

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

Annual Report
2013

平成25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**

平成 26 年 6 月 21 日版

Copyright ©ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 2014

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

皆様には日頃より、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。2013 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、理学系研究科の附属施設として 1999 年度に設置されました。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。それに加え、東半球における宇宙研究のハブ機能を担うことも、大切な目的と考えており、その一環として横山教授は 2014 年 1 月より、APCosPA (Asia Pacific Organization for Cosmology and Particle Astrophysics) の会長の任に就いています。

センター固有のメンバーとしては、7 月 16 日づけで吉田研助教の細川隆史さんが、物理学専攻から本センターへ、また山本研助教の坂井南美さんが本センターから物理学専攻へと、異動になりました。特任研究員として筒井亮さんが昨年に続き在籍し、また新たに顧力意 (Gu Liyi) さんが着任しました。外国からは多くの来訪者があり、その中でセンターの外国人客員教授としては、サクレー原子力庁センター物理理論研究所・主任研究員の Francis Bernardeau 教授を 10 月に、またロシア・ランダウ理論物理学研究所・首席研究員の Alexei Starobinsky 教授を 10 月から 11 月にかけて招聘しています。5 月～7 月にはハーバード大学の学部女子学生 Ms. Jodi Balfé が、Harvard Japan-Undergraduate Research Exchange Program に基づいて本センターに滞在し、研究を行ないました。

本センターは固有のメンバーに加え、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から、約 10 名の「研究協力者」を招くという先進的な構造により、宇宙に関する理論、観測、実験を広くカバーし、合計 8 つのプロジェクトを推進しています。本年度より新たに、プロジェクト 8「太陽系外惑星」が加わりました。それらを通じて本センターは、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」および ASTRO-H 衛星 (プロジェクト 7)、大型低温重力波望遠鏡「かぐら」(プロジェクト 5 と 1) など、最先端の大型宇宙観測装置/施設の装置開発、運用、データ解析などにも大きく貢献しています。研究協力者としては新たに、天文学専攻の戸谷友則教授がプロジェクト 2 に、同じく田村元秀教授がプロジェクト 8 に、物理学専攻の安東正樹准教授がプロジェクト 5 に、同じく中澤知洋講師がプロジェクト 7 に、それぞれ加わりました。他方、坪野公夫教授 (プロジェクト 5) と KEK 山本明教授 (プロジェクト 7) が、定年ご退職に伴い研究協力者の任を終えられました。

本センターは 2013 度もさまざまな研究・広報活動を行いました。研究協力者が一同に会して研究成果や未来へのサイエンスを語りあう「研究者交流会」は、6 月 26 日と年明けの 1 月 8 日に行われました。7 月 24 日～7 月 27 日には山形蔵王にて恒例のサマースクール実施しました。続く全学オープンキャンパスでは、初日の 8 月 7 日 (午後) に田村教授が天文学専攻と本センターの合同で、また同 8 日には横山教授と安東准教授が 2 回づつ講演を行い、今年も超満員の盛況ぶりでした。昨年度に好評を博した「KAGRA データ解析スクール」は、プロジェクト 1 と 5 が中心となり、今年度は第 3 回を本郷キャンパスにて 9 月 27 日と 28 日に開催し、73 名の参加者を記録しています。これは、重力波データ解析および関連する理論研究の強化を目的とした「重力波物理学研究コンソーシアム」の活動の一環であり、本センターは京都大学基礎物理学研究所

とともに、このコンソーシアムの拠点機関となっています。12月13日にはプロジェクト2と7が理研と共同して「マグネター研究交流会」を理研にて行い、1月27日にはプロジェクト7を中心に、本郷キャンパスで、JAXA と共催で「イプシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム」を開催しました。物理学教室などとの共催で、いくつかの談話会も行っています。

今年度は横山教授が、最も一般的な単一場インフレーションモデルを構築した論文“Generalized G-Inflation—Inflation with the Most General Second-Order Field Equations—”により、元当センター研究員の小林努氏、山口昌英氏と共に、日本物理学会第19回論文賞を受賞しました。7月には Starobinsky 客員教授が、Gruber Cosmology Prize を受賞されています。また研究協力者の山本智教授（物理学専攻）が「星間分子雲の化学進化概念の確立と星形成過程の解明への貢献」で第18回日本天文学会 林忠四郎賞を、同じく研究協力者の田村元秀教授（天文学専攻）が「太陽系外惑星とその形成現場のすばる望遠鏡による研究」で第54回東レ科学技術賞を受賞しています。横山研の枝 和成さんは、理学系研究科研究奨励賞（修士の部）の受賞の栄に輝きました。また、研究成果の詳細は本文に譲りますが、本年度も数多くのプレスリリースを行いました。

今後とも、本センターにご声援を賜りたく、お願い申し上げます。

2014年6月

センター長 牧島一夫

目次

I	2013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	7
1	受賞	9
2	教員, 職員, および研究員	11
3	シンポジウム・研究会	12
3.1	2013年度ビッグバン宇宙国際研究センター研究者交流会	12
3.2	第13回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	12
3.3	「高校生のためのオープンキャンパス2013」	14
3.4	KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2013	14
3.5	談話会・コロキウム	15
3.6	2013年度ビッグバン宇宙国際研究センター新春交流会	15
3.7	マグネター研究交流会	16
3.8	イプシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム	17
4	プレプリント・リスト	18
II	2013年度 プロジェクト別 研究活動報告	27
1	初期宇宙進化論	29
1.1	初期宇宙・相対論	29
1.2	観測的宇宙論	35
1.2.1	星形成	39
2	銀河と星の共進化論	48
2.1	宇宙及び系外銀河	48
2.2	銀河系及び近傍矮小銀河	48
2.3	新星	49
2.4	超新星	49
2.4.1	ガンマ線バースト	49
3	光赤外線による観測的宇宙論	52
3.1	宇宙及び系外銀河	52
4	地上サブミリ波観測	57
4.1	星形成から惑星系形成に至る物質進化の探究	57
4.1.1	はじめに	57
4.1.2	星形成の観測研究	57
4.1.3	系外銀河の化学組成	60
4.1.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	61
4.2	大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の探求	63
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	63
4.2.2	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	64
4.2.3	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	66

5	重力波探査	70
5.1	大型低温重力波望遠鏡 KAGRA	70
5.1.1	KAGRA 主干涉計の全体設計	70
5.1.2	光学系のアライメント制御	70
5.1.3	光学系のパラメータ設計	71
5.1.4	非平衡系熱雑音の研究	71
5.2	宇宙空間レーザー干渉計	71
5.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	71
5.3.1	Phase-II TOBA の開発	71
5.3.2	光ファイバーセンサの開発	72
5.3.3	電磁誘導型アクチュエーターの開発	72
5.3.4	直交位相法 TOBA の開発	72
5.4	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	72
5.4.1	低温光共振器の評価実験	72
5.4.2	光共振器の防振	73
5.5	相対論・量子光学精密実験	73
5.5.1	三角光共振器を用いた異方性検出実験	73
5.5.2	量子論的輻射圧の測定	73
5.5.3	光学浮上鏡を用いた巨視的量子実験	73
6	宇宙素粒子物理学	77
6.1	原子炉ニュートリノモニター	77
6.1.1	想定外の現象	78
6.2	Hidden photon ダークマター探索	78
6.2.1	概要	78
6.2.2	光学領域	79
6.2.3	電波領域	79
7	飛翔体によるX線観測	81
7.1	科学衛星の運用と稼働状況	81
7.1.1	宇宙X線衛星「すざく」	81
7.1.2	国際宇宙ステーション搭載 MAXI	81
7.1.3	後継機 <i>ASTRO-H</i>	81
7.2	強磁場中性子星と超新星残骸	81
7.2.1	中性子星と超新星残骸	81
7.2.2	超新星残骸 CTB109 とマグネター 1E 2259+586	81
7.2.3	マグネターの自由歳差運動の発見	82
7.2.4	電子サイクロトロン共鳴	82
7.2.5	長周期パルサーの研究	82
7.3	降着する弱磁場中性子星	83
7.3.1	光度変化に伴う降着流幾何の変化	83
7.3.2	Dipping 天体の研究	83
7.3.3	熱的コンプトン散乱の統一的解釈	83
7.4	質量降着するブラックホール	83
7.4.1	ULX 天体	84
7.4.2	巨大ブラックホールと活動銀河核	84
7.4.3	活動銀河核のX線-可視光同時観測	85
7.5	銀河団の研究	85
7.5.1	銀河団の宇宙論的進化の新しい描像	85
7.5.2	銀河ガスの動圧剥ぎ取り	85
7.5.3	衝突銀河団 CIZA J1358.9 – 4750	86
7.6	雷雲ガンマ線の研究	86
7.6.1	GROWTH 実験	86
7.6.2	雷放電に伴うガンマ線の途絶	86
7.6.3	511 keV ラインの検出	86
7.7	<i>ASTRO-H</i> 衛星計画	87
7.7.1	<i>ASTRO-H</i> 衛星とその搭載装置	87
7.7.2	SXI の開発実験	87
7.7.3	HXI の開発実験	87
7.7.4	SGD の開発実験	88

7.7.5	衛星全体の環境試験と組み上げ	88
7.8	将来計画	89
7.8.1	CMOS 素子を用いた X 線撮像	89
7.8.2	sub-MeV ガンマ線全天探査衛星 <i>CAST</i> の検討	89
7.8.3	その他の実験開発	89
7.8.4	次期 X 線観測衛星の計画検討	89
8	太陽系外惑星	96
8.1	系外惑星の直接撮像による探査	96
8.2	系外惑星の直接観測による特徴付け	96
8.3	原始惑星系円盤の高コントラスト高解像度直接観測	96
8.4	トランジット観測による系外惑星大気の研究	96
8.5	褐色矮星の観測的研究	96
8.6	銀河中心の観測的研究	96
8.7	系外惑星研究のための観測装置の開発	96
8.8	トランジット時刻変動を用いた複数トランジット惑星系の探求	97
8.9	系外惑星系におけるスピン軌道傾斜角の潮汐進化	97

I

2013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

山本 智 教授：第 18 回 日本天文学会 林忠四郎賞

山本教授は、星間分子雲で見られる天体ごとの化学組成の違いの原因を観測的に探求し、それが星間分子雲の進化に伴う化学組成の系統的な変化にあることを見出した。さらに、それを支配する要因が炭素原子が一酸化炭素に変換される化学過程にあることを、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた炭素原子の広域観測によって確かめた。炭素の主要な形態変化による化学進化の法則性は、その後、星間塵への吸着課程と併せて、星間分子雲の化学進化の概念を確立する基礎となった。この新しい方法論により、原始星が形成される以前の星間分子雲コアの年齢が推定できるようになり、恒星の形成過程の理解に大きく貢献した。これらの業績により、第 18 回日本天文学会林忠四郎賞が授与された。

田村 元秀 教授：第 54 回東レ科学技術賞

田村氏は、「太陽系外惑星とその形成現場のすばる望遠鏡による研究」に関する業績で標記の賞を受賞した。以下に公益財団法人東レ科学振興会ホームページによる業績紹介を掲載する。「氏は、観測装置 HiCIAO を開発し、すばる望遠鏡の補償光学装置と組み合わせることにより、太陽型の恒星を周回する系外惑星の直接撮像に初めて成功した。また、惑星の形成現場である星周円盤を多数観測して、それらが多様な構造をもつことを明らかにし、惑星形成の謎を解き明かす重要な観測情報をもたらした。」(http://www.toray.co.jp/tsf/info/inf_001.html)

Alexei A. Starobinsky 客員教授 (Landau Institute for Theoretical Physics) : 2013 Gruber Cosmology Prize

Starobinsky 氏は、宇宙論における氏の顕著な業績を評価され、Viatcheslav Mukhanov 氏とともに標記の賞を受賞した。以下に Gruber Foundation による氏の業績についての記事を掲載する。“During a heady period in the development of the Standard Cosmological Model, Viatcheslav Mukhanov and Alexei Starobinsky provided theories necessary to answer two of the fundamental questions of cosmology: Why is the structure of the universe so uniform on the largest scales? Where did the departures from that uniformity—such as galaxies, planets, and people—come from?” (<http://gruber.yale.edu/prize/2013-gruber-cosmology-prize>)

田村 元秀 教授：日本天文学会 欧文研究報告論文賞

田村氏は、“First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b” (Publ. Astron. Soc. Japan Vol. 61 (2009, pp. L35L40)) によって国立天文台の成田憲保氏らとともに、2014 年度の日本天文学会欧文研究報告論文賞を受賞した。

横山 順一 教授：日本物理学会論文賞

横山氏は“Generalized G-Inflation —Inflation with the Most General Second-Order Field Equations—”
Prog. Theor. Phys. (2011) 126 (3): 511-529 によって立教大学の小林努氏、東京工業大学の山口昌英氏と
2013年の日本物理学会論文賞を共同受賞した。

枝 和成 氏（横山研、平成 25 年度東京大学大学院理学系研究科修士課程終了）：理学研究科研究奨励賞（修士課程）

平成 26 年 3 月に東京大学大学院理学系研究科修士課程を修了した枝氏は、修士論文「重力波を用いたダークマター探査」(2014 年 3 月) によって、東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) 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)
坂井 南美	(助教、2013年7月16日付で物理学専攻へ異動)
須山 輝明	(助教)
樽家 篤史	(助教、2013年8月16日付で京都大学基礎物理学研究所に准教授として異動)
平賀 純子	(助教)
細川 隆史	(助教、2013年7月16日付で物理学専攻から異動)
Bernardeau, Francis	(外国人客員教授; 2013/10/1 - 10/31)
Starobinsky, Alexei A.	(外国人客員教授; 2013/10/10 - 11/29)
伊藤 洋介	(特任助教)
顧 力意	(特任研究員)
筒井 亮	(特任研究員)
渡辺 悠貴	(特任研究員)
山内 大介	(学振研究員)
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 、細川 隆史、須山 輝明、伊藤 洋介
銀河進化理論	茂山 俊和、戸谷 友則 ³
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	山本 智 ¹ 、河野 孝太郎 ² 、坂井 南美
重力波探査	安東 正樹 ¹ 、麻生 洋一 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 、中澤 知洋 ¹ 、平賀 純子、顧 力意
太陽系外惑星	田村 元秀 ³ 、須藤 靖 ^{1,†}

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

† 初期宇宙進化論・太陽系外惑星を兼任

3 シンポジウム・研究会

3.1 2013 年度ビッグバン宇宙国際研究センター研究者交流会

日時：2013 年 6 月 26 日 (木) 15:00 - 18:50

場所：東京大学理学部 4 号館 1320 号室

プログラム

15:00 - 15:10	牧島 一夫 (センター長)	はじめに
15:10 - 15:35	坂井 南美 (プロジェクト 4)	原始星ディスク形成に伴う化学進化
15:35 - 16:00	細川 隆史 (プロジェクト 1)	Star formation across the universe
16:00 - 16:25	安東 正樹 (プロジェクト 5)	重力と重力波で探る宇宙
16:25 - 16:50	鈴木 惇也 (プロジェクト 6)	Hidden photon とダークマター
16:50 - 17:10	休憩	
17:10 - 17:35	須藤 靖 (プロジェクト 8)	四重トランジット惑星系 KOI-94 の TTV 解析
17:35 - 18:00	Liyi Gu (プロジェクト 7)	Galaxy vs. plasma interactions in clusters of galaxies; results, implications, and prospects
18:00 - 18:25	酒向 重行 (プロジェクト 3)	CMOS センサによる超広視野天文学
18:25 - 18:50	戸谷 友則 (プロジェクト 2)	すばる FastSound サーベイで探るダークエネルギーと銀河の進化

3.2 第13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：山形県山形市蔵王温泉

日時：2013 年 7 月 24 日 (水) - 27 日 (土)

プログラム

7月24日(水) afternoon (Chair :Y. Itoh) Lectures and a contributed talk in English

14:00 - 14:10	Jun'ichi Yokoyama	Opening Adress (10)
14:10 - 15:00	Tomonori Totani	Probing the Cosmic Acceleration by the FastSound Galaxy Redshift Survey(50)
15:00 - 15:10		Break
15:10 - 16:00	Tomonori Totani	Probing the Cosmic Reionization by Gamma-Ray Bursts(50)
16:00 - 16:10		break
16:10 - 17:00	Tomonori Totani	Cosmic Background Radiation in Various Wavelengths and Their Origins(50)
17:00 - 17:20	Yousuke Itoh	KAGRA search for continuous gravitational Waves(20)

7月25日(木) 午前 (Chair :R. Kimura) Lectures in English

9:30 - 10:20	Liyi Gu	The Hot Universe: Intracluster Medium and the Related Plasma Physics(50)
10:20 - 10:30		break
10:30 - 11:20	Liyi Gu	The Hot Universe: Intracluster Medium and the Related Plasma Physics(50)
11:20 - 11:30		break
11:30 - 12:20	Liyi Gu	The Hot Universe: Intracluster Medium and the Related Plasma Physics(50)
afternoon		Free Discussion

7月26日(金) 午前 (Chair: D. Yamauchi) Contributed talks in English

9:30 - 9:50	Teruaki Suyama	Detecting cosmic string passage through the Earth by consequent global earthquake(20)
9:50 - 10:10	Daisuke Yamauchi	type-I cosmic string network(20)
10:10 - 10:30	Rampey Kimura	Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity(20)
10:30 - 10:45		break
10:45 - 11:05	Yuki Watanabe	Constraining Generalized G-Inflation from the Cosmic Microwave Background(20)
11:05 - 11:25	Takashi Hosokawa	Diversity of the First Stars(20)
11:25 - 11:45	Kento Masuda	Characterization of KOI-94 system with photometric light curves and transit timing variation analysis(20)

7月26日(金) 午後1 (座長 : 須山) 一般講演

13:30 - 13:50	千秋 元	Growth of dust grains in low-metallicity collapsing clouds(20)
13:50 - 14:10	白崎 正人	Weak Lensing Minkowski Functionals in the CFHTLS field(20)

7月26日(金) 午後2 (座長 : 須山) プロジェクト報告 I

14:30 - 14:40	牧島 一夫	Opening Adress (10)
14:40 - 14:55	吉田 直紀	LMC and the Galactic Warps(15)
14:55 - 15:35	嶋作 一大	光赤外線による観測的宇宙論：プロジェクト報告 (30)
15:35 - 16:05	牧島 一夫	中性子星に関するトピックス (30)
16:05 - 16:20		break
16:20 - 16:35	筒井 亮	ガンマ線バーストの中心エンジン (15)
16:35 - 16:50	茂山 俊和	相対論的火の玉モデルの光度曲線とガンマ線バースト (15)
16:50 - 17:20	安東 正樹	重力波の探査 (30)
17:20 - 17:35	樽家 篤史	Testing gravity with redshift-space distortions: beyond consistency test(15)

7月27日(土) (座長 : 筒井) プロジェクト報告 II

9:30 - 10:00	河野 孝太郎	Early science results from ALMA(30)
10:00 - 10:30	横山 順一	初期宇宙進化論報告 (30)
10:30 - 10:45		break
10:45 - 11:15	田村 元秀	すばる戦略枠 SEEDS による系外惑星研究の成果について (30)
11:15 - 11:45	井上 慶純	Hidden photon search experiment(30)

3.3 「高校生のためのオープンキャンパス 2013」

場所：東京大学

ビッグバンセンター講演開催場所：小柴ホール、東京大学理学部1号館2階207号室

日時：2013年8月7日(水)、8月8日(木)

主催：東京大学

プログラム

8月7日(水)：小柴ホール

14:30 - 15:30 田村 元秀 系外惑星天文学 ～第2の地球をとらえよ～

8月8日(木)：理学部1号館207号室

10:00 - 10:40, 13:50 - 14:30 横山 順一 輪廻転生する宇宙

11:00 - 11:40, 14:50 - 15:30 安東 正樹 重力波望遠鏡「かぐら」で探る宇宙

3.4 KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2013

場所：東京大学理学部4号館1220号室

日時：2013年9月27日(金) - 28日(土)

主催：ビッグバン宇宙国際研究センター, The KAGRA Collaboration, 文部科学省科学研究費補助金(新学術領域研究)「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」, 重力波物理学研究コンソーシアム

世話人：KAGRA データ解析サブシステム

プログラム

9月27日(金)

10:00 - 10:10	神田 展行	挨拶
10:10 - 10:20	伊藤 洋介	事務連絡
10:20 - 12:20	小嶋 康史	中性子星からの重力波
12:20 - 13:30	大原 謙一	昼食・演習環境の確認
13:30 - 15:30	Rutger van Haarsteren	Gravitational-wave detection with Pulsar Timing Arrays
15:30 - 15:50		休憩
15:50 - 17:50	伊藤 洋介	連続重力波データ解析 1
17:50 - 18:10		休憩
18:10 - 18:40	伊藤 洋介	演習コードの説明

9月28日(土)

9:00 - 10:00	伊藤 洋介	連続重力波データ解析の基礎 2
10:00 - 12:00	KAGRA データ解析チーム	演習 1
12:00 - 13:30		昼食
13:30 - 16:00	KAGRA データ解析チーム	演習 2 (適宜休憩)
16:00 - 17:00	伊藤洋介	まとめと解説

3.5 東京大学理学部物理学科・大学院理学系研究科物理学専攻コロキウム、物理学教室談話会

物理学教室談話会

日時：2013年5月31日(金)16:30 - 18:00

場所：小柴ホール

講演者：安東 正樹

講演題目：重力波望遠鏡 KAGRA でみる宇宙の姿

第54回コロキウム

日時：2013年6月14日(金)16:30 - 18:00

場所：理学部4号館1220号室

講演者：田村 元秀

講演題目：系外惑星観測の現状と展開：直接観測と地球型惑星

物理学教室談話会

日時：2013年10月28日(月)16:30 - 18:00

場所：理学部4号館1220号室

講演者：Professor Dr. Karsten Danzmann (Max Planck Institute for Gravitational Physics, (Albert-Einstein-Institut) and Institute for Gravitational Physics, Leibniz Universität Hannover)

講演題目：Listening to the Universe: Gravitational Wave Detection on the Ground and in Space

主催：物理学教室、ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU)

3.6 2013年度ビッグバン宇宙国際研究センター新春交流会

日時：2014年1月8日(水) 15:00 - 18:50

場所：東京大学理学部4号館1624号室

プログラム

13:30 - 13:35	Kazuo Makishima	Opening remarks
13:35 - 14:05	Teruaki Suyama	High frequency gravitational waves
14:05 - 14:30	Masaki Ando	Current status of KAGRA
14:35 - 15:05	Yousuke Itoh	Gravitational wave data analysis
15:05 - 15:35	Jun'ichi Yokoyama	Non-Gaussian noise in gravitational wave data analysis
15:35 - 15:50	Coffee Break	
15:50 - 16:20	Kazuhiro Nakazawa	Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope and beyond ...
16:20 - 16:50	Liyi Gu	Cosmological Co-Evolution of Member Galaxies and Hot Plasmas in Galaxy Clusters
16:50 - 17:20	Kazuo Makishima	Measuring aspherical deformation of neutron stars
17:20 - 17:50	Toshikazu Shigeyama	Neutron star merger as the origin of r-process elements
17:50 - 18:20	Kotaro Kohno	Can a nightmare turn to a dream? A deep survey using ALMA
18:20 - 18:50	Mamoru Doi	Optical-Infrared Observation of Transient Objects

3.7 マグネター研究交流会

日時：2013年12月13日(金) 10:00 - 17:20

場所：理化学研究所仁科ホール

主催：ビッグバン宇宙国際研究センター、理化学研究所(長瀧天体ビッグバン研究室、玉川高エネルギー宇宙物理研究室、MAXI チーム)

プログラム

Radiation from Magnetar (10:00 - 11:15)

- | | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|
| 10:00 - 10:25 | Y. E. Nakagawa (JAXA) | X-ray Emission in Magnetar Short Bursts |
| 10:25 - 10:50 | M. Morii (RIKEN) | Multi-wavelength obs. of Magnetars (tentative) |
| 10:50 - 11:15 | T. Enoto (RIKEN) | Persistent X-ray emission from the expanding magnetar class |

Formation of Magnetar and its relation to GRB and supernova (11:15 - 14:45)

- | | | |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11:15 - 11:40 | R. Tsutsui (U. Tokyo) | How to divide long gamma-ray bursts into subclasses according to their central engines |
| 11:40 - 12:05 | T. Shigeyama (U. Tokyo) | Magnetar driven supernova? |
| 12:05 - 12:30 | N. Kawanaka (U. Tokyo) | Neutrino-Dominated Accretion Flows in Gamma - Ray Bursts |
| 12:30 - 13:30 | | Lunch |
| 13:30 - 13:55 | A. Suzuki (NAOJ) | Hydrodynamical models for low luminosity GRBs and their connection to jet-driven SNe |
| 13:55 - 14:20 | H. Matsumoto (RIKEN) | Special Relativistic Magnetohydrodynamic Simulation of Two-Component Outflow Powered by Magnetic Explosion on Compact Stars |
| 14:20 - 14:45 | Y. Serino (RIKEN) | MAXI Observations of GRBs |

Relation to SNR and other neutron stars (14:45 - 15:35)

- | | | |
|---------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| 14:45 - 15:10 | T. Nakano (U. Tokyo) | Magnetar-SNR association |
| 15:10 - 15:35 | O. Sasano (RIKEN) | Search for neutron stars with $B \sim 10^{13}$ G |

Coffee Break (15:35 - 16:05)

Relation to nuclear physics (16:05 - 17:20)

- | | | |
|---------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| 16:05 - 16:30 | N. Yasutake (Chiba IT) | “Thermal Evolution of NSs” —How to know the inside?— |
| 16:30 - 16:55 | T. Wada (NAOJ) | Structure of magnetosphere of pulsar |
| 16:55 - 17:20 | K. Makishima (U. Tokyo) | Possible Magnetic Deformation of Magnetars |

3.8 イプシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム

日時：2014年1月27日(月)13:00 - 17:30

場所：東京大学・本郷キャンパス(理学部・物理233講義室：主会場)、宇宙科学研究所・本館2F大会議場(テレビ会議接続)

主催：宇宙理学委員会、宇宙工学委員会、宇宙科学プログラムオフィス、宇宙科学SE推進室

共催(シンポジウム開催協力)：東京大学理学系研究科・物理学教室、東京大学理学系研究科・ビッグバン宇宙国際研究センター、神戸大学・惑星科学研究センター(CPS)

世話人：宇宙工学委員会・幹事・久保田孝、宇宙理学委員会・幹事・上野宗孝

プログラム

1. 「本シンポジウムの開催について」 世話人 (13:00 - 13:05)
2. イプシロンロケットと運用・開発中のミッション (13:05 - 13:55)
 - 「イプシロンロケットの現状と今後」 徳留 真一郎 (JAXA)
 - 「ひさき (SPRINT-A)」 澤井 秀次郎 (JAXA)
 - 「ジオスペース探査衛星 (ERG) の開発状況」 高島 健 (JAXA)
3. 検討中のミッション (14:00 - 15:45)
 - 「小型月実験機 (SLIM)」 SLIM-WG
 - 「深宇宙探査技術実験機 DESTINY」 川勝 康弘 (JAXA)
 - 「太陽発電衛星のための小型衛星を用いた無線送電技術実証」 田中 孝治 (JAXA)
 - 「イプシロンロケットを用いた火星探査技術実証の検討」 藤田 和央 (JAXA)
 - 「ペネトレータによる惑星内部構造観測システムの実証ミッション」 後藤 健 (JAXA)
 - 「小型 JASMINE 計画」 郷田 直輝 (国立天文台)
 - 「小型重力波観測衛星 DPF」 安東 正樹 (東京大学)
4. イプシロン搭載宇宙科学ミッション及び小規模プロジェクトの公募について (16:00 - 17:30)
 - 公募に関わる説明及び質疑応答

4 プレプリント・リスト

RESCEU-102/13

Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, J. Harms, B.J.J. Slagmolen, R.X. Adhikari, M.C. Miller, M. Evans, Y.B. Chen, H. Muller, M. Ando, Phys. Rev. D 88, 122003 (2013).

RESCEU-101/13

Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando, Phys. Rev. D 88, 111101(R) (2013).

RESCEU-100/13

New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono, Phys. Rev. Lett. 110, 200401 (2013).

RESCEU-99/13

Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, Y. Aso, Y. Michimura, et al., Phys. Rev. D 88, 043007 (2013).

RESCEU-98/13

Reappearance of McNeil's Nebula (V1647 Orionis) and its Outburst Environment, Ninan, J. P., Ojha, D. K., Bhatt, B. C., Ghosh, S. K., Mohan, V., Mallick, K. K., Tamura, M., Henning, Th., Astrophys. J. , 778, 116 (14pp) (2013).

RESCEU-97/13

Intrinsically Polarized Stars and Implication for Star Formation in the Central Parsec of Our Galaxy, Yoshikawa, T., Nishiyama, S., Tamura, M., Ishii, M., Nagata, T., Astrophys. J. , 778, 92 (10pp) (2013).

RESCEU-96/13

Observability of YSOs with the WISE and AKARI infrared space observatories, Zahorecz , S., Toth, L. V., Marton, G., Ueno, M., Tamura, M., Kawamura, A., Kitamura, Y., Astronomical Notes, 334, 928 - 931 (2013).

RESCEU-95/13

Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504, Kuzuhara, M., Tamura, M., Kudo, T., Janson, M., Kandori, R., Brandt, T. D., Thalmann, C., Spiegel, D., Biller, B., Carson, J., and 47 coauthors, Astrophys. J. , 774, 11 (18pp) (2013).

RESCEU-94/13

Direct Imaging Search for Extrasolar Planets in the Pleiades, Yamamoto, K., Matsuo, T., Shibai, H., Itoh, Y., Konishi, M., Sudo, J., Tanii, R., Fukagawa, M., Sumi, T., Kudo, T., and 45 coauthors including Tamura, M., Publ. Astron. Soc. Japan, 65, 90 (19pp) (2013).

RESCEU-93/13

Multi-color Transit Photometry of GJ 1214b through BJHK s Bands and a Long-term Monitoring of the Stellar Variability of GJ 1214, Narita, N., Fukui, A., Ikoma, M., Hori, Y., Kurosaki, K., Kawashima, Y., Nagayama, T., Onitsuka, M., Sukom, A., Nakajima, Y., and 12 coauthors including Tamura, M., Astrophys. J. , 773, 144 (10pp) (2013).

RESCEU-92/13

The SEEDS Direct Imaging Survey for Planets and Scattered Dust Emission in Debris Disk Systems, Janson, M., Brandt, T. D., Moro-Martin, A., Usuda, T., Thalmann, C., Carson, J. C., Goto, M., Currie, T., McElwain, M. W., Itoh, Y., and 42 coauthors including Tamura, M., Astrophys. J. , 773, 73 (11pp) (2013)

RESCEU-91/13

High-contrast Near-infrared Imaging Polarimetry of the Protoplanetary Disk around RY Tau, Takami, M., Karr, J. L., Hashimoto, J., Kim, H., Wisniewski, J., Henning, T., Grady, C. A., Kandori, R., Hodapp, K. W., Kudo, T., and 43 coauthors including Tamura, M., *Astrophys. J.*, 772, 145 (17pp) (2013).

RESCEU-90/13

Characterization of the KOI-94 system with transit timing variation analysis: implication for the planet-planet eclipse, Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, & Yasushi Suto, *The Astrophysical Journal* 778 (2013) 185.

RESCEU-89/13

76 T dwarfs from the UKIDSS LAS: benchmarks, kinematics and an updated space density, Burningham, B., Cardoso, C. V., Smith, L., Leggett, S. K., Smart, R. L., Mann, A. W., Dhital, S., Lucas, P. W., Tinney, C. G., Pinfield, D. J., and 27 coauthors including Tamura, M., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 433, 457 - 497 (2013).

RESCEU-88/13

Magnetically Confined Interstellar Hot Plasma in the Nuclear Bulge of Our Galaxy, Nishiyama, S., Yasui, K., Nagata, T., Yoshikawa, T., Uchiyama, H., Schodel, R., Hatano, H., Sato, S., Sugitani, K., Suenaga, T., Kwon, J., Tamura, M., *Astrophys. J.*, 769, L28 (5pp) (2013).

RESCEU-87/13

IRSF SIRIUS JHKs Simultaneous Transit Photometry of GJ 1214b, Narita, N., Nagayama, T., Suenaga, T., Fukui, A., Ikoma, M., Nakajima, Y., Nishiyama, S., Tamura, M., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, 27 (8pp) (2013).

RESCEU-86/13

Cluster membership probability: polarimetric approach, Medhi, B. J., Tamura, M., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 430, 1334 - 1343 (2013).

RESCEU-85/13

Mapping H-band Scattered Light Emission in the Mysterious SR21 Transitional Disk, Follette, K. B., Tamura, M., Hashimoto, J., Whitney, B., Grady, C., Close, L., Andrews, S. M., Kwon, J., Wisniewski, J., Brandt, T. D., and 43 coauthors, *Astrophys. J.*, 767, 10 (26pp) (2013).

RESCEU-84/13

The Efficiency and Wavelength Dependence of Near-infrared Interstellar Polarization toward the Galactic Center, Hatano, H., Nishiyama, S., Kurita, M., Kanai, S., Nakajima, Y., Nagata, T., Tamura, M., Kandori, R., Kato, D., Sato, Y., Yoshikawa, T., Suenaga, T., Sato, S., *Astron. J.*, 145, 105 (13pp) (2013).

RESCEU-83/13

A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry, Jorgensen, J. K., Visser, R., Sakai, N., Bergin, E., Brinch, C., Harsono, D., Lindberg, J. E., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., Bisschop, S., & Persson, M. V., *Astrophys. J.*, 779, L22 (2013).

RESCEU-82/13

ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows, Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., & Yamamoto, S., *Astrophys. J.*, 775, L31 (2013).

RESCEU-81/13

Warm Carbon-Chain Chemistry, Sakai, N. & Yamamoto, S., *Chem. Rev.*, 113, 8981 (2013).

RESCEU-80/13

Anomalous ^{13}C Isotope Abundances in C₃S and C₄H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1, Sakai, N., Takano, S., Sakai, T., Shiba, S., Sumiyoshi, Y., Endo, Y. & Yamamoto, S., *J. Phys. Chem. A*, 117, 9831 (2013).

RESCEU-79/13

First Systematic Search for Oxygen-line Blobs at High Redshift: Uncovering AGN Feedback and Star Formation Quenching, Yuma, S., Ouchi, M., Drake, A. B., Simpson, C., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., Momose, R., Akiyama, M., Mori, M., Umemura, M., *Astrophys. J.*, 779, 53 (12pp). (2013)

RESCEU-78/13

Physical Properties of Spectroscopically Confirmed Galaxies at $z \geq 6$. II. Morphology of the Rest-frame UV Continuum and Ly α Emission, Jiang, L., Egami, E., Fan, X., Windhorst, R. A., Cohen, S. H., Dave, R., Finlator, K., Kashikawa, N., Mechtley, M., Ouchi, M., Shimasaku, K., *Astrophys. J.*, 773, 153 (14pp). (2013)

RESCEU-77/13

Physical Properties of Spectroscopically Confirmed Galaxies at $z \geq 6$. I. Basic Characteristics of the Rest-frame UV Continuum and Ly α Emission, Jiang, L., Egami, E., Fan, X., Windhorst, R. A., Cohen, S. H., Dave, R., Finlator, K., Kashikawa, N., Mechtley, M., Ouchi, M., Shimasaku, K., *Astrophys. J.*, 772, 99 (20pp) (2013).

RESCEU-76/13

Constraints on $f(R)$ theory and Galileons from the latest data of galaxy redshift surveys, Okada, Hiroyuki; Totani, Tomonori; Tsujikawa, Shinji, *Phys. Rev. D*, 87, 103002 (2013).

RESCEU-75/13

X-Ray and Radio Follow-up Observations of High-redshift Blazar Candidates in the Fermi-LAT Unassociated Source Population, Takahashi, Y.; Kataoka, J.; Niinuma, K.; Honma, M.; Inoue, Y.; Totani, T.; Inoue, S.; Nakamori, T.; Maeda, K., *Astrophys. J.*, 773, 36 (2013).

RESCEU-74/13

Cosmological Fast Radio Bursts from Binary Neutron Star Mergers, Totani, T., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, L12 (2013).

RESCEU-73/13

Suzaku Observations of the Diffuse X-Ray Emission across the Fermi Bubbles' Edges, Kataoka, J., Tahara, M., Totani, T., Sofue, Y., Stawarz, L., Takahashi, Y., Takeuchi, Y., Tsunemi, H., Kimura, M., Takei, Y., Cheung, C. C., Inoue, Y., Nakamori, T., *Astrophys. J.*, 779, 57 (2013).

RESCEU-72/13

Extragalactic Background Light from Hierarchical Galaxy Formation: Gamma-Ray Attenuation up to the Epoch of Cosmic Reionization and the First Stars, Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M.A.R., Makiya, R., Niino, Y., & Totani, *Astrophys. J.*, 768, 197 (2013).

RESCEU-71/13

Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources, Kohei Inayoshi, Koichiro Sugiyama, Takashi Hosokawa, Kazuhito Motogi, & Kei Tanaka, *Astrophys. J.*, 769 (2013) 20L.

RESCEU-70/13

Formation of Primordial Supermassive Stars by Rapid Mass Accretion, Takashi Hosokawa, Harold W. Yorke, Kohei Inayoshi, Kazuyuki Omukai, & Naoki Yoshida, *Astrophys. J.*, 778 (2013) 178.

RESCEU-69/13

Direct Imaging Detection of Methane in the Atmosphere of GJ 504 b, Janson, M., Brandt, T. D., Kuzuhara, M., Spiegel, D. S., Thalmann, C., Currie, T., Bonnefoy, M., Zimmerman, N., Sorahana, S., Kotani, T., and 47 coauthors including Tamura, M., *Astrophys. J.*, 778, L4 (6pp) (2013).

RESCEU-68/13

Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications, Takahiro Nishimichi, Akira Oka, [arXiv:1310.2672 (astro-ph)].

RESCEU-67/13

An Intensely Star-Forming Galaxy at $z \sim 7$ with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations, Ouchi, M., Ellis, R., Ono, Y., Nakanishi, K., Kohno, K., Momose,

R., Kurono, Y., Ashby, M. L. N., Shimasaku, K., Willner, S. P., Fazio, G. G., Tamura, Y., Iono, D. *Astrophys. J.* , 778, 102.

RESCEU-66/13

Submillimeter ALMA Observations of the Dense Gas in the Low-Luminosity Type-1 Active Nucleus of NGC 1097, Izumi, T., Kohno, K., Martin, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P.Y., Turner, J. L., 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. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, 100.

RESCEU-65/13

Herschel reveals the obscured star formation in HiZELS H-alpha emitters at $z=1.47$, Ibar, E., Sobral, D., Best, P. N., Ivison, R. J., Smail, I., Arumugam, V., Berta, S., Béthermin, M., Bock, J., Cava, A., Conley, A., Farrah, D., Le Floch, E., Lutz, D., Magdis, G., Magnelli, B., Ikarashi, S., Kohno, K., Marsden, G., Oliver, S. J., Page, M. J., Pozzi, F., Riguccini, L., Schulz, B., Seymour, N., Smith, A. J., Symeonidis, M., Wang, L., Wardlow, J., Zemcov, M. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 434, 3218.

RESCEU-64/13

Detection of an Ultra-bright Submillimeter Galaxy behind the Small Magellanic Cloud, Takekoshi, T., Tamura, Y., Minamidani, T., Kohno, K., Oogi, T., Sorai, K., Habe, A., Ezawa, H., Oshima, T., Scott, K. S., Ausermann, J. E., Komugi, S., Tosaki, T., Mizuno, N., Muller, E., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y., Matsuo, H., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Kawabe, R., Wilson, G. W., Yun, M. *S. Astrophys. J.* , 774, L30.

RESCEU-63/13

Extensive [C I] Mapping toward the Orion-A Giant Molecular Cloud, Shimajiri, Y., Sakai, T., Tsukagoshi, T., Kitamura, Y., Momose, M., Saito, M., Oshima, T., Kohno, K., Kawabe, R. *Astrophys. J.* , 774, L20.

RESCEU-62/13

ALMA follows streaming of dense gas down to 40 pc from the supermassive black hole in NGC1097, 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. *Astrophys. J.* , 770, L27.

RESCEU-61/13

Active Galactic Nucleus and Extended Starbursts in a Midstage Merger VV114, 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. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, L7.

RESCEU-60/13

Generation of High-energy Photons at Ultra-relativistic Shock Breakout in Supernovae, Y. Ohtani, A. Suzuki, and T. Shigeyama, *Astrophys. J.* 777 (2013) 113 [arXiv:1309.1239 (astro-ph)].

RESCEU-59/13

Effect of Masked Region on Weak Lensing Statistics , Masato Shirasaki, Naoki Yoshida, & Takashi Hamana, *The Astrophysical Journal*, 774 (2013) 111.

RESCEU-58/13

Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by Avalanche Photo Diodes, Sasano, M., Nishioka, H., Okuyama S., Nakazawa K., Makishima K., Yamada S., Yuasa T., Kataoka J., Fukazawa Y., Hanabata Y. and Hayashi K. *Nuc. Ins. Meth. A.* 715, 105 (2013).

RESCEU-57/13

Hardening and Termination of Long-Duration γ Rays Detected Prior to Lightning, Tsuchiya, H., Enoto, T., Iwata, K., Yamada, S., Yuasa, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kato, H. [arXiv:1306.2388 (astro-ph)] *Phys. Rev. Lett.* 111, id 015001 (2013).

RESCEU-56/13

Weighing the Light Gravitino Mass with Weak Lensing Surveys , Ayuki Kamada, Masato Shirasaki & Naoki Yoshida, [arXiv:1311.4323 (hep-ph)].

RESCEU-55/13

Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku, Tamura, T., Yamasaki, N. Y., Iizuka, R., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Ueda, S., Matsushita, K., Sato, K., Nakazawa, K., Ota, N. and Takizawa, M. [arXiv:1312.4526 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 782, id 38 (2013).

RESCEU-54/13

Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. II. Monte Carlo Modeling, Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y. T., Watanabe, S., Takahashi, T. and Makishima, K. [arXiv:1311.1293 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 780, id 38 (2013).

RESCEU-53/13

Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram Pressure Stripping of a Galaxy: Discovery of an X-Ray Absorption Feature, Gu, L., Yagi, M., Nakazawa, K., Yoshida, M., Fujita, Y., Hattori, T., Akahori, T. and Makishima, K. [arXiv:1308.5760 (astro-ph)] *Astrophys. J. Lett.* 777, id L36 (2013).

RESCEU-52/13

Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram-pressure Stripping of a Galaxy. II. Star Formation in the Tail, Yagi, M. Gu, L., Fujita, Y., Nakazawa, K., Akahori, T., Hattori, T., Yoshida, M. and Makishima, K. [arXiv:1308.6053 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 778, id 91 (2013).

RESCEU-51/13

A Suzaku Discovery of a Slowly Varying Hard X-ray Continuum from the Type I Seyfert Galaxy NGC 3516, Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. and Yamada, S. *Astrophys. J.* 771, id100(2013).

RESCEU-50/13

Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium, Ichikawa, K., Matsushita, K., Okabe, N., Sato, K., Zhang, Y.-Y., Finoguenov, A., Fujita, Y., Fukazawa, Y., Kawaharada, M., Nakazawa, K. et al. [arXiv:1302.0095 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 766, id 90 (2013).

RESCEU-49/13

Evidence for a Cool Disk and Inhomogeneous Coronae from Wide-band Temporal Spectroscopy of Cyg X-1 with Suzaku, Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Torii, S., Noda, H. and Sakurai, S. [arXiv:1304.1968 (astro-ph)] *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Art. No. 80 (2013).

RESCEU-48/13

Spectral Variation of the Hard X-ray Emission from the Crab Nebula with the Suzaku Hard X-ray Detector, Kouzu, T., Tashiro, M. S., Terada, Y., Yamada, S., Bamba, A., Enoto, T., Mori, K., Fukazawa, Y. and Makishima, K. [arXiv:1303.7109 (astro-ph)] *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Art. No. 74 (2013).

RESCEU-47/13

An X-Ray Counterpart of HESS J1427-608 Discovered with Suzaku, Fujinaga, T., Mori, K., Bamba, A., Kimura, S., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Pulhofer, G., Uchiyama, H., Hiraga, J. S., Matsumoto, H., and Terada, Y. [arXiv:1301.5274 (astro-ph)] *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Art. No. 61 (2013).

RESCEU-46/13

Suzaku Follow-Up Observation of the Activated Magnetar 1E 1547.0-5408, Iwahashi, T., Enoto, T., Yamada, S., Nishioka, H., Nakazawa, K., Tamagawa, T. and Makishima, K. *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Art. No. 52 (2013).

RESCEU-45/13

Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation, T. Nakama, T. Harada, A. G. Polnarev and J. Yokoyama, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Issue 01, article id. 037, pp. (2014).

RESCEU-44/13

CMB ISW-lensing bispectrum from cosmic strings, Daisuke Yamauchi, Yuuiti Sendouda and Keitaro Takahashi [arXiv:1309.5528 (astro-ph)] *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Issue 02, article id. 041, pp. (2014).

RESCEU-43/13

Simultaneous constraints on the growth of structure and cosmic expansion from the multipole power spectra of the SDSS DR7 LRG sample, Akira Oka, Shun Saito, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya and Kazuhiro Yamamoto [arXiv:1310.2820 (astro-ph)] Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 439, Issue 3, p.2515-2530.

RESCEU-42/13

Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasi-linear scales, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Takashi Hiramatsu and Akira Oka [arXiv:1309.6783 (astro-ph)] Physical Review D, Volume 89, Issue 4, id.043509.

RESCEU-41/13

Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath, Yuhei Miyamoto, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1308.4794 (hep-ph)] Physical Review D, Volume 89, Issue 8, id.085037.

RESCEU-40/13

Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity, Rampei Kimura and Daisuke Yamauchi [arXiv:1308.0523 (gr-qc)] Physical Review D 88 (2013) 084025.

RESCEU-39/13

Constraining cosmic string parameters with curl mode of CMB lensing, Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi, and Atsushi Taruya [arXiv:1308.6068 (astro-ph)] Physical Review D 88 (2013) 083525.

RESCEU-38/13

Integral Field Spectroscopy of Supernova Explosion Sites: Constraining Mass and Metallicity of the Progenitors. II. Type II-P and II-L Supernovae, H. Kuncarayakti, M. Doi, G. Aldering, N. Arimoto, K. Maeda, T. Morokuma, R. Pereira, T. Usuda, and Yasuhito Hashiba [arXiv:1306.2106 (astro-ph)] Astron.J. 146 (2013) 31.

RESCEU-37/13

Integral Field Spectroscopy of Supernova Explosion Sites: Constraining Mass and Metallicity of the Progenitors. I. Type Ib and Ic Supernovae, H. Kuncarayakti, M. Doi, G. Aldering, N. Arimoto, K. Maeda, T. Morokuma, R. Pereira, T. Usuda, and Yasuhito Hashiba [arXiv:1305.1105 (astro-ph)] Astron.J. 146 (2013) 30.

RESCEU-36/13

Type-I cosmic string network, Takashi Hiramatsu, Yuuiti Sendouda, Keitaro Takahashi, Daisuke Yamauchi, and Chul-Moon Yoo [arXiv:1307.0308 (astro-ph)] Physical Review D 88 (2013) 085021.

RESCEU-35/13

Chasing unbiased spectra of the Universe, Yong-Seon Song, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya & Issha Kayo, Physical Review D 87 (2013) 123510.

RESCEU-34/13

Matter power spectrum from a Lagrangian-space regularization of perturbation theory, Patrick Valageas, Takahiro Nishimichi & Atsushi Taruya, Physical Review D 87 (2013) 083522.

RESCEU-33/13

Constraining Primordial Magnetic Fields by CMB Photon-Graviton Conversion, P. Chen and T. Suyama, [arXiv:1309.0537 (astro-ph)] Phys. Rev. D 88, 123521 (2013).

RESCEU-32/13

DECIGO Pathfinder, M. Ando and the DECIGO WORKING GROUP, Int. J. Mod. Phys. D 22, 1341002 (2013) [10 pages] DOI: 10.1142/S0218271813410022.

RESCEU-31/13

A Double-peaked Outburst of A 0535+26 Observed with INTEGRAL, RXTE, and Suzaku, Caballero, I.; Pottschmidt, K.; Marcu, D. M.; Barragan, L.; Ferrigno, C.; Klochkov, D.; Zurita Heras, J. A.; Suchy, S.; Wilms, J.; Kretschmar, P.; and 11 coauthors [arXiv:1301.4856 (astro-ph)] Astrophys. J. Lett., vol.764, Issue 2, article id. L23, 5 pp. (2013).

RESCEU-30/13

The Nature of Stable Soft X-Ray Emissions in Several Types of Active Galactic Nuclei Observed by Suzaku, Noda, Hirofumi; Makishima, Kazuo; Nakazawa, Kazuhiro; Uchiyama, Hideki; Yamada, Shin'ya; Sakurai, Soki [arXiv:1208.3536 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.65, No.1, Article No.4, 18 pp.

RESCEU-29/13

Nonthermal emission properties of the northwestern rim of supernova remnant RX J0852.0-4622, Kishishita, T.; Hiraga, J.; Uchiyama, Y. [arXiv:1302.0193 (astro-ph)] Astron. & Astrophys., vol.551, id.A132, 6 pp.

RESCEU-28/13

Search for galaxy-ICM interaction in rich clusters of galaxies, Gu, L.; Gandhi, P.; Inada, N.; Kawaharada, M.; Kodama, T.; Konami, S.; Nakazawa, K.; Shimasaku, K.; Xu, Haiguang; Makishima, K. [astro-ph] Astronomische Nachrichten, Vol.334, Issue 4-5, p.453.

RESCEU-27/13

Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. I. Suzaku Observations, Odaka, Hirokazu; Khangulyan, Dmitry; Tanaka, Yasuyuki T.; Watanabe, Shin; Takahashi, Tadayuki; Makishima, Kazuo [arXiv:1304.5838 (astro-ph)] Astrophys. J. , vol.767, Issue 1, article id. 70, 17 pp. (2013).

RESCEU-26/13

Probing of the Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from $z = 0.1$ to 0.9 , Gu, Liyi; Gandhi, Poshak; Inada, Naohisa; Kawaharada, Madoka; Kodama, Tadayuki; Konami, Saori; Nakazawa, Kazuhiro; Shimasaku, Kazuhiro; Xu, Haiguang; Makishima, Kazuo [arXiv:1303.0118 (astro-ph)] Astrophys. J. , vol.767, Issue 2, article id. 157, 30 pp. (2013).

RESCEU-25/13

Rapid Spectral Changes of Cygnus X-1 in the Low/Hard State with Suzaku, Yamada, S.; Negoro, H.; Torii, S.; Noda, H.; Mineshige, S.; Makishima, K. [arXiv:1304.1977 (astro-ph)] Astrophys. J. Lett., vol.767, Issue 2, article id. L34, 5 pp. (2013).

RESCEU-24/13

Highly Ionized Fe-K Absorption Line from Cygnus X-1 in the High/Soft State Observed with Suzaku, Yamada, S.; Torii, S.; Mineshige, S.; Ueda, Y.; Kubota, A.; Gandhi, P.; Done, C.; Noda, H.; Yoshikawa, A.; Makishima, K. [arXiv:1304.1970 (astro-ph)] Astrophys. J. Lett., vol.767, Issue 2, article id. L35, 6 pp.

RESCEU-23/13

Footprints in the wind of Vela X-1 traced with MAXI, Doroshenko, V.; Santangelo, A.; Nakahira, S.; Mihara, T.; Sugizaki, M.; Matsuoka, M.; Nakajima, M.; Makishima, K. [arXiv:1304.5965 (astro-ph)] Astron. & Astrophys., Volume 554, id.A37, 5 pp.

RESCEU-22/13

Implications of Planck results for models with local type non-Gaussianity, Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi and Shuichiro Yokoyama [arXiv:1303.5374 (astro-ph)] J. Cosmo. & Astroparticle Phys. 06 (2013) 012.

RESCEU-21/13

Statistics of general functions of a Gaussian field -application to non-Gaussianity from preheating-, Teruaki Suyama and Shuichiro Yokoyama [arXiv:1303.1254 (astro-ph)] Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 06, article id. 018, pp. (2013).

RESCEU-20/13

Magneto-reheating constraints from curvature perturbations, Christophe Ringeval, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1302.6013 (astro-ph)] J. Cosmo. & Astroparticle Phys. 1309 (2013) 020.

RESCEU-19/13

Universal scaling law in long gamma-ray bursts, Ryo Tsutsui, Toshikazu Shigeyama, Publ. Astron. Soc. Japan, 65, 3, L3 [arXiv:1304.0587 (astro-ph)].

RESCEU-18/13

Experimental search for solar hidden photons in the eV energy range using kinetic mixing with photons, T. Mizumoto, R. Ohta, T. Horie, J. Suzuki, Y. Inoue, M. Minowa [arXiv:1302.1000 (astro-ph)].

RESCEU-17/13

Development of TES bolometer camera for ASTE telescope: I. bolometer design, Oshima, T., Kawamura, M., Westbrook, B., Sato, T., Suzuki, A., Takekoshi, T., Suzuki, K., Minamidani, T., Hirota, A., Izumi, T., Lee, A. T., Holzappel, W. L., Kohno, K., and Kawabe, R. IEEE Trans. Applied Superconductivity, 23 (2013) 2101004, (4 pp.).

RESCEU-16/13

X-ray detections of submillimetre galaxies: active galactic nuclei versus starburst contribution, 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. Mon. Not. R. Astron. Soc.431 (2013) 662-682.

RESCEU-15/13

Submm/mm Galaxy Counterpart Identification Using a Characteristic Density Distribution, 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. Mon. Not. R. Astron. Soc.431 (2013) 194-209.

RESCEU-14/13

A Millimeter-wave Interferometric Search for a Molecular Torus in the Radio Galaxy NGC 4261, Okuda, T., Iguchi, S., Kohno, K. Astrophys. J. 768 (2013) article id.19 (4 pp.).

RESCEU-13/13

Obscured star formation in Ly-alpha blobs at $z = 3.1$, 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. Mon. Not. R. Astron. Soc.430 (2013) 2768-2773.

RESCEU-12/13

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., and Noguchi, T. Publ. Astron. Soc. Pacific125 (2013) 252-262.

RESCEU-11/13

Nuclear Radio Jet from a Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258, Doi, A., Kohno, K., Nakanishi, K., Kamenno, S., Inoue, M., Hada, K., and Sorai, K. Astrophys. J. , 765 (2013) article id. 63 (11 pp.).

RESCEU-10/13

Cosmic string passage through the Earth and consequent global earthquake, Hayato Motohashi and Teruaki Suyama [arXiv:1305.6676 (astro-ph)] Astrophysics and Space Science (in press).

RESCEU-9/13

Gas Motion Study of Ly alpha Emitters at $z \sim 2$ Using FUV and Optical Spectral Lines, T. Hashimoto, M. Ouchi, K. Shimasaku, Y. Ono, K. Nakajima, M. Rauch, J. Lee and S. Okamura [arXiv:1206.2316 (astro-ph)] Astrophys.J. 765 (2013) 70.

RESCEU-8/13

Early Thermal X-Ray Emission from Long Gamma-Ray Bursts and Their Circumstellar Environments, A. Suzuki and T. Shigeyama [arXiv:1301.2421 (astro-ph)] Astrophys.J. 764 (2013) L12.

RESCEU-7/13

Feedback effects of aspherical supernova explosions on galaxies, K. Bekki, T. Shigeyama, and T. Tsujimoto [arXiv:1210.2475 (astro-ph)].

RESCEU-6/13

Full-sky formulae for weak lensing power spectra from total angular momentum method, Daisuke Yamauchi, Toshiya Namikawa, and Atsushi Taruya [arXiv:1305.3348 (astro-ph)] Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 08, article id. 051 (2013).

RESCEU-5/13

Gravitational modulated reheating and non-Gaussianity in Supergravity R^2 inflation, Yuki Watanabe and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1303.5191 (hep-th)] Phys.Rev. D87 (2013) 10, 103524.

RESCEU-4/13

Graceful exit from Higgs G -inflation, Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Taro Kunimitsu, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1309.7410 (hep-ph)] Phys.Rev. D88 (2013) 123518.

RESCEU-3/13

Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing, Tatsuya Narikawa, Tsutomu Kobayashi, Daisuke Yamauchi and Ryo Saito [arXiv:1302.2311 (astro-ph)] Physical Review D 87 (2013) 124006.

RESCEU-2/13

Early Universe Tomography with CMB and Gravitational Waves, Sachiko Kuroyanagi, Christophe Ringeval, and Tomo Takahashi [arXiv:1301.1778 (astro-ph)] J. Cosmo. & Astroparticle Phys. 1110 (2011) 006.

RESCEU-1/13

A new probe of dark matter properties: gravitational waves from an intermediate mass black hole embedded in a dark matter mini-spike, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Sachiko Kuroyanagi, and Joseph Silk [arXiv:1301.5971 (gr-qc)] Phys. Rev. Lett. 110, 221101 (2013).

II

2013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と構造形成の理論的研究—— (横山・須藤・吉田・樽家・須山・細川・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 138 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、観測と整合的な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。

さらに低温重力波検出器 KAGRA の建設をふまえ、そのデータ解析のための基礎研究と準備を進めている。当センターは重力波物理学研究コンソーシアムの拠点機関の一つとして、KAGRA Collaboration によって、データ解析の中核機関に認定されている。

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。

特に、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。すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を用いて、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ーリング統計、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。

1.1 初期宇宙・相対論

超重力 R^2 乗インフレーションモデルにおける重力的な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 [4, 180, 181, 81, 182, 183, 184]。

重力的な宇宙再加熱

プランク天文衛星の CMB 観測は、非最小重力結合を持つインフレーション模型と整合的である。我々はこの結合を持つ一般的な複数場インフレーション模型において、重力相互作用によりユニバーサルに宇宙再加熱が起こることを示した。また、ヒッグス凝縮場が再加熱時に非自明な値を持てば、変調再加熱を引き起こし、非ガウス性密度揺らぎを生成する可能性を指摘した [80, 82]。

CMB 観測により支持されるインフレーション理論模型の統一的再構築

最新のプランク衛星や他の CMB 観測により、インフレーション理論の予言する物理量（原始曲率ゆらぎ、重力波背景放射のスペクトル）は概ね支持されるものの、具体的な模型には一段と制約が強まってきた。我々は最も一般的な scalar-tensor 型重力理論の立場から、プランク衛星の最新 CMB 観測データにより支持されるインフレーション模型を再構築している。これによって個別の模型の制限に留まらず、観測的に支持される模型全てを包含するインフレーション模型の統一的なラグランジアンを示した [132, 133]。

ニューヒッグス・インフレーション模型における自己ユニタリ性と Planck・BICEP2 観測データへの適合性

Germani-Kehagias の提案したニューヒッグス・インフレーション模型はプランク衛星と BICEP2 の観測データと良く一致することを示した。さらに、ニューヒッグス模型は負のスペクトル指数スケール依存性を持ち、プランクと BICEP2 のデータ間のテンションを取り除きうる。この模型は宇宙進化の過程において常にユニタリ性を保っている。インフレーション中に、ヒッグス自己相互作用とヒッグス・重力子相互作用は背景依存する大きなカットオフスケールを持つ。このとき W, Z ボソンは大きな質量を獲得し、脱結合する。もし W, Z ボソンがヒッグス場と非ミナマルに結合すると、それらの有効質量がおおいに減少し、脱結合しない。インフレーション後、ニューヒッグス模型は繰り込み可能なポテンシャルを有する 4 次ガリレオン模型で良く近似される。これはインフレーションがユニタリ性を保ったまま始まり得ることを示唆している [5, 133]。

オープンインフレーションにおける U(1) ゲージ場の超曲率モードについて

量子的遷移を含む系における場の理論の定式化として U(1) ゲージ場の量子化を精密に探索した。量子的遷移を含む系においては「超曲率モード」と呼

ばれる特殊なモードが存在する場合がある。これが存在する場合、通常の量子化では考えられないような揺らぎの増幅が起こることが知られており、観測的に重要になる可能性がある。特に近年、超曲率モードは宇宙の原始磁場の起源として注目されていた。しかし、我々は U(1) ゲージ場には超曲率モードが現れないことを示した。さらに、得られた結果を用い、U(1) ゲージ場の相関関数を評価することで、別の方法で得られる相関関数との対応をあらわに示すことができた [6, 119, 168]。

Higgs G-inflation の再加熱について

Higgs G-inflation とよばれる、ヒッグス場にガリレオン型の相互作用項を加えたインフレーションモデルについて、インフレーション後の再加熱期に不安定性が生じることが示唆されていた。それに対して、ヒッグス場の運動項を拡張することによってそのような不安定性を回避することができるということを示した。またそのような拡張された運動項を持つヒッグス場は十分大きいテンソルゆらぎを作り出すため、今後の宇宙マイクロ波背景放射の観測によって検証される可能性があるということを示した [7, 76, 106]。

初期宇宙のスカラー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可能性を持つ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、重力波を生成す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の記述には、有効ポテンシャルだけでなく場の有効作用を用いたアプローチが重要である。これまでに自己相互作用、他のスカラー場やフェルミオン場との相互作用を取り入れた有効作用による研究がなされてきたが、我々はゲージ場との相互作用による寄与を取り入れた [8, 68, 69, 125]。

ドジッター時空での電磁場のパワースペクトルへのループ補正の寄与

ドジッター時空における超ハップルスケールでの磁場のパワースペクトルは、ブルースペクトルになることが知られている。これはマクスウェル作用が、共形不変性という特殊な対称性を持つためであり、これによりスペクトルの指数の値も一意に決まってしまう。しかし、有質量の荷電粒子（フェルミオン）は共形不変性を有しないため、そのような粒子のループ補正によって、磁場のスペクトル指数は共形不変性によって決まる値からずれることが期待される。本研究では、有質量荷電フェルミオンとの結合定数を展開パラメータとし、摂動論的に 1 ループのオーダーまでの磁場のスペクトル指数を求めた。その結果、スペクトル指数はループ補正によって小さくなる、即ち長波長スケールで磁場は増幅されることが分かった [9]。

光子・重力子変換機構に基づく宇宙磁場の制限

再結合時から現在までの間に宇宙磁場があると、宇宙背景マイクロ波 (CMB) の一部はその伝搬途中で重力波に転換し、その結果 CMB の強度分布はプランク分布からずれる。そこで、この機構と CMB のスペクトル分布の観測結果を使うことで、暗黒時代の宇宙磁場に制限を課することが可能となる。このような考察から、宇宙磁場に制限を課した Pisin Chen(1995) による先駆的研究がある。しかし、ここでは CMB 光子は完全な真空中を伝搬するという簡素化された状況設定がされていた。光子から重力子への変換確率は光子の分散関係に依存しており、そのため暗黒時代といえども極くわずかに存在する自由電子によって誘起されるプラズマ振動効果と、中性水素による分極効果による分散関係の変更が、どの程度変換確率に影響を及ぼすのかは自明ではない。そこで本研究では、上記の2つの効果を取り入れた場合で変換確率を再計算した。その結果、物質効果は変換確率を小さくする方に働くことが分かり、暗黒時代の宇宙磁場の上限は、先行研究で得られたものよりも弱められることを明らかにした [10, 129, 131]。

宇宙ひもの ISW-重力レンズ効果相関がもたらす CMB 非ガウス性の研究

宇宙ひもはそのものが非常に非線形な物体であることから CMB 温度揺らぎに大きな非ガウス性をもたらすと期待されており、CMB 非ガウス性の探索により厳しい制限が与えられている。宇宙ひもはその強い重力場によって ISW を通じて CMB 温度揺らぎに影響を及ぼすことが知られていたが、本研究では弱重力レンズ効果を通じて CMB に影響を及ぼすことに着目し、研究を行った。ISW および弱重力レンズ効果の相関による非ガウス性は通常の場合、高次相関となって無視されるが、宇宙ひもの場合、インフレーション起源揺らぎとの組み合わせで現れることにより、高次相関であっても無視できない寄与を与えることを示した。さらに、これは将来観測により十分観測可能であることを指摘した [11, 54, 65]。

宇宙ひもの CMB 弱重力レンズ効果による探索

宇宙ひもは、宇宙の支配的な揺らぎの成分にはなりえないが、ベクトル型・テンソル型のような特異な計量摂動を誘起することから精細観測により探索することが可能である。本研究では、ベクトル型・テンソル型計量摂動が誘起する CMB の弱重力レンズ効果に着目し、ACT 観測および Planck 観測の実際の観測データを用いることで初めて宇宙ひもの制限を行った。特に、弦理論的宇宙弦に対応するような繋ぎ換え確率が非常に小さいときにはこれまでの制限以上の厳しい制限を与えることを示した [12, 54]。

タイプ-I 宇宙ひもネットワークの進化の研究

宇宙弦の基礎過程の理解を推し進めるため、大規模数値計算を行い、宇宙論的なスケールにおけるネットワークの振る舞いを探索した。特に、「タイプ-I」と呼ばれるタイプの場の理論的宇宙弦に着目した。タイプ-I 場の理論的宇宙弦は、これまで知られていた (タイプ-II およびマージナルな) 宇宙弦とは違い、束縛状態を含むという特有な性質を持つ。この性質は弦理論的宇宙弦も持つことが知られており、弦理論的宇宙論の精密探索を考える際には非常に重要になる。これまで調べられてきた宇宙弦ネットワークでは、どのような理論パラメータにおいても同じアトラクター解に到達することが知られていたが、タイプ-I ネットワークではこれまでと異なるアトラクター解を持つことを指摘した。また理論パラメータへの依存性があり、特にある特殊なパラメータにおいて宇宙弦数密度が最大値を持つことを見出した [13, 167]。

宇宙ひもの地上観測による制限

宇宙のごく初期には対称性の破れに伴う相転移が起こったと考えられているが、多くの理論模型において、真の真空中に到達せずに取り残された領域として位相欠陥が現れる。位相欠陥の形状は真の真空の形状によって異なるが、1次元の位相欠陥は宇宙ひもと呼ばれ、ホライズンスケールにわたる長さを持ち、ほぼ光速で運動し、線密度を持ちながらまわりの時空は欠損角を除いて平坦であるという特徴を持つ。これまで宇宙ひもを観測する手段として、重力レンズ効果や宇宙マイクロ波背景放射が用いられてきたが、線密度の上限を課すのみであり、その存在は確認されていない。我々は新しい観測手段として、宇宙ひもが地球を通過する現象を考察した。このような通過現象が起こる可能性は大きくはないが、もし通過した場合、通過面に対して面対称となる特徴的な地震が生じることを発見した。またその地震を用いることで、宇宙論的に課されている上限値と比較して10桁も小さい線密度でも検出可能であることを明らかにした [14, 170, 128]。

シルク減衰で探る小スケールゆらぎ

初期宇宙においては、バリオンと光子は強く結合しているため、一体となって音響振動している。このバリオン・光子流体のゆらぎは、シルク減衰と呼ばれる効果で減衰する。減衰すると、もともと音響振動が持っていた振動エネルギーによって、宇宙全体の温度がわずかに上昇する (音響再加熱)。ビッグバン元素合成以降の音響再加熱により、光子の数密度は増えるがバリオンの数密度は増えないため、バリオン・光子比は減ることになる。一方で、バリオン・光子比は、ビッグバン元素合成の時期と光子の最終散乱の時期で、それぞれ軽元素の存在量と宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測から独立に決められている。そのため、音響再加熱によるバリオン・光子比の減少分には上限がある、すなわち初期ゆ

らぎのシルク減衰による減衰分には上限がある。このような考察から、従来よりも小スケールの初期ゆらぎをはじめて制限した [15]。

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、近年さまざまな観測源を通じて明らかとなった。しかし加速膨張を引き起こす物理的な原因は未だ謎に包まれており、それを解明するためにさまざまな理論モデルが提唱され、検討されている。その中でも、新しい自由度を導入してアインシュタインの一般相対論を修正することによって宇宙の加速膨張を説明する、修正重力理論が近年活発に研究されている。

本研究ではそのような修正重力理論の一つとして、一般相対論の自然な拡張である $f(R)$ 修正重力理論に着目した。 $f(R)$ 重力理論は関数 $f(R)$ を選ぶことで初期および現在の宇宙における二つの加速膨張期を自然に説明することができる点で興味深い。まず現在の宇宙の加速膨張については、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が促進されることを明らかにした。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ため、一般相対論においては観測の制限から許されないような大きなニュートリノ質量を許容することが可能となる。一方、近年のニュートリノ振動実験により、およそ 1 電子ボルトの質量を持ったステライル・ニュートリノの存在が示唆されている。このように大きな値の質量は密度揺らぎの成長を著しく抑制するため、一般相対論においては許されない。我々は 1 電子ボルトの質量を持った新たなニュートリノの存在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、 $f(R)$ 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分布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、1 電子ボルトのステライル・ニュートリノの存在が将来の素粒子実験により確立すれば、宇宙膨張スケールにおいて時空を記述している理論は一般相対論ではなく修正重力理論であることが優位となる [64, 169]。

また、宇宙初期の加速膨張においては、インフレーションとダークエネルギーの両方を記述する $f(R)$ 重力理論の枠組みで、インフレーション後の再加熱に関する研究を行った。このモデルのインフレーション期および再加熱期は、新しい自由度をスカラー場として明示的に取り扱うことができるアインシュタインフレームを用いることで、その時間発展の追跡が容易となる。我々はこの手法を利用して、膨張期およびスカラー場の解析解を導出し、これを用いて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した。その結果、粒子生成が非効率となるために再加熱が長い期間にわたって起こり、背景重力波パワースペクトルの高周波領域が増幅されることが判明した。これを現在得られている背景重力波パワー

スペクトルの制限と比較することで、理論モデルのパラメータに制限を与えた [16]。

Quasi-dilaton 理論における加速膨張解

Quasi-dilaton 理論とは有質量の重力理論に対称性を課すことで新たなスカラー場を導入し構築された理論である。この理論における非結合極限における有効理論は一般相対性理論のラグランジアンに加え、1つの無質量ベクトル場、2つのスカラー場で記述される。通常の有質量重力理論ではスカラー場がガリレオン場で記述されるのに対し、この理論ではスカラーモードが2つ存在するためバイガリレオンとなる。本研究ではこの理論における加速膨張解を導出し、有質量重力子の5つのモードと新たに加えたスカラー場を含む全てのモードが不安定性を含まないことを証明した [17]。

有質量重力理論における微分結合相互作用の研究

質量を持つ重力子の理論構築は古くから行われてきたが、近年ゴースト自由度を持たない質量を持つ重力子を含む理論が提唱された。この理論にはより一般的な拡張として、重力子の微分結合型の相互作用が許されると期待されているがこれまで見つかっていなかった。本研究は、系統的に微分結合型の相互作用を探索する方法論を定式化し、有質量重力理論の枠内で実際に許される微分結合型相互作用の一部を同定することに成功した [18, 71, 124, 171, 172]。

Proxy 理論におけるアトラクター解析

de Rham Gabadadze Tolley らによって構築された Massive gravity はゴーストが存在しない理論として知られている。重力子の質量で定義されるコンプトン長よりも内側の領域では decoupling limit と呼ばれる極限をとることができることが知られている。この極限では理論は質量なしのスピンの2の場とスカラー場で記述されることが知られている。本研究では、この極限における理論を共変化した Proxy 理論における宇宙論的背景時空の進化を調べた。先行研究では Proxy 理論ではド・ジッター解が存在することが指摘されていた。そこで更に詳しい解析を本研究で行った結果、この理論におけるド・ジッター解を得るには初期条件の微調整が必要であることがわかった。また、de Sitter 解はアトラクターではなく、ミンコフスキー解がアトラクターとなることを明らかにした [19]。

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

宇宙を記述する新しい修正重力理論を考える場合、その理論は現在の宇宙に存在する時空を安定に記述

できることが要請される。ここで安定という意味は、もととなる時空からの小さなずれを摂動として取り入れた場合に、その摂動が成長していかずに、減衰してもとの時空に戻るという意味である。最も基本的な時空の一つとして、球対称時空が挙げられる。球対称時空は、惑星や恒星のまわり、あるいはブラックホールなどのまわりを記述する時空であり、宇宙空間にありふれた時空として重要である。この時空のまわりの摂動論はブラックホール摂動論と呼ばれ、その安定性を解析することで、重力理論に制限を課すことができる。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。この理論はガリレオン対称性を持つ理論を共変化することで、1つのスカラー場を含み運動方程式に2階微分までしか現れない最も一般的なモデルとして構築された。そのため、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。我々は前年度までの研究において、運動方程式を導出する前に非力学的自由度をオイラー・ラグランジュ方程式により消去して作用を簡約化するという手法を用いて、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。今年度はさらにこの解析を偶パリティにおいても行い、二つの研究を合わせて、一般化ガリレオン理論のブラックホール安定性解析を完了した。これにより理論が持つ任意関数に対して、ブラックホール時空が安定となるための制限を与えた [20, 130, 178, 179]。

原始ブラックホールの形成条件

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 の存在量を予測するために PBH 形成過程を数値シミュレーションで調べた。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、さまざまな初期ゆらぎの形状に対して PBH 形成条件とゆらぎの形状の関係を調べた [21, 126, 74, 127, 75, 173, 174, 103, 104]。

中間質量ブラックホールからの重力波を用いたダークマター探査

中間質量ブラックホール (IMBH) とコンパクト星との連星系は IMRI と総称され、次世代の宇宙重力波望遠鏡 eLISA の有望な重力波源とされている。重力波を検出するためには、予め波形を精確に理論予測しておくことが不可欠である。理論波形と実際の波形との間にわずかに相違があれば、それは重力波観測において系統的な誤差を生み重力波源を見落とす原因となり得るからである。今現在、連星系が真空中にあることを仮定してその波形計算が行われているが、本研究では、今まで無視されてきた BH 周囲に集積すると指摘されているダークマター (DM) ハローの重力波波形に及ぼす影響をはじめ検討した。その結果、IMBH 周囲に高密度の DM 領域が形成されている場合には、理論波形に DM の影響を取り入れなければならないが、その場合、IMBH 周囲の DM 分布の情報も得られる可能性を指摘した [46, 83, 134, 84, 85, 136]。

3 出力 TOBA の方向決定精度

ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) は低周波数帯の観測を目的とする地上重力波検出器である。TOBA は2本の直交する棒状のテストマスから構成され、2本のテストマスの角度変位から重力波信号が読み取られる。本研究では、検出器平面と直交する平面上の角度変位を新たに考慮し、独立した信号数を増やすことで、重力波源に対する方向決定精度がどれほど向上するのかを調べた。その結果、信号対雑音比を固定した場合、長時間観測のものでは従来の1出力 TOBA と振る舞いは変わらないものの、短時間観測において方向決定精度が大きく向上することを見出した [135]。

重力波データ解析における非ガウスノイズの影響

重力波検出器のノイズは非ガウス分布に従うことが知られている。ノイズの非ガウス性を取り入れて重力波の検出を実現するためには、どのような推定量を用いれば最も効率的であるか、また独立成分分析を用いた解析法の検討など、基礎研究を行っている [108, 118, 164]。

重力波物理学研究コンソーシアム

2013年6月にビッグバンセンターと京都大学基礎物理学研究所が拠点となって、重力波物理学研究コンソーシアムが結成された。以下にその「設立目的」を引用する (詳細については <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/> を参照)。

レーザー干渉計型地上重力波検出器の開発が世界数カ国で進み、2015年頃から advanced LIGO などが順次稼動開始を予定している。日本の検出器 KAGRA も2017年頃から本格稼動開始予定である。これらの

重力波望遠鏡が予定感度で観測を始めれば、ブラックホールや中性子星からなる連星の合体が年間 10 イベント程度観測されることが予測されており、重力波天文学・重力波物理学が新しい学問として創生される。そして、重力波の初の直接検出のみならず、ブラックホール誕生の瞬間のようなこれまで知ることのできなかった一般相対論的動的現象の解明が進むと考えられる。さらに、重力波望遠鏡は、高エネルギー天文学にも大きなインパクトを与えると期待される。仮に近傍で超新星爆発やガンマ線バーストが起これば、それらに付随する重力波が検出され、発生メカニズムが解明されていないこれらの爆発現象の理解に大きなヒントが得られると予想されるからである。特に、未だに起源が明らかでないガンマ線バーストの正体が解明されることが強く期待されている。また、合体する連星中性子星からの重力波は宇宙論的な新たな距離指標になることが指摘されており、観測的宇宙論においてもこれまでの観測では得られなかった情報が新たに得られる可能性がある。

重力波観測においては、検出器の開発研究だけではなく、理論研究とデータ解析研究が重要な役割を果たす。言うまでもなく、あらゆる観測・実験研究がこれらを必要とするが、重力波観測実験には独特の側面がある。それは、期待される重力波信号の振幅が、検出器雑音の高々 10 倍程度であり、雑音の中から重力波信号を確実に取り出すためにはあらかじめ精度の高い理論波形を予測することが不可欠なことで、理論波形を有効活用することにより検出効率を可能な限り高くするようなデータ解析手法の開発が不可欠なことで、である。加えて、取り出した信号から物理的情報を引き出さなくてはならない。これには、各々の重力波源に適したデータ解析法が必要となり、新しい手法の探求が急務となっている。

さらには、重力波以外の宇宙観測手段による同時観測などの協働的な研究も欠かせない。なぜなら、重力波源に対応する天体を電磁波あるいはニュートリノを用いて観測できれば、重力波の検出を確信する上で飛躍的に信頼度が増すからである。電磁波観測には、加えて、重力波源の正体解明というメリットまである。対応天体を観測するには、なによりもまず、理論的に予想される信号を明らかにする必要がある。さらにその情報を観測者へと発信して行き、必要となる装置の開発および観測計画の立案を促す必要がある。

以上まとめると、重力波観測が実現すれば、新たな天文学・物理学が始まることは間違いないが、その確立のためには、重力波実験研究者、データ解析研究者、天文観測研究者、および理論研究者の協働は不可欠である。とりわけ日本では、来る KAGRA 稼働に向けて、その活動をサポートしていくためには、KAGRA を取り巻くデータ解析研究者や理論研究者のこれまでも増した連携強化が必要不可欠である。本研究コンソーシアムは、このような課題に対して主に物理学・天文学研究者集団として貢献し、日本において中心的役割を担うことを目的としている。

KAGARA Data 解析スクール

現在日米欧は、重力波の直接初検出、さらには重力波天文学の確立に向かって協力・競争している。日本では、基線長 300m を持つ地上重力波検出器 TAMA、基線長 100m の地下低温検出器 CLIO に引き続き、現在神岡の地下に基線長 3km の KAGRA 低温重力波望遠鏡を建設中である。KAGRA は 2015 年末に常温観測、2017 年以降低温観測を始めることが計画されており、データ解析体制の確立が急務となっている。実際、アメリカの LIGO Scientific Collaboration では 150 人ほどのシニアの研究者がデータ解析に専任であっているところ、日本では学生を含めても 20 人以下の人員が、データ管理・転送・検出器モニタリングの仕事と兼務してデータ解析を行う予定となっている。このような状況のもと、2012 年度より RESCEU では様々な機関・研究者の協賛のもと、若手研究者・学生を新しい分野である重力波データ解析・重力波天文学に興味をもってもらうべく、KAGRA データ解析を開催している。2013 年度は 9 月 27 日、28 日にパルサーなどからの連続重力波をテーマに第 3 回のスクールをおこない、73 名の参加を得た。なお本スクールは RESCEU、KAGRA Collaboration、文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」、重力波物理学研究コンソーシアムの共催によるものである。

KAGALI: The KAGARA Algorithmic Library

重力波は極めて微弱なため、その検出手法は簡単なものではなく、近年極めて複雑になっている。そのため重力波データ解析パイプラインは、複数の人間の手によって複数のプログラミング言語を用いて、10 年以上にわたって開発されるものであり、コーディングの最初からコードの構造について綿密に設計をおこなわなくては、保守性、可読性、再利用性、移植性をそこなうことになる。このような問題意識から、伊藤は KAGRA のために重力波データ解析に最もよく使われる C 言語についてのコーディングガイドラインを執筆し、また英訳して共同研究者に公開した。現在、このコーディングガイドラインにそって、KAGRA データ解析のためのライブラリ The KAGRA Algorithmic Library (KAGALI) を開発中である。

量子化誤差の影響

KAGRA の出力をデジタル化する際に生じる量子化誤差は、重力波信号検出に影響を与える可能性がある。このような問題意識の元、2013 年度には伊藤、辰巳らによって、現在までにサイン波については、1 年間積分において、0.3 least significant bit 以上の信号は検出できることが示した。現在、KAGRA の 16bit アナログ・デジタル変換機と whitening filter を仮定し、様々な重力波信号についてどの程度の振幅まで重力波信号を検出できるか、大阪市立大学の鳥谷氏が主に研究を遂行している [157, 159]。

Grid 転送技術の検討および KAGRA VO の設置

Grid は、「いつでもどこからでも安全に計算機資源を利用できる」ようにするネットワーク上の仮想的な仕組みである。Grid を使えばたとえば喫茶店で利用しているラップトップから、地球上の「どこかの研究機関」にあるデータを、地球上の「別研究機関のどこか」にあるクラスタ計算機を用いて解析することができる。ここでのポイントは、ユーザーから見ると、ほぼラップトップで計算しているのと同じような使い勝手で計算できることで、ただし、スピードはもちろんクラスタ計算機のそれであり、扱うデータ容量は数 PB のオーダーである。インターネットを通してかつ複数研究機関をまたがって計算機資源を安全に提供するために、grid では公開鍵認証と第三者証明書を組み合わせた独自のシステムを構築している。Grid は CERN/Large Hadronic Collider が利用しており、日本では KEK が grid 証明書の発行機関となっている。

世界の重力波検出実験チームである LIGO Scientific Collaboration、VIRGO Collaboration がデータ共有に grid を利用していることから日本の KAGRA でも grid を利用することが必要不可欠であった。そこで KAGRA では伊藤が KEK の岩井氏、松本氏の協力によって grid 転送テストのための準備を KEK においておこなっている。RESCEU の協力により grid テスト用に現在 20TB のテープストレージを KEK に設置しており、さらに計算機資源の詳細な管理に必要な Virtual Organization(仮想組織) を KAGRA 用に設定した。今後、KAGRA VO を用いた LIGO とのデータ共有テストを行う予定である [158]。

Low mass X-ray binary search

低質量の主系列星と中性子星の連星は、連星の進化段階において低質量主系列星から中性子星へ質量降着が起き、X 線で光輝くことがある。このような天体は Low mass X-ray binary (LMXB) と呼ばれる。LMXB では質量降着によって中性子星が角運動量を獲得し、一般に高速自転していることが期待される。しかし LMXB のうち中性子星の自転速度がわかっている天体についてその自転周波数分布を見ると 300Hz 程度以下になることが知られているが、これは理論上可能な自転周波数の高々 1/10 程度である。Bildsten らは自転周波数が頭打ちになる理由を中性子星が重力波放射によって角運動量を失うことに求め、このような重力波は、KAGRA を始めとする地上重力波検出器において有望な重力波源であると提唱した。

LMXB からの重力波検出手法については LIGO Scientific Collaboration (LSC) が研究をリードしているが、今のところ最適な手法というのは見つからない。問題は計算量が莫大になることで、感度が最も良い手法では地球上に存在する全ての計算機を利用してきても解析できないことが知られている。問題はしたがって、パラメータで制御される sub-optimal な手法の組み合わせについて、最適なパラメータと最適な手法の組み合わせを探すことにある。この問

題について伊藤は 3 月にドイツマックスプランク重力物理学研究所を訪問し、LSC の連続波グループとともに研究を開始している。

1.2 観測的宇宙論

ベクトル型・テンソル型計量摂動を含む弱重力レンズ効果の定式化

これまで弱重力レンズ効果は、宇宙大規模構造による密度揺らぎが生成するようなスカラー型の計量摂動に起因したものしか考慮されてこなかった。これは観測されてきた E モード歪み場およびグラディエントモードは、スカラー型計量揺らぎが生成するものが支配的であるからである。本研究では、ベクトル型・テンソル型の計量摂動を含むような一般的な状況での弱重力レンズの理論的定式化を推し進めた。特に、総角運動量法と呼ばれる方法を弱重力レンズ効果の定式化に初めて応用することで見通しが非常によくなることを見出した。その結果、ベクトル型・テンソル型計量摂動が存在した場合には、スカラー型計量摂動では作ることのできない新しいモード (B モード歪み場、カールモード) が現れることをあらわに示した [22, 66, 120, 166]。

銀河団の重力レンズ効果による修正重力理論の検証

銀河団スケールにおける修正重力理論の検証のため、最も一般的なスカラー・テンソル重力理論である Horndeski 理論に着目し、銀河団の重力レンズ効果の観測と比較できるような有効な定式化を行った。さらに、定式化を massive gravity 理論に対しても行い、これらを実際の観測データと比較を行った。その結果、特定のパラメータにおいては銀河団中心および外縁部の境界において重力レンズ収斂場に特徴的なシグナルが現れることを始めて示し、銀河団が重力理論の検証に適用できることを明らかにした [23]。

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形性の記述

宇宙大規模構造の非線形進化を精密に記述する方法の一つとして、摂動論にもとづく解析計算手法の研究が近年、急速に進展している。こうした手法は、銀河サーベイなどの観測から求まるパワースペクトルや相関関数の理論テンプレートの計算に有用で、将来の高精度観測に向けて、今後さらなる改良が必要である。本研究では、(1) ハローモデルと組み合わせ、通常、摂動論だけで記述できない小スケールの重力進化の影響を取り入れたダイナミックレンジの広い理論計算手法の開発、(2) 多点プロパゲーター展開と呼ばれる摂動計算にもとづき、パワースペクトルの高次補正を高速計算するために必要なプロパゲーターのフィッティング公式を導出、(3) 非局所的なバイアスの性質を考慮した多点プロパゲーター展

開を銀河・ハローのバイスペクトルに応用し、原始非ガウス性がある場合の大スケールにおけるバイスペクトルの理論予言を行うなど、定量的かつ実用的な側面を中心に、精密理論テンプレートとしての摂動計算手法を発展させた [24, 25, 26]。

弱い重力レンズ効果のカール成分 / B-モードパワースペクトル

遠方銀河の撮像データや宇宙マイクロ波背景放射のマップを使った重力レンズ観測は、今や宇宙論観測の重要な手段として確立し、さまざまな宇宙論的制限が得られるようになってきている。重力レンズ効果の主な原因は前景の宇宙大規模構造が作るスカラー型摂動だが、宇宙ひもや原始重力波などが作るベクトル / テンソル型摂動によっても重力レンズ効果が起きることが知られており、スカラー型摂動では作れないカール成分 / B-モード成分と呼ばれる特徴的な空間相関が現れる。そのため、カール成分 / B-モード成分をもつ重力レンズ効果が検出できれば、宇宙ひもや原始重力波などの決定的証拠となり得る。本研究では、スカラー / ベクトル / テンソル型摂動全てを考慮した重力レンズ効果の公式を導出、全角運動量法と呼ばれるテクニックを使って、重力レンズ観測の基本観測量である角度パワースペクトルの表式を統一的に導いた。得られた表式をもとに、宇宙ひものネットワークが作る重力レンズ効果の角度パワースペクトルを理論計算し、それをテンプレートとして用いることで、Planck / Atacama Cosmology Telescope による宇宙マイクロ波背景放射の観測データから、宇宙ひもの存在に対して強い制限を得た [22, 12]。

弱非線形領域における赤方偏移歪みを用いた重力理論の検証法

宇宙論的スケールにおける重力理論の検証法の 1 つとして、近年、銀河サーベイを用いた赤方偏移歪みの測定が目玉されている。赤方偏移ゆがみから密度ゆらぎの成長率がわかるため、バリオン音響振動などによる宇宙膨張の観測と組み合わせることで、宇宙論的スケールでの一般相対論の検証、および修正重力理論に対する制限が可能になるのである。ただし、重力進化や赤方偏移ゆがみ自身のもつ非線形性により、観測的に線形と呼べるスケールは限られており、重力理論の検証には非線形効果を取り入れた理論テンプレートが不可欠である。本研究では、摂動論にもとづく精密理論テンプレートをもとに、一般相対論の新たな検証方法として、赤方偏移ゆがみの観測から特異速度場を再構築する方法論を開発した他、 $f(R)$ 重力と呼ばれる修正重力理論の下で、非線形性を正しく取り入れた赤方偏移ゆがみの理論テンプレートを初めて構築した。後者については、 N 体シミュレーションのデータをベースに理論テンプレートの妥当性を検証した上で、赤方偏移ゆがみから重力理論に対してどれだけ強い観測的制限が得られるか調べた。その結果、従来のように、一般相対

論にもとづく理論テンプレートでは、あまり強い制限が得られないばかりか、結果がバイアスされる可能性があることを突き止めた。将来観測から一般相対論の「ずれ」を正確に特徴づけるには、一般相対論を超える修正重力理論のフレームワークで精密な理論テンプレートの構築が不可欠になると予想される [27, 28]。

楕円銀河の平均的な星質量及びダークマター分布

これまで発見された 161 個の強い重力レンズ天体の統計解析により、楕円銀河の平均的な質量分布を求めた。総質量密度分布はおおよそ等温球に近いものであり、これは他の方法で求めた密度分布と無矛盾である。観測された密度分布は星質量とダークマター分布の和であり、この両成分は星の初期質量関数 (IMF) の不定性を考慮した場合大きく縮退しそれぞれの成分の分離は非常に難しくなる。我々は重力レンズクエーサー系で観測されるマイクロレンズ現象に着目し、これが星質量の割合を直接制限し縮退をやぶることを見いだした。この方法により、楕円銀河の IMF は低質量星を多く含むいわゆる Salpeter 型のものとよく一致すること、またダークマター分布はバリオンの効果を考慮しない単純な N 体計算から予測される NFW プロファイルとよく一致し、銀河形成に伴って起こると思われていた断熱収縮の効果がほとんどみられないことがわかった。このことは楕円銀河が典型的に複雑な星形成史を経て形成されたことを示唆するのかもしれない [29]。

銀河団の強い重力レンズ現象における視線方向の構造の寄与

10 個の強い重力レンズが観測されている銀河団に対する MMT 及びマゼラン望遠鏡による分光追観測の結果を詳しく再解析することで、強い重力レンズ現象における視線方向の構造の寄与を調べた。その結果銀河団中心方向の視線方向に有意に多数の銀河群が存在することがわかった。この視線方向効果は従来考えられていたよりもずっと大きく、重力レンズ銀河団の解析にさまざまな影響を及ぼするという意味において重要である [30]。

将来の弱重力レンズ観測における軽いグラビティーノの質量の決定可能性

重力が超対称的であるとする、重力子 (グラビトン) の超対称性粒子であるグラビティーノの存在が予言される。グラビティーノの特徴的な点は、極めて寿命が長いことにある。これはグラビティーノが重力及び超対称性の破れを通してのみ相互作用することの帰結である。特に、ゲージ伝達型超対称性模型ではグラビティーノの寿命は宇宙年齢よりも長い。そのため、宇宙最初期に作られたグラビティーノは宇宙

大規模構造にその痕跡を残す。グラビティーノが宇宙大規模構造に与える影響 (冷たい暗黒物質の予言からのずれ) はその質量に比例するため、弱重力レンズ効果の観測は質量の上限を与える。一方、加速器実験の超対称性粒子に対する発見能力はその質量が軽いほど高くなるため、加速器実験はグラビティーノの質量の下限を与える。つまり、弱重力レンズ効果の観測及び加速器実験を組み合わせることで、ゲージ伝達型超対称模型を完全に調べることが可能である。特に、Large Hadron Collider (LHC) の 14 TeV 運転により 5 eV 以下のグラビティーノをもつゲージ伝達型超対称模型を発見可能であり、Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) はグラビティーノ質量が 4 eV であった場合には ± 1 eV の精度で決定可能であることを示した [31, 86]。

スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、その結果銀河の中心から数 Mpc のスケールにまで、クエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとするれば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク (~ 10 kpc) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。これは星間ダストの輸送過程に大きな示唆を与える発見であると同時に (Zu et al. 2011)、大規模構造の宇宙論的解析にも系統的誤差を生む可能性がある (Ménard, Kilbinger & Scranton 2010, Fang et al. 2010)。

我々は MSFR で用いられた SDSS 銀河サンプルを IRAS の全天遠赤外放射マップ上でスタックすることで、SDSS 銀河およびこれに付随する赤外放射量の測定を行った。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR とスタック解析はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的に同等の観測結果を示したものと期待される。MSFR によるダスト赤化と、スタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを比較した結果、検出されたダストは典型的星間ダストの温度 (~ 20 K) と整合的であった。また、MSFR で検出されたダストの約 50% は SDSS 銀河内の星間ダストのクラスタリングによる統計的重ねあわせとして説明可能であることを示した [32, 143, 197, 198]。

弱重力レンズモルフォロジー統計

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。そのため、多くの将来観測において重力レンズ解析は主要科学目的に位置づけられている。

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。このマップを利用して、先行研究では考慮されていなかったいくつかの観測効果を含めた統計解析を行い、将来観測におけるミンコフスキー汎関数解析の適応性をテストした。第一段階として、実際の観測に含まれるマスク領域がどのようにミンコフスキー汎関数解析に影響するかを調べた。結果として、マスクの領域の有無によって、ミンコフスキー汎関数の値はバイアスされることがわかった。さらに、このバイアスの度合いは現段階ではシミュレーションによってのみ補正することが可能であることも明らかにした。これは、1000 平方度以上の広視野観測領域が予定される将来観測において、ミンコフスキー汎関数解析によって宇宙論的な制限をつけるためには、観測領域と同程度の広視野をカバーした数値シミュレーションが必要になることを意味する [33]。

これをうけて、現存する重力レンズデータである Canada–France–Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS) にミンコフスキー汎関数解析を適応し、宇宙論パラメータ推定における系統的な研究を行った。CFHTLenS は合計 154 平方度をカバーする 4 つの領域からなる重力レンズデータである。CFHTLenS における観測効果を網羅するため、観測と同じ視野を確保する convergence マップを作成し、直接的に観測結果とシミュレーション結果を比較した。複数の観測効果を取り入れると、ミンコフスキー汎関数による宇宙論的な制限は、先行研究の予言する制限に比べ数倍悪化するが、依然として暗黒エネルギーの状態方程式パラメータをパーセントレベルの精度で決定できることを明らかにした。この結果から、すばる望遠鏡次世代観測 Hyper Suprime Cam での制限は、既存の宇宙論的な制限から大きく向上することが予測される。さらに、二点相関関数と同時にミンコフスキー汎関数を用いることで、よく知られ

る宇宙論パラメータ間の縮退を解くことに成功した。この結果は、重力レンズ観測だけで、宇宙モデルを厳しく制限できる可能性を示しており、応用上極めて重要である [34, 87, 144, 145, 195]。

非等方銀河クラスタリングの解析による重力理論の宇宙論的検証

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、重力理論の宇宙論的検証が可能となる。

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。

我々は、宇宙論的スケールに渡り 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 非等方パワースペクトル (非等方銀河クラスタリングの二点統計量) 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、一般相対論の検証を行った [35, 88, 90, 107, 196]。また、宇宙定数を導入することなく宇宙の加速膨張を説明し得る重力理論である $f(R)$ 重力理論に対しても、理論テンプレートを構築 [28] し、赤方偏移歪みによる構造成長の測定からこの理論への制限を得た [146, 147, 89, 90, 196]。

宇宙論的 N 体シミュレーションによる非等方銀河クラスタリングの解析

前述の SDSS LRG サンプルは、サンプルのうち 95% もの LRG が周囲に LRG を伴わず単独で存在するため、暗黒物質ハローの中心と対応していると考えられていた。しかし、 N 体シミュレーションを用いて、LRG の非等方クラスタリングを再現するためには、暗黒物質ハローの中心に LRG を対応づけるだけでは不十分であることを明らかにし、さらに、ハロー中のより局所的な重力束縛系であるサブハローと LRG を対応づけることで非等方クラスタリングを再現できることを示した。また、サブハローを用いた模擬銀河カタログは理論テンプレートとして使用することができ、宇宙論パラメータの推定がこれまでよりも高精度に行うことができる可能性を示した [36]。

非等方銀河クラスタリング解析における高次統計量を持つ情報量の評価

これまでの研究では、非等方銀河クラスタリングの解析にはパワースペクトル (二点統計量) が用いられてきたが、非等方銀河クラスタリングをより精密に特徴付けるためにはより高次の統計量が必要となる。

我々は、銀河クラスタリングの三点統計量であるバイスペクトルを解析することで得られるパラメータの決定精度をフィッシャー解析により評価し、銀河クラスタリング解析におけるバイスペクトルの重要性を明らかにした [149]。

銀河団の X 線観測における静水圧平衡の正当性

銀河団の宇宙論的応用における最も重要な課題は、正確な質量測定である。X 線観測においては、静水圧平衡 (銀河団ガスの圧力勾配と全質量による重力のつり合い) の仮定を用いて全質量が推定される。我々は宇宙論的シミュレーションから取り出した銀河団を用いて、静水圧平衡の仮定の下で得た質量と真の質量とを比較した。使用したシミュレーション銀河団は SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションから 5 つ、AMR (Adaptive Mesh Refinement) シミュレーションから 1 つの、計 6 つである。解析の結果、静水圧平衡によって求めた質量は真の質量を半径 r_{500} 付近で 1 割程度、 r_{200} 付近で 2 割程度過小評価することがわかった (r_{500} 、 r_{200} は、その内側の平均密度が宇宙の臨界密度のそれぞれ 500 倍、200 倍となるような半径)。また、その原因は主に銀河団ガスの加速度であることを初めて示した。これは、従来の銀河団の静的モデルの限界と、動的モデルの必要性を示唆するものである [37]。

ダークマター分布におけるボイドを用いた幾何学的宇宙論

宇宙には非常に低密度なボイドと呼ばれる空間が数多く存在し多くの銀河はこのボイドを取り囲むようにして存在する。このボイドは宇宙の大規模構造において、ハローと相補的な観測対象になりうるとして注目を集めている。ボイドにおける基本的な統計量はボイドの体積分布関数であり、これはハローにおける質量関数に相当する。この体積分布関数についてはハローの質量関数と同様に宇宙の構造形成理論を基にした様々な理論予測がなされており、大規模構造のトレーサーとしてボイドを用いた宇宙論パラメータの制限可能性が議論されている。今回我々はボイドの体積分布関数の小スケールでの振る舞いが、宇宙論によらず純粋に幾何学的な考察のみから $n(V) \propto V^{-2}$ という関係式に従う事を発見した。

この研究では、これらの結果が実際に宇宙論的に実現されているかを確かめるために N 体シミュレーションを用いて宇宙論的スケールにおけるボイド分布を調べた。ここでのボイドとは、ダークマターの

密度が疎な空間の事である。ポイド分布を計算するに際して、観測から示唆されるようにポイドは球状に広がっていると仮定した。結果としてポイドの体積分布関数は、小スケール ($< 1000 Mpc^3$) では幾何学的な考察から予測される $n(V) \propto V^{-2}$ に一致し、それより大きなスケールでは指数関数的に落ちていく、という Schechter 関数的な振る舞いをする事が分かった。この結果は Sheth & Weygaert による extended Press-Schechter theory や Bond et al. の peak theory を応用した初期密度分布の極小値にポイドができると考えた場合のポイド分布と整合的である。また、過去の3次元大規模赤方偏移サーベイから得られた銀河におけるポイドの体積分布関数とも一致している。このことは観測におけるポイド分布が Λ CDM モデルと整合することも同時に示唆している [38]。

ALMA による遠方サブミリ波銀河観測の検出可能性

近年、高感度・高分解能のサブミリ波銀河観測が ALMA によって可能となり、とくに電離炭素輝線 ([CII] 輝線) による遠方サブミリ波銀河検出が盛んになされている。日本でも [CII] 輝線銀河をターゲットにしたサーベイが計画されており、我々は宇宙論的銀河形成シミュレーションを用いて、ALMA による [CII] 輝線銀河の検出可能性を調べた。本モデルでは赤外線光度を UV 光度のダスト減光量から計算し、これにより得られた赤外線光度関数は既存の観測結果とよく一致する。[CII] 輝線光度は近傍宇宙の観測で見積もられた赤外線光度との経験則を用いて計算した。さらに現実的な観測条件を ALMA observing tool を用いて設定した。

結果として、赤方偏移 6 - 7、視野 70 秒角で [CII] 輝線光度が $1.2 \times 10^8 L_{\odot}$ 以上の銀河が検出可能な観測条件では、1-3 天体程度が検出可能であることを明らかにした [94, 156]。また、2025 年打ち上げ予定の SPICA-SAFARI による高視野 (2 分角)、高感度 ($32 \mu Jy$, 5σ) の観測と、ALMA による高分解能 (1 秒角以下) の追観測を組み合わせる、電離酸素・電離窒素輝線の観測による金属量診断を提案した [95]。さらに ALMA cycle 2 における deep survey のための見積りでは総観測時間を 50 時間と設定し、[CII] 輝線検出に適した視野と感度を調べた。deep survey においては感度ではなく観測体積を優先する観測が適し、標準的なモデルに基づいた計算によると数天体程度の [CII] 輝線銀河が検出可能であると結論した。

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星生成銀河の性質を調べた。個々の銀河の星形成史、金属量、星質量から特に遠赤外線域の SED を計算し、電離酸素による輝線の明るさを推定した。ハッブル望遠鏡の UDF12 サーベイで見つかったような銀河には、酸素輝線で十分明るくなるものもあることを明らかにし、ALMA 望遠鏡により赤方偏移 8 以上の銀河を検出し、同定することが可能であると提唱した [39]。

1.2.1 星形成

初代星の質量分布

宇宙最初の星形成はミニハロー中に生まれたガス雲の重力崩壊から始まり、その後誕生した原始星へのガス降着により星質量が増加する。我々はこれまで宇宙論シミュレーションとローカルな輻射流体計算を組み合わせるこの間の進化を追跡し、原始星からの紫外光フィードバックにより最終的にガス降着が遮断されて星質量が定まる描像を確立してきた。今年度は宇宙論シミュレーションから星形成ガス雲のサンプルを 100 例以上採り、全ての場合で最終星質量が定まるまでの進化を計算することで、初めて初代星の質量分布にせまる統計的な研究を行った。結果として、初代星の質量分布は数十から数百太陽質量にわたる幅広い分布を持つことを示した。この多様性の起源は星形成ガス雲の質量や角運動量の多様性を反映したものである。星質量のこれらの物理量に対する依存性も明らかにし、星形成のごく初期の進化から最終質量を与えるモデル化が可能であることを示した [40]。

超巨大ブラックホールの種としての超大質量星形成

最近の観測によると赤方偏移 6 より遠方の宇宙ですでに $10^9 M_{\odot}$ を超えるような超巨大ブラックホールが観測されており、ビッグバンから間もない頃にこんな巨大な天体がどうやってできたのか問題になっている。最近さかんに議論されているのは $10^5 M_{\odot}$ を超えるような超大質量星がごくまれに生まれ、この死後残された巨大なブラックホールが種になることで形成時間を短く済ますシナリオである (Direct Collapse シナリオ)。我々はこのとき予想される急速なガス降着の下での原始星進化を星内部構造を解いて調べている。今年度はこれまでの計算を拡張し、はじめて星質量が $10^5 M_{\odot}$ にいたる急速降着する超大質量星の進化を明らかにした。この間星の半径は非常に大きのまま進化し (supergiant protostar)、有効温度は 1 万度を上回ることがない。このため星の光度は非常に大きくなるにも拘らず、普通の初代星形成で予想されている紫外光フィードバックは働かない。ガス降着は阻害されずに進み、超大質量星形成が可能である道筋を示した。一方で星全光度は矮小銀河一つに匹敵するほど明るくなることから、JWST による将来観測でこうした天体を検出できることも予言した [41]。

低金属量のガス雲の重力収縮

大質量 (数 10 – 1000 太陽質量) の初代星 [40] から現在の星 (0.1 太陽質量) への星質量の遷移の過程はまだよくわかっていない。本研究では、星質量遷移の最低限の条件として、ダストによる冷却の効果を調べる。ダスト冷却が効果的となる金属量を求めるため、我々は準解析的な計算により、ガス雲中心の

進化中の温度進化を求めた(ワンゾーン計算)。このとき、先行研究では無視されていたダスト成長(気相中の金属原子がダストに降着する現象)を進化計算と整合的に扱った[42]。初期宇宙において、ダストは超新星によって供給される。本研究では、収縮初期のダスト量とサイズ分布は超新星噴出物の進化の計算から整合的に得られたモデルを用いた。その結果、低質量の星が形成される金属量は、超新星モデルに大きく依存することが分かった。先行研究では、星形成のモデルとして、ある金属量より大きい領域では低質量星形成モードに移行するとしているが、本研究では、遷移の条件がより複雑であることを詳細なモデルにより示した。

<受賞>

- [1] 横山順一、日本物理学会論文賞、2014年3月、“Generalized G-Inflation —Inflation with the Most General Second-Order Field Equations—” Prog. Theor. Phys. (2011) 126 (3): 511-529 (小林努、山口昌英と共同受賞)
- [2] 枝 和成、平成 25 年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞(修士課程)、2014年3月
- [3] Akira Oka, Outstanding Presentation Award in The 23rd Workshop on General Relativity and Gravity in Japan (Hirotsuki University, 11/5/2013).

<報文>

(原著論文)

- [4] Y. Watanabe and J. Yokoyama, “Gravitational modulated reheating and non-Gaussianity in supergravity R^2 inflation”, Phys. Rev. D **87**, 103524 (2013) [arXiv:1303.5191 [hep-th]].
- [5] C. Germani, Y. Watanabe and N. Wintergerst, “Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data”, arXiv:1403.5766 [hep-ph].
- [6] D. Yamauchi, T. Fujita and S. Mukohyama, “Is there supercurvature mode of massive vector field in open inflation?”, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1403**, 031 (2014) [arXiv:1402.2784 [astro-ph.CO]].
- [7] K. Kamada, T. Kobayashi, T. Kunimitsu, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Graceful exit from Higgs G-inflation”, Phys. Rev. D **88**, 123518 (2013) [arXiv:1309.7410 [hep-ph]].
- [8] Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, “Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath”, Phys. Rev. D **89**, 085037 (2014) [arXiv:1308.4794 [hep-ph]].
- [9] H. Motohashi and T. Suyama, “Loop contribution to inflationary magnetic field”, arXiv:1401.1260 [astro-ph.CO].
- [10] P. Chen and T. Suyama, “Constraining Primordial Magnetic Fields by CMB Photon-Graviton Conversion”, Phys. Rev. D **88**, 123521 (2013) [arXiv:1309.0537 [astro-ph.CO]].
- [11] D. Yamauchi, Y. Sendouda and K. Takahashi, “CMB ISW-lensing bispectrum from cosmic strings”, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1402**, 041 (2014) [arXiv:1309.5528 [astro-ph.CO]].
- [12] T. Namikawa, D. Yamauchi and A. Taruya, “Constraining cosmic string parameters with curl mode of CMB lensing”, Phys. Rev. D **88**, 083525 (2013) [arXiv:1308.6068 [astro-ph.CO]].
- [13] T. Hiramatsu, Y. Sendouda, K. Takahashi, D. Yamauchi and C. -M. Yoo, “Type-I cosmic string network”, Phys. Rev. D **88**, 085021 (2013) [arXiv:1307.0308 [astro-ph.CO]].
- [14] H. Motohashi and T. Suyama, “Cosmic string passage through the Earth by consequent global earthquake”, Astrophys. Space Sci. **348** (2013) 565-569, [arXiv:1305.6676].
- [15] T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, “Reheating the universe once more - the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales”, [arXiv:1403.5407 [gr-qc]].
- [16] H. Motohashi and A. Nishizawa, “Constraint on reheating after $f(R)$ inflation from gravitational waves”, Phys. Rev. D **89** (2014) 063541, [arXiv:1401.1023].
- [17] G. Gabadadze, R. Kimura, D. Pirtskhalava, “Self-acceleration with Quasidilaton”, arXiv: 1401.5403.
- [18] R. Kimura and D. Yamauchi, “Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity”, Phys. Rev. D **88**, 084025 (2013) [arXiv:1308.0523 [gr-qc]].
- [19] L. Heisenberg, R. Kimura, K. Yamamoto, “Cosmology of the proxy theory to massive gravity”, arXiv: 1403.2049.
- [20] T. Kobayashi, H. Motohashi and T. Suyama, “Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector”, Phys. Rev. D **89**, 084042 (2014), [arXiv:1402.6740].
- [21] T. Nakama, T. Harada, A. G. Polnarev and J. Yokoyama, “Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation”, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **01**, 037 (2014) [arXiv:1310.3007 [gr-qc]].
- [22] D. Yamauchi, T. Namikawa and A. Taruya, “Full-sky formulae for weak lensing power spectra from total angular momentum method”, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1308**, 051 (2013) [arXiv:1305.3348 [astro-ph.CO]].
- [23] T. Narikawa, T. Kobayashi, D. Yamauchi and R. Saito, “Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing”, Phys. Rev. D **87**, no. 12, 124006 (2013) [arXiv:1302.2311 [astro-ph.CO]].

- [24] Patrick Valageas, Takahiro Nishimichi & Atsushi Taruya, “Matter power spectrum from a Lagrangian-space regularization of perturbation theory”, *Physical Review D* **87** (2013) 083522.
- [25] Francis Bernardeau, Atsushi Taruya & Takahiro Nishimichi, “Cosmic propagators at two-loop order”, *Physical Review D* **89** (2014) 023502.
- [26] Shuichiro Yokoyama, Takahiko Matsubara & Atsushi Taruya, “Halo/galaxy bispectrum with primordial non-Gaussianity from integrated perturbation theory”, *Physical Review D* **89** (2014) 043524.
- [27] Yong-Seon Song, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya & Issha Kayo, “Chasing unbiased spectra of the Universe”, *Physical Review D* **87** (2013) 123510.
- [28] Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Takashi Hiramoto & Akira Oka, “Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasilinear scales”, *Physical Review D* **89** (2014) 043509.
- [29] Masamune Oguri, Cristian E. Rusu & Emilio E. Falco, “The Stellar and Dark Matter Distributions in Elliptical Galaxies from the Ensemble of Strong Gravitational Lenses”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **439** (2014) 2494.
- [30] Matthew B. Bayliss, Traci Johnson, Michael D. Gladders, Keren Sharon & Masamune Oguri, “Line-of-Sight Structure Toward Strong Lensing Galaxy Clusters”, *The Astrophysical Journal*, **783** (2014) 41.
- [31] Ayuki Kamada, Masato Shirasaki & Naoki Yoshida, “Weighing the Light Gravitino Mass with Weak Lensing Surveys”, arXiv:1311.4323.
- [32] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata, & Yasushi Suto, “Detection of Far Infrared emission from Galaxies and Quasars in the Galactic extinction map”, *Publication of Astronomical Society of Japan* **65**(2013)43 (arXiv:1212.0307).
- [33] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida, & Takashi Hamana, “Effect of Masked Region on Weak-lensing Statistics”; *The Astrophysical Journal*, **774** (2013) 111.
- [34] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida “Statistical and Systematic Error in Measurement of Weak Lensing Minkowski Functionals: Application to Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey”; *The Astrophysical Journal*, 査読済み印刷前.
- [35] Akira Oka, Shun Saito, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yamamoto, “Simultaneous constraints on the growth of structure and cosmic expansion from the multipole power spectra of the SDSS DR7 LRG sample”, 2014, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **439**, 2515.
- [36] Takahiro Nishimichi, Akira Oka, “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”, arXiv:1310.2672.
- [37] Daichi Suto, Hajime Kawahara Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto & Renyue Cen, “Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations” *The Astrophysical Journal*, **767** (2013) 79.
- [38] Gibbons, G. W.; Werner, M. C.; Yoshida, N. & Chon, S., “On de Sitter geometry in cosmic void statistics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 438, Issue 2, p.1603-1610 (2014).
- [39] Akio Inoue, Ikkoh Shimizu, Yoichi Tamura, Hiroshi Matsuo, Takashi Okamoto, & Naoki Yoshida, “ALMA Will Determine the Spectral Redshifts of > 8 Galaxies by OIII Lines”, *The Astrophysical Journal Letters*, **780** (2014) 18.
- [40] Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideyuki Umeda, Kazuyuki Omukai, Gen Chiaki, & Harold W. Yorke, “One Hundred First Stars: Protostellar Evolution and the Final Masses” *Astrophys. J.* , **781** (2014) 60.
- [41] Takashi Hosokawa, Harold W. Yorke, Kohei Inayoshi, Kazuyuki Omukai, & Naoki Yoshida, “Formation of Primordial Supermassive Stars by Rapid Mass Accretion” *Astrophys. J.* , **778** (2013) 178.
- [42] Gen Chiaki, Raffaella Schneider, Takaya Nozawa, Kazuyuki Omukai, Marco Limongi, Naoki, Yoshida, and Alessandro Chieffi, “Dust grain growth and the formation of the extremely primitive star SDSS J102915+172927”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **439** (2014) 3121.
- [43] 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)”, *Publication of Astronomical Society of Japan* **66**(2013)R1 (arXiv:1206.0737).
- [44] Yuki Shiromoto, Hajime Susa, & Takashi Hosokawa, “Generation of Magnetic Field on the Accretion Disk around a Proto-first-star” *Astrophys. J.* , **782** (2014) 108.
- [45] Kohei Inayoshi, Koichiro Sugiyama, Takashi Hosokawa, Kazuhito Motogi, & Kei Tanaka, “Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources” *Astrophys. J.* , **769** (2013) 20L.
- (学位論文)
- [46] 枝和成: 「重力波によるダークマター探査」 (修士論文)

- [47] 鄭昇明: 「初期宇宙における始原ガス雲と巨大ブラックホール」 (修士論文)
(著書)
- [48] 日本評論社編集部編: 「物理学ガイダンス」、日本評論社 (2014年2月刊行) (第2章 吉田直紀担当)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [49] J. Yokoyama: “Gravitational modulated reheating in R^2 inflation” Cosmological Perturbation Post Planck (Helsinki University, June 4, 2013).
- [50] J. Yokoyama: “Toward the quest for the ultimate theory of the universe by CMB” CMB2013 (OIST, Okinawa, June 13, 2013).
- [51] J. Yokoyama: “ALMA and variation of the fundamental constants of physics” Todai Forum (University of Chile, November 8, 2013).
- [52] J. Yokoyama: “Cosmology of the Higgs field” PAS-COS 2013 (Taipei, November 22, 2013).
- [53] J. Yokoyama: “Cosmic strings and inflation” Cosmic Strings 2014 (Arizona State University, USA, February, 13, 2014).
- [54] Daisuke Yamauchi: “Weak lensing of CMB by Cosmic Strings and its Detectability”; Cosmic Strings 2014 (Arizona State University, USA, February, 14, 2014).
- [55] Naoki Yoshida: “Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation”; Exascale Computing in Astrophysics (Ascona, Switzerland, September 2013).
- [56] Naoki Yoshida: “Low-mass Stars, Massive Black-holes, and Luminous Supernovae in the Early Universe”; IoA Conference “Mind the Gap” (Cambridge, UK, July 2013).
- [57] Naoki Yoshida: “Cosmic Dawn: Conference Summary”; Cosmic Dawn (Ringberg, Germany, June 2013).
- [58] Naoki Yoshida: “Hunting for the First Supernovae”; Cosmos Meeting 2013 (Kyoto, May 2013).
- [59] Takashi Hosokawa: “UV feedback in the high-mass star formation”; workshop “Birth and death of high-mass stars: Lesson on newly explored phases of the interstellar medium” (Nagoya univ., 1/9, 2014).
- [60] Masamune Oguri: “Gravitational lensing science with WISH”; WISH Science Workshop “Exploring the Darkness”, (NAOJ, December 2013).
- [61] Ayuki Kamada: “Dark Matter Halos in Warm Dark Matter Models”; Workshop Meudon CIAS 2013 Warm Dark Matter Galaxies in agreement with observation: formation, evolution and supermassive black holes, (CIAS Observatoire de Paris, France, 6/5-7, 2013).
- 一般講演
- [62] J. Yokoyama: “Fine feature in the primordial power spectrum from wrapped brane inflation”, APPC12 (Makuhari, July 17, 2013).
- [63] J. Yokoyama: “Gravitational modulated reheating” CosPA 2013 (Pagoda Hotel, Honolulu, November 14, 2013).
- [64] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama: “ $f(R)$ gravity and massive neutrinos”, IEU Cosmology Conference 2013, Institute for the Early Universe (IEU), Ewha Womans University, Seoul, Korea, June 3 - 5, 2013.
- [65] Daisuke Yamauchi: “CMB ISW-lensing bispectrum from cosmic strings”; The 23th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan at Hirosaki University (Hirosaki, Japan, November, 5, 2013).
- [66] Daisuke Yamauchi: “Full-sky formulae for weak lensing power spectra from total angular momentum method”; COSMO2013 (Cambridge University, UK, September 5, 2013).
- [67] R. Kimura: “Inevitable ghost in the decoupling limit of quasi-dilaton theory”, COSMO 2013, (the Centre for Theoretical Cosmology, Cambridge, UK, 9/2-9/6, 2013).
- [68] Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama: “The effect of gauge fields on oscillating scalar fields at finite temperature”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, APPC12, 7/17, 2014.
- [69] Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama: “The role of gauge fields in phase transitions in the early Universe”, COSMO2013, Cambridge University, UK, 9/5, 2014.
- [70] R. Kimura: “Vainshtein solutions and appearance of ghost in quasi-dilaton theory” The 12th Asia Pacific Physics Conferences (幕張, 7/14-7/19, 2013).
- [71] R. Kimura: “Derivative interactions in nonlinear massive gravity” JGRG 2013 (弘前大学, 11/5-11/8, 2013).
- [72] T. Nakama: “Relationship between dark matter properties and primordial black holes as seeds of supermassive black holes”, The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG23), Hirosaki University, Aomori, Japan, Nov. 5 - 8.
- [73] T. Nakama: “Testing scenarios of primordial black holes being seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos”, The seventeenth edition of the annual International Conference on Particle Physics and Cosmology - COSMO 2013, University of Cambridge, Cambridge, Sep. 2 - 6.
- [74] T. Nakama: “Investigating formation condition of primordial black holes for generalized initial perturbation profiles”, CosPA 2013 (Symposium

- on Cosmology and Particle Astrophysics), Pagoda Hotel, Hawaii, Nov. 12 - 15.
- [75] T. Nakama: “Numerical Simulation of Primordial Black Hole Formation”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, Jul. 14 - 29.
- [76] K. Kamada, T. Kobayashi, T. Kunimitsu, M. Yamaguchi and J. Yokoyama: “On the Graceful exit from Higgs G-inflation”, The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, November 5-8, 2013.
- [77] T. Suyama: “Statistics of general functions of a Gaussian field- application to non-Gaussianity from preheating”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, Jul. 14 - 29.
- [78] T. Suyama: “Statistics of general functions of a Gaussian field- application to non-Gaussianity from preheating”, The seventeenth edition of the annual International Conference on Particle Physics and Cosmology - COSMO 2013, University of Cambridge, Cambridge, Sep. 2 - 6.
- [79] T. Suyama: “Strong link between the dark matter identity and the origin of the supermassive black holes”, CosPA 2013 (Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics), Pagoda Hotel, Hawaii, Nov. 12 - 15.
- [80] Y. Watanabe & J. White: “Gravitational Reheating after Multiple Field Inflation”, Cosmic Microwave Background CMB2013, 沖繩科学技術大学院大学, Jun. 2013.
- [81] Y. Watanabe & J. Yokoyama: “Gravitational Modulated Reheating and Non-Gaussianity in Supergravity R^2 Inflation”, COSMO, University of Cambridge, UK, Sep. 2013.
- [82] Y. Watanabe & J. White: “Gravitational particle production and modulated reheating after inflation”, 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 弘前大学, Nov. 2013.
- [83] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk: “Gravitational wave from a stellar mass and an intermediate mass black hole binary surrounded by a dark matter mini-spike”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Chiba Makuhari Messe, 2013/7/15.
- [84] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk: “Parameter Estimation of Gravitational Wave from a Stellar Mass and an Intermediate Mass Black Hole Binary Surrounded by a Dark Matter Mini-spike”, The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Hirosaki University, 2013/11/7.
- [85] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk: “Imprints of dark matter mini-spikes on gravitational waves”, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop, Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune, India, 2013/12/17-20.
- [86] Ayuki Kamada: “Cosmological constraint on light gravitino mass from cosmic shear”; CosPA 2013, (Hawai'i, USA, 11/12-15, 2013).
- [87] Masato Shirasaki: “Weak Lensing Morphological Analysis in CFHTLenS”; ANISOTROPIC UNIVERSE FROM MICROWAVE TO ULTRA-WAVE LENGTH ENEGIES (Amsterdam, Nederland, 9/26, 2013).
- [88] Akira Oka: “Anisotropic Clustering of the SDSS LRG as a Dual Probe of Growth of Structure and Cosmic Expansion”; The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs (Oral, Chiba, 7/15/2013).
- [89] Akira Oka: “Cosmological Upper-Bound for $f(R)$ Gravity through Redshift-Space Distortion”; The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Oral, Hirosaki University, 11/5/2013).
- [90] Akira Oka: “Detectability of Deviation from General Relativity through Redshift-Space Distortions”; Essential Cosmology for Next Generation (Poster, Mexico, 1/13/2014).
- [91] Gen Chiaki: “Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation”, EWASS 2013 - Symposium 5, (Turku, 7/8-9, 2013).
- [92] Gen Chiaki: “Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation”, PROTOSTARS & PLANETS VI, (Heidelberg, 7/15-20, 2013).
- [93] Gen Chiaki: “Collapsing low-metallicity gas clouds with the growth of dust grains”, The Life Cycle of Dust in the Universe, (Taipei, 11/18?22, 2013).
- [94] Natsuki Hayatsu, Naoki Yoshida, & Yuichi Matsuda: “Disribution of IR and submillimeter line emitting galaxies in cosmological simulations”; SPICA conference 2013 (Tokyo, 6/18-6/21, 2013).
- [95] Natsuki Hayatsu, Naoki Yoshida, & Yuichi Matsuda: “Disribution of CO and [CII] emitting galaxies in cosmological simulations”; East Asia ALMA Development Workshop 2013 (Tokyo, 7/8-7/9, 2013).
- [96] Yousuke Itoh: “KAGRA Search for Continuous Gravitational Wave”; 4th Japan-Korea Workshop on KAGRA (大阪大学, 2013/6/10-11).
- [97] Yousuke Itoh for the KAGRA Data Analysis Subsystem: “KAGRA Data Analysis Activities in Feb. - Aug. 2013”; KAGRA f2f meeting (富山大学, 2013/8/1-3).
- [98] Yousuke Itoh: “Review & Proposal: LMXB search”; 新学術領域研究隔月研究会 (大阪市立大学, 2013/10/19).
- [99] Yousuke Itoh for the KAGRA Data Analysis & Management Subsystem: “Data Analysis and Data Management report for the Program Advisory Board”; KAGRA Program Advisory Board Meeting (東京大学宇宙線研究所, 2013/11/2-3).

会議集録

- [100] K. Kamada, T. Kobayashi, T. Kunimitsu, M. Yamaguchi, J. Yokoyama: “A Solution to the Graceful Exit Problem in Higgs G-Inflation” JPS Conf. Proc. **1**(2014)013113.
- [101] T. Kobayashi and J. Yokoyama: “Fine Feature in the Primordial Power Spectrum from Wrapped Brane Inflation” JPS Conf. Proc. **1**(2014)013114.
- [102] T. Nakama, T. Harada, A.G. Polnarev, J. Yokoyama: “Numerical Simulation of Primordial Black Hole Formation” JPS Conf. Proc. **1**(2014)013115.
- [103] T. Nakama, T. Harada, A. G. Polnarev and J. Yokoyama: “Investigating formation condition of primordial black holes for generalized initial perturbation profiles”, to appear in the proceedings of The 10th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA2013), [arXiv:1401.7740 [gr-qc]].
- [104] T. Nakama, T. Harada, A. G. Polnarev and J. Yokoyama: “Numerical Simulation of Primordial Black Hole Formation”, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12).
- [105] T. Nakama: “Relationship between dark matter properties and primordial black holes as seeds of supermassive black holes”, JGRG23(2013)110707.
- [106] K. Kamada, T. Kobayashi, T. Kunimitsu, M. Yamaguchi and J. Yokoyama: “A Solution to the Graceful Exit Problem in Higgs G-Inflation”, JPS Conf. Proc. **1**, 013113 (2014).
- [107] Akira Oka, Shun Saito, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yamamoto: “Anisotropic Clustering of the SDSS LRG as a Dual Probe of Growth of Structure and Cosmic Expansion”, 2014, *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)*, 013096.

(国内会議)

招待講演

- [108] 横山順一: 「Toward GW detection under non-Gaussian noises」重力波データ解析ブートキャンプ 大阪市立大学梅田サテライト 2013年6月28日
- [109] 須山輝明: 「Planck 後の宇宙論:宇宙論は終わったのか?」日本物理学会 2013年秋季大会、高知大学、高知、日本、2013年9月20日 - 23日
- [110] 吉田直紀: 「暗黒宇宙の揺らぎから生まれる星、銀河、ブラックホール」; 第2回 NINS コロキウム (静岡県ヤマハリゾートつまこい、12/16、2013)
- [111] 吉田直紀: 「初代銀河形成」; 初代星初代銀河研究会 (鹿児島大学理学部、1/22、2014)
- [112] 細川隆史: 「現在と初期宇宙での星形成」; 天文・天体物理 第43回若手夏の学校 (8/1、2013)
- [113] 細川隆史: 「初代天体」; SKA 研究会 (東京大学、3/23、2014)
- [114] 大栗真宗: 「宇宙論で期待されるサイエンス」; 2020年代の銀河サーベイとすばる望遠鏡とのシナジー、(国立天文台、1/11、2014)
- [115] 大栗真宗: 「光赤外サーベイの将来計画」; 第2回銀河進化と遠方宇宙、(東京大学、3/25、2014)
- [116] 須藤大地: 「銀河団の質量測定バイアス」; 「銀河団の物理」ワークショップ (東京理科大学 (東京)、2013年12月28日)
- [117] 伊藤洋介: 「重力波実験・データ解析」; 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム (数物連携宇宙研究機構、2013/12/25-27)

一般講演

- [118] 横山順一: “Confronting non-Gaussian statistics in gravitational wave data analysis” 新学術領域シンポジウム 東京工業大学 2014年1月13日
- [119] 山内大介: 「バブル生成を伴うインフレーションモデルにおける電磁場の超曲率モードについて」; 物理学会 (東海大学、3/28、2014)
- [120] 山内大介: “Full-sky formulae for weak lensing power spectrum from total angular momentum method”; 第26回理論懇シンポジウム (IPMU、12/25、2013)
- [121] 山内大介: “Type-I cosmic string network”; 「第13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、山形、日本、2013年7月24日 - 27日
- [122] 木村蘭平: “Vainshtein mechanism in quasi-dilaton massive gravity” Mini-workshop “Massive gravity and its cosmological implications (IPMU, 東京大学、4/8-4/10, 2013).
- [123] 木村蘭平: “Derivative interactions in de Rham-Gabadadze Tolley massive gravity”; 「第13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、山形、日本、2013年7月24日 - 27日
- [124] 木村蘭平: “Derivative interactions for a massive graviton” 理論懇シンポジウム (東京大学柏キャンパス、12/25-12/27、2013)
- [125] 宮本裕平、本橋隼人、須山輝明、横山順一: 「初期宇宙の相転移におけるゲージ場の非平衡過程」、日本物理学会秋季大会、高知大学、高知、2013年9月23日
- [126] 中間 智弘、原田知広、A. G. Polnarev、横山 順一: 「数値計算で探る原始ブラックホール形成条件」; 日本物理学会 2013年秋季大会、高知大学、高知、日本、2013年9月20日 - 23日
- [127] T. Nakama: “Searching crucial parameters of initial perturbation profiles for primordial black hole formation”, ワームホールと原始ブラックホール:その理論と観測、Nagoya University, Aichi, Japan, Nov. 25 - 26.
- [128] 須山輝明: “Detecting cosmic string passage through the Earth by consequent global earthquake ”; 「第13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、山形、日本、2013年7月24日 - 27日

- [129] 須山輝明: “Constraining Primordial Magnetic Fields by CMB Photon-Graviton Conversion”; 第26回理論懇シンポジウム (IPMU、12/25、2013)
- [130] 須山輝明: “Black hole perturbation in modified gravity” 新学術領域シンポジウム 東京工業大学 2014年1月15日
- [131] 須山輝明: 「光子-重力子変換機構に基づく宇宙磁場の制限」; 第69回日本物理学会 (東海大学、3/28、2014)
- [132] 渡辺 悠貴: “Constraining generalized G-inflation from the cosmic microwave background”; 「第13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、山形、日本、2013年7月24日 - 27日
- [133] 渡辺悠貴、横山順一、A.A. Starobinsky: 「CMB観測により支持されるインフレーション理論模型の統一的再構築」、第69回日本物理学会、東海大学、Mar. 2013
- [134] 枝和成: 「ダークマター探査」、第12回 DECIGO ワークショップ、東京大学、2013/10/27
- [135] K. Eda and A. Shoda: “Angular Resolution of a Torsion-bar Antenna” 新学術領域 A04/05 班合同合宿、2014/2/22
- [136] 枝和成、伊藤洋介、黒柳幸子、Joseph Silk: 「重力波による中間質量ブラックホール周囲のダークマター探査」、第26回理論懇シンポジウム、東京大学、2013/12/25-27
- [137] 細川隆史、Harold W. Yorke、稲吉恒平、大向一行、吉田直紀: 「超急速ガス降着による超大質量原始星の進化」; 天文学会 2013年秋季年会 (東北大学、9/11、2013)
- [138] 細川隆史、Rolf Kuiper、Harold W. Yorke 他: 「初代星形成質量降着期の3D計算」; 初代星・初代銀河研究会 2014 (鹿児島大学、1/22、2014)
- [139] 細川隆史、Rolf Kuiper: 「初代星形成質量降着期の3次元シミュレーション」; 天文学会 2014年春季年会 (国際基督教大学、3/21、2014)
- [140] 鎌田歩樹: 「暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響」; 日本天文学会 2013年秋季年会 (東北大学、9/10-12、2013)
- [141] 鎌田歩樹: 「暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響」; 第26回理論懇シンポジウム (東京大学柏キャンパス、12/25-27、2013)
- [142] 鎌田歩樹: 「暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響とその荷電重粒子への応用」; 日本物理学会第69回年次大会 (東海大学湘南キャンパス、3/27-30、2014)
- [143] 柏木俊哉、須藤靖: 「スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆」; 日本天文学会 2013年秋季年会 (東北大学、9/10-9/12、2013)
- [144] 白崎正人: “Weak Lensing Minkowski Functionals in CFHTLenS”; RESCEU サマースクール (山形県蔵王、7/26、2013)
- [145] 白崎正人、吉田直紀: 「CFHTLenS データを用いた重力レンズカタログとモルフォロジー統計」; 日本天文学会 (東北大学、9/10、2013)
- [146] 岡アキラ: 「SDSS LRG 非等方クラスタリングを用いた $f(R)$ 重力理論に対する制限」; 天文学会 (口頭発表、東北大学、9/10/2013)
- [147] 岡アキラ: “Cosmological Test of $f(R)$ Gravity with Anisotropic Galaxy Clustering”; 第二回観測的宇宙論ワークショップ (口頭発表、国立天文台、12/4/2013)
- [148] 岡アキラ: “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”; 第26回理論懇シンポジウム (ポスター発表、Kavli IPMU、12/25/2013)
- [149] 岡アキラ: 「パイスペクトルにおける AP 効果の影響」; 天文学会 (口頭発表、国際基督教大学、3/20/2014)
- [150] Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Klaus Dolag & Renyue Cen: 「X線および SZ 効果観測を用いた銀河団質量推定の信頼性」日本天文学会 2013年秋季大会、東北大学 (仙台)、2013年9月12日
- [151] 千秋元: 「ダスト成長を考慮した低金属量の星形成ガス雲の進化 2」天文学会 (東北大学、9/11、2013)
- [152] 千秋元: 「低金属量重力収縮ガス雲中でのダスト成長」初代星・初代銀河研究会 (鹿児島大学、1/23、2014)
- [153] 千秋元: 「低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション I」天文学会 (国際基督教大学、3/21、2014)
- [154] 鄭昇明、平野信吾、細川隆史、吉田直紀: 「初期宇宙における始原ガス雲と巨大ブラックホール」; 日本天文学会 2014年春季年会 (国立天文台、March 19-22、2014)
- [155] 鄭昇明、平野信吾、細川隆史、吉田直紀: 「宇宙論的シミュレーションにおける超巨大ブラックホールの種形成」; 初代星・初代銀河研究会 2014 (鹿児島大学、Jan 22-24、2014)
- [156] 早津夏己、吉田直紀、松田有一: 「ミリ波・サブミリ波観測と数値シミュレーションで探る星生成銀河」; 日本天文学会 2013年秋季年会 (東北大学、9/12、2013)
- [157] 鳥谷仁人 (阪市大理)、神田展行 (阪市大理)、伊藤洋介、KAGRA Collaboration 「KAGRA における ADC の量子化誤差の影響の見積もり」; 日本物理学会 2013年秋季大会、22pSR-10、1092 (高知大、2013/9/20-23)
- [158] 神田展行 (阪市大理)、大原謙一 (新潟大自然)、宮川治 (東大宇宙線研)、三代木伸二 (東大宇宙線研)、内山隆 (東大宇宙線研)、大橋正健 (東大宇宙線研)、田越秀行 (阪大理)、伊藤洋介、高橋弘毅 (長岡技科大)、端山和大 (阪市大理)、KAGRA collaboration: 「iKAGRA データ転送・保管システムの開発 I (設計)」; 日本物理学会第69回年次大会、27pTL-3 1129 (東海大、2014/3/27-30)

- [159] 鳥谷仁人 (阪市大理)、神田展行 (阪市大理)、伊藤洋介、KAGRA Collaboration 「連続重力波探索に向けた KAGRA 信号取得における whitening filter と ADC の最適化」; 日本物理学会第 69 回年次大会、27pTL-5、2021 (東海大、2014/3/27-30)
- [160] 伊藤洋介: 「KAGRALI(仮) コーディング規約」; 新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」A04 Boot Camp (大阪市立大学、2013/6/29)
- [161] 伊藤洋介: 「KAGRA 連続波探索」; KAGRA 重力波データ解析スクール@ RESCEU 2013 (東京大学、2013/9/27-28)
- [162] Yousuke Itoh: “Gravitational Wave Data Analysis for KAGRA” RESCEU 新春交流会; (東京大学、2014/1/18)
- [163] 伊藤洋介: 「重力波データ解析講義 (プロジェクト研究)」; 宇宙・素粒子 スプリングスクール 2014 「宇宙を解こう」 (東京大学宇宙線研究所、2014/3/4-8) (セミナー)
- [164] 横山順一: 「非ガウス性を入れた重力波データ解析」 京都大学 GG ゼミ 2013 年 5 月 17 日
- [165] 横山順一: “Cosmology of the Higgs field” DESY 2013 年 9 月
- [166] Daisuke Yamauchi: “Full-sky formulae for weak lensing power spectra from total angular momentum method”; Group seminar (University of Chicago, USA, January, 1, 2014).
- [167] Daisuke Yamauchi: “Type-I cosmic string network”; Theory group seminar (APC, France, 18, September 2013).
- [168] 山内大介: “Open inflation in the landscape”; 宇宙物理グループセミナー (KEK、5/12、2013)
- [169] H. Motohashi: “Cosmological consequences of $f(R)$ modified gravity for accelerated expansion of the Universe”, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Apr. 18, 2013.
- [170] 本橋隼人: 「宇宙ひもの通過により発生する地球全体の地震について」、東京大学、地震研究所、東京都、日本、2013 年 5 月 9 日
- [171] 木村蘭平: “Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity” 早稲田大学、11/13、2013
- [172] 木村蘭平: “Derivative interactions in dRGT massive gravity” カブリ数物連携宇宙研究機構、10/29、2013
- [173] 中間智弘: “Revealing the formation condition of primordial black holes by numerical simulations” 高エネルギー加速器研究機構理論セミナー 2013 年 12 月 3 日
- [174] 中間智弘: 「数値計算で探る原始ブラックホール形成条件」 早稲田大学理論宇宙物理学研究室セミナー 2013 年 6 月 28 日
- [175] 須山輝明: 「強い重力場での修正重力理論の検証に向けた理論的研究」 京都大学 GG ゼミ 2013 年 4 月 12 日
- [176] 須山輝明: 「宇宙マイクロ波背景放射で探る初期宇宙」 日本大学素粒子論研究室セミナー 2013 年 10 月 30 日
- [177] 須山輝明: 「インフレーション宇宙論の進展」 慶応大学談話会 2013 年 12 月 17 日
- [178] Teruaki Suyama: “Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector”; 精華大学 (台湾, 6, March 2014).
- [179] Teruaki Suyama: “Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector”; 国立台湾大学 (台湾, 10, March 2014).
- [180] Y. Watanabe: “Gravitational Modulated Reheating and non-Gaussianity in Supergravity R^2 Inflation”, Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, 早稲田大学、2013 年 5 月 1 日
- [181] 渡辺悠貴: “Gravitational Modulated Reheating and non-Gaussianity in Supergravity R^2 Inflation”, 首都大学東京 高エネルギー理論物理学セミナー、2013 年 6 月 6 日
- [182] Y. Watanabe: “Gravitational Particle Production and Non-Gaussianity in Supergravity R^2 Inflation”, Particle Physics and Quantum Gravity Seminar, University of Nottingham, UK, 10th Sep. 2013.
- [183] Y. Watanabe: “Gravitational Particle Production and Non-Gaussianity in Supergravity R^2 Inflation”, ICG Seminar, University of Portsmouth, UK, 16th Sep. 2013.
- [184] Y. Watanabe: “Generating Non-Gaussianity from Gravitational Particle Production in Supergravity R^2 Inflation”, London Relativity and Cosmology Seminar, Queen Mary University of London, UK, 17th Sep. 2013.
- [185] Naoki Yoshida: “Low-mass Stars, Massive Black-holes, and Luminous Supernovae in the Early Universe”; Star Formation Thursday Seminar (Princeton, USA, November 2013).
- [186] 細川隆史: “High-Mass Star Formation in the Early Universe”; 東京大学天文教室セミナー (6/11、2013)
- [187] 細川隆史: “High-Mass Star Formation in the Early Universe”; 国立天文台談話会 (7/5、2013)
- [188] Takashi Hosokawa: “Radiative Feedback from Primordial Protostars and Mass Distribution of the First Stars”; Astrophysikalisches Seminar (Tubingen Univ., Germany, 7/22, 2013).
- [189] 細川隆史: 「大質量星の形成」; 九州大学天文セミナー (11/9、2013)
- [190] Takashi Hosokawa: “The First Stars: their diversity and beyond”; IPMU seminar (1/15, 2014).

- [191] 千秋元: “The first low-mass stars in the universe” (東京理科大学、9/27、2013)
- [192] 千秋元: 「ダスト成長を考慮した低金属量ガス中の星形成」(甲南大学、10/9、2013)
- [193] Masamune Oguri: “Finding and Characterizing Gravitationally Lensed Quasars”; Seminar at Pontificia Universidad Catolica de Chile (Santiago, Chile, October 18, 2013).
- [194] 大栗真宗: 「銀河団および銀河内のダークマター分布」; C 研セミナー(名古屋大学、11/14、2013)
- [195] Masato Shirasaki: “Weak Lensing Morphological Analysis in CFHTLenS”; Cosmology seminar at Yale University (New Haven, USA, 11/24, 2013).
- [196] Akira Oka: “Cosmological Test of Gravity with Anisotropic Galaxy Clustering”; Observational Cosmology Seminar (京都大学基礎物理学研究所、12/20/2013)
- [197] Yasushi Suto: “Far-Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis”; Cosmology lunch talk at Princeton University, September 30, 2013.
- [198] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD extinction map and discovery of FIR emission of galaxies by stacking analysis of the SDSS DR7 sample”; CAS seminar at Johns Hopkins University, October 22, 2013.
- [199] Yousuke Itoh: “KAGRA Data Analysis Activities”; RESCEU Early Universe Seminar (東京大学、2013/7/1)
- [200] Yousuke Itoh: “Post-Newtonian equations of motion for relativistic compact binaries”; Kansai Joint Seminar on Relativity and Cosmology (京都大学、2013/7/20)
- [201] 伊藤洋介: 「連続波探索」; 安東研究室セミナー(東京大学、2013/9/4)
- [202] Yousuke Itoh: “Gravitational Wave Data Analysis”; 宗宮研究室セミナー(東京工業大学、2013/12/13)
- [203] Yousuke Itoh: “Gravitational Wave Data Analysis for KAGRA”; LSC CW group seminar(Max-Planck-Institute for gravitational physics, Albert-Einstein-Institute, Hannover, 2014/3/25).

(集中講義)

- [204] 須山輝明: 「宇宙初期揺らぎと宇宙背景放射」第18回新瀉・山形合宿 2013年11月1日-3日

(一般講演)

- [205] 横山順一: 「日本文明論と科学」国家ビジョン研究会 国際縄文学協会 2013年4月27日
- [206] 横山順一: 「宇宙の輪廻転生」東京大学理学部オープンキャンパス 2013年8月8日
- [207] 横山順一: 「相対論と重力波による宇宙の探求」日比谷高校 SSH 講演会 2014年1月31日

- [208] 吉田直紀: 「おほしさま」; 幼稚園児向け講演会(明石市 Kansai International School、8/24、2013)
- [209] 吉田直紀: 「シミュレーションによる宇宙進化の研究」; 国立天文台主催 「最新の天文学の普及をめざすワークショップ」(東京大学柏キャンパス、11/17、2013)
- [210] 吉田直紀: 「宇宙暗黒の時代」; 第24回東京大学理学系研究科公開講演会(東京大学、11/24、2013)
- [211] 大栗真宗: 「すばる望遠鏡で『見る』暗黒宇宙」; SSH 講演会(出雲高校、9/28、2013)

2 銀河と星の共進化論

——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・戸谷)

宇宙全体を眺めるとき、最も基本的な単位として観測されるのは銀河です。銀河は、星やガスが暗黒物質ハローの重力で閉じ込められたシステムで、宇宙誕生後およそ10億年の時代にできはじめ、現在(137億年)までに様々な銀河が、時には合体成長をしながら進化してきたと考えられています。銀河の中では星が生まれては死に、重い星が死ぬときは超新星爆発やガンマ線バーストといった巨大な爆発現象を起こします。星内部の核融合でつくられた重元素は超新星爆発などの現象で星間空間に返され、次の世代の星に受け継がれて我々の体を作る材料になっていきます。最新の天文観測により、こうした銀河の形成進化が直接見られるようになってきました。また、超新星やガンマ線バースト、クエーサーなどの明るい天体は遠方宇宙からでも観測でき、初期の宇宙の物理的な情報を教えてくれます。一方、私たちの近く、すなわち銀河系内の古い星の表面の元素組成には、その星が誕生した頃の銀河の情報が刻まれていると考えられています。このプロジェクトでは、こうした宇宙初期から現在まで連続と続く銀河進化のより完全な解明を目的としています。そのために、様々な最新観測データを、物理法則に基づいた理論的予測と比較しながら、新たな知見を得るための研究を進めています。

2.1 宇宙及び系外銀河

すばる FMOS による宇宙論銀河分光サーベイ (FastSound) の推進 (戸谷、清水、舎川)

すばる望遠鏡戦略枠プログラムとして採択されている、FastSound 計画の推進を行った。2年目の観測をおおむね順調に進め、 $z \sim 1.3$ の宇宙における初めての大規模三次元銀河地図が描き出されつつある。赤方偏移歪みもほぼ予想通りの精度で検出され、最終目標の一般相対性理論の検証に向けて解析を進めている。また、ターゲット銀河選択及び FastSound 試験観測については Tonegawa et al. として論文にまとめた。また、京大 D2 の石川敬視らとの共同研究で、大規模宇宙論シミュレーションを用いて、赤方偏移歪み効果による一般相対論の検証における、ハローバイアスの影響を調べた。また、京大 M2 の岡田裕行らとの共同研究で、 $f(R)$ 重力理論などの修正重力理論が、現在の銀河サーベイのデータからどれだけ制限を受けるかを調べた [5, 9, 20, 22, 33]。

ガンマ線バーストによる宇宙再電離の研究 (戸谷)

2013年6月に発生した GRB 130606A は、 $z = 5.913$ で非常に明るく、宇宙再電離のプロブとして理想的であった。戸谷はすばる GRB チームとしての共同研究で、すばる望遠鏡で取得した可視残光の高精度スペクトルを理論解析し、GRB の周囲に中性度 10%以上の銀河間水素ガスが存在している兆候を、ライマン α 線の減衰翼の中に発見した。ガンマ線バーストで初めて銀河間中性水素の兆候が得られたもので、 $z = 6$ の宇宙はまだ完全に再電離が終わっていないことを示唆する [8, 21, 25]。

高速電波バーストの理論モデルの提唱 (戸谷)

2013年、Fast Radio Burst (FRB) と呼ばれる、継続時間わずか 1 msec で宇宙論的な遠方からやってきている新種の変動天体が発見された。戸谷は、この FRB が、連星中性子星の合体でうまく説明できるという理論を提唱した [3, 21, 26]。

新しいフィードバックを考慮した宇宙論的銀河形成モデル (戸谷)

戸谷は、国立天文台 PD の真喜屋龍らとの共同研究で、宇宙論的な銀河形成モデルに、銀河の平均的な dust opacity に依存する新しいフィードバックを入れて、銀河の光度関数の進化などを調べた。その結果、超新星のみのフィードバックを考慮した従来のモデルでは説明できなかった光度関数の faint end slope の傾きが、うまく説明できることがわかった [1, 6, 18]。

すばる望遠鏡による遠方 Ia 型超新星発生頻度の研究 (戸谷)

戸谷は、京大 D3 の奥村純らとの共同研究で、すばる XMM-Newton Deep Survey で発見された遠方 Ia 型超新星のデータから、 $z \sim 1$ での発生頻度を測定した。この赤方偏移では最も統計の大きいサンプルである [7]。

2.2 銀河系及び近傍矮小銀河

r-過程元素の起源としての中性子星合体 (茂山)

継続時間の短いガンマ線バーストから r-過程元素が大量に放出されることを示唆する観測に端を発した研究。国立天文台の辻本拓司との共同研究。継続時間の短いガンマ線バーストは中性子星合体から生じるジェットからの放射と考えられている。中性子星合体は非常に稀な現象であるから、中性子星合体が主

要な r-過程元素の起源とすると星の数の極端に少ない矮小銀河では超新星によって鉄の含有量が増えても r-過程元素は全く増えないことが予想される。実際、非常に暗い矮小銀河の星の分光観測によって得られたこれらの元素の組成を調べてみると鉄の含有量には色々あるのに対し r-過程元素の 1 つであるユーロピウムはほぼ一定の含有量を持っていることがわかった。また、中性子星合体の数値計算から、r-過程元素は光速の 10% 以上の速さで放出される。我々はこの速さの粒子は stopping length が長いので銀河全体に行き渡り薄まるのに対し、超新星から放出される鉄は速度がせいぜい毎秒数千 km なので 100 pc 以内の星間物質としか混ざらないことを考慮して、次世代の恒星の組成を簡素化したモデルで計算して銀河系ハローの観測と比較したところよく再現できることを示した [14, 30]。

2.3 新星

MAXI が発見した特異な新星の理論モデル (大谷、茂山)

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。通常的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的新星の 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、特異なスペクトルも非常に高速な新星風中にある Ne XI イオンによる共鳴散乱によって再現できることを D1 の大谷友香理の数値計算によって示した。理化学研究所研究員の森井幹雄氏との共同研究 [15, 19, 28, 32]。

2.4 超新星

Ia 型超新星での伴星の影響と水素の吸収線 (茂山)

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調べた。輻射流体力学計算で得られたモデルをもとに京大の前田啓一がモンテカルロ法でスペクトルの時間変化を詳細に計算した。最近観測された超

新星に計算結果と良く似た形の光度曲線を持つものが現れたので、より詳細に伴星との衝突が放射に及ぼす影響を調べる予定。

重力レンズを用いた遠方銀河での超新星残骸観測 (茂山)

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 [16]。

マグネターからのエネルギーで駆動される超新星 (坪木、茂山)

重力崩壊直後に形成される中性子星がマグネターの様な超強磁場を持っていたと仮定し、そこからの磁気双極子放射で爆発が駆動されるか否かを調べている。その爆発の特徴が観測される超新星に似たものになるのかも調べる [24, 31]。

2.4.1 ガンマ線バースト

衝撃波面での熱的放射とコンプトン散乱による非熱的放射形成 (大谷、茂山)

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のスペクトルの時間変化を解析した結果を The Astrophysical Journal に発表した。現在は衝撃波が濃い星周物質内を伝播するときに放射される光子のスペクトル変化を解析中。京大で学振特別研究員をしている鈴木昭宏との共同研究 [11, 27, 29]。

ガンマ線バーストの新しい分類方法と相似則 (筒井、茂山)

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 (Ep) 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が2つの種族に分けることができたが、それは中心エンジンの違いを表している可能性を指摘した。即時放射の減衰のしかたが時間の二乗に反比例する種族の中心エンジンはマグネターであると指摘した [10, 12, 23]。

中性子星の冷却 (茂山)

中性子星の冷却に磁場が及ぼす影響を2次元輻射輸送計算で調べた研究。福岡大学の固武慶、千葉工業大学の安武伸俊との共同研究 [13]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M.A.R., Makiya, R., Niino, Y., & Totani, T. 2013, “Extragalactic Background Light from Hierarchical Galaxy Formation: Gamma-Ray Attenuation up to the Epoch of Cosmic Reionization and the First Stars”, *Astrophys. J.*, 768, 197.
- [2] Kataoka, J., Tahara, M., Totani, T., Sofue, Y., Stawarz, L., Takahashi, Y., Takeuchi, Y., Tsunemi, H., Kimura, M., Takei, Y., Cheung, C. C., Inoue, Y., Nakamori, T. 2013, “Suzaku Observations of the Diffuse X-Ray Emission across the Fermi Bubbles’ Edges”, *Astrophys. J.*, 779, 57.
- [3] Totani, T. 2013, “Cosmological Fast Radio Bursts from Binary Neutron Star Mergers”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, L12.
- [4] Takahashi, Y.; Kataoka, J.; Niinuma, K.; Honma, M.; Inoue, Y.; Totani, T.; Inoue, S.; Nakamori, T.; Maeda, K. 2013, “X-Ray and Radio Follow-up Observations of High-redshift Blazar Candidates in the Fermi-LAT Unassociated Source Population”, *Astrophys. J.*, 773, 36.
- [5] Okada, Hiroyuki; Totani, Tomonori; Tsujikawa, Shinji, 2013, “Constraints on f(R) theory and Galileons from the latest data of galaxy redshift surveys” *Phys. Rev. D*, 87, 103002.
- [6] Makiya, Ryu; Totani, Tomonori; Kobayashi, Masakazu A. R.; Nagashima, Masahiro; Takeuchi, Tsutomu T., 2014, “Galaxy luminosity function and its cosmological evolution: Testing a new feedback model depending on galaxy-scale dust opacity”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* in press.
- [7] Okumura, Jun E., Ihara, Yutaka, Doi, Mamoru, Morokuma, Tomoki, Pain, Reynald, Totani, Tomonori, Barbary, Kyle, Takanashi, Naohiro, Yasuda, Naoki, Aldering, Greg, Dawson, Kyle, Goldhaber, Gerson, Hook, Isobel, Lidman, Chris, Perlmutter, Saul, Spadafora, Anthony, Suzuki, Nao, Wang, Lifan, 2014, “The Type Ia supernovae rate with Subaru/XMM-Newton Deep Survey”, *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [8] Totani, Tomonori, Aoki, Kentaro, Hattori, Takashi, Kosugi, George, Niino, Yuu, Hashimoto, Tetsuya, Kawai, Nobuyuki, Ohta, Kouji, Sakamoto, Takanori, Yamada, Toru 2014, “Probing Intergalactic Neutral Hydrogen by the Lyman Alpha Red Damping Wing of Gamma-Ray Burst 130606A Afterglow Spectrum at $z = 5.913$ ”, *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [9] Tonegawa, Motonari, Totani, Tomonori, Akiyama, Masayuki, Dalton, Gavin, Glazebrook, Karl, Iwamuro, Fumihide, Sumiyoshi, Masanao, Tamura, Naoyuki, Yabe, Kiyoto, Coupon, Jean, Goto, Tomotsugu, Spitler, Lee R. 2014, “A Study of Selection Methods for H alpha Emitting Galaxies at $z = 1.3$ for the Subaru/FMOS Galaxy Redshift Survey for Cosmology (FastSound)”, *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [10] Ryo Tsutsui & Toshikazu Shigeyama, “Universal scaling law in long gamma-ray bursts”, 2013, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, No. 3, Article No.L3.
- [11] Ohtani, Yukari, Suzuki, Akihiro, & Shigeyama, Toshikazu “Generation of High-energy Photons at Ultra-relativistic Shock Breakout in Supernovae”, 2013, *Astrophys. J.*, 777, 113.
- [12] Ryo Tsutsui & Toshikazu Shigeyama, “On the subclasses in Swift long gamma-ray bursts: A clue to different central engines”, 2014, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, No. 2, Article No.42.
- [13] Yasutake, Nobutoshi, Kotake, Kei, Kutsuna, Masamichi, & Shigeyama, Toshikazu “An investigation into surface temperature distributions of high-magnetic-field pulsars”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, No. 2, Article No. 50 (2014).
- [14] Tsujimoto, Takuji, & Shigeyama, Toshikazu, “Enrichment history of r-process elements shaped by a merger of neutron star pairs”, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 565, id.L5 (2014).
- [15] Ohtani, Yukari; Morii, Mikio; Shigeyama, Toshikazu, “Origin of Ne Emission Line of Very Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744”, *Astrophys. J.*, 787, Issue 2, article id. 165. (2014).

(会議抄録)

- [16] Hamano, Satoshi; Kobayashi, Naoto; Kondo, Sohei; Tsujimoto, Takuji; Okoshi, Katsuya; & Shigeyama, Toshikazu, “Type-Ia SNR at $z=3.5$ seen in the three lines of sight toward the gravitationally lensed QSO B1422+231”, *AIP Conference Proceedings*, Volume 1594, Issue 1, p.117-122.

(国内雑誌)

- [17] 茂山俊和、「スーパーコンピューターで銀河を作るには」“Theoretical Challenges in understanding galaxy evolution”, Jeremiah P. Ostriker and Thorsten Naab 著の翻訳、パリティ、第 28 巻第 8 号 (丸善)、p.4、2013 年 8 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [18] Totani, T.; “Physics of Infrared Spectral Energy Distribution of Galaxies, and Its Implications for Cosmological Galaxy Formation”, in the workshop “Astronomy and Astrophysics from ALMA”, Santiago, Chile, 2013 Nov. 7.
- [19] Yukari Ohtani, Mikio Morii, Toshikazu Shigeyama, “Origin of Ne Emission Line of Peculiar Nova MAXI J0158-744”, Suzaku-MAXI, Matsuyama, Japan, February, 2014 (Poster).

招待講演

- [20] Totani, T.; “FastSound: Testing modified gravity by redshift-space distortion beyond $z=1$ ” in the conference “Return of de Sitter II” at MPA, Munich, Germany, 2013 Oct. 16.
- [21] Totani, T. “Probing reionization with GRB 130606A / Fast Radio Bursts and Binary Neutron Star Mergers”, at 2nd Symposium - New Development in Astrophysics through Multimessenger Observations of Gravitational Wave Sources, Jan 13-15, 2014, Tokyo Tech, Ookayama, Tokyo.

(国内会議)

一般講演

- [22] 戸谷友則: 「FastSound から SWIMS へ?」 TAO/SWIMS サイエンスワークショップ、2013/8/5、東京大学天文学教育研究センター
- [23] 筒井亮: “How to divide long gamma-ray bursts into subclasses according to their engines”, マグネター研究交流会、理化学研究所仁科ホール、2013 年 12 月 13 日
- [24] 茂山俊和: “Magnetar driven supernova?” マグネター研究交流会、理化学研究所仁科ホール、2013 年 12 月 13 日
- [25] 戸谷友則: 「GRB 130606A 可視残光から得られた宇宙再電離への示唆」初代星・初代銀河研究会、鹿児島大学、平成 26 年 1 月 22-24 日
- [26] 戸谷友則: “Fast Radio Bursts and Binary Neutron Star Mergers2” 研究会「宇宙における粒子加速と電波帯域での突発現象」東京大学柏キャンパス・柏図書館、平成 26 年 3 月 10 日

日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学 2013/9/10-12

- [27] 大谷友香理、鈴木昭宏、茂山俊和、「重力崩壊型超新星で発生する相対論的 shock breakout の理論的研究」、2013 年日本天文学会秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 日 (口頭)、K10a

- [28] 大谷友香理、森井幹雄、茂山俊和、「軟 X 線源 MAXI J0158-744 における Ne 輝線の起源」、2013 年日本天文学会秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 日 (ポスター)、J217b

- [29] 茂山俊和、筒井亮、「相対論的火の玉モデルからの放射の時間変化とガンマ線バースト」、2013 年日本天文学会秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 日 (口頭)、J203a

日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学
2014/3/19-22

- [30] 辻本拓司、茂山俊和、「連星中性子星合体シナリオに基づく r プロセス元素の化学進化」、2014 年日本天文学会春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 20 日、(口頭)、A21a

- [31] 坪木曜一郎、茂山俊和、「時間依存エネルギー流入による爆発に関する自己相似解」、2014 年日本天文学会春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 20 日、(口頭)、K07a

- [32] 大谷友香理、森井幹雄、茂山俊和、「軟 X 線源 MAXI J0158-744 から強い NeIX 輝線の起源」、2014 年日本天文学会春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 22 日、(口頭)、J224a

(セミナー)

(新聞記者発表)

- [33] 戸谷友則、他: 「史上最遠方の宇宙立体地図が完成、ダークエネルギーの謎に迫る研究が進行中」、2013 年 8 月 7 日、国立天文台

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

重力レンズで探る $z \sim 7-8$ 銀河の性質

大栗真宗 (物理学専攻)、石垣真史、大内正己 (宇宙線研究所) との共同研究。

我々は、重力レンズ効果を受けた銀河の撮像データから、その銀河の真の明るさとサイズを求めるコードを構築した。レンズされた銀河の画像に最もよく合う真の等級と有効半径を、暗い銀河の測光において避けて通れない系統誤差も考慮して推定するというものである。続いて、このコードを、Hubble Frontier Fields の6つの銀河団のうち現時点で完了している Abell 2744 の近赤外の撮像データに適用し、過去の HUDF12 のサンプルと合わせて、 $z \sim 7-8$ 銀河のサンプル数を倍増させることに成功した。今後は、このサンプルを用いて、銀河のサイズ-光度関係、色、星形成活動の解析に加えて、銀河とダークハローとの関係などの新たな視点も持ち込んで、これらの最遠方銀河の性質に迫っていく予定である。

$z = 5.7$ の原始銀河団の性質

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研究している。本年は、 $z = 5.7$ という早期宇宙の原始銀河団でも銀河団環境が銀河の性質に影響を及ぼすのかどうかを探るために、すばる望遠鏡の可視のデータと Spitzer 望遠鏡の中間赤外のデータを組み合わせて、原始銀河団の内外での銀河の性質を調べた。個々の銀河は非常に暗いので、まずは銀河団内外の銀河をそれぞれ足し合わせて平均の測光的性質を導出した。今後は星形成率等の物理量を求め、違いの有無を議論するつもりである。

Subaru/FMOS による $z \sim 2$ の小質量星形成銀河の電離状態と重元素量探査

大内正己、小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所) らとの共同研究。

我々のこれまでの研究で Ly α 輝線銀河の高電離・低重元素量が示唆されたが、そのサンプルは未だ小さい。我々はより大きな分光サンプルを構築し、多様な性質を持つ銀河に対して重元素量や電離状態を推定する目的で、すばる望遠鏡の近赤外ファイバ-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約 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、既に約 50 個もの $z \sim 2$ LAE から [OIII]5007 輝線の有意な検出に成功している。一部のサンプルを用いた加算平均スペクトルからは、[OII] や H β といった輝線の同定もできた。今後は、得られた巨大分光サンプルを質量や星形成活動、Ly α 輝線強度などの違いでサブサンプルに分け、電離状態や重元素量を調べることで、遠方宇宙における質量-星形成率-重元素量-電離パラメーター関係を確立し、また未だ謎の多い Ly α 輝線銀河の性質解明に挑む。

Keck/MOSFIRE による銀河からの電離光子脱出メカニズムの解明

大内正己、小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所)、井上昭雄 (大阪産業大学)、岩田生、松田有一 (国立天文台) らとの共同研究。

我々はこれまでの研究で、電離光子の脱出率が高い天体は電離パラメーターが特に高く観測される可能性を示唆した。この可能性を直接検証すべく、米国 Keck 望遠鏡に新たに搭載された高性能近赤外多天体分光器 MOSFIRE を用いた遠方銀河の近赤外分光観測プロジェクトを始めている。その最初の観測は 2013 年 10 月に行われ、[OIII] や H β 輝線の検出に成功した。引き続き行う観測を通じて得られる静止系可視輝線スペクトルを精査することで、銀河から電離光子が漏れ出るその物理的起源の解明に挑む。

Ly α 輻射輸送モデルを利用した Ly α Emitters (LAEs) の総合的な理解

大内、小野、澁谷 (宇宙線研究所)、A. Verhamme、D. Schaerer (Observatory of Geneva)、M. Rauch (OCIW) との共同研究。

LAEs は測光研究から若くて小質量銀河であることが分かっており、銀河進化の初期段階を表す天体として重要である。しかし連続光で非常に暗いことから、その性質理解は不十分である。特に LAEs が強い Ly α 輝線を放射する機構は興味深く、様々な研究が銀河のダスト量やアウトフローと Ly α 輝線強度の関係性を調べているが、依然として LAEs における

$\text{Ly}\alpha$ 放射機構の決着はついていない。多くの理論モデルは $\text{Ly}\alpha$ 輝線放射と銀河の中性水素量に非常に強い相関があることを予想しているが、観測から直接調べることができない。そこで本研究では、銀河の中性水素量、ダスト量、アウトフロー速度などをパラメータとして持つ $\text{Ly}\alpha$ 輻射輸送モデルを利用し、LAEs の中性水素量を調べた。モデルを適用した天体は、Hashimoto et al. (2013)、Shibuya et al. (2014b) で $\text{Ly}\alpha$ 輝線および nebular line を分光検出した 12 天体である。現在はモデルから得られたパラメータの妥当性を検証しており、今後は LAEs の中性水素量をはじめとした、通常観測から直接調べることのできない物理量について調べ、過去に私たちが観測から調べた性質 (Nakajima et al. 2013, Nakajima & Ouchi 2013, Shibuya et al. 2014a) と併せ、LAEs が強く $\text{Ly}\alpha$ を放射する機構を含めた総合的な理解を目指す。

$z = 2.2$ $\text{Ly}\alpha$ Emitters (LAEs) 大サンプルを利用した非常に強い $\text{Ly}\alpha$ 輝線を放射する天体の完全同定およびその性質の解明

大内、小野、澁谷 (宇宙線研究所)、M. Rauch (OCIW) との共同研究。

$\text{Ly}\alpha$ 輝線の等価幅 ($\text{EW}(\text{Ly}\alpha)$) は銀河の初期質量関数 (IMF)、銀河の星年齢、銀河の金属量などに依存することが分かっている。具体的には銀河が重い天体を多く作る top-heavy IMF、銀河進化の初期段階、小さな金属量を持つ場合に EW が大きくなり、通常の銀河進化では EW は最大 240 \AA 程度になると考えられている。過去の観測研究では、この値を越えた銀河進化の非常に若い段階にある可能性がある天体の報告例がある。しかしながら、 EW を計算する際にいくつか簡単な仮定を置いている問題や、これら EW の大きい天体は UV 連続光で暗いために EW のエラーが非常に大きい問題があった。そこで我々は、 $z \sim 2$ の世界最大の LAE サンプルを用い、かつ分光観測結果を用いていくつかの仮定に強い制限を加え、改めて EW を計算した。この結果、高い信頼度で $\text{EW} \sim 240 \text{ \AA}$ 天体を 4 天体発見した。現在はこれら天体の性質を測光および分光結果を用い詳細に調べている。

$z = 2.2$ $\text{Ly}\alpha$ emitters (LAEs) のダークハローの研究

大内正己、小野宜昭 (宇宙線研究所)、小林正和 (愛媛大学) らとの共同研究。

Subaru/XMM-Newton Deep Field の Lyman alpha emitters(LAEs) のクラスタリング強度を測定し、理論予測と比較することで、平均ダークハロー質量を推定した。LAEs のダークハロー質量は、星質量と同様に同時代のどの銀河種族よりも小さいことがわかった。更に、SED の特徴別にダークハロー質量の依存

性を調べたところ、ダークハロー質量が Lyman alpha luminosity に強く依存することがわかった。この結果を準解析モデルと合わせて解釈すると、軽いダークハローは burst モード、重いダークハローは quiescent モードという、それぞれが異なる星形成モードに従っている可能性があることがわかった [19]。

$z \sim 2$ の $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) のダスト放射の性質

銀河のダスト吸収量や星形成率を正確に求めるには、ダストからの赤外放射を測定することが不可欠である。我々は、The Great Observatories Origins Deep Survey South Field (GOODSS) において、我々が得た $z \sim 2$ の LAE サンプル (213 銀河) に対して、Herschel/PACS と Spitzer/MIPS の深い公開データのスタッキング解析を行なうことで、平均的な LAEs の赤外光度に初めて強い制限を与えた。MIPS $24\mu\text{m}$ 、PACS 70、100、 $160\mu\text{m}$ のどのスタック画像でも非検出であったことから、LAEs の赤外光度は大変弱いことが分かった。赤外光度に対して最も厳しい上限値を与える MIPS $24\mu\text{m}$ の結果から、ダストに隠された星形成率は、静止系紫外光度から推定される星形成率と同程度かそれ以下であること、同時代の他の銀河に比べて $\text{Ly}\alpha$ 光子の脱出率が高いことなどが分かった。本研究は、ダスト放射を観測することがより困難な更に遠方の LAEs への応用や、 $\text{Ly}\alpha$ の輻射輸送の理論モデルの議論にも有用である。今後は公開されている多波長データを有効に使うことで、より詳細な研究を進めていくつもりである。

近傍-遠方銀河の星間物質の電離状態の系統的研究

大内正己 (東京大学宇宙線研究所) との共同研究。

銀河の星間物質の物理状態を理解することは銀河進化を探る上で欠かせない。特に、気相の重元素量と電離パラメータは重要な性質である。電離パラメータとは、HII 領域における電離光子の水素原子に対する個数比である。電離パラメータは重元素とともに HII 領域から放射される輝線スペクトルに大きな影響を与えるのだが、その研究は十分に進んでいない。そこで我々は、 $z \sim 0$ から 3 の銀河に対して電離パラメータと重元素量の系統的研究を行った。観測から得られた $[\text{OIII}]/5007/[\text{OII}]/3727$ 比と R23-index を光電離モデルと比較して電離パラメータと重元素量を求めた。その結果、遠方銀河ほど典型的に高い電離パラメータを持つ傾向を明らかにした。また銀河の質量や星形成率に着目したところ、小質量・高星形成率の銀河ほど高電離パラメータ・低重元素量を持つことがわかった。興味深いことに、この質量-星形成率-重元素量-電離パラメータの関係は赤方偏移によらない普遍的な関係であることが示唆された。これは、重元素量が $z \sim 2$ と 3 の間で急激に進化したと示唆する過去の

研究 (Fundamental Metallicity Relation; Mannucci et al. 2010) とは対照的である。我々はこの進化に関して、遠方銀河ほど高い電離パラメーターを持つ傾向を考慮に入れずに重元素量が求められたために生じた可能性があることを明らかにした。更に我々は電離パラメーターを精査し、その値が大きい銀河は電離光子の脱出率が高い天体である可能性を観測的・理論的に明らかにした。特に高い電離パラメーターが観測されている Ly α 輝線銀河は、若い銀河である可能性に加え、高い電離光子脱出率を持ち宇宙再電離に大きく寄与した可能性が示唆される [16]。

変化する星の初期質量関数が銀河の質量関数に与える影響の研究

S. McGee (Leiden)、M. Balogh (Waterloo) らとの共同研究。

銀河の速度分散や金属量に応じて、星の初期質量関数 (IMF) の傾きが系統的に変化するという観測的研究が多数報告されている。これを受けて、我々は SDSS 銀河カタログの回転速度 (速度分散) に応じて、異なる IMF を与えることで、銀河の星質量を推定し、星質量関数への影響を調べた。得られた銀河の星質量関数は、特に massive end でパワーロー型となり、IMF を Chabrier IMF に固定した場合に比べて重い銀河が多く存在することがわかった。これは AGN フィードバックなどの重い銀河に有効な星形成抑制機構が従来考えられていたよりも弱いことを示唆している可能性がある [12]。

近傍銀河に出現した重力崩壊型超新星の環境の研究

H. Kuncarayakti (チリ大学)、有本・白田 (国立天文台)、前田 (京都大学)、G. Aldering (LBNL)、R. Pereir (Institut de Physique Nuclaire de Lyon) らとの共同研究。

近傍銀河の重力崩壊型超新星出現位置付近にある若い星団の可視面分光・狭帯域撮像等を行い、星団の年齢などから、超新星の親星生成後の年齢に制限を与えることを試みた。具体的には、面分光観測においては、ハワイ大学 2.2m 望遠鏡の SNIFS 分光器や GEMINI-N 望遠鏡の GMOS 分光器による 27 個の超新星の出現位置付近の分光撮像データを用い、周辺の恒星集団が一度に生まれたと思ったときに予想される輝線や吸収線と連続光の比率などから、恒星集団の年齢を推定し、初期質量に換算した。その結果、Ic 型超新星が最も大質量かつ高金属量の星団の環境に出現している可能性を指摘した。一方で、比較的小質量でおそらくは連星系をなす Ib 型・Ic 型超新星の親星の存在可能性も示唆する結果を得た。また一部の II 型超新星の親星は連星をなさない Ib 型や Ic 型の親星と同程度に質量が大きい可能性を指摘した。これらの結果を 2 編の査読論文として The Astronomical Journal に発表した [7, 8]。

SDSS-II および SNLS 超新星サーベイからの宇宙モデルへの新制限

M. Betoule (LPNHE)、R. Kessler (シカゴ大)、R. Guy (LBNL) らとの共同研究。

カナダフランスハワイ望遠鏡 (CFHT) による Supernova Legacy Survey (SNLS) の 3 年間の超新星と Solan Digital Sky Survey II (SDSS-II) の超新星のうち、分光データのある 740 個の Ia 型超新星を用い宇宙モデルの制限を新たに求めた。特に SNLS の測光および較正を丁寧にやりなおし、また SDSS の Stripe82 領域の測光の系統誤差を修正することで、以前の同様のデータを使った結果に比べ宇宙モデルについて 1.8 σ の変化がみられた。求められた値は、例えばダークエネルギーの性質をあらわす w で表現すると、超新星のみで $w = -1.018 \pm 0.057$ 、バリオン音響振動の観測結果とあわせて $w = -1.027 \pm 0.055$ であり、投稿の時点で過去最も厳しい制限を与えている [15]。

SDSS クエーサー可視-紫外域スペクトル変動の統計的性質

川口 (山口大学)、鮫島 (ISAS/JAXA)、越田 (カリフォルニア大学) らとの共同研究。

クエーサーの静止系紫外-可視域におけるスペクトルの時間変動の説明として、標準降着円盤において大域的質量降着率が時間変化することによって光度変動が生じている、とする説が提唱されている (標準降着円盤 + 質量降着率変化モデル; e.g., Pereyra et al. 2006)。我々は SDSS の Stripe82 領域に含まれる約 9000 個のクエーサーの多バンド光度曲線を用いて、この「標準降着円盤 + 質量降着率変化モデル」の妥当性を定量的に検証した。Flux-flux 相関法 (Choloniewski 1981) を用いてモデルと比較した結果、短波長側の光度変動振幅がモデル予言値よりも系統的に大きいことが分かった。また、スペクトル変動と降着円盤温度パラメータ T^* の間に有意な相関は見られなかった。これらのことから「標準降着円盤 + 質量降着率変化モデル」ではクエーサーの紫外-可視域スペクトル変動は説明できないという結論を得た [13]。

可視光ファブリペロー分光撮像装置 LISS の開発

H. Kuncarayakti (チリ大学)、渡辺 (北海道大学) らとの共同研究。

液晶型エタロンと低分散グリズムを用いた可視光狭帯域撮像分光装置 LISS (Line Imager and Slit Spectrograph) の開発を進めた。LISS は完全空乏層型の浜松ホトニクス社の $2k \times 1k$ CCD を検出器に採用し、長波長側の高感度と、エタロンによる狭帯域撮像性能を活かした銀河・超新星・クエーサーなどの観測研究を目的としている。2012 年 10 月に北海道大学ピリカ望遠鏡でファブリペローモードの立ち上

げを行っていたが、本年度は、新たに低分散グリズム (R~100)、スリット、スリットビューワーを搭載し、分光モードの立ち上げを行った。試験観測は、2013年7月に約2週間、北海道大学ピリカ望遠鏡を用いて実施し、分光モードの動作を確認した。また、今後の科学的観測に向けて、明るいくエーサー SDSS J1733+5400 のスペクトルの取得に成功した。ファブリペローモードでは、惑星状星雲 M57 を対象に、 $H\alpha$ 、 $[NII]\lambda 658.3$ nm、 $[SII]\lambda\lambda 671.6, 673.1$ nm、 $[SIII]\lambda 906.9$ nm 輝線を波長をスキャンして撮像観測に成功した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] 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.
- [2] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., Makishima, K. 2013, “Search for galaxy-ICM interaction in rich clusters of galaxies”, *Astronomische Nachrichten*, **334**, 453–457.
- [3] 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.*, **767**, 157 (30pp).
- [4] 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.*, **769**, 3 (18pp).
- [5] Jiang, L., Egami, E., Mechtley, M., Fan, X., Cohen, S. H., Windhorst, R. A., Dave, R., Finlator, K., Kashikawa, N., Ouchi, M., Shimasaku, K. 2013 “Physical Properties of Spectroscopically Confirmed Galaxies at $z \geq 6$. I. Basic Characteristics of the Rest-frame UV Continuum and Ly α Emission”, *Astrophys. J.*, **772**, 99 (20pp).
- [6] Jiang, L., Egami, E., Fan, X., Windhorst, R. A., Cohen, S. H., Dave, R., Finlator, K., Kashikawa, N., Mechtley, M., Ouchi, M., Shimasaku, K. 2013 “Physical Properties of Spectroscopically Confirmed Galaxies at $z \geq 6$. II. Morphology of the Rest-frame UV Continuum and Ly α Emission”, *Astrophys. J.*, **773**, 153 (14pp).
- [7] Kuncarayakti, H., Doi, M., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., Hashiba, Y., 2013, “Integral Field Spectroscopy of Supernova Explosion Sites: Constraining the Mass and Metallicity of the Progenitors. I. Type Ib and Ic Supernovae”, *Astron. J.*, **146**, 30, (14 pp).
- [8] Kuncarayakti, H., Doi, M., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., Hashiba, Y., 2013, “Integral Field Spectroscopy of Supernova Explosion Sites: Constraining the Mass and Metallicity of the Progenitors. II. Type II-P and II-L Supernovae”, *Astron. J.*, **146**, 31, (14 pp).
- [9] Ono, Y. et al. (17 authors including K. Shimasaku) 2013, “Evolution of the Sizes of Galaxies over $7 < z < 12$ Revealed by the 2012 Hubble Ultra Deep Field Campaign”, *Astrophys. J.*, **777**, 155 (13pp).
- [10] Ouchi, M. et al. (13 authors including K. Shimasaku) 2013, “An Intensely Star-forming Galaxy at $z \sim 7$ with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations”, *Astrophys. J.*, **778**, 102 (12pp).
- [11] Yuma, S., Ouchi, M., Drake, A. B., Simpson, C., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., Momose, R., Akiyama, M., Mori, M., Umemura, M. 2013, “First Systematic Search for Oxygen-line Blobs at High Redshift: Uncovering AGN Feedback and Star Formation Quenching”, *Astrophys. J.*, **779**, 53 (12pp).
- [12] McGee, S. L., Goto, R., Balogh, M. L., 2014, “The stellar mass function and efficiency of galaxy formation with a varying initial mass function”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **438**, 3188–3204.
- [13] Kokubo, M., Morokuma, T., Minezaki, T., Doi, M., Kawaguchi, T., Sameshima, H., Koshida, S., 2014, “Statistical Properties of Multi-epoch Spectral Variability of SDSS Stripe 82 Quasars”, *Astrophys. J.*, **783**, 46 (20pp).
- [14] Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Yuma, S., Hashimoto, T., Shimasaku, K., Mori, M., Umemura, M. 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly α Emission? I. Demographics of Ly α Emitter Structures”, *Astrophys. J.*, **785**, 64 (12pp).
- [15] Betoule, M., (63 authors including Doi, M.), “Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples”, *A&A*, in press.
- [16] Nakajima, K., Ouchi, M. 2014, “Ionization State of Inter-Stellar Medium in Galaxies: Evolution, SFR- M_* -Z Dependence, and Ionizing Photon Escape”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, in press.
- [17] Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Hashimoto, T., Ono, Y., Rauch, M., Gauthier, J.-R., Shimasaku, K., Goto, R., Mori, M., Umemura, M. “What is the physical origin of strong Ly α emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Ly α Emitters”, *Astrophys. J.*, in press.

(学位論文)

- [18] 小久保充 “Statistical Properties of Multi-epoch Spectral Variability of SDSS Stripe 82 Quasars ” (修士論文)

[19] 後藤亮介 「 $z \sim 2$ のライマンアルファ輝線銀河のクラスタリングの性質」 (修士論文)

[20] Kimihiko Nakajima “The Chemical Evolution and Ionization State of Star-Forming Galaxies” (博士論文)

(国際会議)

一般講演

[21] Shimasaku, K. “Clustering of High- z Galaxies Based on HSC SSP Data”, Quasar science with HSC: Toward the first results, Taipei, Taiwan, 2014/1/14–16.

[22] Nakajima, K., Ouchi, M., Shimasaku, K., Hashimoto, T., Ono, Y., Lee, J. C. “First Spectroscopic Evidence for High Ionization State and Low Oxygen Abundance in Ly α Emitters”, Lyman Alpha as an Astrophysical Tool, Stockholm, Sweden, 2013/09/02–17.

[23] Hashimoto, T., Ouchi, M., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., & Rauch, M.: “Ly α radiation mechanism of Ly α emitters and its implications for re-ionization”: Lyman Alpha as an Astrophysical Tool, Stockholm, Sweden, 2013/09/02–17.

[24] Kokubo, M., Morokuma, T., Minezaki, T., Doi, M., Kawaguchi, T., Sameshima, H., Koshida, S.: “Long Term Color Variability of SDSS Quasars”: EAST-ASIA AGN WORKSHOP 2013, Sapporo, Japan, 2013/08/20-23.

(国内会議)

一般講演

日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学
(2013/09/10–12)

[25] 小久保充、土居守、諸隈智貴、峰崎岳夫、吉井譲、川口俊宏、越田進太郎、鮫島寛明、小林行泰: SDSS quasar の可視紫外域光度変動の統計的性質、S20b

日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学
(2014/03/19–22)

[26] 中島王彦、大内正己: 近傍–遠方銀河の電離状態の統計的研究、X23a

[27] 後藤亮介、Sean McGee (Leiden)、Michael Balogh (Waterloo): The stellar mass function and efficiency of galaxy formation with a varying initial mass function、X03b

[28] 後藤亮介、嶋作一大、大内正己、中島王彦、小野宜昭、日下部晴香: Bridging Lyman alpha emitters and Hosting Dark Haloes at $z \sim 2$ 、X21a

[29] 川俣良太、石垣真史、大栗真宗、嶋作一大、大内正己: 重力レンズで探る再電離期の銀河の性質、X15b

[30] 小久保充、橋場康人、土居守、酒向重行、諸隈智貴、満田和真、Hanindy Kuncarayakti、渡辺誠、中尾光: 可視光ファブリ・ペロー分光撮像装置 LISS の開発: 低分散グリズム分光モードの追加立ち上げ、S20b

(その他)

集中講義

[31] 土居守 “Galaxies and Cosmology”, International School for Young Astronomers (ISYA) 2013, Bandung Institute of Technology

一般講演

[32] 嶋作一大: 「銀河宇宙と私たち」、文京区子ども科学カレッジ、文京区教育センター、2013/6/15

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 星形成から惑星系形成に至る物質進化の探究

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。本サブプロジェクトでは、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。本サブプロジェクトでは、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。本サブプロジェクトでは、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。本サブプロジェクトは、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進めている。

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。さらに重要なことは、このような分子組成の違いがどのように惑星系へ伝播されるかである。本サブプロジェクトでは、これらの点を中心に、ALMA などの先端的観測装置を用いて幅広い研究を進めている。

【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】 ALMA を用いて、おうし座分子雲にある原始星 L1527 の高感度・高空間分解能観測を行い、惑星系円盤が形成される様子を調べた。いくつかの分子のスペクトル線観測から、中心星から半径 100 AU の位置よりも内側で、炭素鎖分子やその仲間の分子が急激にガス中からなくなってしまうことを見出した。ドップラー効果の精密な測定から、100 AU という半径は、落ち込んでくるガスが遠心力のために滞留し（遠心力バリア）、惑星系円盤に移り変わっていく半径であることがわかった（図 2、3）。即ち、惑星系円盤形成の「最前線」を同定したといえる。一方、SO 分子の分布を調べたところ、この分子は遠心力バリア付近でリング状に局在していることがわかった。SO 分子の温度が落ち込んでくるガスの温度に比べて高い

星間分子雲から惑星系への物質進化

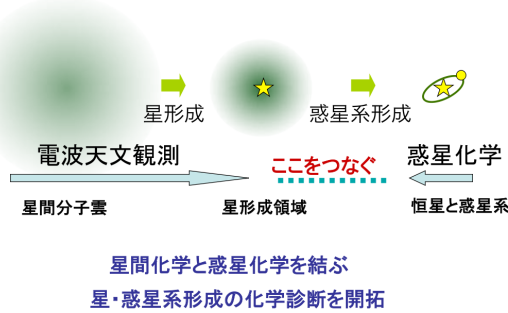


図 4.1: A schematic illustration of our goal

ことから、落ち込むガスが遠心力バリアに突っ込むときに、弱いながらも衝撃波が生じていると考えられる。その結果、ガス中に含まれる塵（星間塵）の表層に凍りついていた SO 分子がガス中に放出され、リングのように観測されたと見られる。惑星系円盤内では密度が非常に高いので、遠心力バリアを通過した後はほとんどの分子が星間塵に凍りついてしまう。円盤形成に伴って激しい化学変化がおこることは予想すらされていないため、惑星系の物質的起源の研究に大きなインパクトを与えた。また、惑星系円盤が周囲のガスから形成される過程の理解は、太陽系の起源の理解にもつながる重要な研究課題であるが、これまで行われてきた、直接、構造や運動を調べる物理的アプローチでは、惑星系円盤と周囲のガスとの区別が難しかった。これに対し、本研究では、構造変化に伴う化学変化に着目したことで、円盤との境界を捉えることに成功した。このような観測は ALMA によって初めて可能になったものであり、今後さらなる発展が期待される。

L1527 の速度場の詳細解析のため、計算機シミュレーションを行った。モデルとして、回転しながら落下するガス円盤を採用した (図 3)。このモデルでは、エネルギーと角運動量の保存則のため、粒子は遠心力バリアより内側には落ち込むことができない。ガスの速度場は、遠心力バリアまでの落下を粒子の運動で近似した。この運動は、中心星の質量と遠心力バリアの位置によって決定される。また、ガスの分布は中心星からの距離の 1.5 乗に反比例するものとし、放射強度の計算は光学的に薄い状態を仮定した。スペクトル線の熱的拡がりや望遠鏡の解像度の効果も取り入れた。このモデルは、ガスの圧力や自己吸収などを無視し単純化したものであるが、図 2 の観測結果をよく再現している。

【低質量原始星 IRAS15398-3359 の高分解能観測】
IRAS 15398-3359 は、おおかみ座にある Class 0 天体であり、L1527 に次ぐ WCCC 天体として知られている。今回、ALMA の初期運用 Cycle 0 の観測において、 H_2CO 、 CCH 、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 、 CH_3OH などの分子が検出され、中心の原始星から北東-南西方向に噴

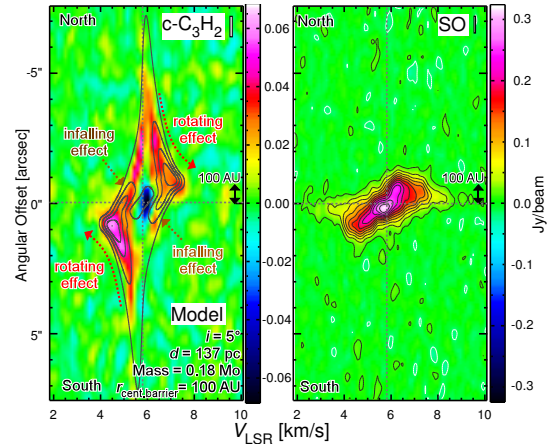
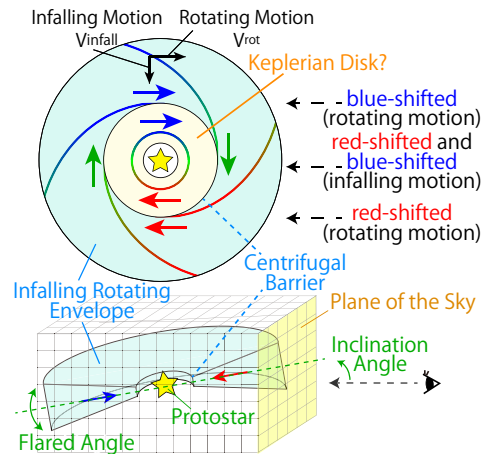
図 4.2: Position-velocity diagrams of $\text{c-C}_3\text{H}_2$ and SO observed toward L1527. Contours in the left panel represent the model simulation.

図 4.3: A model of an infalling rotating envelope

き出すアウトフローの存在が確認された。このアウトフローにおけるガスの速度場の解析から、視線方向に対する天体の傾き角は 20° と推定された。この角度はこれまで 75° と報告されており、face-on であると考えられていたが、今観測によりむしろ edge-on に近いことがわかった。一方、原始星近傍の構造については、今観測の分解能では L1527 のような遠心力バリアは確認されなかった。また edge-on であるにも関わらず、ガスの視線速度の幅は $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ と小さいことがわかった。これらは、この天体では L1527 に比べてガスの比角運動量が小さく、また原始星の質量が低いことを示唆する。実際、L1527 と同じモデルを用いた解析により、原始星の質量は $0.04 M_\odot$ 以下と見積もられた。しかし、原始星の位置では H_2CO の高速度成分が確認されており、遠心力バリア内でケプラー回転するガス円盤の存在が示唆される。以上から、この天体は進化初期の低質量な段階にある

が、既に円盤構造を形成している可能性がある。

【TMC-1 における有機分子の起源】 星間空間で検出される分子の中にはかなり複雑な飽和有機分子 (CH_3CHO 、 HCOOCH_3 、 CH_3OCH_3 など) も含まれている。それらは、主に原始星近傍の温かい領域で検出され、星間塵上で生成したものが星形成に伴う温度上昇で蒸発してきたものと考えられている。しかし、近年の観測研究で、複雑な飽和有機分子は冷たい星なしコアの時代から既に存在していることが明らかになってきた。それらの生成過程を調べるため、化学組成がよく知られている星なしコアである TMC-1 について野辺山 45 m 望遠鏡などで観測を行った。この天体では、気相反応によって生成する炭素鎖分子 C_3S と、星間塵上でのみ生成される CH_3OH のそれぞれのラインプロファイルが大きく異なる。このことを利用して、個々の分子のラインプロファイルを上記の2つのものと比較することで生成過程を調べた。その結果、分子種によって星間塵由来、気相反応由来、その両方に由来するものがあることがわかってきた。これまで気相における飽和有機分子の生成はあまり議論されてこなかったが、その寄与を再考する必要がある。

【 ^{13}C 同位体種の異常存在量比率】 米国立電波天文台の望遠鏡 GBT を用いて、 C_3S 分子と C_4H 分子の ^{13}C 同位体種のスペクトル線を観測し、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率を求めた。その際、 CC^{13}CS のスペクトル線の周波数は不明であったため、FTMW 分光計を用いて分光測定を行い、その回転遷移スペクトル線の周波数を調べた。おうし座分子雲 TMC-1 を観測したところ、3つ (あるいは4つ) の同位体種間で $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率が異なることが明らかになった。このことから、それぞれの分子が星間分子雲中で生成される反応において、分子中の3つ (あるいは4つ) の炭素が非同位であることを示し、その生成過程を絞り込むことができた。また、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率が通常知られている60より有意に高いこともわかった。他の様々な分子での $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率の値を比較することにより、 CO 分子経路ではなく C^+ を起源として分子が生成されると比率が高くなることを示した。これにより、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の測定が分子の生成過程を調べる手段として非常に有効であることがわかった。

【重水素化分子の精密観測】 低温の星間分子雲において、重水素化分子の通常分子に対する存在比 (重水素濃縮度) は分子雲の進化とともに高まるため、進化段階の指標として用いられている。太陽系近傍にある代表的な分子雲中で、重水素濃縮度を正確に求めておくことは、今後の分子雲研究の基礎となる。このような観点から、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、分子雲中で基本的な分子である HCN 、 HNC と、その重水素化物 DCN 、 DNC の基本遷移の観測を行った。高い速度分解能で観測したことで、各スペクトル線の超微細構造を分解して観測することができた。この超微細構造を利用し各分子の励起温度を求めたところ、どの天体でも系統的に DNC の励起温度が他の分子よりも高いことがわかった。これを検証するため、Large Velocity Gradient 法による分子励起計算を行ったところ、上記の結果を説明するには DNC の空間分布が他の分

子よりもコアの中心に集中している必要があることが示された。重水素濃縮度の正確な評価にはこのことを考慮する必要がある。

【星形成領域における重水素濃縮度】 原始星形成に伴う重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551 IRS5、IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度の分布を観測した。原始星形成に伴う温度上昇のため、原始星近傍では重水素濃縮度が減少する。イオン種と中性分子種では減少速度が違い、中性分子種の場合の減少のタイムスケールは 10^5 年程度と予想される。観測の結果、L1551 IRS5 に対しては $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ 比がディスク方向で減少していた。一方で、 DNC/HNC 比も同様に減少していた。L1551 IRS5 の年齢は $(3 - 10) \times 10^4$ 年であるため、イオン種の重水素濃縮だけでなく、中性分子の重水素濃縮度も下がっていると考えられる。一方、L1551 IRS5 (Class I) よりも進化段階の若い原始星、IRAS16293-2422 (Class 0) に対しては、イオン種、中性分子ともに原始星方向での重水素濃縮の減少は見られなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロープの影響が卓越しているためであり、こ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重要と考えられる。

【大質量星形成領域 NGC 2264 ラインサーベイ】 NGC 2264 C 領域はオリオン星雲に次いで太陽系に近い大質量星形成領域である。その中で最も重い CMM3 は、最終的に $8M_{\odot}$ の主系列星に進化すると予測されており、力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随する非常に若い段階の原始星である。これまで我々は CMM3 に対して ASTE 望遠鏡を用いて 330-366 GHz の分子輝線サーベイを実施し、典型的な Hot Core 天体である Orion KL とは違う化学組成を持つことを明らかにしてきた。2013 年度は、国立天文台野辺山 45 m 鏡を用いて、68.0-98.6 GHz 及び 104.4-110.6 GHz のサーベイを実施した (図4)。観測の結果、 DCO^+ 、 DCN 、 DNC 、 NH_2D などの重水素化合物に加え、 C_4H 、 HC_5N 、 C_3S などの炭素鎖分子の輝線を数多く検出した。炭素鎖分子は、分子雲中の化学進化の初期段階で豊富に存在する分子であるので、CMM3 が大質量星形成の初期段階にあることを化学組成の観点からも示す結果である。

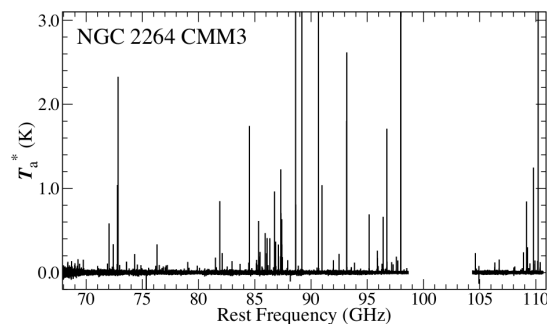


図 4.4: The 3 mm Band Spectrum of NGC2264

【超新星残骸 IC443 のラインサーベイ】 IC 443 はふたご座にある超新星残骸であり、太陽系から 1.5

kpc の距離にある。年齢は 3×10^4 年である。本研究では超新星残骸の高密度クラumpである GI 領域について、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて 78-116 GHz 帯でのスペクトル線サーベイを行った。その結果、14 種類の分子の 44 本のスペクトル線を検出した。CS、HCN、SO、SiO などの基本的分子の他に、この領域で初めて CH_3OH および HC_3N を検出した。 CH_3OH の強度は星形成に伴う分子流で生じた衝撃波領域 L1157B1 と比べて非常に弱く、また CH_3OH 以外の飽和有機分子も検出されなかった。このことは、衝撃波発生以前のこの領域の分子雲が比較的低密度の環境にあり、星間塵マントル上での飽和有機分子生成があまり進行しなかったためと考えられる。

【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】 おうし座の分子雲 HCL2 に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 分子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。HCL2 の東側の希薄な星間雲と HCL2 本体についてストリップスキャン観測で温度分布を調べたところ、いずれも雲の中心部分で温度が下がり、OH 分子の柱密度が上昇することがわかった。分子雲をとりまく希薄な星間雲の温度分布は、分子雲形成の理解につながる重要な知見であり、OH 分子の観測でその測定ができることを示したことは大きな意義がある。

4.1.3 系外銀河の化学組成

系外銀河における化学組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と化学組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の化学組成を議論する場合、力学進化のタイムスケールに比べて化学進化のタイムスケールが短くなり、系内の分子雲コアで議論されてきた化学進化の概念は成立しない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測される化学組成の持つ意味と起源を再考することが、系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本サブプロジェクトでは近傍の円盤銀河や大マゼラン雲に存在する中心核活動性の影響を受けていない分子雲に対して、10 pc-1 kpc スケールの化学組成の観測研究を推進している。

【NGC 3627 における化学組成】 棒渦巻銀河である NGC 3627 のバーエンドに対して、野辺山 45m 鏡を用いて 3 mm 帯の 12 種の分子輝線 (CCH、HNCO、HCN など) の観測を行った。観測したバーエンドは、渦状腕と比較して星形成効率が 5 倍高い領域であり、星形成活動が kpc スケールの分子ガス化学組成に及ぼす影響を探るのに適している。観測の結果、M51 の渦状腕と比較して CS や HCO^+ が増加している一方で、M51 では比較的強い輝線強度で検出できた HNCO は検出されなかった。このような化学組成の違いの原因として、活発な星形成に伴う様々なフィードバックの影響が考えられる。一方で、比較対象が NGC 3627 とは別の銀河であるため、重元素の組成の違いを反映している可能性も否定できない。そこで、単一鏡及び干渉計を用いた NGC 3627 の渦状腕での観測を計画している。

【大マゼラン雲におけるラインサーベイ】 大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud: LMC) は、太陽系の最も近く (48.5 kpc) にある系外銀河であり、重元素量が太陽系近傍の 1/2-1/3 程度であることが知られている。この LMC にある分子雲を対象に、我々は 2013 年 6 月から 10 月にかけて、Mopra 22 m 望遠鏡を用いて 85-116 GHz のラインサーベイを行った。観測対象には、赤外線衛星「あかり」のサーベイ結果をもとに、大質量星形成領域が付随している分子雲と付随していない分子雲の中から HCO^+ 、HCN の強度が最も強い天体である ST2 と CO Peak 1 をそれぞれ選んだ。さらに HII 領域まとった活発な大質量星形成領域 N113 を比較のために観測した。雑音温度が 8mK 程度の高感度観測を行い、3 つの天体において、CO、 ^{13}CO 、CS、 HCO^+ 、SO、HCN、HNC の 7 本の輝線、星形成に伴う ST2 ではさらに、CCH、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 、 N_2H^+ の 3 本の輝線を検出した (図 5)。これらの輝線強度の比を見ると、3 つの天体は星形成活動の規模が異なるにもかかわらず、巨大分子雲サイズ (10 pc) のスケールでは同じ化学組成に見えることがわかった。即ち、このスケールの化学組成には個々の星形成活動の影響は顕著に現れていない。また、3 天体を詳しく比較すると、星形成活動のない CO Peak 1 で CS、SO などの硫黄を含む分子の存在比が、他と比べてやや高い特徴が見られた。その原因としては重元素量の少なさから紫外線放射の影響の可能性と、領域ごとに硫黄の depletion の程度が異なっている可能性が考えられる。

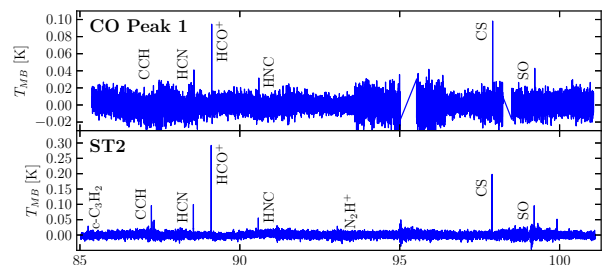


図 4.5: Spectral line survey of two molecular clouds in LMC

4.1.4 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（ヘテロダイナミックサ）の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS ミキ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發揮している。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、本サブプロジェクトでは、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ（HEB）ミキサ素子の開発を行っている。HEB ミキ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、超伝導体をサブマイ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 ミキサ素子の開発研究を進めている。

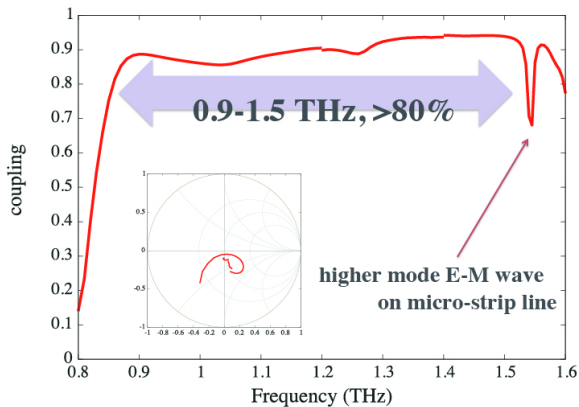


図 4.6: Coupling efficiency of the wide-band waveguide-type HEB mixer

【ワイドバンド導波管ミキサの設計】我々のグループで作成、開発を進めている THz 帯の電波受信機は、望遠鏡への試験搭載・観測を行う段階まで来ている。今後の更なる性能向上として、受信周波数帯域を大幅に広げた新型受信機を開発を進めている。現在の受信機は、ターゲットとしている 0.9 THz、1.3-1.5 THz の観測帯域に対し別々の受信素子を使っている。この周波数帯を単一受信素子でカバーする受信機を開発し、最終的に ASTE に搭載ことを目標としている。本年度、設計した導波管回路、評価光学系とともに HEB 素子の評価系を構築した。今後、この評価系を用いて素子の作成、性能評価を行っていく予

定である。このような設計の受信機を作成・運用することにより、効率よく天体を観測することが可能になる。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。

【2013 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験】我々のグループでは、自作した超伝導ホットエレクトロンポロメータ (HEB) を用いたカートリッジ型 THz 帯受信機を作成し、2011 年度より ASTE 望遠鏡へ搭載・観測実験を行っている。これまでに、0.9 THz 帯における月・木星からの連続波と分子雲からの CO(8-7) の輝線の受信に成功している。今年度は科学観測を目指し、ASTE 望遠鏡への受信機搭載実験を行った。本年度の実験では、受信機立ち上げの際にいくつかのトラブルが発生した。最終的に、デュワー外部から準光学的に入射している基準周波数信号 (LO) の強度が十分に入らず、観測に至ることができなかった。前年度以前にはこの問題は生じておらず、本年度の実験において LO 信号を導入するための光学系の調整になんらかの問題があった可能性が高い。この問題の解決のためには、LO 信号をデュワー側壁窓から導入するのではなく、他の低い周波数向けの受信機と同様にデュワー内部の冷却ステージに設置した周波数通倍器から導入する方法が有効である。これにより、これまでのような受信機搭載後の光学系調整が不要となるため確実に動作させることができる。上記のような手法へと変更するため、受信機カートリッジの改造を行った上で、ASTE 望遠鏡への搭載実験に挑戦する予定である。

【冷却中間周波増幅器の製作】HEB ミキサでダウンコンバートした中間周波を低雑音で増幅することは、受信機雑音の低減のために重要である。これまで市販の冷却増幅器を用いてきたが、バンド幅が低周波側に伸びていないこと、入力インピーダンスが 50 Ω に規格化されているので、HEB ミキサとのマッチングのためにアイソレータが必要であるなどの問題があった。そこで、中間周波増幅器を HEB ミキサに最適化して設計できるよう、冷却増幅器の開発を国立天文台の鶴澤佳徳准教授と小嶋崇文助教との共同研究で進めている。本年度は、SiGe を用いた Heterojunction Bipolar Transistor による増幅器の設計製作と冷却実験を行い、初期性能として満足できる結果を得た。

【準光学型 THz 帯 HEB ミキサの開発】超伝導 HEB 細線を形成する際に誘導性結合プラズマエッチングの前工程として酸素クリーニングを導入することで、エッチング時の再付着などを軽減し、超伝導転移を示す素子の歩留りを著しく向上させた。また、超伝導 HEB 細線の電流-電圧特性のモデル化を行い、抵抗-温度特性とセルフコンシステントに解くことで、電流-電圧特性の複雑な変化を再現させた。これにより、中間周波出力の利得-電圧依存の多様なパターン/利得性能を再現することが可能になると期待される。さらに、開いた空間での無限遠の放射を計算するのに適した、仮想境界/近似を用いない有限境界要素法を導入して、準光学ツインスロットアンテナのシミュレーションを実施し、受光感度を約 25 %改善する設計改良を行った。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] 山本智、日本天文学会林忠四朗賞、日本天文学会、2014年3月20日

<報文>

(原著論文)

- [2] Sakai, N., Takano, S., Sakai, T., Shiba, S., Sumiyoshi, Y., Endo, Y. & Yamamoto, S. “Anomalous ^{13}C Isotope Abundances in C_3S and C_4H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1”, *J. Phys. Chem. A*, 117, 9831 (2013).
- [3] Sakai, N. & Yamamoto, S. “Warm Carbon-Chain Chemistry”, *Chem. Rev.*, 113, 8981 (2013).
- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Kahane, C., Bottinelli, S., Caux, E., Demyk, K., Vastel, C., Coutens, A., Taquet, V., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H.-W., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar”, *Nature*, 507, 78 (2014).
- [5] Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., & Yamamoto, S. “ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows”, *Astrophys. J.*, 775, L31 (2013).
- [6] Jorgensen, J. K., Visser, R., Sakai, N., Bergin, E., Brinch, C., Harsono, D., Lindberg, J. E., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., Bisschop, S., & Persson, M. V. “A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry”, *Astrophys. J.*, 779, L22 (2013).
- [7] Fontani, F., Sakai, T., Furuya, K., Sakai, N., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “DNC/HNC and $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ Ratios in High-Mass Star-Forming Cores”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 440, 448 (2014).
- [8] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51 in the 3 mm and 2 mm Bands”, *Astrophys. J.*, in press.

(国内雑誌)

- [9] 坂井 南美、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、日本天文学会 天文月報、Vol. 106、No. 2、2013.

(学位論文)

- [10] 山口貴弘、”Classification of Shock Chemistry by Pre-shocked Conditions” (博士論文)
- [11] 猪熊宏士、「暗黒星雲における OH 吸収線の発見とその物理的意味」 (修士論文)
- [12] 西村優里、「重水素濃縮に注目した星間分子雲の物質進化の探求」 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [13] Sakai, N. “Astrochemistry in Star/Planet Forming Regions”, ALMA Development Workshop, NAOJ, Mitaka, Tokyo, Japan, Jul. 7-8, 2013.
- [14] Sakai, N. “New carbon-chain chemistry found in solar-type star-forming regions”, 247th American Chemical Society National Meeting 2014, Dallas Convention Center, Dallas, US, Mar. 16-21, 2014.

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】

- [15] 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」、P116a
- [16] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」、P126c
- [17] 山口貴弘、高野秀路、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「超新星残骸 IC443 の衝撃波化学」、Q04a

【天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 19 - 22 日】

- [18] Sakai, N., Sakai, T., Oya, Y., Yamamoto, S.(Univ. Tokyo), Hirota, T., Ohashi, N. (NAOJ), Takakuwa, S., Yen, H.-W. (ASIAA), Aikawa, Y. (Kobe Univ.), Ceccarelli, C. (IPAG), and IPAG group members(France), “A Drastic Chemical Change in Protostellar-Disk Formation: IRAS 04368+2557 in L1527”, B07a.
- [19] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」、P111a
- [20] 渡邊祥正、古屋隆太、坂井南美、山本智、酒井剛、「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 0.8 mm 帯分子輝線サーベイ」、P131a
- [21] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、“Non-thermal Desorption in the Cold Molecular Cloud: TMC-1”、P132a
- [22] 下西隆、西村優里、渡邊祥正、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智、「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトルラインサーベイ 1. 高密度ガス探索」、Q14a
- [23] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智、「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトルラインサーベイ 2. 高感度観測」、Q15a

- [24] 猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 基底状態遷移の吸収線の発見と統計平衡計算による解析」、Q18a

招待講演

- [25] 坂井 南美、「A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation」、原始惑星系円盤研究会、国立天文台、2013 年 8 月 19-22 日

- [26] Satoshi Yamamoto、「Astrochemistry with ALMA」、日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 20 日、B05r

公開講演

- [27] 坂井 南美、「電波観測で探る星の誕生 - 太陽系の奇跡 -」、東京大学理学部公開講演会、東京大学、2013 年 4 月 20 日

- [28] 坂井 南美、「分子の誕生と星間物質」、日本物理学会科学セミナー、東京大学、2013 年 8 月 22-23 日

4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の探求

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、ダストに隠されていることが知られている。ダストに隠された星形成の割合は、現在の宇宙から過去に遡るにつれて急激に上昇し、赤方偏移 1-3 の時代にかけて、宇宙の星形成率密度の主たる担い手は多量のダストに覆われた爆発的星形成銀河になることが明らかになりつつある (Burgarella et al. 2013, *Astron. & Astrophys.*, 554, 70)。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、どのような銀河種族が担い、どのように進化しているのだろうか？

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; Casey et al. 2014, *Physics Report*, arXiv:1402.1456)。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

Subaru/XMM-Newton Deep Field におけるサブミリ波銀河の赤方偏移分布

サブミリ波望遠鏡 ASTE に搭載した波長 1100 μ m の連続波カメラ AzTEC を用いてすばる/XMM-Newton 深宇宙探査領域を非常に深く (rms \sim 0.5 mJy) 広く (\sim 1200 arcmin²) 観測し 281 個の 1100 μ m 検出の爆発的星形成銀河を検出した。同じく初期宇宙の爆発的星形成銀河に感度のある米国大型電波干渉計の波長 21 cm、ハーシェル宇宙望遠鏡の波長 100-160 μ m、スピッツァー宇宙望遠鏡の波長 24 μ m の画像データを用いて、これら全てのデータが観測を行っている 221 個の 1100 μ m 検出の初期宇宙の爆発的星形成銀河の多波長対応天体を調べたところ、およそ 78% の 1100 μ m 検出の銀河が同様に検出されていることを明らかにした。波長 21 cm - 8 μ m 検出の 1100 μ m 検出の銀河の赤方偏移分布を可視光、近赤外線等のデータで推定したところ赤方偏移 2.2(中央値) 付近に存在していることを明らかにした。波長 21 cm - 8 μ m のデータが主に赤方偏移 3~4 ぐらいまでに感度を持つことを考えると、残りの 22% はより初期の宇宙に存在する可能性が示唆される。ALMA cycle-1 project (2012.1.00326.S) ではこれら 22%(50 個) の波長 21 cm - 8 μ m で未検出の 1100 μ m 検出の爆発的星形成銀河のうち 30 個について、その正体を探るための観測を行い、可視、近赤外のデータから確かに赤方偏移 4-5 以上に存在する銀河であることの示唆を得た [23, 16]。

原始銀河団領域 SSA22 におけるサブミリ波銀河の集団の発見と高分解能追観測

SSA22 はライマンブレイク銀河やライマン α 輝線銀河の極めて顕著な密度超過から赤方偏移 3.1 の宇宙に原始銀河団が存在する領域だと考えられている。このような高赤方偏移の原始銀河団領域は希少であり、宇宙全体の星形成活動に大きな寄与を示すサブミリ波銀河の発現や進化と宇宙の大規模構造の関係性を調べる上で重要な実験場として期待される。本領域において、我々が行った ASTE 望遠鏡に AzTEC カメラを搭載した広視野高感度サブミリ波観測によって 125 個のサブミリ波銀河が発見された。さらに電波や赤外線を用いた天体同定と測光赤方偏移の推定から、10 個のサブミリ波銀河が SSA22 原始銀河団のメンバーである可能性が高いことが示された。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も判明した。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 (Umehata et al., 2014, MNRAS, 440, 3462)。サブミリ波干渉計 PdBI を用いた高分解能追観測が 10 個のうち 4 個に対して行われ、うち 2 個について他波長による同定天体とサブミリ波源が一致することが確認された。検出されなかった 2 天体については (他波長による同定が正しいとした場合)、想定よりも暗かったか、複数のサブミリ波源に分かれている可能性が考えられる [22]。

ALMA アーカイブを利用した CO 光度関数の進化の研究

宇宙年齢にわたる星形成率や分子ガス密度の進化を研究するためには、無バイアスなミリ波分子輝線探査による輝線光度関数の決定が必要である。これまでも CO 分子輝線の偶然検出 (Tamura et al. 2014) や原始銀河団をプローブにした CO 分子輝線探査 (Aravena et al. 2012) といった観測が行われてきたが、完全に無バイアスなミリ波分子輝線探査にはさらに広大な領域の深い観測が必要である。本研究ではミリ波分子輝線探査の新たな手法として ALMA アーカイブデータを利用した探査を提案している。本研究が用いたアーカイブデータは ALMA cycle 0 で行われた大質量銀河団 Abell 1689 の band 6 (~ 230 GHz) による観測 (P.I. Johan Richard) であり、その広さはおよそ 50 視野 (~ 5 平方分) にわたり、深さは $\sigma \sim 90 \mu\text{Jy}/\text{beam}$ を達成している。このデータを再解析することにより、本研究では観測周波数 241 GHz 付近に CO 回転遷移輝線とみられる輝線を発見することに成功した。ALMA のデータだけでは検出した天体の赤方偏移は決定できないが、可視光近赤外線対応天体を測光して近傍銀河の SED テンプレートと比較した結果 $z < 6$ であることが分かった。光度関数についても上限値を与えることに成功し、従来のモデルや観測と矛盾しないことが確かめられた。以上からアーカイブデータの利用がミリ波分子輝線の光度関数の制限に有用な手段であるといえる。この研究は山口の課題研究としてまとめられ、2014 年度は多波長データの解析によるさらに正確な測光赤方偏移の推定、フォローアップ観測による分光赤方偏移の決定等を行なった上、論文として出版予定である [25]。

サブミリ波帯で極めて赤い銀河の性質

近年、無視できない数のサブミリ波銀河が初期宇宙 ($z \gtrsim 5$) にも確認され始めている一方、銀河形成モデルでは、こうした時代に大質量銀河を多く発生させることが難しく、遠方サブミリ波銀河の数密度を定量することで銀河形成モデルを制限できる可能性が高い。我々は、COSMOS 領域から Herschel/SPIRE の $250\text{--}500 \mu\text{m}$ データに対応天体

のない (i.e., $500\text{-}\mu\text{m}$ dropout) AzTEC/ASTE 1.1 ミリ波銀河を 13 天体選定し、うち ALMA や SMA で位置同定された 2 つの天体について、可視光から近赤外線にいたるスペクトルを種族合成モデルでフィットし、中間赤外線からセンチ波にいたるスペクトル分布を爆発的星形成銀河の SED テンプレートでフィットした。結果、現実的な星間減光 ($A_V \simeq 1$) のもとで $z \sim 6$ に位置するサブミリ波銀河である可能性が高いことがわかった。この 2 天体が $z \sim 6$ に位置していたとすると、この時代の宇宙星形成率密度に対して $\gtrsim 1\%$ (下限値) の寄与が見込まれる。なお、本研究の一部は、藤本の平成 25 年度課題研究としてまとめられた [26]。

4.2.2 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により、スペクトル線によるエネルギー源診断を確立していくと共に、開発した手法を、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。

活動銀河核 NGC 1097 における、ALMA を用いた dense gas tracers の研究

ダストによる減光を受けないミリ波やサブミリ波帯の輝線観測を通じて銀河の熱源 (活動銀河核や爆発的星形成など) を診断することは、星間物質に深く埋もれて可視光や赤外線でも見通すことのできな

い、成長初期段階のブラックホールを探索する上で重要だと考えられる。そこで我々は、そのような診断法を探索するために、近傍の1型セイファート銀河である NGC 1097 の中心部に対して、ALMA の Band 7 帯での分子輝線観測を試みた。この銀河は過去の X 線観測等で活動銀河核の存在が既知の天体である。得られた観測結果や、文献値を用いることで、活動銀河核では $\text{HCN}(J=4-3)/\text{HCO}^+(J=4-3)$ と $\text{HCN}(J=4-3)/\text{CS}(J=7-6)$ の輝線強度比が星形成銀河に比べて大きくなることを発見した。また、この現象の物理化学的要因についても当該分子の多遷移輝線解析から検討を進めた。その結果、非局所熱平衡条件下での分子モデル解析から、これらの輝線の放射領域は、高密度 ($10^{4.25} < n_{\text{H}_2} [\text{cm}^{-3}] < 10^6$) かつ高温 ($70 < T_{\text{kin}} [\text{K}] < 450$) で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明らかにした。本研究はわずか1天体の観測結果に基づくが、今後の ALMA での観測を通じてこうした診断法の妥当性が確立されると、星間物質に深く埋もれた活動銀河核の発掘も進むであろう [24, 2, 56]。

ALMA を使った NGC 1097 活動銀河核における巨大ブラックホールへのガス供給の研究

近傍1型セイファート銀河 NGC 1097 は、8 kpc に及ぶ銀河規模での棒構造から、中心の1 kpc に存在する環状の爆発的星形成領域、そしてさらにその中心に存在する銀河核というように、種々の構造が存在するため、力学的研究の良い対象となっている。今回我々は、ALMA Cycle 0 観測において取得された、高密度ガスのトレーサーである $\text{HCN}(4-3)$ を用いて、NGC 1097 の中心 200 pc 程度の領域における力学機構のモデル化を行ない、分子ガスが中心の活動銀河核 (AGN) に落ち込むインフローートを見積もった。この解析には、観測された速度場をフーリエ展開する手法を用いた。その結果、今回の ALMA のデータからは、中心の AGN から約 40 pc の距離までのガスの運動をモデル化することに成功し、その力学的な振る舞いは先行研究ともよく一致するものであった。モデル解析から得られた高密度ガスは、幾何学的に極めて薄い ($h/R < 10^{-3}$) 円盤状のものであり、その molecular gas mass inflow rate は 40 pc 半径地点で $0.09 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であった。今後は ALMA を用いた同様の手法で、多くの活動銀河において分子ガスの力学構造探査と巨大ブラックホールへの質量供給過程の解明が進展すると期待される [6]。

ALMA で探る SMBH と銀河中心高密度ガス円盤の共進化

多くの銀河の中心には、その質量が太陽の数百万倍から数十億倍にも及ぶ超巨大ブラックホール (supermassive black hole; SMBH) が存在すると考え

られている。しかし、これらの大質量天体が一体どのように形成・成長してきたのかは依然として未解決の問題である。この問題に対して、我々は最新の電波干渉計 ALMA による観測結果等を用いて、ブラックホール (BH) 周辺の数 10pc から 100pc 規模の高密度ガス円盤 (circumnuclear gas disk; CND) が、BH の成長における直接的質量供給源として重要な役割を果たしている可能性があることを発見した。具体的には、まず我々は ALMA 等を用いた高密度ガストレーサーである HCN 分子輝線の観測から、CND の質量を推定した。そして、CND 質量と中心の BH 質量の比が、BH の活動性の指標である Eddington 比と相関することを観測的に初めて発見した。この相関は、母銀河スケールでのガス観測では見られないものであり、CND と BH の成長機構に関連があることを示している。また、文献から、Eddington 比の高い BH に付随する CND は幾何学的に厚く、逆に Eddington 比の低い BH に付随する CND は薄いという示唆も得た。これらの結果は、Kawakatsu & Wada (2008) のモデルで予言されているように、CND の重力不安定性が BH への物質降着を左右する鍵となっていることを示唆するものである [30]。

ALMA を使った爆発的星形成銀河 NGC 253 におけるダスト関連分子種の撮像分光観測

現在までに 40 種を超える星間分子が発見されており、それらの物理化学的な生成・破壊反応を調べることは銀河規模の星間化学・星間物理過程を調査する上でも極めて重要である。そこで我々は、近傍の爆発的星形成銀河の代表格である NGC 253 中心領域において、ALMA を用いて星間化学的観点から重要であるダスト関連分子種の観測を行なった (PI = 高野)。対象とした分子は、 SO 、 HNCO 、 CH_3OH 、 CH_3CN などである。この観測の結果、典型的な高密度ガスのトレーサーである CS の放射は、3mm 帯の連続波放射と空間的に一致しており、NGC 253 の爆発的星形成活動をトレースしていることが分かった。その一方で、 CH_3OH のような、ダスト関連分子の放射は、Sakamoto et al. (2006) などで指摘されている、NGC 253 の super bubble 地点からよく出ていることが分かった。Super bubble が超新星爆発に起因する構造だと想定すると、これは CH_3OH のような分子がダストが衝撃波で破壊されることで気相に解放されるという星間化学的描像と一致するものである。また、これらのダスト関連種の放射は、NGC 253 の中心領域 (星形成活動のピーク地点) では弱いことも判明した。これは星形成に起因する UV 放射によりダストが高温に加熱されることで、 CH_3OH などの反応が抑制された可能性を示唆している。上記の成果は ALMA のような高感度・空間分解能の干渉計観測で初めて可能になったものであり、系外銀河において、銀河の物理構造と化学組成が密接にリンクしている様を直接示す、大変希有な例になると考えられる [47]。

電波銀河 NGC4261 中心核における分子トーラスの探査

電波銀河 NGC4261 の中心核方向でミリ波帯にある $J=1-0$ および $2-1$ での CO 分子吸収線の探査を野辺山ミリ波干渉計/RAINBOW 干渉計および IRAM PdBI 干渉計を用いて行った。非常に感度の高い吸収線探査であったが、いずれの遷移においても検出されなかった。光学的厚みの 3σ 上限値は $J=2-1$ が 0.098、 $J=1-0$ は 0.042 であった。これは、過去の JCMT による大きな吸収量 ($J=2-1$ で光学的厚みが 0.7) を否定する結果である。CO 輝線は活動銀河核の影響で非常に高い励起状態にあり、 $J=2$ や $J=1$ よりも高いエネルギー準位に多くの粒子が存在していること(そのために low- J の CO 吸収線の光学的厚みが非常に小さくなっていること)が示唆される [10]。

4.2.3 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

サブミリ波銀河の発見に加え、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)に制限をつける上で、複数の波長における flux 測定は極めて重要である。単色での連続波カメラ AzTEC(波長 1.1mm)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、複数の波長での同時撮像を可能とするミリ波サブミリ波カメラの開発を進めてきた。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だす超伝導熱検出器)のアレイを採用した。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ミック素子を用いて実現する。読み出しは超伝導量子干渉計デバイス SQUID を用い、さらに、周波数分割方式により 1 本の読み出し系統で 8 画素の信号を多重に読み出すことで多画素を効率的に読みだすシステムである。まず 1.1mm および 0.87mm 帯の 2 色同時撮像を実現する、合計 400 画素のカメラ開発が進められた。これらの開発は、国立天文台野辺山の島が PI となり、本学のほか、国立天文台・北海道大学・UC Berkeley、Cardiff University、McGill University ほかとの共同研究により進められている。

泉拓磨らは、南米アタカマ砂漠の標高 4860m 地点にて運用されている ASTE 望遠鏡に搭載する超伝導遷移端 (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行った。主な評価項目は、TES ボロメータの saturation power (P_{sat})、実効的な時定数 (τ_{eff})、そして光学系全体を通してのスループットである。まず P_{sat} に関しては、350GHz アレイは観測と装置仕様の両面から求められた設計値と一致する測定結果を得た。その一方で、270GHz アレイでは設計値より +20 pW の測定値を得た。こ

れはボロメータ出力の読み出しに用いている SQUID システムの不具合によるものであった。また、 τ_{eff} に関しては、TES ボロメータを超伝導状態に近づけるほど加速する(より線形性が高くなる)ことが判明した。さらに測定結果は TES ボロメータの時定数が周辺回路の時定数と十分に分離できていることを示しており、上記の結果から高速で安定的な観測が実行可能であることが実証できた。光学系スループット評価に際しては、黒体を自作し、それで TES ボロメータを設置してある焦点面モジュールを照射、フィルターも含めたシステムの出力を読み出し、入力値と比較するという手法をとった。結果としては、こちらも設計値通りの高いスループット ($\eta > 0.7$) を得ており、十分に観測に利用可能であることが判明した。

こうして評価された TES ボロメータ素子は、2013 年冬期のアタカマでの試験観測に利用した。試験観測は、泉、田村を含む開発メンバーがチリに渡航して行なった。太陽系内天体や銀河系の星形成領域の試験観測に成功し、blank field のデータも取得するなど、有意義な成果を挙げることができた。今後は 2014 年 3 月-4 月に得た観測のデータも含めた解析を進めると同時に、来年度以降に想定されている共同利用観測の実現へ向けて更にシステムの改善や安定化を目指す [8, 38, 39]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Ouchi, M., Ellis, R., Ono, Y., Nakanishi, K., Kohno, K., Momose, R., Kuroono, Y., Ashby, M. L. N., Shimasaku, K., Willner, S. P., Fazio, G. G., Tamura, Y., Iono, D., "An Intensely Star-Forming Galaxy at $z \approx 7$ with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations", *Astrophys. J.*, 778, 102 (2013).
- [2] Izumi, T., Kohno, K., Martin, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P.Y., Turner, J. L., 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", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, 100 (2013).
- [3] Ibar, E., Sobral, D., Best, P. N., Ivison, R. J., Smail, I., Arumugam, V., Berta, S., Bethermin, M., Bock, J., Cava, A., Conley, A., Farrah, D., Le Floch, E., Lutz, D., Magdis, G., Magnelli, B., Ikarashi, S., Kohno, K., Marsden, G., Oliver, S. J., Page, M. J., Pozzi, F., Riguccini, L., Schulz, B., Seymour, N., Smith, A. J., Symeonidis, M., Wang, L., Wardlow, J., Zemcov, M., "Herschel reveals the obscured star formation in HiZELS H α emitters at $z=1.47$ ", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 434, 3218 (2013).

- [4] Takekoshi, T., Tamura, Y., Minamidani, T., Kohno, K., Oogi, T., Sorai, K., Habe, A., Ezawa, H., Oshima, T., Scott, K. S., Ausermann, J. E., Komugi, S., Tosaki, T., Mizuno, N., Muller, E., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y., Matsuo, H., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Kawabe, R., Wilson, G. W., Yun, M. S., “Detection of an Ultra-bright Submillimeter Galaxy behind the Small Magellanic Cloud”, *Astrophys. J. Lett.*, 774, L30 (2013).
- [5] Shimajiri, Y., Sakai, T., Tsukagoshi, T., Kitamura, Y., Momose, M., Saito, M., Oshima, T., Kohno, K., Kawabe, R., “Extensive [C I] Mapping toward the Orion-A Giant Molecular Cloud”, *Astrophys. J. Lett.*, Volume 774, Issue 2, article id. L20, 7 pp. (2013).
- [6] 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 NGC1097”, 2013, *Astrophys. J.*, 770, L27.
- [7] 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”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, L7, 5 pp. (2013).
- [8] 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”, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 23, 2101004, 4 pp. (2013).
- [9] 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”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 431, 662-682 (2013).
- [10] Okuda, T., Iguchi, S., Kohno, K., “A Millimeter-wave Interferometric Search for a Molecular Torus in the Radio Galaxy NGC 4261”, *Astrophys. J.*, 768, article id. 19, 4 pp. (2013).
- [11] 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., and Noguchi, T., “A New 100-GHz Band Two-Beam Sideband-Separating SIS Receiver for Z-Machine on the NRO 45-m Radio Telescope”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 125, 252-262 (2013).
- [12] 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”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 431 194-209 (2013).
- [13] Doi, A., Kohno, K., Nakanishi, K., Kamenno, S., Inoue, M., Hada, K., and Sorai, K., “Nuclear Radio Jet from a Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258”, *ApJ*, 765, article id. 63, 11 pp. (2013).
- [14] 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 $z = 3.1$ ”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 430, 2768-2773 (2013).
- (会議集録)
- [15] Hatsukade, B., Takeuchi, T. T., Pollo, A., Kohno, K., Aretxaga, I., Ausermann, J. E., Ezawa, H., Hughes, D. H., Ikarashi, S., Iono, D., Kawabe, R., Nakanishi, K., Oshima, T., Perera, T., Scott, K. S., Tamura, Y., Williams, C. C., Wilson, G. W., and Yun, M. S., “Clustering Properties of 1.1 mm-Selected Submillimetre Galaxies Uncovered by AzTEC Deep Surveys”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 269.
- [16] Ikarashi, S., Kohno, K., Aretxaga, I., Arumugam, V., Caputi, K., Dunlop, J., Hatsukade, B., Hughes, D., Iono, D., Ivison, R., Kawabe, R., Motohara, K., Nakanishi, K., Ohta, K., Suzuki, K., Tamura, Y., Umehata, H., Wilson, G., Yabe, K., and Yun, M., “AzTEC/ASTE Deep and Wide Submillimetre Galaxy Survey in the Subaru/XMM-Newton Deep Field: Identification of VLA, Spitzer and Herschel Counterparts to 1100- μ m-Selected Galaxies and Redshifts”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 265.
- [17] Kawabe, R., Kohno, K., Yamamoto, S., Tamura, Y., Totani, T., Kitayama, T., Komatsu, E., Onishi, T., Oshima, T., Honma, M., Matsuhara, H., Nakanishi, H., Iono, D., Kuno, N., Momose, M., and New Telescope Working Group, “A Large Millimeter and Submillimeter Telescope Project: ALMA-SPICA Synergy Telescope (“ASTE-II”)”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 425-431.
- [18] Kodama, T., Tanaka, I., Hayashi, M., Koyama, Y., Tadaki, K., Shimakawa, R., Kohno, K., and Tamura, Y., “From Mahalo-Subaru to Gracias-ALMA: Resolving Galaxy Formation at Its Peak Epoch”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 37.

- [19] Suzuki, K., Kohno, K., Tanaka, I., Kodama, T., Hatsukade, B., Tamura, Y., Nakanishi, K., Iono, D., Kajisawa, M., Ikarashi, S., Umehata, H., Iverson, R. J., Wilson, G. W., Yun, M. S., Hughes, D. H., Aretxaga, I., and Zeballos, M., “Sub-mm Singledish and Interferometric Observations of the Proto-Cluster around 4C 23.56 at $z = 2.5$ ”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 263.
- [20] Tamura, Y., Tatamitani, Y., Takahashi, S., Horigome, O., Maekawa, J., Kohno, K., Sakai, T., and Taniguchi, A., “A New “Off-pointless” Method for Mm/submm Spectroscopy with a Frequency-Modulating Local Oscillator”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 401.
- [21] Tateuchi, K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N., Kitagawa, Y., Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Kawara, K., Tanaka, M., Miyata, T., Tanabe, T., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Koshida, S., Kamizuka, T., Asano, K., Uchiyama, M., and Okada, K., “Distributions of Dusty Star Forming Region in Local Starburst Galaxies”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 301.
- [22] Umehata, H., Tamura, Y., and Kohno, K., “Submillimeter Galaxies in the SSA22 Protocluster at $z = 3.1$ ”, 2013, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 476, 271.
- (学位論文)
- [23] 五十嵐創, “Study of Dust-Obscured Massive Galaxies beyond Redshift 5 based on Submillimeter Photometric and Spectroscopic Surveys”, 博士論文, 2014年3月
- [24] 泉拓磨, 「ALMA で探る活動銀河中心核領域における分子ガスの物理化学状態」, 修士論文, 2014年3月
- [25] 山口裕貴, 「ALMA archive data を利用したミリ波輝線銀河光度関数の制限」課題研究, 2014年2月
- [26] 藤本征史, 「AzTEC/SPIRE 多色撮像に基づくダストに隠された $z \sim 6$ での爆発的星形成銀河の探査」課題研究, 2014年2月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- [27] Kohno, K., “Anticipated specifications and development for 2020-2030” (invited), 2013/07/08–09, “The 2nd EA-ALMA Future Development Workshop”, NAOJ, Japan.
- [28] Kohno, K., “ALMA study of dense molecular medium in the central regions of active galaxies” (invited), 2013/09/02–04, “East-Asian ALMA Science Workshop”, ASIAA, Taipei, Taiwan.
- [29] Kohno, K., “Extreme starburst galaxies in the early Universe” (invited), 2014/02/17–22, “Transformational Science with the SKA”, Stellenbosch, South Africa.
- 一般講演
- [30] Izumi, T., Kohno, K., and Kawakatu, N., “The synergy with APICA and ALMA - for a robust AGN diagnostic”, 2013/06/18–21, “SPICA Science Conference 2013”, Univ. Tokyo, Tokyo, Japan.
- [31] Izumi, T., Kohno, K., Martín, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P. Y., Turner, J. L., 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., and Wiklind, T. : “The first 100 pc scale view of a type-1 Seyfert nucleus in NGC 1097 traced by submillimeter dense gas materials with ALMA”, 2013/09/03–07, “Asia-Pacific Radio Science Conference 2013 SPC Session”, Taipei, Taiwan.
- [32] Kohno, K., “ALMA status and early science results”, 2013/11/07–08, “Astronomy & Astrophysics from ALMA” UTokyo-Forum, University of Chile, Santiago, Chile.
- (国内会議)
- 招待講演
- [33] 河野孝太郎, “ALMA close-up view of dense molecular medium in the central regions of nearby active galaxies”, 企画セッション「ALMA の初期科学成果」、B18r、日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、(2014/03/19 – 03/22)
- 一般講演
- [34] 泉拓磨、河野孝太郎: “For establishing a new diagnostic method - synergy with ALMA and TAO/MIMIZUKU”, 2013/5/24、MIMIZUKU Science Workshop 2013、天文センター
- [35] 泉拓磨、河野孝太郎: “Predict, observe, and understand the high temperature chemistry in ISM - for a robust AGN diagnostic”, 2013/6/12、系外銀河の星間化学、東京大学
- [36] 河野孝太郎: 「星間化学の知見に基づく高赤方偏移銀河研究の展望」、2013/6/12、系外銀河の星間化学、東京大学
- [37] Izumi, T., Kohno, K., Martín, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P. Y., Turner, J. L., 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., and Wiklind, T. : 「ALMA による近傍 1 型 Seyfert 銀河 NGC 1097 中心領域の観測」、2013/7/24-25、NRO User’s meeting、国立天文台野辺山宇宙電波観測所

- [38] Izumi, T., Oshima, T., Hirota, A., Sato, T., Takekoshi, T., Minamidani, T., Iwashita, H., Westbrook, B., Suzuki, A., Lee, A. T., Holzapfel, W. L., Dobbs, M., Gilbert, A., Smecher, G., Suzuki, K., Tamura, Y., Kohno, K., and Kawabe, R.: “Development of Multi-color TES Bolometer Camera for ASTE I. Introduction”, 2013/7/24-25, NRO User’s meeting, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- [39] Izumi, T., Oshima, T., Hirota, A., Sato, T., Takekoshi, T., Minamidani, T., Iwashita, H., Westbrook, B., Suzuki, A., Lee, A. T., Holzapfel, W. L., Dobbs, M., Gilbert, A., Smecher, G., Suzuki, K., Tamura, Y., Kohno, K., and Kawabe, R.: “Development of Multi-color TES Bolometer Camera for ASTE II. Evaluation of Bolometer Arrays”, 2013/7/24-25, NRO User’s meeting, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- [40] 河野孝太郎: 「大口径ミリ波サブミリ波望遠鏡」、2013/7/24-25、NRO User’s meeting、国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- [41] 河野孝太郎: 「CARMA 時間購入について」、2013/7/24-25、NRO User’s meeting、国立天文台野辺山宇宙電波観測所
- [42] 河野孝太郎: “Early Science Results from ALMA”、2013/7/24-27、RESCEU summer school 第13回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、山形県蔵王市
- [43] 泉拓磨: “Proposal (1) Multi-line/transition observation in AGNs (2) Growth History of SMBH”、2013/9/30、ALMA workshop “Nearby Galaxies”、国立天文台
- [44] 河野孝太郎: “Molecules in NGC1097: chemical diversity within the circumnuclear starburst ring”、2013/9/30、ALMA workshop “Nearby Galaxies”、国立天文台
- [45] 河野孝太郎: “ALMA deep survey on the CANDLES-UDS-SXDS”、2013/11/16、ALMA cycle2 proposal meeting、国立天文台
- [46] 泉拓磨: 「近傍1型セイファート銀河 NGC 1097 中心領域における高温化学」、2013/11/26-27、ALMA 銀河中心ワークショップ、慶應大学
- [47] 泉拓磨: 「爆発的星形成銀河 NGC 253 中心領域における分子の空間分布」、2013/11/26-27、ALMA 銀河中心ワークショップ、慶應大学
- [48] 河野孝太郎: “Molecules in AGNs”、2013/11/26-27、ALMA 銀河中心ワークショップ、慶應大学
- [49] 河野孝太郎: 「SKA と ALMA の連携」、2013/12/18-19、宇宙電波懇談会シンポジウム「SKA 計画」、国立天文台
- [50] Kohno, K.: “ALMA Science and Requests to Long Baselines”, 2013/12/25-26, ALMA Workshop on Long Baseline and Phase Correction、国立天文台
- [51] Kohno, K.: “Can a nightmare turn to a new year’s dream? A deep survey using ALMA”, 2014/1/8、RESCEU 新春放談会、東京大学
- (その他講演 (アウトリーチ活動))
- [52] 河野孝太郎: 「南米アタカマから探る宇宙」、2013/7/19、スクワール麹町
- [53] 河野孝太郎: 「夏の夜空から覗く原始銀河」、2013/9/21、ルミネ横浜
- [54] 河野孝太郎: 「南米アタカマ砂漠から探る超巨大ブラックホールの謎」、2013/10/19、三鷹・星と宇宙の日、東京大学天文学教育研究センター
- [55] 泉拓磨: 「見えない宇宙を見る - 南米チリから探る巨大ブラックホールの性質 -」、2013/11/30、野辺山×宙ガール、野辺山 ベジタボールウィズ
- (プレスリリース)
- [56] 泉拓磨、河野孝太郎: 「超巨大ブラックホール周辺での特異な化学組成の発見 - 新たなブラックホール探査法の開発に向けて -」2013年10月24日

5 重力波探査

——重力波によるビッグバン宇宙の探索—— — (安東・麻生)

ビッグバンセンター・プロジェクト5では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して本プロジェクト5の中心テーマとなっている。2010年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の建設は順調に進んでいる。トンネルの掘削、全長 6km におよぶ真空パイプの建造、低温ミラーを収納するクライオスタットの製作が前年度までにほぼ完了し、2014 年度からは本格的なインストールが開始される。KAGRA の 2017 年からの本格的な重力波観測開始への期待が高まっている。また、宇宙空間重力波アンテナ DECIGO 計画の基礎開発も行われている。地上浮上型重力波検出器 TOBA についてはセンサーの技術開発が進んだ。同時に、われわれは重力波研究以外にも、それらで必要とされる技術を用いた関連研究も進めている。低温 (4K) シリコン光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発は世界的にもユニークな研究である。片道光速の異方性検出や微小距離における重力法則の検証は基礎物理として重要である。また、量子光学の手法を用いた光学実験は重力波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている。

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



図 5.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

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。当ビッグバンセンター・プロジェクト5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。

5.1.1 KAGRA 主干渉計の全体設計

大型レーザー干渉計の設計に於いては、その原理的感度を高めるだけではなく、十分に SN 比の高い制御信号が得られるか、各光学素子パラメーターの許容誤差が現実的な値であるか、誤差によって生じる高次光モードの影響が十分小さく抑えられるか、等複数の観点から設計の最適化を行う必要がある。KAGRA 主干渉計設計チームのチーフである麻生を中心に、本プロジェクトではこれらの検討を進めてきた。その結果、KAGRA 主干渉計の主要パラメータを決定し、また大型干渉計の設計を系統的に行う手法をまとめた論文として出版した [3]。

5.1.2 光学系のアライメント制御

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決定や姿勢制御系の設計を行ってきた。今年度は鏡の姿勢制御に用いる wave-front sensor (WFS) 法の原理的な雑音であるショットノイズに着目し、その要求値の計算を行った。また、干渉計シミュレーションにより、重力波に対する感度を悪化させない姿勢信号の取得方法や分離方法を検討した。これにより、ほぼ要求値を満たす方法を見出すことができたが、15 Hz 以下の帯域では、干渉計の重力波に対する感度を悪化させてしまうことがわかった。15 Hz 以下の低周波帯域では地面振動による雑音によってそもそも干渉計の重力波に対する感度は低いため、連星中性子星合体の観測可能距離 (inspiral range) に対する影響は小さい。

さらに、原理的な雑音以外の雑音も干渉計シミュレーションに加え、より実際的な雑音評価を行うことも進めている。特に、基線長 3 km のメインの光共振器の透過光を用いて、その共振器を構成する鏡の姿勢制御を行うと、透過光を受ける光検出器の振動が、干渉計の重力波に対する感度に大きく影響を与えてしまうことがわかった。この振動は主に地面振動から来るものであるため、光検出器を懸架するなどして防振を行うか、光検出器の振動に感度のない光学系配置を考えなくてはならず、現在検討を進めている。

5.1.3 光学系のパラメータ設計

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。本プロジェクト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で、かつ不安定性が発生した後の振る舞いについて取り扱うことができるものにした。また、この結果を実際に KAGRA に対して適用し、その光学設計におけるパラメトリック不安定性のリスクを評価した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。

5.1.4 非平衡系熱雑音の研究

微小な変位信号を取り扱う実験においては、熱雑音が測定の精度を制限することが多い。特に干渉計型重力波検出器においては、鏡およびその懸架系の熱雑音が測定帯域において主要な雑音源となっているため、KAGRA では鏡を冷却することによって熱雑音を抑え込むことを試みる。しかし、冷却後の温度勾配のついた系での熱雑音の振る舞いは、その系が非平衡系であるために取り扱いが単純ではない。本プロジェクトではこうした非平衡系、その中でも非平衡定常系における熱雑音のモデリングに取り組み、KAGRA の懸架系に対してこれを適用し熱雑音の評価を行った。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。

5.2 宇宙空間レーザー干渉計

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。本プロジェクト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。

5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振り子を用いた新しい重力波検出器である。TOBA は 2 本の棒状のテストマスを持ち、これらが重力波による潮汐力を受けて差動回転するのを読み取ることで、重力波を検出する。TOBA の大きな特徴は、回転方向の共振周波数が小さいことから、地上においても 1 Hz 付近の低周波数帯に良い感度を持つことである。これによって、地上の干渉計型重力波検出器では捉える事が難しい、中間質量ブラックホール連星合体や背景重力波などといった低周波重力波源の探査を行う事を目標とする。

5.3.1 Phase-II TOBA の開発

現在までに、最初のプロトタイプによって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、更なる技術検証が求められている。そこで現在、最終的な大型 TOBA と既存のプロトタイプの間をつなぐ段階として、Phase-II TOBA の開発を進めている(図 5.2)。

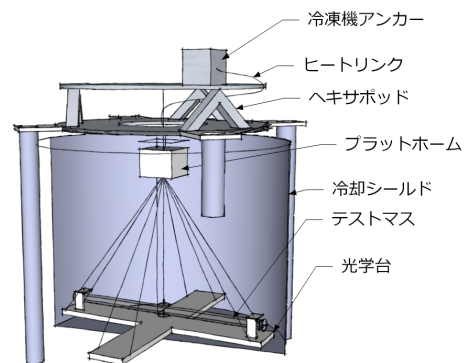


図 5.2: Phase-II TOBA の概念図

この装置では大きく、2 本のテストマスによる同相雑音除去及び自由度分離による感度向上の検証、低温共振器でも使用する Hexapod 型能動防振装置の導入による地面振動雑音除去、低温システムの導入による熱雑音の低減の 3 点を柱として開発を進める。

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同時に観測する新たな解析手法も採用する。この手法によって 3 つの独立な重力波信号が 1 つの実験装置から取り

出すことができるため、TOBA1 台でも重力波の波源方向などといったパラメータが精度よく決定できる事も明らかにした。

現在までに、これらの技術が実現できるような振り子の設計・製作、Hexapod 型能動防振装置の開発、低温システムの初期評価までが終了しており、今後はこれらのパーツを組み合わせ、総合的な評価を行っていく予定である。

5.3.2 光ファイバーセンサの開発

Phase-II TOBA ではテストマスの回転変位が 1 Hz で 10^{-15} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となるように設計されており、センサーにはマイケルソン干渉計を用いる予定である。このとき、テストマス 2 本の回転運動と並進運動を同時に読み取る必要があるため、多数のマイケルソン干渉計が必要となる。しかし、空間にレーザー光を通した場合ミラーなどの光学部品が真空槽内で密集するために、すべてを配置することが困難になると考えられる。そこで光ファイバーを用いてマイケルソン干渉計を構成することにより、余分な光学部品を排除してコンパクト化し、問題の解決を目指している。現在までに、試験的に 1 辺 30 cm のブレッドボード上に干渉計を組み上げ、1 Hz で 10^{-11} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が達成されている。今後は雑音源を特定し、その除去を目指していく [30]。

5.3.3 電磁誘導型アクチュエーターの開発

現在 PhaseII TOBA の開発が進行中である。プロトタイプ TOBA において、低周波帯で感度を制限していた雑音として環境磁場による雑音が挙げられ、その由来は、アクチュエーターとして用いていたコイルマグネットアクチュエーターの、テストマスに貼り付けていた磁石が環境磁場の影響を受けるためだということが分かっている。そこで、特に低周波帯での感度向上のために新型のアクチュエーターが必要となり、我々はテストマス側にもコイルを用いるコイルコイルアクチュエーターの開発を行った。まずは変位を読み取るセンサーとしてフォトセンサーを用いてテストマスをロックし、openloop 伝達関数やアクチュエーターのゲインを測定した。現段階で、コイルコイルアクチュエーター用いてテストマスの制御が可能であることを実証し、アクチュエーターの出す力が、同じ面積の標準的な静電型アクチュエーターより格段に大きいだけでなく、コイルマグネットアクチュエーターと比較しても同等かそれ以上であることが分かった。今後はマイケルソンファイバー干渉計を用いてテストマスを制御し、アクチュエーター自身の雑音を評価していきたいと考えている [31]。

5.3.4 直交位相法 TOBA の開発

以前開発された TOBA では棒状のテストマスを超伝導ピン止め効果によって浮上させ、回転をコイ

ル・マグネットアクチュエータで制御しその回転の読み取るセンサとしてマイケルソン干渉計を用いていた。この TOBA では磁石をテストマスに取り付けており約 0.1 Hz 以下において磁場雑音によって重力波に対する感度が制限されていた。そのため我々は新しくセンサとして直交位相干渉計を用いた TOBA を開発した。直交位相干渉計を用いることによってテストマスを制御する必要がなくなり、さらにテストマスをワイヤーで懸架しているため磁場雑音が原理的になくなっている。新しい TOBA の重力波に対する感度は 0.01Hz において 2×10^7 [1/Hz^{1/2}] となっており、この周波数において超伝導磁気浮上を用いた TOBA と比べ雑音レベルが 1/35 程度に低減された。今後は雑音を低減させより良い感度の実現を目指す。

5.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

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。そこで当プロジェクトでは、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なっている。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ー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ーザーを使えば、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。

5.4.1 低温光共振器の評価実験

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、地面振動の防振による弾性変形の抑制や温度安定化による熱膨張の低減も必要となる。

2013 年度は光共振器の冷却試験および低温で光共振器へのレーザーの安定化を行った。冷却試験では光共振器の温度を 4.05 K まで冷やすことができ、極低温でのオペレーションが可能であることを確認した。また、光共振器にレーザーをロックして周波数安定化を行い、in loop 評価で 10^{-18} を下回る結果を得た。さらに今年度は開発したレーザーの応用を見据えて、光の伝送によって導入される周波数雑音の評価を行い 10^{-17} レベルの安定度で光を伝送する光学系を構築した。

今後は、ヘキサポッドステージを用いた能動防振装置のインストールや out of loop でのレーザーの周波数安定度の評価を行っていく。

5.4.2 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、台上部の振動を能動的に抑える。

これまでに装置開発、及び並進3軸の同時制御に成功しており、直径約40cm以内、高さ約20cmと非常に小型でありながら1~10Hzという低周波数帯において約1/10の防振比を持つ防振台を完成させた。これは現在低温共振器の防振台としてインストールされており、今後は防振によるレーザー周波数安定度の向上が期待される。

5.5 相対論・量子光学精密実験

5.5.1 三角光共振器を用いた異方性検出実験

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い。

今年度は昨年度の8月に開始した長期測定を9月まで続け、合計393日分、約170万回転分の異方性

信号データを得た。この1年以上に渡るデータの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^{-15} のオーダーの上限値をつけた。これ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。また、拡張標準理論の枠組みで解析を行い、光子の高次の Lorentz 不変性の破れパラメータに世界初の上限値をつけた。高次の破れとは電磁場のラグランジアンに光子の運動量依存性がある項を加える事で表現される破れのことである。運動量依存性の次数が上がると、光速の異方性を球面調和関数で展開した場合の、高次の成分が出てくることになる。これまでは異方性の双極子成分に対応する単純な片道光速の異方性しか測定されてこなかったが、今回我々は六重極成分に着目し、解析を行った。

5.5.2 量子論的輻射圧の測定

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かった。その原因の一つとして、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 不安定性と呼ばれる)ために、光共振器に十分な光量を溜められない問題が存在する。そこで我々は、Siddles-Sigg 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装置を開発し、輻射圧揺らぎの影響を評価することに成功した。

5.5.3 光学浮上鏡を用いた巨視的量子実験

超高精測定においては測定に擾乱が問題となる。例えば、重力波検出器のような機械光学系では懸架した鏡にレーザー光を当てることで位置を測定するが、光子数の揺らぎによって鏡に揺らいだ運動量が与えられてしまうことに起因する雑音が存在する。この量子輻射圧雑音は、光子の位相揺らぎによって生じる散乱雑音と相関を持たせることで打ち消すことができ、標準量子限界を超えた鏡の位置測定(量子非破壊計測)ができることになる。そのため盛んに研究が行われているが、プランク質量を超えるような巨視的な領域では量子輻射圧雑音に到達した例がこれまで存在しなかった。今年度の本プロジェクトの実験により、これが達成されたが、量子非破壊計測を行うためには直近にある熱雑音をさらに低減する必要がある。

熱雑音にはさまざまな種類が存在するが、KAGRAのような重力波検出器やこれまでの実験で最も問題となっているのは鏡を懸架する際に生じる散逸に伴

うサスペンション熱雑音である。これをなくすためには重力に逆らって鏡を浮上させる必要があり、その一つの方法が光の輻射圧のみによって鏡を支える光学浮上である。磁気浮上などの方法には熱雑音となる散逸が存在するが、光学浮上では光子の有効温度が環境に比べて十分高いため、熱雑音となる散逸が存在しない。

今年度はこの光学浮上の安定性について検討を行った。その結果、鏡の曲率が鉛直下方向に凸でないと安定な光学浮上を実現できないことがわかった。また、3本のFabry-Perot共振器による光輻射圧を用いて支えるという、既に提案がされている三脚構造の方式より簡便な構成で安定な浮上が可能であることがわかった。その構成はFabry-Perot共振器を浮上鏡の上下に1本ずつ作る方式であり、我々が新しく発見した構成である。また、初期アラインメントへの要求値の計算や、1.6 mgの鏡や実験に用いる真空設備の準備を進めている。

<受賞>

- [1] 松本 伸之、2013年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)

<報文>

(原著論文)

- [2] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).
- [3] Y. Aso, Y. Michimura, et al.: Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, *Phys. Rev. D* 88, 043007 (2013).
- [4] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 110, 200401 (2013).
- [5] Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando: Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, *Phys. Rev. D* 88, 111101(R) (2013).
- [6] J. Harms, B.J.J. Slagmolen, R.X. Adhikari, M.C. Miller, M. Evans, Y.B. Chen, H. Muller, M. Ando: Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, *Phys. Rev. D* 88, 122003 (2013).
- [7] Masaki Ando: DECIGO Pathfinder Int. J. Modern. Phys. D 22, 1341002 (2013).

(会議抄録)

- [8] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with a Double-Pass Optical Ring Cavity, Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry, edited by V. A. Kostelecký, pp.216-219 (World Scientific, Singapore, 2014).

(学位論文)

- [9] 松本 伸之: Direct Measurement of Quantum Back-Action in a Macroscopic System, 博士論文、2013年3月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: WFS Shot Noise Requirement, 8th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2013, Toyama).
- [11] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA Interferometer, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves (Aug 2013, Toyama).
- [12] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, Y. Aso, K. Tsubono: A New Setup for Torsion-bar Antenna, Amaldi10/GR20 (Warsaw University, July 2013).
- [13] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (June 2013, Indiana University).
- [14] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA, ELiTES Bilateral Italy-Japan Workshop (Apr 2013, Tokyo).

招待講演

- [15] N. Matsumoto: Direct measurement of quantum back-action in a macroscopic system, IWQD2014, (March 2014, NII, Japan).
- [16] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Multi-Messengers from Core-Collapse Supernovae (December 2nd, 2013, Fukuoka Univ.).
- [17] Masaki Ando: Gravitational-Wave Telescopes, 6th OECD Meeting of the Astroparticle Physics International Forum (Oct. 29, 2013 Toyama).
- [18] Masaki Ando: KAGRA, Large-scale Cryogenic Gravitational-Wave Telescope, Workshop on Scientific Project Management (Oct. 16, 2013, Fuku- racia Tokyo Station, Tokyo).
- [19] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, (August 2013, Pohang, Korea).
- [20] Masaki Ando: KAGRA and Gravitational-Wave Experiments, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference (July 17, 2013, Makuhari Messe, Chiba, Japan).

- [21] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC34, The 34th Program Advisory Committee Meeting (June 4th 2013, Hanford, USA).
- [22] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, Italy-Japan Workshop (Tokyo, Japan, April 2013).
- (国内会議)
- 一般講演
- [23] 安東正樹、他: 大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクトの現状、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [24] 麻生洋一、他: 重力波検出器 KAGRA の主干渉計開発 III、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [25] 松本伸之、道村唯太、麻生洋一、安東正樹: 輻射圧雑音の直接測定、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [26] 道村唯太、松本伸之、麻生洋一、安東正樹: 鏡の光学浮上、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [27] 正田亜八香、手嶋航大、桑原祐也、小森健太郎、麻生洋一、安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [28] 柴田和憲、乙村浩太郎、出野雄也、徳田順生、麻生洋一、宗宮健太郎、安東正樹: 非平衡定常状態における熱雑音、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [29] 牛場崇文、麻生洋一、大前宣昭、正田亜八香: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 II、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [30] 桑原祐也、小森健太郎、正田亜八香、麻生洋一、安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) に向けたファイバー干渉計の開発、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [31] 小森健太郎、桑原祐也、正田亜八香、麻生洋一、安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) のためのアクチュエーターの開発、日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日、東海大学、神奈川)
- [32] 安東正樹: 小型重力波観測衛星 DECIGO パスファインダーイブシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム (2014 年 1 月 24 日、東京大学)
- [33] 安東正樹: DECIGO Pathfinder、宇宙科学シンポジウム (2014 年 1 月 8 日、宇宙科学研究所、相模原)
- [34] 安東正樹: DECIGO/DPF の概要、第 12 回 DECIGO ワークショップ (2013 年 10 月 27 日、東京大学)
- [35] 安東正樹、他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (44): DECIGO/DPF の概要日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日、高知大学)
- [36] 正田亜八香、安東正樹、石徹白晃司、岡田健志、麻生洋一、坪野公夫: 「次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の基本概念設計」、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日、高知大学)
- [37] 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光子のローレンツ不変性検証、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日、高知大学)
- [38] 柴田和憲、麻生洋一、山元一広、安東正樹: 任意の光学系におけるパラメトリック不安定の評価、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日、高知大学)
- [39] 牛場崇文、麻生洋一、大前宣昭、正田亜八香、坪野公夫: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日、高知大学)
- [40] 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 II、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月、徳島大学)
- [41] 阿久津 智忠、安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (23)、日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日、東北大学)
- 招待講演
- [42] 安東正樹: 重力波の観測、日本天文学会 年会 企画セッション 「r プロセスと重力波天文学」 (2014 年 3 月 19 日、国際基督教大学)
- [43] 安東正樹: DECIGO Pathfinder、CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日、東京大学 宇宙線研究所)
- [44] 麻生洋一: 重力波で拓く新しい天文学・KAGRA の技術と建設の現状、CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日、東京大学 宇宙線研究所)
- (セミナー)
- [45] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, LHO Journal Club (Mar 2014, Richland, WA).
- [46] Masaki Ando: Current status of KAGRA, RESCEU 交流会 (Jan. 8th, 2014, RESCEU).
- [47] 安東 正樹: 重力波検出に挑む KAGRA、朝日カルチャーセンター講演 (2013 年 11 月 16 日、ルミネ横浜、横浜)
- [48] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で切りひらく新しい天文学、駿台天文講座 (2013 年 10 月 19 日、駿台学園、東京)
- [49] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で探る宇宙、ビッグバン宇宙国際研究センター 講演会、Open Campus 2013 (2013 年 8 月 8 日、東京大学)
- [50] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が切り拓く天文学、富山大学 談話会 (2013 年 7 月 31 日、富山大学)

- [51] 安東 正樹: 低周波数重力波の探査、第 13 回 RESCEU サマースクール 「宇宙における時空・物質・構造の進化」 (2013 年 7 月 26 日、蔵王、山形)
- [52] 安東 正樹: 重力と重力波で探る宇宙、2013 年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 研究者交流会 (2013 年 6 月 26 日、東京大学)
- [53] 安東 正樹: 重力波望遠鏡で観測する新しい宇宙の姿、平成 25 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 6 月 7 日、小柴ホール、東京大学)
- [54] 安東 正樹: 重力波で解き明かす宇宙の謎、平成 25 年度 物理学科進学ガイダンス講演会 「物理学の新たな地平」 (2013 年 5 月 27 日、東京大学駒場キャンパス)
- [55] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA でみる新しい宇宙の姿、東京大学 物理学教室談話会 (2013 年 5 月 31 日、東京大学)
- [56] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が拓く宇宙の地平線、2013 年 総研大特別公開講演 (2013 年 5 月 25 日、国立天文台、三鷹)

6 宇宙素粒子物理学

——太陽アクシオンおよび hidden photon 探索実験—— (蓑輪・井上)

本プロジェクトでは、「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 原子炉ニュートリノモニター

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) は原子炉モニタリングを目的とした小型ニュートリノ検出器である。

原子炉では核分裂反応に伴う β 崩壊により大量の反電子ニュートリノが発生しており、このニュートリノは炉心を取り囲む水やコンクリートなどの遮蔽物によって遮られることなく建屋の外まで出てくる。原子炉に匹敵するニュートリノ発生源を人為的に用意することは困難であることから、ニュートリノの放出量をモニタリングすることで原子炉の運転状況を外部から監視することが可能になる。国際原子力機関 (IAEA) によって核不拡散の目的で現在実施されている原子力施設の保障措置は、負担の大きい侵襲的な方法に頼らざるを得ないことが課題となっており、ニュートリノを用いた新しいモニタリング手法は強力かつ非侵襲的な査察のツールになることが期待されている。そのため IAEA の要請に基づく形で、世界の複数のグループで原子炉モニタリングを目的とした小型ニュートリノ検出器の開発が進められている。

原子炉由来の反電子ニュートリノはターゲットとなるシンチレータ内で逆 β 崩壊を起こし、この反応で陽電子と中性子が同時に発生する。陽電子はただちにエネルギーを失って対消滅する一方、中性子はシンチレータ中で熱化した後ガドリニウムなどに捕獲されて γ 線を放出する。時間差を持つこの2種類のイベントを遅延同時計測で測定することで、バックグラウンド事象を排除してニュートリノイベントを検出することができる。

我々のグループが開発している PANDA は原子力発電所で求められる高い安全性を実現するべく、他の多くのグループが使用している液体シンチレータではなく、燃えにくいプラスチックシンチレータを採用している。それぞれに遮光を施した 10cm 四方、長さ 1m 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積み重ねることでターゲット部分を構成しており、各モジュールでのエネルギーデポジットからニュートリノイベントのセレクションを効果的に行うことができる。また、原子炉モニタリングを実現

するため可搬性も重視しており、過去に開発したプロトタイプ検出器はすべて 2 トントラックまたは貨物輸送用コンテナに積載した状態で運搬と測定ができるよう設計されている。これらの特徴をいかして、原子炉建屋の外、かつ地上からの原子炉モニタリングを世界で初めて実現することを目指している。

プラスチックシンチレータを 100 本使用する PANDA100 のプロトタイプとして、シンチレータをそれぞれ 16 本、36 本、64 本使用した lesserPANDA、PANDA36、そして PANDA64 の3つの検出器をこれまでに開発した。第1次プロトタイプ検出器 lesserPANDA は中部電力浜岡原子力発電所の敷地内で2か月間の試験的なバックグラウンド測定を行い、安定した無人運転が可能であることを確認した。それに続く第2次プロトタイプ検出器 PANDA36 では、関西電力大飯発電所の2号機近傍 (屋外・地上) での2か月間の測定を経て、原子炉運転期間と停止期間の間でニュートリノイベント検出率の 2σ の変化を捉えることに成功した (図 6.1)。これは原子炉建屋の外、かつ地上からの原子炉ニュートリノの検出としては、世界で初めてである。昨年度開発した第3次プロトタイプ検出器 PANDA64 は、データ取得回路の改善やシールドの設置などにより性能が大きく向上し、本郷キャンパス内に設置した貨物輸送用コンテナ内でのテスト測定も完了した。

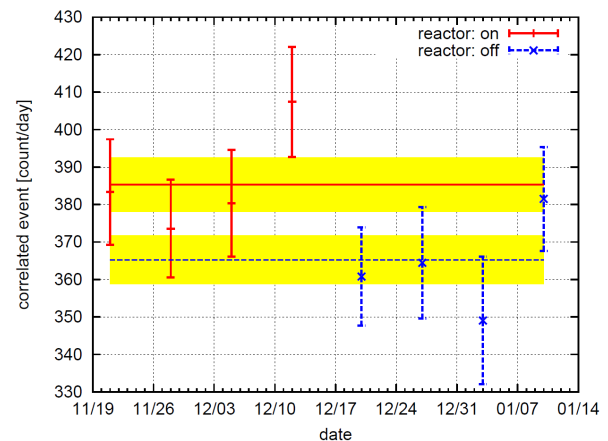


図 6.1: PANDA36 による大飯発電所での測定結果

地上測定において最大のバックグラウンドである高速中性子イベントについて、セレクションによる対処も検討した。原子炉ニュートリノ入射時の陽電子イベントと、高速中性子入射時の陽子反跳イベントを区別出来ればよい。プラスチックシンチレータを用いる PANDA では、液体シンチレータ方式の検出器で試みられている波形弁別法を行うのは難しいものの、モジュール構造を利用してエネルギーデポジット位置間の距離・角度情報を得る事ができる。これを利用したセレクションを検討し、比較的ニュートリノイベント数が少ないとき、従来行っていたセレクションより有利となるようなセレクションを開発した。またそれとは別に、同じく検出器のモジュール構造を利用することで宇宙線ミュオンの飛跡の再

構成を行うことで、建物での減衰による影を捉えた。

PANDA64での測定に向けた準備と並行して、シンチレータを100本使用するプロジェクトの最終的な検出器であるPANDA100の開発も開始しており、データ取得回路のアップデート、水シールド構造の簡略化などを進めている。PANDA64やPANDA100を使用して、PANDA36が大飯発電所で測定を行ったときと同じ条件下で測定を行うことを想定した場合、原子炉運転期間と停止期間をPANDA64の場合は2.5日ずつ、PANDA100の場合は0.8日ずつ測定するだけでニュートリノイベントの 3σ の変化を捉えることができると見込まれている。

PANDAの開発を進めつつ、ニュートリノによる原子炉モニタリングの実現にさらに貢献すべく、フランスで行われているNucifer実験に2013年度から参加している。NuciferはCEA Saclayが中心となって開発している液体シンチレータを用いた小型ニュートリノ検出器であり、PANDAがモジュールごとのエネルギーデポジットの情報をイベントセレクションに用いているのに対して、Nuciferは波形弁別法を用いてバックグラウンドイベントの除去を試みている。測定はフランスの実験炉Osirisにおいて行われており、検出器の設置場所は炉心から約7mのごく近傍である。屋外や地上での測定ではないため環境由来のバックグラウンドの影響が小さい一方で、炉心や周囲の配管からのバックグラウンドが原子炉の運転状況に伴って変化する環境にあり、PANDAとは異なる条件下での原子炉モニタリングに挑んでいる。Nuciferは昨年3月から安定した測定を行っており、現在得られたデータの解析を共同で進めている。

最近、複数の原子炉ニュートリノ実験の解析結果から指摘されている原子炉アノマリーをはじめ、さまざまな異なるタイプのニュートリノ実験によって第4のニュートリノ（ステライルニュートリノ）の存在が示唆されており、世界各地で20以上の検証実験が計画されている。ステライルニュートリノの検証は、短いベースラインでのニュートリノ振動を捉えるために、原子炉などのニュートリノ源のごく近傍にニュートリノ検出器を設置する必要がある。将来的にはPANDAを用いてステライルニュートリノの検証実験に貢献することを目指している。

6.1.1 想定外の現象

約2か月に及ぶ大飯発電所でのPANDA36検出器による測定データを再解析したところ、数十秒以上継続する γ 線と思われる放射線のバースト現象が3例観測された。そのうち、日本標準時2012年1月5日6:46頃に観測されたバーストは継続時間が約180sで、エネルギーが3MeV以上の検出率が最高で $5.5 \times 10^2/s$ もあった。

いずれの事例でも、気象庁の観測データによれば、近くに活動度の高い雷雲の存在が確認されており、雷雲中の電場と何らかの関係があると考えられる。我々の観測以前にも、冬の日本海沿岸地方の雷雲に関係した類似の γ 線バースト現象が観測されている。PANDA検出器のような、比較的大質量でセグメン

ト構造をもつ検出器による観測はこれが初めてなので、このバースト現象を詳しく解析してみた。

γ 線がプラスチックシンチレータモジュールのひとつでコンプトン散乱をして別のモジュールで再びエネルギーを落とすようなイベントを解析することにより、 γ 線の飛来方向が推定できる。それによると、我々の観測したバーストは、すべてほぼ天頂方向より飛来しており、バースト継続中はその方向は変わらなかった。

また、検出されたエネルギーは10–15 MeVまで延びる連続スペクトルであった。単純なモデルによるモンテカルロ・シミュレーションを行ったところ、エネルギーが16 MeVの単色の電子を高度400–1100 mの上空から鉛直下方に発射した場合の電磁シャワーによるエネルギースペクトルが観測データをよく近似していることがわかった。日本海沿岸の冬の雷雲は一般的な夏の雷雲と異なり、高度が低いことがわかっておりこのモデルと矛盾しない。逆に、夏の雷雲では高度が高すぎてこの程度のエネルギーの電子の発生する電磁シャワーは空気により吸収されて地上には届かない。

このような高エネルギーの γ 線が空気中を通過した時には、空気中の窒素原子に対するphotoneuclear reactionにより高速中性子が発生することがあるが、PANDA36検出器でも少数の高速中性子が検出されている。

このような γ 線を発生する機構として、雷雲中の電場による相対論的逃走電子のなだれ増幅モデルが提唱されている。空気中ではその阻止能のため、加速電場があっても低エネルギーの電子は加速されない。しかし、ある程度以上のエネルギー（典型的な雷雲では百～数百keV以上）の電子に対しては、加速電場による静電気が阻止能を超えるので ~ 20 MeVまで加速される。この加速された電子が、電磁シャワーなどにより電子を生み出して、さらに加速されることを繰り返すというのが、相対論的逃走電子のなだれ増幅モデルである。われわれの解析結果もこのモデルと矛盾しない。このなだれ増幅の種になる電子は宇宙線により供給されると考えられるが、知られている宇宙線中の電子のフラックスと、電子や γ 線の空気による減衰を考慮して、はたして我々の観測した検出率 $5.5 \times 10^2/s$ を説明できるのかどうかについては現在解析中である。

6.2 Hidden photon ダークマター探索

6.2.1 概要

様々な天文的観測の結果から、宇宙の物質成分の大半は、我々がよく知る通常の物質ではない何か、暗黒物質＝ダークマターによって占められていることが明らかになった。このダークマターの正体を突き止めることは、現在の宇宙・素粒子物理にとって最も重要な課題の一つとなっている。その中でも、ダー

クマターを直接実験室中の物質と反応させてその信号を得る**直接探索実験**はその証拠を掴み性質を調べる上で必須である。

近年、国内外の多数のグループにより直接探索実験が行われている。そのほとんどはダークマター粒子として質量が $\gtrsim \text{GeV}$ と重い Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) を想定し、その原子核反跳を捉える実験である。その他には axion ダークマター探索実験 ADMX が存在する程度で、WIMP 以外のダークマター候補についての探索は十分に行われているとは言いがたい現状がある。

その中で、我々は hidden photon と呼ばれる新たな U(1) 対称性に対応するゲージボソン \tilde{X}_μ を持つモデルについて、それがダークマターとなりうることに目をつけ、実験的探索を行っている。そのラグランジアンは、

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\tilde{X}_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}\tilde{X}_\mu\tilde{X}^\mu + J^\mu A_\mu$$

と、通常の光子との間に mixing parameter χ で記述される小さな混合が存在し、また質量 $m_{\gamma'}$ を持つ。このようなモデルは、標準理論を拡張する多くの模型において出現することが知られている。標準理論の電磁場との結合が存在するため、それを介して hidden photon を探索することができるが、 χ は非常に小さいことが想定されるため、何らかの方法でその信号を増幅する必要がある。これまでに axion ダークマターの探索を行ってきた ADMX では resonant cavity を用いて信号を増幅していた他、新たに dish antenna を用いる手法が提案された。我々のプロジェクトではこの dish antenna による手法で hidden photon ダークマターの探索を行っている。

6.2.2 光学領域

Hidden photon の質量が $\sim \text{eV}$ の光学領域では、光を反射する球面鏡と光検出器を用いて探索を行うことができる。我々は直径 50cm の鏡と、フォトンカウンティングが可能な低ノイズの光電子増倍管を用いて、質量が光学領域にある hidden photon CDM の探索実験を行っている。2013 年度はこの実験装置の設計・制作を行い、現在実際に地下の実験室において探索実験を実行中である。

6.2.3 電波領域

我々は hidden photon の質量が $10^{-5} - 10^{-4} \text{eV}$ オーダーである電波領域での探索も行う予定である。探索は市販のパラボラアンテナを用い、BS 放送に使われている Ku バンド (約 12GHz) について行う。

パラボラアンテナは直径が 2.2m と大口径のものを使用し、受信された信号を FFT アナライザでフーリエ変換する。検出される電波のエネルギーは hidden

photon ダークマターの質量と同等であるため、もし本粒子が検出された場合にはその質量に相当する周波数の信号強度だけが大きくなる。

現在はパラボラアンテナの信号利得の性能評価測定を行っている。今後はパラボラアンテナを電波暗室内に設置し、hidden photon の探索測定を開始する予定である。

本探索測定は約 1 か月を想定している。また、この測定を様々な周波数に感度のある受信機を用いて行うことで、広い領域の探索測定を行える。これらの測定によって図 6.2 に示すような領域の探索が可能になると期待される。

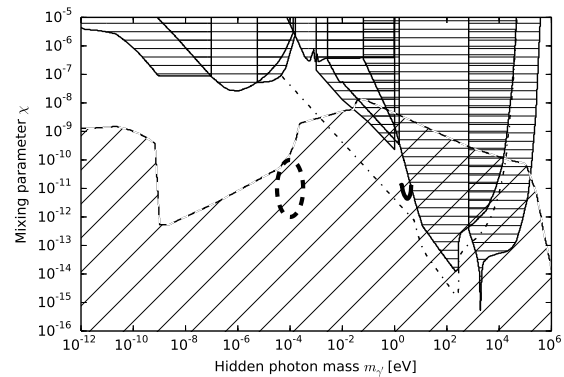


図 6.2: 斜線で塗りつぶされた部分が hidden photon ダークマターの未だに否定されていない領域。期待される感度領域はそれぞれ可視光領域については実線、電波領域については点線部分である。横線で塗りつぶされた領域は hidden photon について他グループの実験、考察によってすでに否定された領域。

<報文>

(原著論文)

- [1] 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, JCAP 07 (2013) 013, arXiv:1302.1000 [astro-ph.SR].

(会議抄録)

- [2] Y. Inoue, *et al.*: Search for Hidden photons with Sumico, Proceedings of the 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs 2013, eds. U. Oberlack and P. Sissol, DESY-PROC-2013-04, pp.109–114; arXiv:1312.7245.

(学位論文)

富田望: 「小型反電子ニュートリノ検出器におけるバックグラウンド事象」、平成 26 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)

招待講演

- [3] Y. Inoue: Search for Hidden Photons with Sumico, 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Schloß Waldthausen, Mainz, Germany, 24-28 June 2013.
- [4] S. Oguri: Reactor neutrino monitoring with a mobile plastic scintillator array (PANDA), Applied Anti-neutrino Physics 2013 (AAP2013), COEX Convention Center, Seoul, Korea, 1-2 November 2013.

(国内会議)

一般講演

- [5] 鈴木惇也: Hidden photon とダークマター、ビッグバンセンター研究者交流会、東京大学 2013 年 6 月 26 日
- [6] 井上慶純: Hidden photon search experiment, RESCEU サマースクール、「第 13 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、山形県山形市蔵王温泉みはらしの宿 故郷、2013 年 7 月 27 日
- [7] 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 PANDA の高速中性子バックグラウンド、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 20 日
- [8] 黒田康浩: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリノ検出器 PANDA の目的外使用、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 20 日
- [9] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 23 日
- [10] 堀江友樹: 太陽 hidden photon の探索手法について、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 23 日
- [11] 加藤陽: 原子炉モニター Nucifer@Osiris、新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会、東京都府中市「クロス・ウェーブ府中」 2013 年 12 月 7 日
- [12] 蓑輪 眞: その後の PANDA、物理学教室ランチトーク、東京大学 2014 年 1 月 24 日
- [13] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 28 日
- [14] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 28 日
- [15] 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 PANDA[1]、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 27 日
- [16] 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 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 27 日

(セミナー)

- [17] 蓑輪 眞: 素粒子と放射線、東京大学応用倫理教育プログラム「応用倫理研究 3」「生命をめぐる科学と倫理」、東京大学 2013 年 7 月 11 日
- [18] 蓑輪 眞: 科学的なもの見方、考福塾第一期第四回研修会、福井新聞社 2013 年 10 月 22 日
- [19] 蓑輪 眞: 世界は何でできている?、福井県おおい町名田庄中学校 2013 年 12 月 10 日、同大飯中学校 12 月 11 日
- [20] 蓑輪 眞: 宇宙と素粒子、高校生対象 クリスマス・レクチャー、けいはんなプラザ 2013 年 12 月 25 日

7 飛翔体によるX線観測

——宇宙からのX線・ガンマ線を捉える——
——(牧島・平賀・中澤)

7.1 科学衛星の運用と稼働状況

7.1.1 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8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、さらに2014年1月には2台ある二次電池の一方が大幅に劣化した。搭載されたX線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と、我々が設計製作に貢献した硬X線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、節電モードで断続的に運用されている。我々は本年度も、衛星およびHXDの運用を支援し、観測データの解析を進めた。

7.1.2 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、運用が続けられている。その運用はJAXAにより2014年度末まで認可されており、延長申請も計画されている。牧島は引き続き、理研MAXIチームの責任者を非常勤で兼務した。RESCEUとしては、MAXIに直接に参加してはいないが、「すざく」とMAXIの連携などを支援している。

7.1.3 後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機ASTRO-Hは、2015年度後半に打ち上げが設定され、建造が進んでいる。§7.7に詳述するように、我々はそれに全面的に参加している。

7.2 強磁場中性子星と超新星残骸

7.2.1 中性子星と超新星残骸 [128]

中性子星 (NS) は原子核物理学と関係が深い [129]。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)。多種多様なNSの中でも、とくに興味深い

のは、 $10^{14} - 10^{15}$ G の超強磁場をエネルギー源としてX線を放射する「マグネター」天体で [35, 59, 3, 129]、銀河系やマゼラン雲に約30個が知られている。

NSは重力崩壊型の超新星で作られると考えられ、後に残った超新星残骸 (SNR) は、NSの形成現場の証人として重要である [20, 52, 66, 86]。SNRはまた、重い星の進化の終点、重元素の合成とその星間空間への還元、衝撃波に伴うプラズマ加熱や宇宙線加速源などの面からも重要で、Project 2とも関係が深い。我々は、飛躍的な軟X線のエネルギー分解能や硬X線での撮像能力をもつASTRO-H (§7.7) への継承を念頭に、「すざく」によりNSおよびSNRの研究を進めている。

その一環として村上らは昨年につき、G330.2+1.0 と呼ばれるSNRの研究を進めた [51]。このSNRは不完全なシェルをもち、そのX線で明るい部分は非熱的スペクトル (おそらくシンクロトロン放射) を示すほか、中心よりやや東側の明るいスポットは、熱的X線放射を放射する。さらにその中心には、X線の点源が存在し (パルスは未発見)、SNRと起源を同じくするNSである可能性がある。

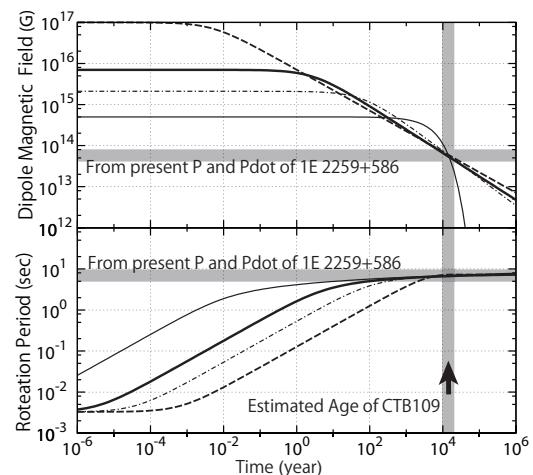


図 7.1: Allowed evolution tracks of the dipole magnetic field B (top panel) and the spin period (bottom panel) of the magnetar 1E 2259+586, assuming a power-law decay of B and spin-down due to magnetic dipole radiation. The system age, ~ 13 kyr, refers to that of CTB109, rather than the characteristic age of 1E 2259+586. Different line symbols specify different power-law indices of the field decay [86, 133].

7.2.2 超新星残骸 CTB109 とマグネター 1E 2259+586 [58, 66, 86, 133]

中野らは昨年につき、マグネター 1E2259+586 に付随する、CTB109 と呼ばれるSNRの研究を進めた。「すざく」によるX線分光の結果、その爆発エネルギー ($\sim 10^{51}$ erg s^{-1}) も元素組成も、重力崩壊型SNRとして典型的であった。またその特異な半月形の形状は、膨張するSNRシェルの中に巨大分子が食

い込んでいるとして説明できた。このようにマグネターを生んだ手掛かりとなる特異性は乏しいが、X線分光から得られたCTB109の推定年齢は約1.3万年で、1E2259+586の特性年齢(23万年)より大幅に若いという問題が残る。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ことを明らかにし、論文として投稿した。これは、マグネターが真の磁気駆動NSであることを支持するとともに、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、マグネターの方が多く誕生する可能性まで示唆している。ASTRO-Hによる高精度・広帯域のX線観測により、研究の多角的な進展が期待される。

中野らはまた、6.7 hという超長周期の中心天体を擁する類似したSNR、RCW103も研究した[77]。

7.2.3 マグネターの自由歳差運動の発見 [26, 88, 47, 94, 124, 128, 129]

マグネターのスペクトルは一般的に、黒体放射的な軟X線成分ときわめて硬い硬X線成分から成る。牧島らは理研の榎戸らと協力し、昨年(2013)に続き、マグネター4U 0142+61の2009年の「すざく」データを解析した。その結果、硬X線成分の8.69秒パルスの位相が、15時間の周期で ± 0.7 秒ほど前後に動く効果を確立した。これはNSの自由歳差運動の発現と考えられ、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直交軸回りに比べ $\sim 1.6 \times 10^{-4}$ だけ小さい(レモン型変形)として説明できる。マグネターのトロイダル磁場を観測から推定した最初の結果である。東大本部を通し2014年6月2日、各新聞社に対する掲載依頼の形で、プレスリリースが行われた。

2007年のデータではこの位相変調は有意に検出されず、他方2013のデータでは変調振幅が ~ 1.2 秒に増大していた。これはNSの幾何学的対称軸に対し、硬X線の発生領域が移動したことを示唆する。この位相変調は、軟X線領域では検出されず(振幅 < 0.3 秒)、硬X線成分と軟X線成分が、異なる放射領域をもつ可能性も明らかになった。他のマグネターの「すざく」データ解析を進めるとともに、ASTRO-Hによる高感度な硬X線観測を計画中である。

7.2.4 電子サイクロトロン共鳴

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。笹野らは理研の山本や三原とともに、MAXIの増光検出にもとづき再帰パルサーGRO J1008-57を「すざく」で観測し、HXDデータの ~ 80 keVにCRSFを発見し(図7.2)、この方法で測定された磁場の最高記録 7×10^{12} Gを得た[30]。

CRSF以外にも、スペクトル連続成分の形、鉄輝線の形状、パルス周期と変化率などから、降着NS

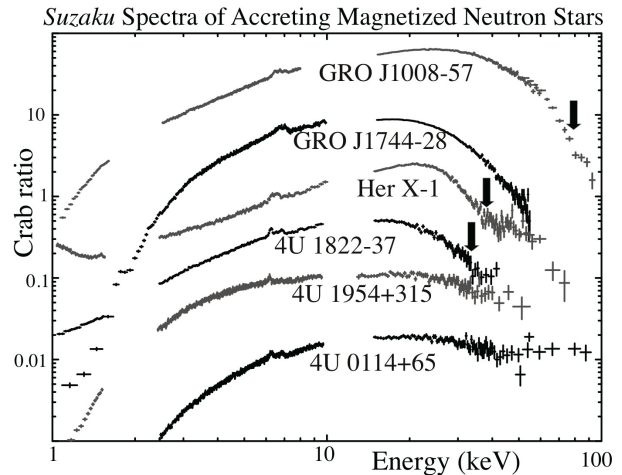


図 7.2: *Suzaku* νF_{ν} spectra of 6 magnetized accreting NSs. GRO J1008-57 [30] is a transient Be binary pulsar, while GRO J1744-28 (a transient), Her X-1, and 4U 1822-37 (a dipping binary [29]) have low-mass companions. 4U 1954+315 (with an M-giant companion [21]) and 4U 0114+65 (with a B-type companion) are long-period pulsars with the pulse periods of 5.1 hours and 2.6 hours, respectively. Arrows indicate CRSFs.

の磁場を総合的に推定する方法を、開発しつつある。特に有望なのは、ASTRO-Hの高分解能分光により、Alfvén半径付近で降着物質がNSと共回転する際の、鉄輝線のドップラー効果を検出することである。

笹野らは、周期的ディップを示す0.6秒のX線パルサー4U 1822-37(図7.2)から ~ 32 keVにCRSFを発見し、この天体が強磁場NSであることを示した[29, 60, 73]。さらに2014年3月、約20年ぶりにX線増光した、バーストとパルスの両方を示す稀な天体GRO J1744-28が「すざく」で観測された。笹野らの解析で得られた図7.2のスペクトルは、強磁場NSの特徴をもつ。これら2天体はともに、低質量星と強磁場NSが連星をなす稀な連星系と考えられ、そうした系の形成シナリオに興味をもたれる。

7.2.5 長周期パルサーの研究

一群のX線パルサーは数百秒 \sim 1万秒の長いパルス周期をもち、降着物質との相互作用が強いこと、よって $B \sim 10^{13}$ Gの強磁場をもつ可能性が示唆される。図7.2の4U 1954+315と4U 0114+65に代表されるように、それらのスペクトルは、折れ曲がりを示さず高エネルギーまで延び、これも磁場が強いことを支持する[60, 87, 135]。榎戸らは4U 1954+315の「すざく」データを解析し、わりに強めの磁場をもつNSに、ほぼ球対称な降着が起きているという描像を導いた[21]。よってこの天体は、マグネターが連星を成したものかもしれない。この解釈を検証するには、 Υ it ASTRO-Hによる > 100 keVでのCRSF探査が鍵となろう。

7.3 降着する弱磁場中性子星 [35]

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。降着流は NS 磁場にあまり影響されないため、その挙動は強磁場 NS の場合とは異なり、むしろ降着ブラックホールの場合に似るが、NS では硬い表面が存在することで違いが生じる。

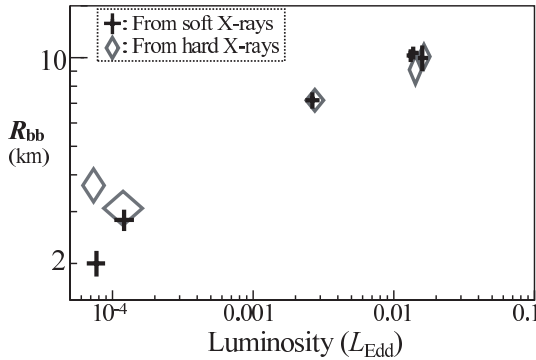


図 7.3: The effective radius of black-body source on the NS surface in Aql X-1 measured with *Suzaku*, shown as a function of the Eddington luminosity ratio. Crosses show values measured directly from the disk emission in soft X-rays, while diamonds those estimated from the optical depth of the Comptonizing corona [8, 54, 61].

7.3.1 光度変化に伴う降着流幾何の変化

昨年に続き、櫻井らはトランジェント LMXB の代表例である Aql X-1 の「すぎく」データ解析を続け [8, 54, 61, 103]、また小野らは GS 1826-238 の「すぎく」のデータ解析を進めた [34, 74, 106]。その結果、質量降着率が減少して系がソフト状態からハード状態へと遷移するさい、降着流や X 線放射領域がどう変化するかわらなくなってきた。たとえば図 7.3 の十字印は、スペクトルのソフト側に見られる黒体放射 (NS 表面からの放射) の等価半径を求めたもので、降着率が下がるにつれて弱い磁気圏が頭をもたげ、降着流が南北の磁極に絞られると解釈できる。同じ図の菱形は、観測スペクトルの硬 X 線部分から、高温コロナ流が NS 表面に降着する足下領域の等価半径を求めたものである。黒体放射半径と良く一致することから、弱い磁場による降着流の絞り込みが起きることは、より確実にされた。

7.3.2 Dipping 天体の研究 [55, 75, 105]

学振外国人研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のコロナ形状を測定すべく、それらのうち周期的ダイップを示す (円盤を横から見る) ものを研究している。典型例 4U 1916-053 の「すぎく」スペクトルを図 7.4 に示す。これは一般的な LMXB ソフト状態のモデルである、標準降着円盤からの多温度

黒体放射と NS 表面からの黒体放射がコンプトン化されたものの和で再現できるが、通常の LMXB (図の 4U 1820-30) に比べ、 > 10 keV でより強くコンプトン化されている。ソフト状態 LMXB の高温コロナが、円盤に沿って扁平に広がるためと考えられる。

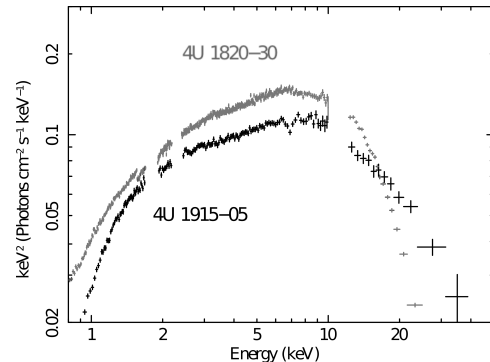


図 7.4: A *Suzaku* νF_ν spectrum of the dipping source 4U 1916-05, compared with that of the normal LMXB 4U 1820-30 [55, 75, 105].

7.3.3 熱的コンプトン散乱の統一的解釈

牧島、Zhang、櫻井、小林、小野、理研の杉崎らは、LMXB や降着ブラックホールに広汎に見られる熱的コンプトン過程の、統一的な解釈に挑戦している [48, 101, 104, 134, 53, 49]。その結果、電子コロナの温度 T_e と種光子温度 T_s の比 $Q \equiv T_e/T_s$ が、 y パラメータ ($y \equiv 4kT_e/m_e c^2 \times$ 光子散乱回数) を補充する、新しい良いパラメータになることがわかった。結果は図 7.5 の (Q, y) プロットにまとめられており、以下のように多くの結果が読み取れる。ASTRO-H でさまざまな展開が期待される。

1. LMXB のハード状態は $Q > 7$ (T_e が高く τ が低い)、ソフト状態は $Q < 5$ (T_e が低く τ が大) に現れ、 Q は状態のよい指標になる。
2. 多くの LMXB が、図上で共通の軌跡を描く。これは LMXB の自由度が質量降着率 (と inclination) のみであることを意味する。
3. LMXB が状態遷移するさい、図上で動きはひじょうに急激だが、軌跡は連続的につながる。
4. ブラックホール (BH) 天体は 2 次元分布する。これは降着率に加え、BH 質量、降着エネルギーの分岐比など、自由度が多いためであろう。
5. ULX と AGN に関しては項を改める (§7.4)。

7.4 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が降着する際、解放される重力エネルギーは、放射や運動エネルギー (ジェットなど) に変換されたり、BH に吸い込まれたりする。放射に行く分は最大で静止質量エネルギーの $\sim 10\%$

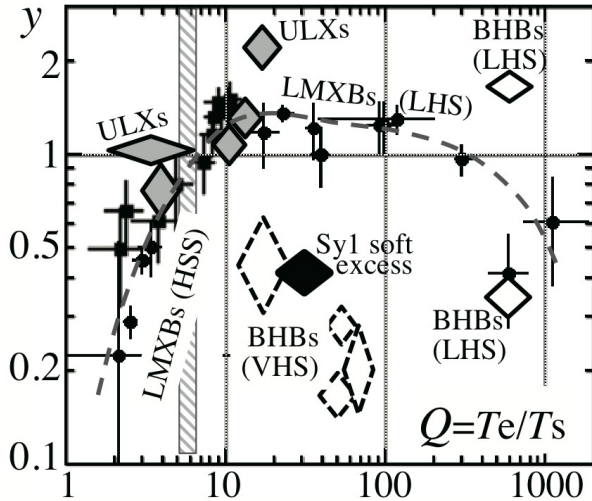


図 7.5: A *Suzaku* compilation of thermal Comptonization, on the plane of the new parameter $Q \equiv T_e/T_s$ and the y -parameter. Filled circles with crosses are weak-field neutron-star binaries (LMXBs), while diamonds represent accreting black holes, including black-hole binaries, ULXs, and a Seyfert galaxy. The vertical strip at $Q \sim 6$ indicates a boundary between the Low/Hard state (LHS) and the High/Soft state (HSS).

と考えられるが、この比は降着の仕方により、かなり変動すると見られる。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 5 桁以上の広帯域にわたる。

「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とづき、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。今年度も理研の山田らと協力し、その研究を続けた [6, 11, 12]。

7.4.1 ULX 天体 [31, 49, 76]

近傍銀河に見られる ULX (Ultra-Luminous X-ray Sources) 天体は、恒星質量 BH と巨大 BH を結ぶ、「中質量 BH」の有候補である (Makishima+2000)。それらは図 7.6 のように、Power-Law 的なスペクトルを示す PL 状態と、多温度黒体放射的なスペクトルを示す円盤の状態の間を遷移し、後者の方が光度が高い。小林らは、いくつかの ULX の「すぎく」データを解析し、以下を明らかにした。

1. どちらの状態でも、 $0.5\text{--}10$ keV スペクトルは、多温度黒体放射と、その熱的コンプトン化 ($T_e \sim 3$ keV, $\tau \sim 10$) との和で説明できる。円盤の状態は従来、Slim 円盤モデルで表されていた。
2. 円盤内縁温度を種光子温度 T_s に採り §7.3.3 の Q を求めると (図 7.5)、LMXB と同様、PL 状態は $Q > 7$ 、円盤状態は $Q < 6$ となる。
3. 状態遷移の光度は ULX 間で 1 桁半もばらつく。よって遷移が同じ Eddington 比で起きるなら、

ULX 間で Eddington 光度は 1 桁半も異なり、最も軽い ULX が $\sim 10 M_\odot$ だとしても、最も重い ULX は数百 M_\odot と推定される。

これらは特定の理論モデルに頼らず、ULX の中質量 BH 説を強化するもので、*ASTRO-H* の高感度な広帯域観測により、さらなる強化が期待される。

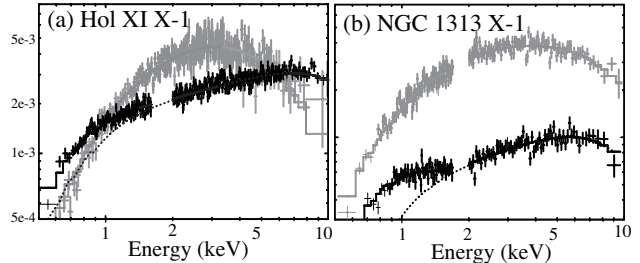


図 7.6: Spectra (in νF_ν form) of the two ULXs, Hol IX X-1 (panel a) and NGC 1313 X-1 (panel b), obtained in the PL state (black) and the Disk-like state (gray). The PL state data of Hol IX X-1 were taken with the *ASCA* GIS, while the others with the *Suzaku* XIS [49].

7.4.2 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。その円盤放射は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。野田らは昨年にも続き、「すぎく」で得た広帯域の AGN スペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する「C3PO」法を開発し、謎だった AGN の「軟 X 線超過現象」が、熱的コンプトン現象であることを立証した [40]。この結果は図 7.5 のように、他の降着天体と同列に論じられる。

さらに野田らはこの方法を約 10 個のセイファート銀河の「すぎく」データに適用した結果、 $3\text{--}45$ keV の広帯域放射が、次の三成分に分解できることを明らかにした [15, 36, 45, 62, 78, 80, 102]。

1. 光子指数 $\Gamma \approx 2.3$ と柔らかく変動の激しい、power-law (PL) 的な一次成分。光度 (Eddington 比) が高くなると卓越する。
2. 光子指数 $\Gamma \approx 1.4$ と硬く、吸収が強く、変動の遅い、第 2 の PL 的な一次成分。光子指数は $\Gamma \approx 1.4$ と硬い。Eddington 比が低い時に優勢となる。
3. 遠方の中性物質で発生する反射成分。硬 X 線コンプトンハンプ、幅の狭い鉄輝線、吸収された連続成分から成る。

この描像は、AGN の一次放射を単一成分として扱う長年の通説に根底から見直しを迫る重要性をもち、三宅らによるセイファート銀河 IC 4329A の解析でも確認された [79, 33, 56, 108]。野田はこの新描像を発展させることで、修業年齢特例で博士学位を早期取得し [37]、理学系研究科奨励賞を受賞し [1]、多くのセミナーでこの成果を講演した [143, 141, 147, 148]。AGN のセントラルエンジンの全貌を解明することは、*ASTRO-H* の最重要テーマの 1 つになる。

7.4.3 活動銀河核のX線-可視光同時観測

野田らは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 MIT-SuME、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、2013年度に6回にわたり、NGC 3516の「すぎく」と可視光の同時観測を実行した [43, 107, 141, 147, 148]。どの観測でも NGC 3516 は、X線でも可視光でも、過去にないほど暗かったが、結果として図 7.7 のように、両者の間に良い相関が得られた。これは暗い時に卓越する $\Gamma \approx 1.4$ の成分が、降着円盤からの可視光と強く相関することを意味する。従来 NGC 3516 で X線と可視光の相関が悪いとされたのは、 $\Gamma \approx 2.3$ の X線成分が可視光と無相関に変動するためと解釈できる。

以上の結果から、 $\Gamma \approx 1.4$ の成分は、理論的に予言されている、Radiatively Inefficient Accretion Flow (RIAF) からの放射である可能性が高い。

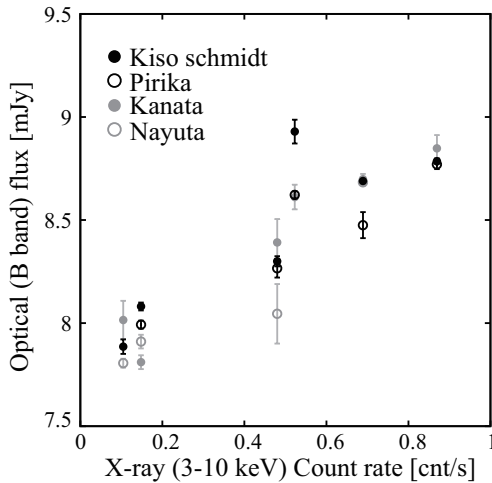


図 7.7: X-ray (abscissa) to optical (ordinate) intensity correlation of the Seyfert galaxy NGC 3516, obtained with simultaneous observations using *Suzaku* and 5 medium-size domestic telescopes. The optical data includes contribution from the host galaxy.

7.5 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。

7.5.1 銀河団の宇宙論的進化の新しい描像

牧島らは「あすか」のX線観測により、銀河団に関し独創的な磁気流体的描像 (Makishima +2001) を構築してきた。それは「銀河団のメンバー銀河たちは、ICM中を運動するさい抵抗を受け、渦巻から楕円へと形態を変化させつつ中心に落下し、その解放

エネルギーがICMの放射冷却を止め、粒子加速を駆動する」という壮大な筋書きで、銀河団に関する多くの謎を一挙に解決できる威力をもつ。

この予言を証明すべく、Gu (雇 力意)、牧島らは、奈良高専の稲田直久 (センターのOB) らと協力し、近傍 ($z \sim 0.1$) から遠方 ($z \sim 0.9$) までの34個の銀河団を「サンプル1」と定義し、それらをハワイ大学88インチ望遠鏡で観測した。その多色画像からメンバー銀河を同定し、それらの空間分布を求め、X線公開データ (*Chandra*, *XMM-Newton*) から計算した高温プラズマの空間分布と比較した。その結果、図 7.8 に離散データ点として示すように、遠方銀河団ではICM周辺部まで銀河が分布するのにに対し、近傍の系では、ICM球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でき [14, 28]、牧島の予言を検証することに成功した。これは、宇宙最大級のエネルギー流の新発見を意味する。

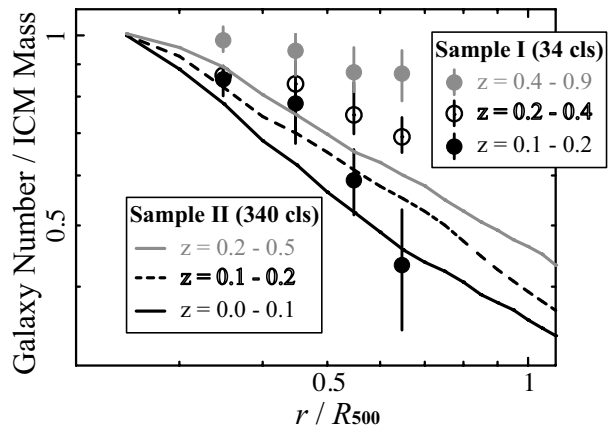


図 7.8: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Discrete data points represent results on Sample 1 (34 clusters), while the three curves Sample 2 (340 clusters), averaged into three separate subgroups with different redshifts.

Gu らは中国人研究者の協力を得て、Sloan Digital Sky Survey のデータを2次処理した、 $z = 0 \sim 0.5$ の340個の銀河団のデータ (多色測光でメンバーを選定済み) を入手できた。それらを「サンプル2」と名付け、対応するX線公開データと合わせて同様に解析した結果、図 7.8 に実線として示すように、サンプル1と同様、銀河が宇宙年齢かけて中心へ落下するという進化を検出できた。成果は国際学会や国内学会・研究会 [82, 44, 109, 127, 130, 131, 90, 93]、国内外でのセミナー [137, 138, 140, 142, 144, 145, 146] など広く公表し、また2014年3月に新聞記者発表を行った [152]。ASTRO-Hを用い、大きな視線速度をもつメンバーの周囲で、ICMのX線放射のドップラーシフトを検出できれば、動かぬ証拠となる。

7.5.2 銀河ガスの動圧剥ぎ取り

上記の結果は、銀河とICMが強く相互作用することを意味する。流入するICMの動圧により、銀河自

身のガスが下流へ変位し、それが銀河の星や暗黒物質に重力を及ぼすのであろう。この動圧が限界を越えると、銀河ガスは重力ポテンシャルを乗り越えて銀河から剥ぎ取られ、それに伴い重元素が、銀河間空間に運ばれると考えられる。その現場を明らかにすべく、Guらは昨年続き、国立天文台の八木らと協力し、「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」望遠鏡などで明らかにできた [109, 16]。剥ぎ取られたガスが銀河団の中で星を形成するという、驚くべき兆候も得た [17]。

7.5.3 衝突銀河団 CIZA J1358.9 – 4750

CIZA は銀河面の背後にある銀河団のカタログで、加藤、中澤らは、その中から $z = 0.07$ の標記天体を選び「すざく」により観測した。山形大の滝沢、阪大の藤田、シドニー大の赤堀らと協力してデータを解析した結果、図 7.9 のように、この天体は 2 つの銀河団に対応する X 線ピークと、その中間をつなぐ X 線放射とから成り、中間部では ICM の加熱が起きていること、よってこの天体は、2 つの銀河団がまさに衝突しかかっている、貴重な系であることが判明した [32, 50, 63, 81, 91, 122]。XMM-Newton の X 線画像では、衝撃波も同定できた。ICM の温度上昇とランキン=ユゴニオの関係から、衝突速度は $\sim 1800 \text{ km s}^{-1}$ と推定される。「すざく」の追観測および電波観測が採択され、Chandra の観測にも応募した。

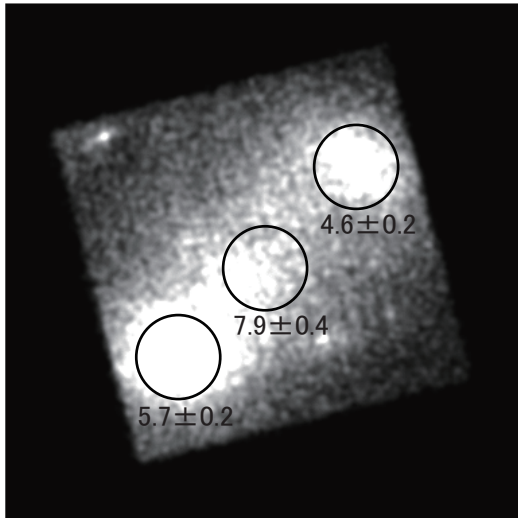


図 7.9: The 1–10 keV *Suzaku* XIS image of CIZA J1358.9 – 4750, on which the ICM temperatures (in units of keV) at three locations are indicated.

7.6 雷雲ガンマ線の研究

7.6.1 GROWTH 実験 [25, 65, 71, 125]

我々は身近な天然の加速器として、雷雲中での粒子の静電加速を理解すべく、原子力機構の土屋、理研

の榎戸などと協力し 2006 年度より、新潟県柏崎刈羽原子力発電所にて、冬期雷雲から飛来するガンマ線の検出実験 GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds) を行っている。これは結晶シンチレータを用いた自律型の検出器で、今年度は博士 1 年の榎本が参加し、体制が強化された。

7 冬にわたる GROWTH 観測で、おもに 12 月～1 月に、約 20 例のガンマ線放射が検出された。うち 1/3 ほどは、雷放電に同期した短い (< 0.1 秒) 「短バースト」、残りは雷放電に同期せず 1 分～数分間も続く「長バースト」である。雷雲中には $\sim 0.2 \text{ MeV m}^{-1}$ の静電場があり、宇宙線などで $> 100 \text{ keV}$ の電子が生じると逃走電子機構により、電子が雪崩増幅されつつ、相対論的領域にまで加速され、制動放射でガンマ線を出すと考えられる。バーストの長短によらずガンマ線スペクトルは $\sim 10 \text{ MeV}$ まで延びるので、電子が $> 10 \text{ MeV}$ まで加速されていることは疑いない。しかし長バーストで、いかにして加速が 1 分以上も維持されるかは、まだ大きな謎である。

7.6.2 雷放電に伴うガンマ線の途絶 [25]

長バーストの中でも興味深いのが、2010 年 12 月 30 日のイベントである。3 分ほど続く長バーストがほぼピークに達したとき落雷があり、その $\sim 800 \text{ msec}$ 前に、ガンマ線放射が突如として途絶したのである。落雷により静電場が解消されたため、電子加速が止まったと解釈されるが、詳細は未解明である。

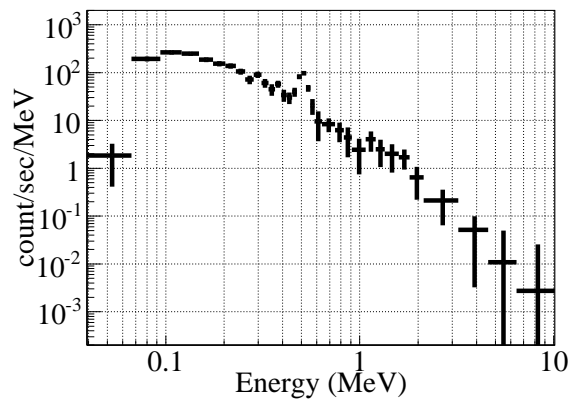


図 7.10: A background-subtracted spectrum of burst like gamma-ray emission from thunderclouds, on 2012 January 13, 00:27:00 UT, detected for about 1 minute with the GROWTH experiment placed at Niigata Kariwa Nuclear Plant. A clear 511 keV line is seen.

7.6.3 511 keV ラインの検出 [65, 71, 125]

2013–2014 年の冬にはあいにく、GROWTH でバーストが検出されなかったが、2012–2013 年の冬には 3 例が検出され、その 1 例 (2012 年 1 月 13 日 UT 00:27 に発生) は 2 つの点で特異である。1 点は、短バーストと同時に長バーストが起きたこと、もう

1 点は図 7.10 のように、長バーストのスペクトルの 508 ± 5 keV に顕著な輝線が検出されたことである。これは電子陽電子対消滅線と解釈でき、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡による宇宙空間からの検出例を除くと、雷ガンマ線から地上で初めて対消滅線が検出された事例である。ラインは等価幅にして ~ 80 keV で、これは過去の GROWTH イベントにおける上限値より 1 桁以上も強い。電子陽電子対は数 MeV のガンマ線により生成されるが、どうやって連続成分に対しラインをここまで強くできるか、また短バーストと長バーストの複合がそれに関係しているかなど、きわめて興味深い。

7.7 ASTRO-H 衛星計画

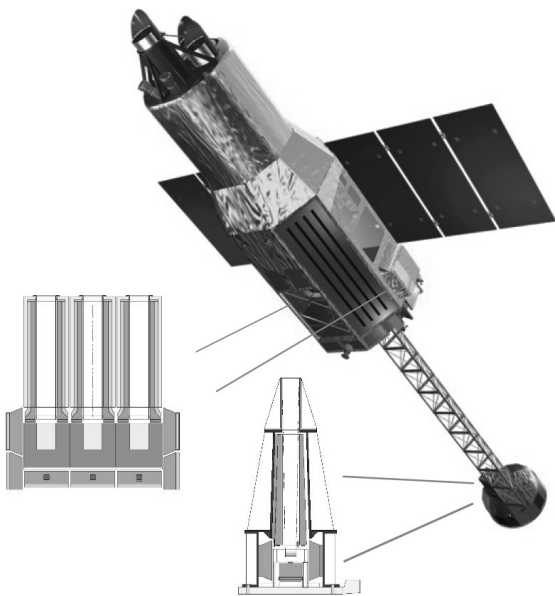


図 7.11: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2015. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

7.7.1 *ASTRO-H* 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は、国内の多くの大学・研究機関、米国 NASA および欧州 ESA などの国際協力の下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、0.5–10 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に加え、38' の広視野を持つ X 線 CCD カメラ (SXI)、5–80 keV を集光結像する 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT) とその焦点面に置かれる硬 X 線イメージャー (HXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。これら 4 種 6 個の検出器の組み合わせにより、*ASTRO-H* は広帯域、高感度、高精度での X 線分光観測を得意

とし、ブラックホールや銀河団の研究などに飛躍的な進展をもたらす。同衛星は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本の科学衛星として最大で、HIIA ロケットにより 2015 年に打ち上げられる予定である。平賀は、大阪大学、京都大学、JAXA、工学院大、東北学院大、宮崎大、青山学院大ほかの機関と協力し、SXI の開発に大きな貢献を行っている。また本プロジェクトは、JAXA、広島大ほか国内の大学研究機関、またスタンフォード大、フランス CNES などと共同し、HXI と SGD の開発に参加している。

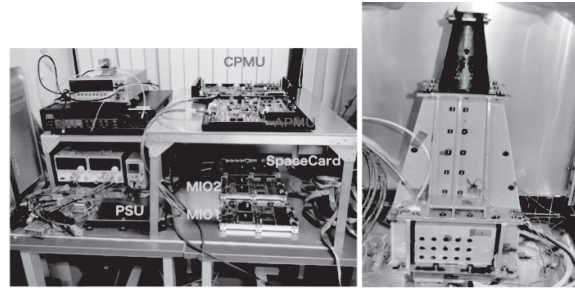


図 7.12: HXI “full EM” test pictures. Full system made of FPGA electronics and power supplies (left) are put outside the thermostatic chamber, within which the sensor part is located (right).

7.7.2 SXI の開発実験 [69, 70, 83, 84, 110, 111, 119, 97]

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。

2013 年度は、納品された 24 素子の中から、実際に搭載する FM 用 CCD 素子 4 個を選定し、他の全ての FM 部材と合わせて、2013 年 12 月に SXI のセンサーを完成させた。2014 年 1 月には、衛星との通信、データ処理を司るデジタルエレクトロニクス機器 (SXI-PE および DE) の一部が EM であることを除いて、全ての構成要素の FM 品が完成し、これらを接続した、SXI サブシステムとしての end-to-end 試験を JAXA つくば宇宙センターにて実施した。基本的機能・性能に問題ないことを検証した後、衛星本体に組み付け、衛星全体での初めての電気動作試験を実施し、衛星からの供給電源を用い、他の搭載機器の電氣的干渉を受けることなく、読み出しノイズ $6-8 e^-$ 、と目標性能を達成している。

7.7.3 HXI の開発実験 [68, 72, 85, 95, 120, 38, 39]

HXI は、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、エネルギー分解能 1.5

keV の精度で分光する。その検出器部は図 7.11 に示すように、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を搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来の装置より 2 桁よい感度を実現する。

2013 年度は図 7.12 に示すように、HXI 検出器システムのフルセットの試作機 (通称 “full EM”) を立ち上げ、半導体イメージャ部、シールド部、データ処理部、ソフト部、地上系のすべてを通した形態で、多くの機能試験、性能確認試験を実施した。試験には、衛星の主コンピュータのシミュレータから、HXI 検出器および全回路系、さらに地上解析/運用システムのシミュレータが含まれる。作業は相模原の JAXA 宇宙科学研究所において半年にわたって行われ、イメージャの試験には中野の指導の下で小林が [112]、シールド系の試験には笹野の支援の下で村上が、それぞれ中心的に参加した [115, 113, 118]。試験に必要なソフトウェアの整備には、櫻井が大きく貢献した [72]。最終的に図 7.13 に示すようなスペクトルを取得し、 -20° 環境で要求性能を満たすことを実証した。小林と村上は、この成果をそれぞれ修士論文にまとめた [38, 39]。

今年度はまた衛星搭載品 (flight model = FM) の開発・製造も進められ、5 月現在、5 層のイメージャと 9 個の BGO シールドから成る、検出器部 (HXI-S) の 1 台目が完成している。イメージャの性能試験は、小林らが JAXA と共同で、また BGO の性能確認は、笹野らが静岡大などと共同で完遂した [114]。HXI-S の 2 台目は現在、構造体と 9 個の BGO シールド製造が終了し、イメージャの完成を待って、全体の組み立てに向かう。

検出器の読み出し回路系は、すべての基板の最終試作品 (Engineering Model = EM) が製造された。開発製造を担当する三菱重工の社内試験を経て、我々も性能試験を実施した。いくつかの改良を経て、最終的に性能を満たす設計が確立され、これを受けて、FM の製造が完了した。

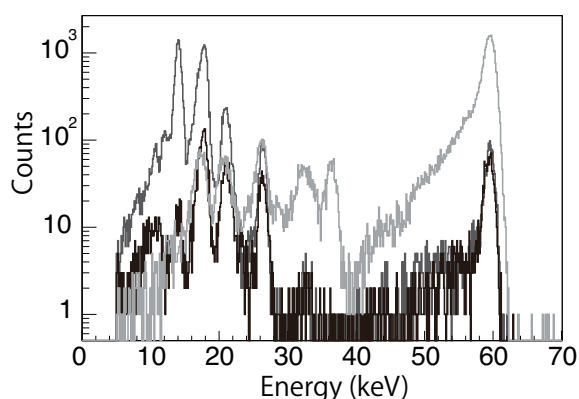


図 7.13: ^{241}Am spectra obtained in the “HXI full EM” test. All radio active lines are clearly observed. For clarity, the top and bottom DSSD and the CdTe spectra are shown. The measured energy resolution meets the requirement of < 2 keV (FWHM).

7.7.4 SGD の開発実験 [67, 96]

SGD は図 7.11 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 より感度を一桁上げる。

SGD の開発でも今年度は、衛星搭載品に準ずる装置を用い、中澤は主に検出器の構造の視点から、野田がその熱設計の視点から、そして村上らがシールド部の視点から、性能評価と環境試験をリードした。

JAXA の筑波宇宙センターで行われた、SGD 検出部の構造開発の最終試験では、大面積のラジエータの支持構造の開発が難航したが、いくつかの方策により問題を解決した。SGD の主検出部である Si/CdTe コンプトンカメラ部に対しても、熱と構造の観点から、最終確認試験を行った。シールド部に関しては、HXI のそれと共通性が高いため、あわせて開発を進め、すでに 2012 年度内に基本設計は完成している。これらをもって SGD 検出部の設計が確定した。

これを受け 2013 年度の後半では、FM 品の製造が開始された。SGD 1 台あたり 25 個の BGO モジュールの製造では、HXI と同様に三菱重工で製造されたものを、笹野、三宅、小野らが静岡大や名古屋と協力し、評価試験した。1 号機用の 25 個は性能検証が済み、現在は 2 号機用の製造に入っている。

HXI に準じ、SGD も試作機と一部 FM を組み合わせた全系の試験を行っている。いくつか課題が発見され、対策の検討を進めた。ここでは、シールド担当として村上らが大きく貢献した。

7.7.5 衛星全体の環境試験と組み上げ

2013 年度には、図 7.14 のように全体構造を用い、ASTRO-H 衛星の機械環境と熱環境の試験が実施された。その結果、振動や衝撃レベルが更新され、熱設計のチューニングが行われた。これらの結果は、HXI および SGD の最終設計にフィードバックされた。

2013 年末から 2014 年 5 月にかけては、衛星全体の「一次噛合わせ試験」が実施されており、HXI は 2 セット (一部 EM 品で代用)、SGD は 1 セット (一部 EM 品で代用) とダミー 1 セットをもって参加している。衛星構体にすべてのサブシステムを取り付け、配線し、電源供給とデータ収集を確認する作業で、多くの課題を洗い出し対策を講じつつ、作業を進めている。熱構造系の試験では中澤や野田らが、データ処理系では櫻井らが、また HXI の試験では小林や村上らが、大きく貢献している。

今後はいったん衛星を分解後し、各サブシステムの環境試験、打ち上げに向けての最終艀装、装置の較正作業などを実施する。衛星は 2014 年の 11 月より、最終組み上げと最終試験に突入し、2015 年秋には種子島へ移送し、2015 年度内の打ち上げに臨む。

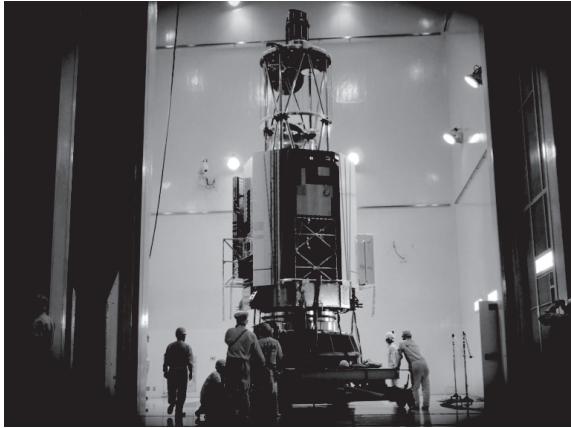


図 7.14: *ASTRO-H* in its mechanical test configuration, being transferred to the acoustic test facility at the Tsukuba Space Center.

7.8 将来計画

7.8.1 CMOS 素子を用いた X 線撮像

平賀と笹野は時間分解能が乏しいという X 線 CCD の欠点を補うべく、市販の可視光用 CMOS 型半導体撮像センサーを用いた、X 線撮像分光の技術開発を進めた [64, 100]。蓄積モードで、 $10\mu\text{m}$ を切る位置分解能と、0.1 秒の時間分解能をもつ X 線の直接撮像に成功した。また ^{55}Fe 線源を用いて単一光子モードによる X 線検出を試みた結果、 $\text{Mn-K}\alpha$ と $\text{K}\beta$ のスペクトル分離に成功し、エネルギー分解能は半値幅で 290 eV であった。将来の宇宙観測に向けて、非常に期待される結果である。

7.8.2 sub-MeV ガンマ線全天探査衛星 *CAST* の検討 [98, 116]

MeV 帯域の宇宙観測は、原子核からの輝線が現れる帯域であると同時に、宇宙の粒子加速の研究において、ローレンツ因子が最も小さい電子の逆コンプトン散乱が見られ、今なお人類にとって未開のフロンティアである。しかし 2000 年の COMPTEL の停止以降、その観測に進展は乏しい。近年の *Fermi* 衛星による GeV 帯域の全天観測の成果に照らすと、MeV 帯域においても 1 mCrab レベル感度での広視野 (or 全天) 観測の実現が重要である。

ここを担うべく我々が検討を進めているのが、*CAST* (Compton Telescope for Astro and Solar Terrestrial) 計画である。これは *ASTRO-H* 衛星の SGD 検出器に搭載される Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡の技術を発展させ、将来の小型衛星もしくは国際宇宙ステーション (ISS) の搭載機器として、全天を撮像観測する計画である。0.2–2 MeV の “sub-MeV” 帯域に集中することで、小型で高性能な観測装置を目指している。また *CAST* の発展として、欧州やアメリカの MeV 研究者と連携し、将来の MeV 大型衛星の計画の検討も進めている。

7.8.3 その他の実験開発

これまで OB の奥山や西岡が着手し、笹野らが受け継いだ、BGO 結晶シンチレータの集光率の実験結果を、論文にすることができた [27]。将来の宇宙観測を目指し、三宅や小野は、高速中性子を判別できる新型のプラスチックシンチレータの評価や、臭化セリウム結晶シンチレータの性能評価を進めた。

7.8.4 次期 X 線観測衛星の計画検討

2015 年に打ち上げ予定の *ASTRO-H* は、その時期に宇宙にあがる唯一の国際宇宙天文台であるが、その次の大型ミッションとして本年に ESA 主導の *ATHENA* 計画が採択され、2028 年の打ち上げを目指して動き始めた。本計画には日本も参加を検討しており、国際調整が進められている。一方で、その打ち上げ以前に *ASTRO-H* は想定寿命を迎えることから、両者の間をつなぐ次世代ミッションも検討に着手している。

<受賞>

- [1] 野田博文、東京大学理学系研究科研究奨励賞 (博士の部、天文学専攻)、2014 年 3 月 25 日

<報文>

(原著論文 (Refereed))

- [2] Fujita, Y. Okabe, (5 co-authors), Matsushita, K., Nakazawa, K. & Takizawa, M: “Discovery of an Outstanding Disk in the cD Galaxy of the Hydra A Cluster”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, Art., No.L.15 (2014).
- [3] 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**, Art. No. 52 (2013).
- [4] Fujinaga, T., Mori, K., Bamba, A., Kimura, S., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Pulhofer, 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**, Art. No. 61 (2013).
- [5] 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**, Art. No. 74 (2013).
- [6] 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**, Art. No. 80 (2013).

- [7] Nakajima, M., Mihara, T., Sugizaki, M., Serino, M., Matsuoka, M., Kawai, N., & Makishima, K.: “Precursors and outbursts of A 0535+26 in 2009-2011 observed by the MAXI/GSC and the Swift/BAT”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, Art., No. 9 (2014).
- [8] Sakurai, S., Torii, S., Noda, H., Zhang, Z., Ono, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S. & Matsuoka, M.: “Suzaku studies of luminosity-dependent changes in the low-mass X-ray binary Aquila X-1”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, Art. No. 66 (2014).
- [9] Burke M.J., Raychaudhury S., (20 co-authors), & Zhang, Z.: “Spectral properties of X-ray binaries in Centaurus A” *Astrophys. J.* **766**, id 80 (2013).
- [10] Ichikawa, K., Matsushita, K., (7 co-authors), Nakazawa, K. et al.: “Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium”, *Astrophys. J.* **766**, id 90 (2013).
- [11] 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”, *Astrophys. J. Lett.* **767**, id 34 (2013).
- [12] 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”, *Astrophys. J. Lett.* **767**, id 35 (2013).
- [13] Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y. T., 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**, id 70 (2013).
- [14] 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**, id 157 (2013).
- [15] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S., “A Suzaku Discovery of a Slowly Varying Hard X-ray Continuum from the Type I Seyfert Galaxy NGC 3516”, *Astrophys. J.* **771**, id100(2013).
- [16] Gu, L., Yagi, M., Nakazawa, K., Yoshida, M., Fujita, Y., Hattori, T., Akahori, T. & Makishima, K.: “Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram Pressure Stripping of a Galaxy: Discovery of an X-Ray Absorption Feature”, *Astrophys. J. Lett.* **777**, id L36 (2013).
- [17] Yagi, M. Gu, L., Fujita, Y., Nakazawa, K., Akahori, T., Hattori, T., Yoshida, M. & Makishima, K.: “Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram-pressure Stripping of a Galaxy. II. Star Formation in the Tail”, *Astrophys. J.* **778**, id 91 (2013).
- [18] Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y. T., Watanabe, S., Takahashi, T. & Makishima, K.: “Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. II. Monte Carlo Modeling”, *Astrophys. J.* **780**, id 38 (2013).
- [19] Tamura, T., Yamasaki, N. Y., Iizuka, R., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Ueda, S., Matsushita, K., Sato, K., Nakazawa, K., Ota, N. & Takizawa, M.: “Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku”, *Astrophys. J.* **782**, id 38 (2013).
- [20] Yamaguchi, H., Badenes, C., Petre, R., Nakano, T., Castro, D., Enoto, T., Hiraga, J. S., et al.: “Discriminating the Progenitor Type of Supernova Remnants with Iron K-shell Emission”, *Astrophys. J. Lett.* **785**, id L27 (2014).
- [21] Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al.: “Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System”, *Astrophys. J.* **786**, id. 127 (2014)
- [22] Su, Y., Gu, L., White, R. & Irwin, J.: “Joint XMM-Newton and Chandra Observations of NGC 1407/1400 Complex: A Tail of an Early-Type Galaxy and a Tale of a Nearby Merging Group”, *Astrophys. J.* **786**, id.152 (2014).
- [23] Doroshenko, V., Santangelo, A., Nakahira, S., Mihara, T., Sugizaki, M., Matsuoka, M., Nakajima, M. & Makishima, K.: “Footprints in the wind of Vela X-1 traced with MAXI”, *Astron. Ap.* **554**, id A37 (2013).
- [24] Kishishita, T., Hiraga, J., & Uchiyama, Y.: “Non-thermal emission properties of the northwestern rim of supernova remnant RX J0852.0-4622”, *Astron. Ap.*, **551**, id A132 (2013).
- [25] Tsuchiya, H., Enoto, T., Iwata, K., Yamada, S., Yuasa, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kato, H. “Hardening and Termination of Long-Duration γ Rays Detected Prior to Lightning”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, id 015001 (2013).
- [26] Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, id.171102 (2014).
- [27] 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.* **715**, 105 (2013).
- [28] 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* **334**, 453 (2013).

- [29] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: “Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822–37”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, in press (2014).
- [30] Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. & Sasano, M.: “Firm detection of a cyclotron resonance feature with Suzaku in the X-ray spectrum of GRO J1008-57 during a giant outburst in 2012”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, in press (2014).

(会議抄録)

- 天文・天体物理若手夏の学校 (宮城蔵王: 2013年7月29日～8月1日) 収録

- [31] 小林翔悟ほか: 「『すざく』による ULX 天体 Holmberg IX X-1 のスペクトルの時間変動解析」
- [32] 加藤 佑一ほか: 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の『すざく』による観測」、銀河 44c
- [33] 三宅 克馬ほか: 「Sy1 活動銀河核 IC4329A における新たな硬 X 線成分の発見」、コンパクト天体 09a
- [34] 小野光ほか: 「『すざく』を用いた GS 1826-238 のハード状態のスペクトル解析」、コンパクト天体 10a

- その他の収録

- [35] Makishima, K.: “From Sco X-1 to magnetars: Past, present, and future of X-ray studies of neutron stars” *Mem. S.A. Italy*, vol. 84, p.547 (2013).
- [36] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S.: “Model-Independent Decomposition of Broad-Band *Suzaku* Spectra of AGNs into Primary Continua and Secondary Components”, *ibid*, p.707.

(学位論文)

- [37] Noda, Hirofumi: “X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei with Suzaku” 博士学位論文 (天文学専攻; 2013年9月、修業年限特例早期取得)
- [38] 小林翔悟: 「*ASTRO-H* 衛星搭載の硬 X 線撮像検出器の応答特性」、修士学位論文
- [39] 村上浩章: 「*ASTRO-H* 搭載硬 X 線検出器のアクティブシールド機能の検証」、修士学位論文

< 学術講演 >

(国際会議招待講演)

- [40] Noda, H.: “Soft and Hard X-ray Excess Variability in Type I AGNs”, *The restless nature of AGNs: variability as a probe of the central engine*, (Napoli, Italy; 2013 May 20-23).

- [41] Makishima, K.: “Plasma Astrophysics in Clusters of Galaxies”, *The 12th Int'l WS on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS013)* (白馬; 2013 Jul. 1–5).
- [42] Makishima, K.: “AGN Studies from *Suzaku* to *ASTRO-H*”, *Int'l Conf. on "Black holes, jets and outflows"* (Kathmandu, Nepal; 2013 Oct. 14–18).
- [43] Noda, H.: “X-ray Astronomy at University of Tokyo”, *UTokyo Forum: Global Emergence of Frontier Knowledge* (Santiago; 2013 November 7–8).
- [44] Gu, Liyi: “Probing of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale” *Suzaku-MAXI conference 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, (愛媛大学; 2014 February 19-22).
- [45] Noda, H.: “A Novel *Suzaku* View of the Central Engine in Active Galactic Nuclei”, *ibid*.
- [46] Noda, H.: “AGN Emission Decomposition with Time Variability”, *HXI/SGD Science Work Shop* (広島大学; 2014 February 24-25).
- [47] Makishima, K.: “Some Novel Results from Recent X-ray Observations”, *Fujihara Seminar: X-raying the Gamma-Ray Universe – CTA-X-ray LINK Meeting* – (箱根; 2013 November 4–6).

(国際会議一般講演/ポスター)

- *Suzaku-MAXI Conference: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe* (愛媛大学; 2014 Feb. 19–22)
- [48] Makishima, K., Zhang, Z., Noda, H., Toii, S., Sakurai, S., Kobayashi, S., Ono, K., Nakazawa, K., Sugizaki, M., Yamada, S. & Kawaguchi, T.: “A Unified Compilation of Thermal Comptonization Processes in Accreting Objects” (Oral).
- [49] Kobayashi, S., Makishima & K., Nakazawa, K.: “A Unified Interpretation of the ULXs Spectra in Terms of the Te/Tin Ratio” (Oral).
- [50] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Fujita, Y., Okabe, N & Makishima, K.: “Observation of nearby early merging clusters of galaxies CIZA J1358.9-4750 with *Suzaku*” (Poster VI-3).
- [51] Murakami, H.: “*Suzaku* study of X-ray emission from the high-latitude supernova remnant G332.5-5.6” (Poster VI-9).
- [52] Nakano, T.: “Statistical studies of supernova remnants with *Suzaku* toward the *ASTRO-H* era” (Poster VI-10).
- [53] Ono, K.: “Towards a Unification of the Hard and the Soft states of LMXBs” (Poster VII-45).
- [54] Sakurai, S.: “Luminosity-Dependent Changes in the Accretion Geometry in *Aquila X-1*” (Poster VII-50).
- [55] Zhang, Z.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of LMXBs” (Poster VII-81).

- [56] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S. & Makishima, K.: “The New Primary Radiation from Seyfert 1 AGNs” (Poster VIII-12).
- [57] Nakazawa, K.: “Magnetic fields in cluster radio relic as observed with Suzaku and to be with *ASTRO-H*” (Poster IX-10).
- その他の国際会議
- [58] Nakano, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of the Supernova Remnant CTB109 and its Central Magnetar 1E 2259+586” (Poster), *The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants* (Madrid, 2013 May 22-24).
- [59] Enoto, T., Makishima, K., Shibata, S., Nakagawa, Y. & Sakamoto, T.: “*Suzaku* View of Recent Magnetar and Magnetar-related Objects” (Poster) *ibid.*
- [60] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S. & Zhang, A.: “*Suzaku* studies of 4U 1822-37: an LMXB involving a strongly magnetized neutron star” (Poster), *Physics at the Magnetospheric Boundary* (University of Geneva; 2013 June 25).
- [61] Sakurai, S.: “Evolution of the accretion geometry through an outburst decay phase of the NS-LMXB Aquila X-1” (Poster) *ibid.*
- [62] Noda, H.: “A Novel Picture for the Central Engine of Seyfert Galaxies Established with *Suzaku*” (Poster), *East-Asia AGN Workshop 2013* (札幌; 2013 August 20-23).
- [63] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L. & Makishima, K.: “Observation of merging clusters of galaxies with *ASTRO-H*” *The 4th ASTRO-H Summer School* (修善寺; 2013 September 5-7).
- [64] Sasano, M., Hiraga, J. & Makishima, K.: “X-ray photon detection with a newly developed CMOS image sensor” (Poster), *The 12th Symposium on X-ray imaging optics* (阪大; 2013 November 20).
- [65] Umemoto, D., Tsuchiya, H., Enoto, T. et al: “Observations of radiation bursts from winter thunderclouds and lightning over the Japan sea coast” (Oral), *American Geophysics Union Fall Meeting 2013* (San Francisco; 2013 December 9-13).
- [66] Nakano, T., Makishima, K., Enoto, T. & Uchiyama, H.: “Clues to the formation and evolution of magnetars from X-ray observations of the associated supernova remnants” (Oral), *The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death* (Firenze, Italy; 2014 March 25).
- (国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2013年9月20~23日、高知大学; 口頭)
- [67] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、内山秀樹、(17名)、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「*ASTRO-H* 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星搭載器開発」、21pSP-1
- [68] 佐藤悟朗、国分紀秀、中澤知洋、内山秀樹ほか: 「*ASTRO-H* 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発の現状」、21pSP-4
- [69] 平賀純子、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、木村公、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、幸村孝由、村上弘志、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム: 「X 線天文衛星 *ASTRO-H* 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 VI」、21pSP-5
- [70] 中嶋大、薙野綾、穴吹直久、林田清、常深博、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、木村公、鶴剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、平賀純子、幸村孝由、村上弘志、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム: 「*ASTRO-H* 搭載 X 線 CCD カメラ SXI 用 CCD 素子スクリーニング」、21pSP-6
- [71] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、中澤知洋、玉川徹、牧島一夫ほか: 「2012 年中における日本海沿岸の冬季雷雲からのガンマ線観測」、21pSP-14
- [72] 櫻井壮希、中澤知洋、小高裕和、国分紀秀ほか: 「*ASTRO-H* 衛星搭載硬 X 線イメージ用の機上オンラインイベント選別処理の効率の検証」、22aSL-7
- 日本天文学会・秋季年会 (2012年9月10日~12日、東北大学; 口頭)
- [73] 笹野理、牧島一夫、櫻井壮希、Zhang Zhongli、榎戸輝揚、「すざくによる低質量星中性子星連星 4U 1822-37 の観測」、J116a
- [74] 小野光、牧島一夫、中澤知洋、櫻井壮希、鳥井俊輔: 「『すざく』でみたハード状態の中性子星連星 GS 1826-238」、J117a
- [75] Zhang, Z., Sakurai, S., Sasano, M. & Makishima, K.: “*Suzaku* observation of the non-dip spectrum of the dipping source XB 1916-053”, J119a.
- [76] 小林翔悟、牧島一夫、中澤知洋: 「『すざく』による近傍 ULX 天体 M33 X-8 のスペクトルとその時間変動」、J147a
- [77] 中野俊男、牧島一夫: 「『すざく』衛星による長周期パルサーに付随する超新星残骸 RCW103」、K01a
- [78] 牧島一夫、野田博文、中澤知洋、三宅克馬、山田真也: 「活動銀河核のセントラルエンジンの理解に向けて」、S27a
- [79] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫: 「IC4329A における時間変動を用いたモデル依存しない手法による成分分解」、S28a
- [80] 野田博文、牧島一夫、三宅克馬、山田真也: 「『すざく』で調べる活動銀河核セントラルエンジンからの硬 X 線信号」、S29a
- [81] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、西田瑛量、牧島一夫: 「『すざく』による衝突初期銀河 CIZA J1358.9-4750 の観測」、T02a
- [82] Gu, L., Nakazawa, K., Makishima & Jinlin Han: “Investigation of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters IV”, T09a.

- [83] 村上弘志、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、富田洋、木村公、鶴剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、幸村孝由、平賀純子、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム: 「ASTRO-H 搭載軟 X 線撮像検出器 SXI の開発の現状」、W127a
- [84] 信川久美子、鶴剛、田中孝明、内田裕之、信川正順、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、富田洋、木村公、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、幸村孝由、平賀純子、村上弘志、他 SXI チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の地上較正実験とそれに用いる X 線発生装置の製作」、W128a
- [85] 中澤知洋、牧島一夫ほか HXI team: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状 ~FM 製造の現状と予想性能~」、W140a
- マグネター研究交流会 (理研仁科ホール、2013 年 12 月 13 日; 口頭)
- [86] 中野俊男: “Magnetar-SNR association”.
- [87] 笹野 理: “Searching for strong-magnetic-field neutron stars in X-ray binaries”.
- [88] Makishima, K.: “Possible Magnetic Deformation of Magnetars”.
- X 線銀河団研究会 (東京理科大学、2013 年 12 月 28 日; 口頭)
- [89] Makishima, K.: “Plasma-Physical View of Central Regions of Clusters of Galaxies”.
- [90] Gu, L.: “Probing of Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters”.
- [91] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、中西裕之、小澤武揚、岡部信広、牧島一夫: “Observation of nearby early merging clusters of galaxies CIZA J1358.9-4750 with SUZAKU”.
- RESCEU 新年交流会 (2014 年 1 月 6 日; 口頭)
- [92] Nakazawa, K.: “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope and beyond”.
- [93] Gu, L.: “Cosmological Co-Evolution of Member Galaxies and Hot Plasmas in Galaxy Clusters”.
- [94] Makishima, K.: “Measuring aspherical deformation of neutron stars”.
- 第 14 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2014 年 1 月 9~10 日; ポスター)
- [95] 国分紀秀、(7 名)、中澤知洋、牧島一夫 ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、P2-4
- [96] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司、(17 名)、中澤知洋、牧島一夫、内山秀樹ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発」、P2-5
- [97] 常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、高橋宏明、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、富田洋、木村公、鶴剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、平賀純子他 SXI チーム: 「ASTRO-H 搭載軟 X 線撮像検出器 (SXI) の開発」、2-8
- [98] 中澤知洋、高橋忠幸、田島宏康、釜江常好ほか: 「MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST 計画」、P2-37
- [99] 玉川 徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、(8 名)、田原 譲、高橋忠幸、牧島一夫ほか: 「X 線偏光観測衛星 GEMS の現状と今後」、P2-39
- [100] 平賀純子、笹野理、牧島一夫: 「CMOS イメージセンサーを用いた X 線の直接検出」、P2-249
- [101] 牧島一夫、Zhongli Zhang、野田博文、鳥井俊輔、櫻井壮希、小林翔悟、小野光、中澤知洋、山田真也: 「『すぎく』で観測した降着型天体における熱的コンプトン過程の系統的解析」、P3-4
- [102] 野田博文、牧島一夫、山田真也: 「『すぎく』が確立した活動銀河核セントラルエンジンの新描像」、P3-5
- 日本天文学会・春季年会 (2014 年 3 月 19 日~22 日、国際基督教大学; 口頭)
- [103] 櫻井壮希、小野光、Zhongli Zhang、中澤知洋、牧島一夫: 「ハード状態の LMXB における光学的に薄い降着流の取束」、J103a
- [104] 牧島一夫、Zhang, Z.、野田博文、鳥井俊輔、櫻井壮希、小林翔悟、小野光中澤知洋、杉崎 陸、山田真也、川口俊宏: 「降着コンパクト天体の熱的コンプトン過程の新しい考察: 『すぎく』の結果」、J104a
- [105] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K. & Sasano, M.: “Understanding Dipping LMXBs in the Same Scheme as Normal LMXBs”, J105a.
- [106] 小野光、櫻井壮希、鳥井俊輔、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫: 「『すぎく』によるハード状態における LMXB の統一的な研究」、J106a
- [107] 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、諸隈智貴、小久保充、土居守、山田真也ほか: 「X 線と可視光の同時観測で迫る NGC 3516 セントラルエンジンの構造」、S27a
- [108] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫: 「IC4329A における時間変動を用いたモデル依存しない成分分解 (2)」、S28a
- [109] Gu, L. & Makishima, K.: “Investigation of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Galaxy Clusters V”, T04a.
- [110] 平賀純子、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、富田洋、木村公ほか SXI チーム: 「Astro-H 搭載軟 X 線撮像検出器 SXI の開発の現状」、W117a
- [111] 信川久美子、鶴剛、田中孝明、内田裕之、信川正順、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、富田洋、木村公、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、幸村孝由、平賀純子、村上弘志、他 SXI チーム: 「ASTRO-H 搭載軟 X 線撮像検出器 SXI における CTI および Charge Trail 補正」、W119a

- [112] 小林翔悟、村上浩章、笹野理、櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の統合試験における半導体両面ストリップ主検出部の応答調査」、W124a
- [113] 大野雅功、田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、(15 名)、中澤知洋、野田博文、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) 開発の現状」、W125a
- [114] 内山秀樹、山岡和貴、(6 名)、笹野理、三宅克馬、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載検出器 (HXI/SGD) のアクティブシールド BGO ユニットフライト品の受け入れ試験」、W126a
- [115] 徳田伸矢、大野雅功、高橋弘充、深沢泰司、村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器の End-to-End 試験によるアクティブシールドの機能検証」、W127a
- [116] 中澤知洋、高橋忠幸、渡辺伸、国分紀秀ほか: 「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラによる sub-MeV 全天観測構想」、W130a
- 日本物理学会・春季大会 (2013 年 3 月 27~30 日、東海大学 (平塚); 口頭)
- [117] 大野雅功、(4 名)、村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線軟ガンマ線検出器における BGO アクティブシールドの開発状況」、29pTK-1
- [118] 村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、鳥井俊輔、中澤知洋ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器のアクティブシールド機能の検証」、29pTK-2
- [119] 村上弘志、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、木村公、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、平賀純子、幸村孝由、森浩二、廿日出勇、山内誠、西岡祐介、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム: 「X 線衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 VII」、29pTK-5
- [120] 川原田円、国分紀秀、中澤知洋ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発状況」、29pTK-6
- [121] 太田方之、田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、(17 名)、中澤知洋、野田博文、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発状況」、29pTK-8
- [122] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫: 「『すざく』による近傍の初期衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の観測」、29pTK-11
- [123] 山岡和貴、田代信、(22 名)、牧島一夫、中澤知洋、田島宏康: 「すざく衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (VIII)」、29pTK-12
- [124] 牧島一夫、榎戸輝揚、平賀 S. 純子、中野俊男、中澤知洋、櫻井壮希、笹野理: 「『すざく』で探るマグネター 4U 0142+61 における中性子星の自由歳差運動と磁気変形」、29pTK-13
- [125] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、中澤知洋、国分紀秀、加藤博、岡野眞治、玉川徹、牧島一夫: 「2012 年以降の日本海沿岸の冬季雷雲からの粒子線観測」、30aTK-13
- [126] 玉川徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、山田真也、岩切渉、阿佐美、吉川英文、武内陽子、金子健太、幸村孝由、田原譲、高橋忠幸、牧島一夫ほか: 「X 線偏光観測衛星 GEMS 開発の現状 (III)」、30aTK-16
- その他の国内研究集会
- [127] Gu, L.: “Galaxy vs. Plasma Interactions in Clusters of Galaxies: Results, Implications, and Prospects”、RESCEU 研究交流会 (2013 年 6 月 26)
- [128] 牧島一夫: 「中性子星に関するトピックス」、ビッグバンセンター第 13 回サマースクール (山形蔵王温泉; 2013 年 7 月 24-27 日)
- [129] 牧島一夫: 「X 線によるマグネターの研究」、新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」公募研究交流会 (仙台; 2013 年 9 月 12 日)
- [130] Makishima, K. & Gu, L.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Plasmas in Clusters of Galaxies (1)” (Invited)、日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2013 (水沢; 2013 年 9 月 13 日)
- [131] Gu, L. & Makishima, K.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Plasmas in Clusters of Galaxies (2)” (Invited)、同上
- [132] Gu, L. & Makishima, K.: 「X 線と電波観測による銀河団プラズマ中の磁場測定の実況」 (Invited)、同上
- [133] 中野俊男: 「マグネターに付随する超新星残骸の観測的研究」、新学術研究領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第二回中性子星核物質研究会 (理化学研究所; 2013 年 12 月 25 日)
- [134] 小野光、鳥井俊輔、櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫: 「Low-mass X-ray Binary のソフト状態とハード状態の関係」 (ポスター)、同上
- [135] 笹野理: 「磁場強度から見た中性子星と恒星の連星系」、連星天文学研究会 (京都大学; 2014 年 2 月 12 日)
- [136] 牧島一夫、顧力意: 「銀河団における銀河とプラズマの宇宙論スケールでの相互作用」、SKA ワークショップ「銀河進化と遠方宇宙」(東大; 2014 年 3 月 24 日)
- (セミナー、談話会、集中講義)
- [137] Gu, Liyi: “Probe of Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”、天文学教育研究センター談話会 (三鷹; 2013 年 5 月 16 日)
- [138] Gu, Liyi: “Probing of the Galaxy-Hot Plasma Interactions in Galaxy Clusters”、地球惑星物理学専攻 横山研究室セミナー (2013 年 7 月 10 日)
- [139] Gu, Liyi: “The Hot Universe: Intracluster Medium and the Related Plasma Physics”、RESCEU 夏の学校招待講義 (蔵王; 2013 年 7 月 25 日)
- [140] Gu, Liyi: “Towards a Deeper Understanding of the Hot Plasma in Galaxy Clusters”、ISAS/JAXA プラズマグループセミナー (相模原; 2013 年 8 月 19 日)
- [141] 野田 博文: 「X 線観測で迫る活動銀河核セントラルエンジンの新描像」、広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外天文研究室 談話会 (2013 年 10 月 2 日)

- [142] Gu, L.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, Seminar at Durham university, Group of Astronomy and Astrophysics (UK: 2013 October 25).
- [143] Noda, H.: “X-ray Studies of the AGN Central Engine by Suzaku”, Seminar at Durham university, Group of Astronomy and Astrophysics (*ibid.*)
- [144] Gu, Liyi: “Towards a Deeper Understanding of Plasma Astrophysics in Galaxy Clusters”, 千葉大学セミナー (千葉; 2013年11月18日)
- [145] Gu, Liyi: “Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, IPMU セミナー (柏; 2013年12月3日)
- [146] Gu, L.: “Electro-Magnetic Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, 国立天文台談話会 (三鷹; 2013年12月4日)
- [147] 野田博文: “X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei”, 京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 談話会 (京都; 2013年12月10日)
- [148] 野田博文: 「X線と可視光の同時観測で迫る AGN センtral エンジンの新たな描像」、東京大学理学系研究科 天文学専攻 談話会 (2014年1月21日)
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [149] 牧島一夫: 「宇宙の謎をいっしょに考えよう」、文京区子ども科学カレッジ (文京区; 2013年4月18日)
- [150] 牧島一夫: 「大気圏外から宇宙を見る」、東大理学部 高校生のための夏休み講座 2013 (2013年8月20日)
- [151] Zhang Zhongli: ”An introduction to X-ray Astronomy and International Research”, 日本学術振興会サイエンス・ダイアログ講演 (山梨県立日川高校; 2013年10月10日)
- [152] 牧島一夫、Gu Liyi、稲田直久ほか: 新聞記者発表 「銀河団における巨大なエネルギーの流れを発見～巨大な銀河たちも、低きに流れていた～」、(日本天文学会、東京大学、奈良国立工業専門高校、理研、JAXA、国立天文台; 2014年3月19日)

8 太陽系外惑星

——太陽系外惑星および星惑星形成——
(田村・須藤)

8.1 系外惑星の直接撮像による探査

すばる望遠鏡戦略枠 SEEDS プロジェクトに基づく国際共同研究。HiCIAO を用いた高コントラスト観測を行い、系外惑星の探査を行った。その結果、太陽型星 GJ 504 において惑星を発見した。推定質量は 3-5 木星質量、離角距離は 44 au であった。太陽系サイズの軌道を持つ直接観測された数少ない惑星の中でも最も軽く、かつ、低温であり、いわば「第二の木星」の撮像に成功したと言える [17, 19, 33]。

8.2 系外惑星の直接観測による特徴付け

すばる望遠鏡戦略枠 SEEDS プロジェクトに基づく国際共同研究。SEEDS で発見された系外惑星 kappa And b の Keck/NIRC2 および LBTI/LMIRCam における多波長測光観測を行い、さまざまな進化および惑星形成モデルとの比較を行った。その結果、本天体の形成は重力不安定性で説明可能なことを示した [22]。

8.3 原始惑星系円盤の高コントラスト高解像度直接観測

すばる望遠鏡戦略枠 SEEDS プロジェクトに基づく国際共同研究。HiCIAO を用いた高コントラスト観測を行い、原始惑星系円盤および残骸円盤の観測を行った。その結果、RY Tau の原始惑星系円盤に非対称な散乱光を検出した。数値シミュレーションの結果と比較した結果、この赤外線分布は、円盤上層部に広がった密度の薄い塵の層によるものと考えられる。円盤の立体構造がここまで詳細に明らかにされたのは初めてである。さらに、SR21 の原始惑星系円盤にはサブミリ波で観測されるような空隙が近赤外線では見られないことを示した。これは、円盤の内外における塵のサイズ分布が大きく異なることを示している [8, 13]。

8.4 トランジット観測による系外惑星大気の研究

成田憲保らを中心として、すばる望遠鏡に搭載された可視光カメラでスーパーアース GJ1214 b を観測した結果 この惑星では晴れた水素大気の中で観測されるはずの強いレイリー散乱の特徴が見られないことが明らかとなった。これは、GJ1214 b が水蒸気を主成分とする大気を持つ可能性が高いことを示している。同天体を IRSF における赤外線カメラ IRSF で JHK s バンド同時撮像を初めて行った [10, 15]。

8.5 褐色矮星の観測的研究

UKIRT 望遠鏡を用いた UKIDSS プロジェクトのうち、Large Area Survey で発見された 76 個の T 型矮星の測光・分光観測の結果を報告した。さらに、星団における超低質量天体探査プロジェクトである SONYC についてのまとめ講演を行った [12]。

8.6 銀河中心の観測的研究

西山正吾 (国立天文台) らを中心として、IRSF 望遠鏡および SIRPOL 偏光器を用いた銀河中心の広域偏光観測を行い、同領域のトロイダル磁場とポロイダル磁場の関係を明らかにした。さらに、それによってプラズマの閉じ込めが起こっていることを示唆した [11]。

8.7 系外惑星研究のための観測装置の開発

すばる望遠鏡用高コントラスト装置 HiCIAO (ハイチャオ) を保守・運用している。すばる望遠鏡用超高精度視線速度分光器 IRD (アイアールディー) を開発している。本装置は、広ピッチ回折格子、光周波数コム、光ファイバー、セラミック光学系およびベンチ、2048x2048 素子赤外線検出器等を用いている。また、TMT のための高コントラスト観測装置 SEIT (サイト) の開発を京都大学・国立天文台・北海道大学等と進めている。この装置によって地球型惑星の直接観測を実現することを目指している。さらに、IRSF 望遠鏡のための偏光器 SIRPOL の保守・運用も行っている。

8.8 トランジット時刻変動を用いた複数トランジット惑星系の探求

2009年の打ち上げ以来、ケプラー宇宙望遠鏡が発見したトランジット惑星は、候補も含めて3000以上を数える。これらの惑星の質量を決定することは、惑星系の性質の統計的理解に欠かせない作業である。一方、ケプラーがターゲットとする主星の多くは暗いため、従来通りの視線速度法による質量の決定は困難である。そこで近年よく用いられるのが、複数トランジット惑星系におけるトランジット時刻変動(惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ)の解析である。本研究では、この手法を視線速度法と比較しその信頼性と限界を明らかにするとともに、複数惑星系の性質を系統的に調べることを目的とし、ケプラーによって発見された2つの複数トランジット系(KOI-94およびKepler-51)においてトランジット時刻変動の解析を行った。その結果、1. KOI-94系の4惑星候補のうち、3つの質量を精密に決定し、これらが惑星であるという確証を得た。2. 特に、4つのうち最大の惑星の質量は、視線速度法によって独立に得られた値の半分程度となった。この差異の原因は未だ不明だが、いずれかの質量決定法に系統誤差が含まれる可能性を示唆する。3. Kepler-51系の3惑星すべてが、これまで発見された中で最も低密度の惑星であることを発見した。このような惑星の存在は現在の惑星形成理論では予想されておらず、標準モデルに対する観測的制限となる。4. 上記に加え、KOI-94系の3惑星もまた平均と比べてかなり低密度であることを示した。これらの結果は、低密度惑星の存在が短周期の複数トランジット惑星系の普遍的な特徴であることを支持する[26, 27, 45, 70, 94, 110]。

8.9 系外惑星系におけるスピン軌道傾斜角の潮汐進化

中心星自転軸と惑星公転軸のなす角(スピン軌道傾斜角 λ)は、惑星系形成の初期条件およびその後の軌道進化の情報を担う重要な観測量である。これまで行われたトランジット惑星に対するロスター・マクローリン効果の測定により、系外惑星系のスピン軌道傾斜角は太陽系のように必ずしも小さくはなく、幅広い分布をもつことが明らかにされている。今回我々は、太陽型星とホット・ジュピターからなる単純な系に対し、平衡潮汐と星内部での慣性波の散逸を同時に考慮してスピン軌道傾斜角の潮汐進化を調べた。その結果、系は瞬時に $\lambda = 0^\circ$ 、 $\lambda = 90^\circ$ 、 $\lambda = 180^\circ$ のいずれかの状態へと移行し、さらに後者2つはやがて $\lambda = 0^\circ$ に落ち着く準安定な状態であることを明らかにした。即ち、今回用いたモデルでは、観測で得られるような中間的な値のスピン軌道傾斜角を再現することは困難であった。従って、観測された幅広い軌道傾斜角の分布は、外惑星も含めたよ

り複雑な相互作用の存在や、原始惑星系円盤と中心星の自転方向がそもそもずれている可能性を示唆する[28, 71, 95]。

<受賞>

- [1] 田村 元秀: 第54回東レ科学技術賞 2014/03/18
- [2] 成田 憲保: 田村 元秀 他: 第18回 欧文研究報告論文賞 2014/02/25
- [3] 平野照幸、第30回井上研究奨励賞 「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」、井上財団、2014年2月4日
- [4] 成田憲保、第6回井上リサーチアワード 「スーパーアースとは何か? その組成と形成過程の解明」、井上財団、2014年2月4日
- [5] 成田憲保、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、2014年3月21日
- [6] 増田賢人、平成25年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞(修士課程)「トランジット時刻変動を用いた超低密度惑星の発見」、2014年3月24日

<報文>

(原著論文)

- [7] Hatano, H., Nishiyama, S., Kurita, M., Kanai, S., Nakajima, Y., Nagata, T., Tamura, M., Kandori, R., Kato, D., Sato, Y., Yoshikawa, T., Suenaga, T., Sato, S., 2013, "The Efficiency and Wavelength Dependence of Near-infrared Interstellar Polarization toward the Galactic Center," *Astron. J.*, **145**, 105 (13pp).
- [8] Follette, K. B., Tamura, M., Hashimoto, J., Whitney, B., Grady, C., Close, L., Andrews, S. M., Kwon, J., Wisniewski, J., Brandt, T. D., and 43 coauthors, 2013, "Mapping H-band Scattered Light Emission in the Mysterious SR21 Transitional Disk", *Astrophys. J.*, **767**, 10 (26pp).
- [9] Medhi, B. J., Tamura, M., 2013, "Cluster membership probability: polarimetric approach", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **430**, 1334–1343.
- [10] Narita, N., Nagayama, T., Suenaga, T., Fukui, A., Ikoma, M., Nakajima, Y., Nishiyama, S., Tamura, M., 2013, "IRSF SIRIUS JHKs Simultaneous Transit Photometry of GJ 1214b", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **65**, 27 (8pp).
- [11] Nishiyama, S., Yasui, K., Nagata, T., Yoshikawa, T., Uchiyama, H., Schodel, R., Hatano, H., Sato, S., Sugitani, K., Suenaga, T., Kwon, J., Tamura, M., 2013, "Magnetically Confined Interstellar Hot Plasma in the Nuclear Bulge of Our Galaxy", *Astrophys. J.*, **769**, L28 (5pp).
- [12] Burningham, B., Cardoso, C. V., Smith, L., Leggett, S. K., Smart, R. L., Mann, A. W., Dhital, S., Lucas, P. W., Tinney, C. G., Pinfield, D. J., and 27 coauthors including Tamura, M., 2013, "76 T dwarfs from the UKIDSS LAS: benchmarks, kinematics and an updated space density", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **433**, 457–497.

- [13] Takami, M., Karr, J. L., Hashimoto, J., Kim, H., Wisniewski, J., Henning, T., Grady, C. A., Kandori, R., Hodapp, K. W., Kudo, T., and 43 coauthors including Tamura, M., 2013, “High-contrast Near-infrared Imaging Polarimetry of the Protoplanetary Disk around RY Tau”, *Astrophys. J.*, **772**, 145 (17pp).
- [14] Janson, M., Brandt, T. D., Moro-Martín, A., Usuda, T., Thalmann, C., Carson, J. C., Goto, M., Currie, T., McElwain, M. W., Itoh, Y., and 42 coauthors including Tamura, M., 2013, “The SEEDS Direct Imaging Survey for Planets and Scattered Dust Emission in Debris Disk Systems”, *Astrophys. J.*, **773**, 73 (11pp).
- [15] Narita, N., Fukui, A., Ikoma, M., Hori, Y., Kurosaki, K., Kawashima, Y., Nagayama, T., Onitsuka, M., Sukom, A., Nakajima, Y., and 12 coauthors including Tamura, M., 2013, “Multi-color Transit Photometry of GJ 1214b through BJHK s Bands and a Long-term Monitoring of the Stellar Variability of GJ 1214”, *Astrophys. J.*, **773**, 144 (10pp).
- [16] Yamamoto, K., Matsuo, T., Shibai, H., Itoh, Y., Konishi, M., Sudo, J., Tanii, R., Fukagawa, M., Sumi, T., Kudo, T., and 45 coauthors including Tamura, M., 2013, “Direct Imaging Search for Extrasolar Planets in the Pleiades”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **65**, 90 (19pp).
- [17] Kuzuhara, M., Tamura, M., Kudo, T., Janson, M., Kandori, R., Brandt, T. D., Thalmann, C., Spiegel, D., Biller, B., Carson, J., and 47 coauthors, 2013, “Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504”, *Astrophys. J.*, **774**, 11 (18pp).
- [18] Zahorec, S., Toth, L. V., Marton, G., Ueno, M., Tamura, M., Kawamura, A., Kitamura, Y., 2013, “Observability of YSOs with the WISE and AKARI infrared space observatories”, *Astronomical Notes*, **334**, 928–931.
- [19] Janson, M., Brandt, T. D., Kuzuhara, M., Spiegel, D. S., Thalmann, C., Currie, T., Bonnefoy, M., Zimmerman, N., Sorahana, S., Kotani, T., and 47 coauthors including Tamura, M., 2013, “Direct Imaging Detection of Methane in the Atmosphere of GJ 504 b”, *Astrophys. J.*, **778**, L4 (6pp).
- [20] Yoshikawa, T., Nishiyama, S., Tamura, M., Ishii, M., Nagata, T., 2013, “Intrinsically Polarized Stars and Implication for Star Formation in the Central Parsec of Our Galaxy”, *Astrophys. J.*, **778**, 92 (10pp).
- [21] Ninan, J. P., Ojha, D. K., Bhatt, B. C., Ghosh, S. K., Mohan, V., Mallick, K. K., Tamura, M., Henning, Th., 2013, “Reappearance of McNeil’s Nebula (V1647 Orionis) and its Outburst Environment”, *Astrophys. J.*, **778**, 116 (14pp).
- [22] Bonnefoy, M., Currie, T., Marleau, G.-D., Schlieder, J. E., Wisniewski, J., Carson, J., Covey, K. R., Henning, T., Biller, B., Hinz, P., and 60 coauthors including Tamura, M., 2014, “Characterization of the gaseous companion κ Andromedae b. New Keck and LBTI high-contrast observations”, *Astron. & Astrophys.*, **562**, A111 (20pp).
- [23] Toth, L. V., Marton, G., Zahorec, S., Balazs, L. G., Ueno, M., Tamura, M., Kawamura, A., Kiss, Z. T., Kitamura, Y., 2014, “The AKARI Far-Infrared Surveyor young stellar object catalog”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, 17 (13pp).
- [24] Oshiyama, F., Murakami, N., Guyon, O., Martinache, F., Baba, N., Matsuo, T., Nishikawa, J., Tamura, M., 2014, “Central-Occultation Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **126**, 270–279.
- [25] Tsukagoshi, T., Momose, M., Hashimoto, J., Kudo, T., Andrews, S., Saito, M., Kitamura, Y., Ohashi, N.i, Wilner, D., Kawabe, R., and 48 coauthors including Tamura, M., 2014, “High-resolution Submillimeter and Near-infrared Studies of the Transition Disk around Sz 91”, *Astrophys. J.*, **783**, 90 (10pp).
- [26] Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, & Yasushi Suto: “Characterization of the KOI-94 system with transit timing variation analysis: implication for the planet–planet eclipse”, *The Astrophysical Journal* **778** (2013) 185 (arXiv:1310.5771).
- [27] Kento Masuda: “Very low density planets around Kepler-51 revealed with transit timing variations and an anomaly similar to a planet–planet eclipse”, *The Astrophysical Journal* **785** (2014) 53 (arXiv:1401.2885).
- [28] Yuxin Xue, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Teruyuki Hirano, Yuka Fujii, & Kento Masuda, “Tidal evolution of the spin-orbit angle in exoplanetary systems”, *The Astrophysical Journal* **784**(2014)66 (arXiv:1401.5876).
- (会議収録)
- [29] Fukagawa, M., Hashimoto, J., Tamura, M., SEEDS/HiCIAO/IRCS/AO188, 2013, “High-Angular-Resolution Infrared Observations of Protoplanetary Disks”, *New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory. Proceedings of a Symposium held in Hakone, Japan 3-8 December 2012. ASP Conference Series, Vol. 476. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2013., p.157.*
- [30] Momose, M., Morita, A., Okamoto, Y., Fukagawa, M., Honda, M., Muto, T., Takeuchi, T., Hashimoto, J., Tamura, M., SEEDS/HiCIAO/AO188 Teams, 2013, “Near-Infrared Imaging Observations of Circumstellar

- Disk around HD 169142 with Subaru/HiCIAO Teams”, *New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory. Proceedings of a Symposium held in Hakone, Japan 3-8 December 2012.* ASP Conference Series, Vol. 476. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2013., p.389.
- [31] “High-Angular-Resolution Infrared Observations of Protoplanetary Disks”, *New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory. Proceedings of a Symposium held in Hakone, Japan 3-8 December 2012.* ASP Conference Series, Vol. 476. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2013., p.157.
- [32] Kwon, J., Tamura, M., 2013, “Near-Infrared Circular Polarimetry in Star Forming Regions: Implication for Astrobiology”, *International Astrobiology Workshop 2013, LPI Contribution No. 1766*, p.1023.
- [33] Tamura, M., 2014, “SEEDS: Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru”, *Exploring the Formation and Evolution of Planetary Systems, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 299*, pp. 12-16.
- (国内雑誌)
- [34] 田村 元秀, 山岸 明彦: 「アストロバイオロジー」、*学術の動向* 2013年11月号
- [35] 須藤靖: 「注目の多い雑文 その二十三: 科学者の品格」、*東京大学出版会 UP 488*(2013)6月号、pp.24-31
- [36] 須藤靖: 「注目の多い雑文 その二十四: We are “the” Nobody」、*東京大学出版会 UP 491*(2013)9月号、pp.31-37
- [37] 須藤靖: 「解き尽くせないから面白い 宇宙原理と人間原理」、*MOKU 260*(2013)11月号、pp.62-71
- [38] 須藤靖: 「もうひとつの地球から眺める我が地球」、*HUMAN 5*(2013)12月号、pp.123-130
- [39] 須藤靖: 「注目の多い雑文 その二十五: つれづれなるまま: プリンストン雑感」、*東京大学出版会 UP 494*(2013)12月号、pp.24-32
- [40] 須藤靖: 「考える冬: 世界は法則に支配されている (のだろうか?)」、*考える人 47*(2013)冬号、pp.288-289
- [41] 須藤 靖: 「天文学は invaluable」、*MOKU 262*(2014)1月号、pp.34-37
- [42] 須藤靖: 「注目の多い雑文 その二十六: 人生に悩んだらモンテイー・ホールに学べ」、*東京大学出版会 UP 497*(2014)3月号、pp.12-21
- [43] 須藤靖 *朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境論説* 2013年4月10日、6月4日、6月27日、8月6日、9月10日、10月1日、11月5日、12月26日、2014年1月16日、3月5日、3月21日
- [44] 須藤靖 *読売新聞 書評* 2013年4月14日、4月21日、4月28日、5月12日、5月26日、6月2日、6月16日、7月7日、7月14日、7月28日、8月4日、8月18日、9月1日、9月22日、10月6日、10月13日、10月27日、11月10日、12月8日、12月22日、2014年1月5日、1月12日、1月19日、2月2日、3月2日、3月16日、3月23日、3月30日
- (学位論文)
- [45] Kento Masuda: “Characterization of multi-transiting planetary systems with transit timing variations” (修士論文)
- (著書)
- [46] 『理科年表』、田村 元秀 (天文部、分担執筆)、丸善
- [47] 須藤靖・伊勢田哲治: 『科学を語るとはどういうことか 科学者、哲学者にモノ申す』、河出ブックス河出書房新社 (2013年6月刊行、304ページ)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [48] Yasushi Suto: “Message from Science Council of Japan”; invited opening address at SPICA Science Conference “From Exoplanets to Distant galaxies: SPICA’s New Window on the Cool Universe” (Univ. of Tokyo; June 18, 2013).
- 一般講演
- [49] Kudo, T., Tamura, M.: “SEEDS: Direct Imaging of Exoplanets and Their Forming Disks with the Subaru Telescope” in *Transformational Science with ALMA: From Dust to Rocks to Planets Formation and Evolution of Planetary Systems, Kona, USA, 2013/04/08-12.*
- [50] Tamura, M.: “Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru” in *IAU Symposium 299: Exploring the formation and evolution of planetary systems, Victoria, Canada, 2013/06/02-07.*
- [51] Kashiwagi, K., Suzuki, S., Tanaka, Y., Kotani, T., Nishikawa, J., Suto, H., Tamura, M., Kurokawa, T.: “400-nm-Spanning Astro-Comb Directly Generated from Synthesized Pump Pulse with Repetition Rate of 12.5 GHz” in *Conference on Lasers and Electro Optics 2013 (CLEO 2013), San Jose, USA, 2013/06/09-14.*
- [52] Tamura, M., Kwon, J.: “Near-Infrared Circular Polarization Images of NGC 6334-V” in *AOGS 2013, Brisbane, Australia, 2013/06/24-28.*
- [53] Geers, V., Scholz, A., Muzic, K., Dawson, P., Jayawardhana, R., Tamura, M., 2013, “SONYC: Sub-stellar Objects in Nearby Young Clusters”, *Protostars and Planets VI, Heidelberg, Germany, 2013/07/15-20, 2013.*

- [54] Fukagawa, M., Hashimoto, J., Grady, C. A., Mose, M., Wisniewski, J. P., Okamoto, Y., Muto, T., Kusakabe, N., Bonnefoy, M., Kotani, T., Maruta, Y., Tamura, M., SEEDS/HiCIAO/AO188 Collaboration, Protostars and Planets VI, Heidelberg, Germany, 2013/07/15–20, 2013.
- [55] Suzuki, S., Kashiwagi, K., Tanaka, Y., Okuyama, Y., Kotani, K., Nishikawa, J., Suto, H., Tamura, M., Kurokawa, T.: “12.5 GHz Near-IR Frequency Comb Generation Using Optical Pulse Synthesizer for Extra-Solar Planet Finder” in Nonlinear Optics 2013 (NLO 2013), Kohala Coast, USA, 2013/07/26–31.
- [56] Hashimoto, J., SEEDS/AO188/HiCIAO team including Tamura, M.: “High resolution/high contrast near infrared imaging survey of protoplanetary disks and exoplanets with Subaru/HiCIAO” in Exoplanets and brown dwarfs: Mind the gap, Hertfordshire, UK, 2013/09/02–05.
- [57] Kotani, T., Tamura, M.: “Detection and characterization of extra-solar planets by infrared radial velocity and high-contrast imaging instruments” in 9th East Asian Meeting on Astronomy, Taipei, Taiwan, 2013/10/14–18.
- [58] Kuzuhara, M., Tamura, M.: “Studies of Exoplanetary Systems with Subaru Telescope” in 9th East Asian Meeting on Astronomy, Taipei, Taiwan, 2013/10/14–18.
- [59] Kwon, J., Tamura, M.: “Infrared Polarimetric Studies toward Star and Planet Forming Regions” in 9th East Asian Meeting on Astronomy, Taipei, Taiwan, 2013/10/14–18.
- [60] Tamura, M.: “Exoplanets and Disks Studies with SEEDS and Steps toward TMT” in Astronomy in the TMT Era, Tokyo, Japan, 2013/10/16–17.
- [61] Hashimoto, J., SEEDS/AO188/HiCIAO team including Tamura, M.: “High resolution/high contrast near infrared imaging survey of protoplanetary disks and exoplanets with Subaru/HiCIAO,” in UTokyo Forum, Sao Paulo, Brazil, 2013/11/07–08.
- [62] Kuzuhara, M., Tamura, M.: “A Report of the SEEDS Exoplanets and Disks Direct Imaging Survey” in The 1st COSPAR Symposium: Planetary Systems of our Sun and other Stars, Bangkok, Thailand, 2013/11/14.
- [63] Hashimoto, J., SEEDS/AO188/HiCIAO team including Tamura, M.: “High resolution/high contrast near infrared imaging survey of protoplanetary disks and exoplanets with Subaru/HiCIAO” in Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, Kona, USA, 2013/12/09–12.
- [64] Nishikawa, J., Tamura, M. et al.: “A coronagraph system with unbalanced nulling interferometer : upgrade of 2013” in Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, Kona, USA, 2013/12/09–12.
- [65] Oya, M., Nishikawa, J., Tamura, M. et al.: “Adaptive optics operation with a focal plane wavefront sensing in a coronagraph” in Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, Kona, USA, 2013/12/09–12.
- [66] Kwon, J., Tamura, M.: “Infrared Polarimetric Studies of Star and Planet Forming Regions”, American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, San Francisco, USA, 2013/12/9–12.
- [67] Schneider, G., Belikov, R., Guyon, O., Lozi, J., Eduardo, B., Davis, P., Greene, T. P., Lynch, D., Eugene, P., Sandrine, T., and 28 coauthors including Tamura, M.: “Technology Demonstration Milestone #1 for the EXoplanetary Circumstellar Environments and Disk Explorer (EXCEDE) II. Science Drivers and Implications”, AAS Meeting, **223**, 149.08., 2014/01/05–09.
- [68] Stark, C. C., Schneider, G., Weinberger, A. J., Debes, J. H., Jang-Condell, H., Grady, C. A., Carson, J., Henning, T., Hines, D. C., Hinz, P., and 8 coauthors including Tamura, M.: “HD 181327 Debris Disk Asymmetries: Signs of a Planet or Geometric Projection Effects?”, AAS Meeting, **223**, 303.06., 2014/01/05–09.
- [69] Debes, J. H., Quiroga-Nunez, L., Schneider, G., Carson, J., Goto, M., Grady, C. A., Henning, T., Hines, D. C., Hinz, P., Jang-Condell, H., and 10 coauthors including Tamura, M.: “STIS High Contrast Imaging of HD 15745 on Solar System Scales: Inspecting the Fan”, AAS Meeting, **223**, 424.06., 2014/01/05–09.
- [70] Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, & Yasushi Suto: “Characterization of the KOI-94 system with photometric light curves and transit timing variation analysis: implication for the planet–planet eclipse”; Protostars & Planets VI, Heisenberg, 7/15–20, 2013).
- [71] Yuxin Xue, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Teruyuki Hirano, Yuka Fujii, Hajime Kawahara, & Kento Masuda, “Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment”; Protostars & Planets VI, Heisenberg, 7/15–20, 2013).
- (国内会議)
招待講演
- [72] 須藤靖: 「系外惑星研究から宇宙生物学へのロードマップ」、最新の天文学の普及をめざすワークショップ「宇宙論」(Kavli IPMU、2013年11月19日)
- [73] 須藤靖: 「バイオマーカー研究の現状: from the Pale Blue Dot to beyond a pale blue dot」、生命概念の普遍化—宇宙の生命研究会(湘南国際村、2013年12月21日)
- [74] 須藤靖: 「天文学の心」、プラズマ科学のフロンティア2013研究会(核融合研究所、2013年8月22日)
- 一般講演

共同発表者が多数の場合、筆頭発表者以外は省略したことがある。

● 日本天文学会 2013 年秋季年会

- [75] 楠根 貴成、SIRPOL チーム (田村 元秀を含む) 他: ブライトリム分子雲の磁場構造、P134a
- [76] 杉谷 光司、SIRPOL チーム (田村 元秀を含む) 他: 赤外線暗黒星雲 M17SWex の近赤外線偏光観測、P135a
- [77] 工藤 智幸、田村 元秀 他: みなみのかんむり座の遷移円盤天体における高解像度近赤外線偏光観測、P138a
- [78] 橋本 淳、田村 元秀 他: SEEDS による星形成領域における原始惑星系円盤探査の現状 -2-、P139a
- [79] 日下部 展彦、田村 元秀 他: Mon R2 における近赤外線偏光と中間赤外で探る若い星の固有偏光、P140a
- [80] 本田 充彦、田村 元秀 他: Herbig Be 型星 HD100546 原始惑星系円盤表層における水氷分布観測、P202a
- [81] 鬼塚 昌宏、田村 元秀 他: 若い星 CVSO30 を周回する惑星のトランジット観測、P205a
- [82] 高橋 安大、田村 元秀 他: 直接撮像法による複数惑星系 KOI-94 周りの伴星候補天体の発見、P207a
- [83] 田村 元秀 他: すばる戦略枠観測 SEEDS による原始惑星系円盤および系外惑星探査 IV、P218a
- [84] 葛原 昌幸、田村 元秀 他: SEEDS による太陽型恒星を公転する低温・低光度巨大ガス惑星の直接撮像、P219a
- [85] オ デヒョン、田村 元秀 他: 直接撮像による若い恒星周りの遠方惑星と原始惑星系円盤の探査、P220a
- [86] 山本 広大、田村 元秀 他: SEEDS による散開星団での系外惑星探査 4、P221a
- [87] Matthias S. Samland、HiCIAO/AO188/Subaru Team (田村 元秀を含む) 他: SEEDS Direct Imaging Survey of Ursa Major Members、P222a
- [88] 小西 美穂子、HiCIAO/AO188/Subaru Team (田村 元秀を含む) 他: 太陽系外惑星探査における恒星混入率の導出: 赤外線深撮像観測を用いた銀河系恒星分布モデルへの制限、P223a
- [89] 西山 正吾、田村 元秀 他: 近赤外線観測で探る銀河系中心拡散 X 線放射の起源、Q36a
- [90] 小谷 隆行、田村 元秀 他: 地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 6、V236a
- [91] 松尾 太郎、田村 元秀 他: 極限補償光学のための新しい波面計測装置の開発、V241a
- [92] 塩谷 圭吾、田村 元秀 他: SPICA コロナグラフ装置 (SCI) の現状、V212a
- [93] 堀江 正明、田村 元秀 他: 系外惑星直接撮像のための高コントラスト光学系の研究・初段補償光学による干渉計内部の波面補正、V230a
- [94] 増田賢人、平野照幸、樽家篤史、長沢真樹子、須藤靖: TTV を用いた複数トランジット惑星系のパラメータ推定; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学、9/11、2013)

- [95] Yuxin Xue、須藤靖、樽家篤史、増田賢人: Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment II; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学、9/12、2013)

● 日本天文学会 2014 年春季年会

- [96] 橋本 淳、田村 元秀 他: SMA による遷移円盤天体 PDS 70 の高解像度電波干渉計観測、P108a
- [97] 岡田 方孝、SIRPOL チーム (田村 元秀を含む) 他: 星団形成領域 Serpens Cluster B の近赤外線偏光観測、P122b
- [98] 工藤 智幸、田村 元秀 他: すばる望遠鏡戦略枠観測「SEEDS」による原始惑星系円盤および系外惑星探査 IV、P217a
- [99] 呉 大銘、田村 元秀 他: 直接撮像による若い恒星周りの遠方惑星と原始惑星系円盤の探査 2、P218c
- [100] 水木 敏幸、SEEDS/HiCIAO/AO188 team (田村 元秀を含む) 他: Subaru/HiCIAO を用いた 5pc 以内の太陽型星における巨大ガス惑星探査、P219c
- [101] 高橋 安大、田村 元秀 他: 太陽系外惑星の惑星軌道移動に関する直接撮像法を用いた研究、P220a
- [102] 笠 嗣瑠、田村 元秀 他: 長周期視線速度変化を示す中質量巨星に対する直接撮像、P221a
- [103] 大宮 正士、IRD チーム (田村 元秀を含む) 他: すばる IRD による M 型矮星周りの地球型惑星探索 I: 観測計画、P231a
- [104] 小谷 隆行、田村 元秀 他: 地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 7、V204a
- [105] 馬場 はるか、田村 元秀 他: 波面誤差を含む光源を用いた赤外用光ファイバーの特性評価試験、V205a
- [106] 塩谷 圭吾、田村 元秀 他: SPICA Coronagraph Instrument (SCI): 2013 年の進捗、V206a
- [107] 村上 尚史、田村 元秀 他: フォトニック結晶技術による焦点面マスクコロナグラフの開発状況、V220a
- [108] 庄子 隼斗、田村 元秀 他: 32 分割 4 次光渦コロナグラフによる speckle decorrelation 偏光差分法の実証実験、V221a
- [109] 大矢 正人、田村 元秀 他: 系外惑星直接観測のための焦点面波面センシングを用いた補償光学制御法 (2)、V222a
- [110] 増田賢人: 「Kepler-51 系における低密度惑星の発見」; 日本天文学会 2014 年春季年会 (国際基督教大学、3/21、2014)

● 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (2013/05/19-24、幕張メッセ国際会議場)

- [111] 橋本 淳、田村 元秀 他: 近赤外線直接観測で探る太陽型星に付随する原始惑星系円盤の形態進化
- [112] 橋本 淳、田村 元秀 他: 原始惑星系円盤における近赤外線直接撮像

その他の国内研究会

- [113] 田村 元秀:「すばる戦略枠 SEEDS による系外惑星研究の成果について」、RESCEU サマースクール、蔵王温泉みはらしの宿 故郷、2013/07/24-27
- [114] 田村 元秀:「IR and Submm Observations of Magnetic Fields in SFRs」、ALMA 偏波観測研究会、国立天文台大セミナー室、2013/11/19
- [115] 田村 元秀:「生命の「はじまり」条件: ハビタブル惑星の誕生」、総研大創立 25 周年記念事業「はじまり」シンポジウム、総研大葉山、2013/11/25
- [116] 田村 元秀:「宇宙における円偏光観測の進展」、自然界における生体分子キラリティ起源: 実験・観測・計算シナジーによるアプローチ、岡崎コンファレンスセンター小会議室、2013/11/16
- [117] 田村 元秀:「系外惑星天文学と宇宙の円偏光と生命」、感染研学会シンポジウム「生命の起源と宇宙」、戸山庁舎共用第一会議室、2013/12/02
- [118] 田村 元秀:「系外惑星観測」、第 26 回理論懇話会シンポジウム「2020 年代を見据えた理論宇宙物理・天文学」、東京大学柏キャンパス 柏図書館メディアホール、2013/12/25-27
- [119] 田村 元秀:「地球型系外惑星探査ミッション: J T P F」、第 14 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所、2014/01/09-10
- [120] 工藤 智幸、田村 元秀:「すばる望遠鏡戦略枠観測「SEEDS」による原始惑星系円盤および系外惑星探査」、地惑装置ワークショップ、定山溪万世閣ホテルミリオネ、2014/02/22-24
- [121] 小谷 隆行、田村 元秀:「TMT による地球型惑星直接撮像計画 (SEIT) と京大 3.8m 望遠鏡用技術立証機 (SEICA) の開発について」、地惑装置ワークショップ、定山溪万世閣ホテルミリオネ、2014/02/22-24
- [122] 小谷 隆行、田村 元秀:「赤外線ドップラー IRD の装置開発」、地惑装置ワークショップ、定山溪万世閣ホテルミリオネ、2014/02/22-24
- [123] 馬場 はるか、田村 元秀:「近赤外線視線速度装置 IRD に向けた赤外用ファイバー特性評価試験」、地惑装置ワークショップ、定山溪万世閣ホテルミリオネ、2014/02/22-24
- [124] 大宮 正士、田村 元秀:「近赤外ドップラー装置 IRD による低質量星周りの地球型惑星探し」、地惑装置ワークショップ、定山溪万世閣ホテルミリオネ、2014/02/22-24
- [125] 田村 元秀:「WACO の背景説明と概要」、WACO ワークショップ、天文学教室会議室、2014/03/04-06
- [126] 奥山 康志、鈴木 翔太、田中 陽一、柏木 謙、黒川 隆志、小谷 隆行、西川 淳、田村 元秀:「系外惑星探査のためのマルチギガヘルツの広帯域化」、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学 相模原キャンパス、2014/03/17-20
- [127] 田村 元秀:「IRSF における赤外円偏光サーベイ」、IRSF 研究会、名古屋大学理学部、2014/03/24-26 (セミナー)
- [128] 田村 元秀:「太陽系外惑星と国立天文台での 20 年」、国立天文台談話会、国立天文台三鷹大セミナー室、2013/04/19
- [129] 田村 元秀:「赤外線による系外惑星の観測」、天文学教室第 1510 回談話会、東京大学 天文学教室、2013/05/07
- [130] 田村 元秀:「系外惑星探査室と ATC」、国立天文台 ATC セミナー、国立天文台 ATC セミナー室、2013/05/23
- [131] 田村 元秀:「系外惑星観測の現状と展開: 直接観測と地球型惑星」、物理学教室第 54 回コロキウム、4 号館 1220 号室、2013/06/14
- [132] 田村 元秀:「惑星系のレシピ」、SPICA 研究会一般講演会、イノホール、2013/06/21
- [133] 須藤 靖:「多重トランジット惑星系 KOI-94 の planet-planet eclipse の発見と TTV 解析」、大阪大学宇宙地球科学教室セミナー (大阪大学、2013 年 6 月 21 日)
- [134] Yasushi Suto: “Different Cultures, Same Science”; Joint seminar organized by East Asian Studies Program, History of Science Program and Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, October 23, 2013.
- (集中講義)
- [135] 田村 元秀: 宇宙生物学、総合研究大学院大学、2013/10/03
- (一般向け講演)
- [136] 田村 元秀:「太陽系外惑星と宇宙における生命」、山形大学講演会、山形大学小白川キャンパス理学部大講義室、2013/05/25
- [137] 田村 元秀:「系外惑星天文学」、東京大学理学部オープンキャンパス 2013 一般講演会、小柴ホール、2013/08/07
- [138] 田村 元秀:「水惑星 (地球型惑星) の探査の現状とこれから」、自然科学研究機構プレス懇談会、機構本部会議室、2013/09/17
- [139] 田村 元秀:「系外惑星と宇宙偏光の観測で迫る生命起源の謎」、第 15 回自然科学研究機構、学術総合センター (一橋講堂)、2013/10/14
- [140] 田村 元秀:「第二の木星を写し、第二の地球を捉えよ!」、地球惑星科学学会一般講演会、石垣市民会館、2013/11/02
- [141] 田村 元秀:「太陽系外惑星と宇宙における生命」、日本アストロバイオロジーネットワーク公開講演会「宇宙にいのちを探す」、相模原市立博物館プラネタリウム、2013/12/01
- [142] 田村 元秀:「系外惑星探査について」、宗像サイエンスカフェ、宗像ユリックス、2014/02/11
- [143] 須藤 靖:「夜空を通して世界を知る」、駿台予備学校講演会 (2013 年 6 月 29 日)
- [144] 須藤 靖:「もうひとつの地球の色: ペイルブルドットを超えて」、東京大学基金講演会 (東京大学、2013 年 7 月 10 日)
- [145] 須藤 靖:「もうひとつの地球の色は何色?」、日本学術会議東北地区会議公開学術講演会サイエンストーク「宇宙ファミリー」(八戸、2013 年 9 月 14 日)

- [146] 須藤靖: 「第二の地球の色を解読する」、日本物理学会市民講演会 (高知、2013年9月20日)
- [147] 須藤靖: 「もうひとつの地球を探す」、日本学術会議サイエンスカフェ (高知、2013年9月21日)
- [148] 須藤靖: 「宇宙の境界、地球の境界」、東京大学 朝日講座 知の冒険もつともつとを考えたい 世界は謎に満ちている「境界線をめぐる旅」(東大法文2号館2階一番大教室、2014年2月3日)

(記者会見、プレスリリース、新聞報道)

- [149] 権 静美、田村 元秀、他: 星・惑星の誕生領域の赤外線のかたよりの普遍性と生命のホモキラリティー、2013年4月23日、国立天文台・東京大学大学院理学系研究科・総研大他 共同発表
<http://www.nao.ac.jp/news/science/2013/\20130423-esp-sirpol.html>
- [150] 葛原 昌幸、田村 元秀、他: すばる望遠鏡 SEEDS プロジェクト、「第二の木星」の直接撮影に成功、2013年8月4日、国立天文台・東京大学大学院理学系研究科他 記者会見・共同発表
http://subarutelescope.org/Pressrelease/\2013/08/04/j_index.html
- [151] 高見 道弘、田村 元秀、他: 塵粒にふわりと包まれた惑星誕生の現場、2013年8月22日、台湾中央研究院・国立天文台・東京大学大学院理学系研究科他 共同発表
http://subarutelescope.org/Pressrelease/\2013/08/22/j_index.html
- [152] 成田 憲保、田村 元秀、他: 青い光で見るスーパーアースの空、2013年9月3日、台湾中央研究院・国立天文台・東京大学大学院理学系研究科他 共同発表
http://subarutelescope.org/Pressrelease/\2013/09/03/j_index.html
- [153] 田村 元秀、2014年3月2日、日本経済新聞、紹介記事