

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

# Annual Report

## 2015

平成27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 28 年 9 月 20 日版

Copyright ©ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 2016

## ご挨拶

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 (Research Center for the Early Universe; RESCEU) の 2015 年度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から、天体諸階層の形成と進化、さらには現在の宇宙をみたく暗黒エネルギーの解明に至る宇宙史の解明が本センターのミッションです。

この年次報告に記載されている個々の研究活動に加えて、8月1日から4日に栃木県日光市にて RESCEU APCosPA サマースクールを、このほど発足したアジア太平洋物理学会連合宇宙物理分科との共催で実施しました。全学オープンキャンパスでは、8月5日、6日に茂山准教授、生駒准教授と伊藤助教が2回ずつ、講演を行いました。7月31日には、前センター長をつとめられた牧島一夫教授のご退職と学士院賞受賞を記念して、ワークショップ”Max’s 4 questions in X-ray astronomy to be addressed with ASTRO-H”を開催いたしました。

国際交流に関しては、2015年4月に Pisin Chen 教授を、2015年6月より7月に Giuseppe Bono 准教授を 2015年11月から12月にかけて Alexei Starobinsky 教授を招聘しています。また 2015年4月より10月まで Thierry Soubie 氏が客員共同研究員として、2016年2月より3月にかけて Chad Hanna 氏が、それぞれ滞在し共同研究を行いました。

また、須藤研出身の藤井友香氏が井上研究奨励賞を受賞いたしました。

2016年2月1日付で、Kipp Cannon 准教授が本センターに赴任されました。Cannon 准教授は、重力波検出にかかわるデータ解析とそれを用いた宇宙物理学がご専門です。そして、まさにその赴任直後の2月11日に、米国の重力波実験施設 LIGO が、史上初の重力波直接検出に成功したとの発表がなされました。Cannon 准教授は、この科学史に残る大発見にも大きな貢献をされており、本センターに重力波物理学の発展における国際的なグループが発足する意義はいくら強調しても強調しすぎることはないでしょう。どうぞ引き続きご期待ください。

また中野俊男さんが当年度1年間、特任研究員として在籍し、Xian Gao さんが1月16日に特任助教として着任しました。研究協力者としては、杉田精司教授、生駒大洋准教授、河原創助教が、太陽系外惑星プロジェクトに加わりました。一方、暗黒物質・太陽アクシオン直接検出プロジェクトを担ってこられた蓑輪眞教授が定年ご退職に伴い研究協力者の任を終えられました。

Cannon 准教授の赴任とも関係しますが、過去数年間にわたって、本センターでは今後集中して取り組むべき研究プロジェクトを整理再編するとともに、それにしたがって理学系研究科内の関係研究者の方々にも研究協力者として正式に加わって頂く制度の確立を模索してきました。その結果、2016年度からは Evolution of the universe and cosmic structures, Gravitational-wave astrophysics and experimental gravity, Formation and characterization of planetary systems の3つをキープロジェクトとして推進することが決まりました。今後ともどうぞよろしくお願い致します。

2016年9月

センター長 須藤 靖

# 目次

<b>I</b>	<b>2015 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</b>	<b>4</b>
1	受賞	5
2	教員, 職員, および研究員	6
3	シンポジウム・研究会	7
3.1	RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics	7
3.2	「高校生のためのオープンキャンパス 2013」	9
3.3	ビッグバン宇宙国際研究センター・物理学教室合同談話会	9
3.4	RESCEU ワークショップ ”Max’s 4 questions in X-ray astronomy to be addressed with ASTRO-H”	9
4	プレプリント・リスト	11
<b>II</b>	<b>2015 年度 プロジェクト別 研究活動報告</b>	<b>15</b>
1	初期宇宙進化論	16
1.1	初期宇宙論	16
1.2	観測的宇宙論	18
1.3	星形成	22
1.4	超新星爆発	24
1.5	曲がった時空の場の量子論	24
1.6	重力理論	25
1.7	データ解析	26
1.8	重力波天文学	27
2	銀河と星の共進化論	39
2.1	宇宙及び系外銀河	39
2.2	銀河系及び近傍矮小銀河	39
2.3	新星	40
2.4	超新星	40
2.4.1	ガンマ線バースト	41
3	光赤外線による観測的宇宙論	44
3.1	宇宙及び系外銀河	44
3.2	系外惑星	45
3.3	重力波	46
4	地上サブミリ波観測	49
4.1	山本 研究室	49
4.1.1	星形成の観測研究	49
4.1.2	系外銀河の分子組成	51
4.1.3	テラヘルツ帯観測技術の開拓	53
4.2	大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究	53
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	53
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	54
4.2.3	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	56

<b>5</b>	<b>重力波観測</b>	<b>61</b>
5.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	61
5.1.1	iKAGRA 試験運転	61
5.1.2	主干渉計制御設計	62
5.2	宇宙重力波望遠鏡	62
5.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	62
5.3.1	光学系の検討・開発	62
5.3.2	防振・懸架装置の検討・開発	62
5.3.3	アクチュエータの検討・開発	63
5.3.4	データ解析研究	63
5.4	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	63
5.5	相対論・量子光学精密実験	63
5.5.1	三角光共振器を用いたオプトメカニクス研究	63
5.5.2	光学浮上鏡の開発	64
5.5.3	光リング共振器を用いた光速の等方性検証	64
<b>6</b>	<b>宇宙素粒子物理学</b>	<b>67</b>
6.1	原子炉ニュートリノモニター	67
6.2	雷雲ガンマ線	67
6.3	Hidden photon 暗黒物質探索	68
6.3.1	概要	68
6.3.2	光学領域	68
6.3.3	電波領域	68
<b>7</b>	<b>飛翔体によるX線観測</b>	<b>70</b>
7.1	科学衛星の運用と稼働状況	70
7.2	中性子星とその親星の研究	70
7.3	ブラックホールの X 線研究	71
7.4	白色矮星への質量降着	73
7.5	銀河団の衝突・合体	73
7.6	雷雲ガンマ線の研究	73
7.7	宇宙 X 線衛星「ひとみ」の開発・運用	75
7.8	将来衛星計画へ向けた装置開発	76
<b>8</b>	<b>太陽系外惑星</b>	<b>81</b>
8.1	田村研究室	81
8.2	須藤研究室	81
8.3	生駒研究室	83
8.4	河原研究室	83
8.5	杉田研究室	84

I

2015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

## 藤井 友香：第32回井上研究奨励賞

須藤研出身の藤井友香氏が、優れた学位論文に対して与えられる第32回井上研究奨励賞を受賞した。藤井氏の学位論文は、地球型惑星の反射光の自転による変動を利用した多バンド測光観測からその表面の性質を再構築するというユニークな理論的研究の方法論の構築とシミュレーション解析、さらには実際の地球の観測データへの応用例を中心としてまとめたものである。これらの主目的は、地球型惑星の海が存在、さらには植物の存在を検出する可能性を探ることで、今後の天文学の必然ともいえる宇宙生物学への展開を牽引することにある。具体的には、実際の地球の観測データを用いて、惑星光反射を、海、土、植生、雪、雲などの成分の典型的な“色”をテンプレートとして用いて成分分解したのち、各成分の寄与の時間変化から表面の経度分布をマッピングした。さらに、自転による変動のみならず、公転による年周変化まで取り込む事によって経度方向・緯度方向の2次元地図を作製する方法論を作り上げた。

本学位論文で提案された方法論は、将来必ずや打ち上げられるであろう系外惑星直接撮像宇宙探査機の科学の根幹を支えるものである。実際この研究によって、地球の、海と陸の共存・陸上植物・部分的な雲被覆・水循環などといった際立った特徴が、原理的には系外からでも探査可能であることが示された。これは、系外惑星の表層環境の詳細を探る新しい可能性を具体的に提示しており、将来の直接撮像計画の科学的可能性に迫った優れた内容である。

## 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

須藤 靖	(センター長/教授；兼任)
横山 順一	(教授)
茂山 俊和	(准教授)
Kipp Cannon	(准教授、2016年2月1日着任)
須山 輝明	(助教)
細川 隆史	(助教)
大栗 真宗	(助教)
Pisin Chen,	(外国人客員教授; 2015/4/2 - 4/7, 4/13 - 4/30)
Thierry Sousbie,	(外国人客員研究員; 2015/4/10 - 10/31)
Giuseppe Bono,	(外国人客員准教授; 2015/6/28 - 7/13)
Alexei A. Starobinsky,	(外国人客員教授; 2015/11/4 - 12/3)
Xian Gao,	(外国人客員研究員; 2016/1/16/ - 3/31)
Chad Hanna,	(外国人客員研究員; 2016/2/21 - 3/5)
伊藤 洋介	(特任助教)
須田 拓馬	(特任助教)
中野 俊男	(特任研究員)
山内 大介	(学振特別研究員)
小宮 悠	(科研費研究員)
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、須藤 靖 <sup>1,†</sup> 、吉田 直紀 <sup>1</sup> 、Kipp Cannon 須山 輝明、細川 隆史、大栗 真宗、伊藤 洋介
銀河進化理論	茂山 俊和、戸谷 友則 <sup>3</sup> 、須田 拓馬
銀河と宇宙構造の進化	土居 守 <sup>2</sup> 、嶋作 一大 <sup>3</sup>
サブミリ波観測	山本 智 <sup>1</sup> 、河野 孝太郎 <sup>2</sup>
重力波探査	安東 正樹 <sup>1</sup> 、麻生 洋一 <sup>1</sup>
暗黒物質・太陽アクシオン直接検出	蓑輪 眞 <sup>1</sup> 、井上 慶純 <sup>4</sup>
飛翔体による宇宙観測	中澤 知洋 <sup>1</sup>
太陽系外惑星	田村 元秀 <sup>3</sup> 、須藤 靖 <sup>1,†</sup> 、杉田 精司 <sup>5,6</sup> 、生駒 大洋 <sup>5</sup> 、河原 創 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> 物理学専攻、<sup>2</sup> 天文学教育研究センター、<sup>3</sup> 天文学専攻、<sup>4</sup> 素粒子物理国際研究センター、<sup>5</sup> 地球惑星科学専攻、<sup>6</sup> 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 † 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 RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics

場所：栃木県日光市鬼怒川温泉

日時：2015年8月1日(土) - 4日(火)

#### プログラム

8月1日(土)

(Chair :T. Suda) Lectures

16:30 - 17:30 Rennan Barkana(I) (50+10)

17:30 - 17:40 break

17:40 - 18:40 Rennan Barkana(II) (50+10)

8月2日(日)

(Chair :T. Hosokawa) Lectures and Contributed talks

9:00 - 10:00 Rennan Barkana(III) (50+10)

10:00 - 10:10 break

10:10 - 11:10 Martin Lemoine (I)(50+10)

11:10 - 11:20 break

11:20 - 11:35 Takuma Suda Star formation history in the local group explored using the SAGA database for dwarf spheroidal galaxies

11:35 - 11:50 Takashi Hiramatsu CMB bispectrum

11:50 - 12:05 Tomohiro Fujita Effective Field Theory of Large Scale Structure: how to explain the N-body results

12:05 - 12:20 Daisuke Yamauchi Probing inflationary consistency relation with galaxy surveys

(Chair :T. Shigeyama) Lectures and Contributed talks

14:00 - 15:00	Martin Lemoine (II) (50+10)	
15:00 - 15:10		Break
15:10 - 15:25	Mariia Redchuk	Implications of recent IceCube result on the astrophysical neutrino flavor ratio
15:25-15:40	Toshio Nakano	X-ray Studies of Supernova remnants and Neutron stars, from Suzaku toward Astro-H
15:40-15:55	Shih-Ying Hsu	Taiwan Astroparticle Radiowave Observatory for Geo-synchrotron Emissions (TAROGÉ)
15:55-16:10	Ken'ichi Saikawa	Cosmological aspects of the next-to-minimal supersymmetric standard model
16:10-16:25	Jeong-Pyong Hong	Charged Q-balls in gauge mediated SUSY breaking models
16:25-16:35		Break

**(Chair :T. Suyama) Contributed talks**

17:45-18:00	Kazunari Eda	An all-sky search for continuous gravitational waves in low-frequency regime using the Phase-II TOBA data
18:00-18:15	Guillem Domenech	Cosmological frame (in)dependence in Scalar tensor theory
18:15-18:30	Yuki Watanabe	Multi-disformal invariance of nonlinear primordial perturbations
18:30-18:45	Yi-Peng Wu	Cosmology with spacetime curvature induced negative potentials
18:45-19:00	Ling-Wei Luo	Teleparallel Gravity in Five Dimensional Theories

**8月3日(月)****(Chair: Y. Watanabe) Lectures and Contributed talks**

9:00-9:15	Yuji Akita	Removing Ostrogradski's ghost from cosmological perturbations in Higher derivative gravity
9:15-9:30	Takahiro Hayashinaka	QED effective action for background field in de Sitter spacetime
9:30-9:45	Chen-min Shen	The boundary effect of anomaly-induced action
9:45-10:00	Kazufumi Takahashi	Equation of state of dark energy in f(R) gravity
10:00-10:15	Daisuke Yoshida	Perturbation of cosmological and black hole solutions in bi-gravity
10:15-10:30	Hiromu Ogawa	Perturbations of hairy black holes in shift-symmetric scalar-tensor theories
10:30-10:45		Break
10:45-11:45	Ruth Gregory (I) (50+10)	
Afternoon		Excursion

**8月4日(火)****(Chair: J. Yokoyama) Lectures**

9:00-10:00	Ruth Gregory (II) (50+10)	
10:00-10:15		Break
10:15-11:15	Ruth Gregory (III) (50+10)	

### 3.2 「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：東京大学理学部

日時：2015年8月5日（水）、8月6日（木）

主催：東京大学

#### プログラム

##### 8月5日（水）：

- |               |       |                    |                  |
|---------------|-------|--------------------|------------------|
| 14:50 - 15:30 | 茂山 俊和 | (理学部 4 号館 1220 号室) | 天体の衝突・合体         |
| 15:45 - 16:25 | 生駒 大洋 | (理学部 4 号館 1220 号室) | 系外惑星から学んだ太陽系の不思議 |

##### 8月6日（木）：

- |               |       |                   |                                 |
|---------------|-------|-------------------|---------------------------------|
| 10:00 - 10:40 | 伊藤 洋介 | (化学本館 5 階講堂)      | アインシュタインの重力波をとらえる：100 年越しの課題提出？ |
| 13:30 - 14:10 | 茂山 俊和 | (化学本館 5 階講堂)      | 天体の衝突・合体                        |
| 14:30 - 15:10 | 生駒 大洋 | (化学本館 5 階講堂)      | 系外惑星から学んだ太陽系の不思議                |
| 15:30 - 16:10 | 伊藤 洋介 | (理学部 1 号館 207 号室) | アインシュタインの重力波をとらえる：100 年越しの課題提出？ |

### 3.3 ビッグバン宇宙国際研究センター・物理学教室合同談話会

日時：2016年2月12日（金）16:30 - 18:00

場所：東京大学理学部 4 号館 2 階 1220 号室（本郷キャンパス）

講演者：Kipp Cannon

講演題目：Results From Advanced LIGO's First Science Run

### 3.4 RESCEU ワークショップ ”Max's 4 questions in X-ray astronomy to be addressed with ASTRO-H”

日時：2015年7月31日（金）

場所：東京大学理学部小柴ホール

- |                                                                                     |                                                                                  |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 10:00-10:05                                                                         | Opening remark                                                                   | Kazuo Makishima                        |
| <b>Session 1: Cluster of Galaxies (chaired by K. Nakazawa, University of Tokyo)</b> |                                                                                  |                                        |
| 10:05-10:25                                                                         | Galaxy infalling by interaction with ICM                                         | Liyi Gu (SRON)                         |
| 10:25-10:45                                                                         | MHD aspects of ICM                                                               | Takaaki Yokoyama (University of Tokyo) |
| 10:45-11:05                                                                         | X-ray observations of MHD in cluster centers: Past legacy and ASTRO-H challenges | Takayuki Tamura (JAXA)                 |
| 11:05-11:15                                                                         | Discussion                                                                       |                                        |

**Session 2: Particle acceleration in the universe (chaired by A. Bamba, Aoyama University)**

- 11:30-11:50 Acceleration in the sun Satoshi Masuda (Nagoya University)
- 11:50-12:10 Acceleration in planetary space Yoshizumi Miyoshi (Nagoya University)
- 12:10-12:30 Acceleration in cosmic space Dmitry Khangaluyan (Rikkyo University)
- 12:30-12:40 Discussion
- 12:40-13:00 Special Talk to Japanese young astronomers "ASTRO-H で新宇宙を切り拓くには" (given in Japanese) Katsuji Koyama
- 13:00-14:00 Lunch

**Session 3: Blackholes (chaired by T. Mizuno, Hiroshima University)**

- 14:00-14:19 Theory of black hole accretion flows and outflows Ken Ohsuga (National Astronomical Observatory Japan)
- 14:19-14:38 Formation of intermediate-mass black holes in star clusters Michiko Fujii (National Astronomical Observatory Japan)
- 14:38-15:18 Observations of Blackholes
- 14:38-14:57 Narrow Line Seyfert 1 AGN as supermassive ULX Chris Done (Durham University)
- 14:57-15:18 Panel discussion on mass vs  $L/L_{\text{edd}}$   
 Moderator Aya Kubota (Shibaura Inst. Tech.)  
 Mass  $\sim 10M_{\odot}$ ; topic on Suzaku BHBs Shinya Yamada (Tokyo Metropolitan University)  
 Mass  $\sim 10^{6-8}M_{\odot}$ ; state transition of AGN Hirofumi Noda (RIKEN)  
 ULX:  $\sim 10M_{\odot}$  BH of  $L/L_{\text{edd}} \gg 1$  vs  $\sim 30 - 100M_{\odot}$  BH of  $L/L_{\text{edd}} \sim 1$  Shogo Kobayashi (University of Tokyo)
- 15:18-15:30 Discussion
- 15:30-15:50 Cofee break

**Session 4: Neutron stars (chaired by T. Mihara, RIKEN)**

- 15:50-16:15 How are the neutron star magnetized? Questions and Observations Tatehiro Mihara (RIKEN), Teruaki Enoto (Kyoto University), Toshio Nakano (University of Tokyo)
- 16:15-16:40 The different faces of neutron stars: Clues on their Physics from their Hosting Supernova Remnants Samar Safi-Harb (University of Manitoba)
- 16:40-17:00 Origin of the strong magnetic field Koji Hashimoto (Osaka University)
- 17:00-17:10 Discussion
- 17:15-17:30 Closing remark

## 4 プレプリント・リスト

RESCEU-46/15

*ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a  $z = 3.09$  Protocluster Core*, Umehata, H.; Tamura, Y.; Kohno, K.; Ivison, R. J.; Alexander, D. M.; Geach, J. E.; Hatsukade, B.; Hughes, D. H.; Ikarashi, S.; Kato, Y.; and 13 coauthors, [arXiv:1510.08861 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 815 (2015) L8

RESCEU-45/15

*Predictions for surveys with the SPICA Mid-infrared Instrument*, Bonato, M.; Negrello, M.; Cai, Z.-Y.; De Zotti, G.; Bressan, A.; Wada, T.; Kohno, K.; Maiolino, R.; Gruppioni, C.; Pozzi, F.; Lapi, A., [arXiv:1506.02135 (astro-ph)] *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 452 (2015) 356-367

RESCEU-44/15

*SXDF-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> Deep Survey: A Compact Dusty Star-forming Galaxy at  $z = 2.5$* , Tadaki, Ken-ichi; Kohno, Kotaro; Kodama, Tadayuki; Ikarashi, Soh; Aretxaga, Itziar; Berta, Stefano; Caputi, Karina I.; Dunlop, James S.; Hatsukade, Bunyo; Hayashi, Masao; and 16 coauthors, [arXiv:1508.05950 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 811 (2015) L3

RESCEU-43/15

*ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469*, Izumi, Takuma; Kohno, Kotaro; Aalto, Susanne; Doi, Akihiro; Espada, Daniel; Fathi, Kambiz; Harada, Nanase; Hatsukade, Bunyo; Hattori, Takashi; Hsieh, Pei-Ying; and 23 coauthors, [arXiv:1508.05946 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 811 (2015) 39

RESCEU-42/15

*Compact Starbursts in  $z \sim 3 - 6$  Submillimeter Galaxies Revealed by ALMA*, Ikarashi, Soh; Ivison, R. J.; Caputi, Karina I.; Aretxaga, Itziar; Dunlop, James S.; Hatsukade, Bunyo; Hughes, David H.; Iono, Daisuke; Izumi, Takuma; Kawabe, Ryohei; Kohno, Kotaro; and 9 coauthors, [arXiv:411.5038 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 810 (2015) 133

RESCEU-41/15

*Extremely Bright Submillimeter Galaxies beyond the Lupus-I Star-forming Region*, Tamura, Y.; Kawabe, R.; Shima-jiri, Y.; Tsukagoshi, T.; Nakajima, Y.; Oasa, Y.; Wilner, D. J.; Chandler, C. J.; Saigo, K.; Tomida, K.; Yun, M. S.; Taniguchi, A.; Kohno, K.; Hatsukade, B.; and 14 coauthors, [arXiv:1506.06768 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 808 (2015) 121

RESCEU-40/15

*The ALMA Patchy Deep Survey: a blind search for [C II] emitters at  $z \sim 4.5$* , Matsuda, Y.; Nagao, T.; Iono, D.; Hatsukade, B.; Kohno, K.; Tamura, Y.; Yamaguchi, Y.; Shimizu, I., [arXiv:1505.02244 (astro-ph)] *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 451 (2015) 1141-1145

RESCEU-39/15

*Local Instability Signatures in ALMA Observations of Dense Gas in NGC 7469*, Fathi, Kambiz; Izumi, Takuma; Romeo, Alessandro B.; Martin, Sergio; Imanishi, Masatoshi; Hatziminaoglou, Evanthia; Aalto, Susanne; Espada, Daniel; Kohno, Kotaro; Krips, Melanie; and 4 coauthors, [arXiv:1506.01157 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 806 (2015) L34

RESCEU-38/15

*A Measurement of the Black Hole Mass in NGC 1097 Using ALMA*, K. Onishi, S. Iguchi, K. Sheth, and K. Kohno, [arXiv:1506.05917 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 806 (2015) 39

RESCEU-37/15

*The Most Iron-deficient Stars as the Polluted Population III Stars*, Y.Komiya, Y.Suda, and M.Y.Fujimoto, [arXiv:1507.0166 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 808 (2015) L47

RESCEU-36/15

*High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. II. Molecular Clump Properties of a Lensed Submillimeter Galaxy at  $z = 3.042$*  , Bunyo Hatsukade, Yoichi Tamura, Daisuke Iono, Yuichi Matsuda, Masao Hayashi, and Masamune Oguri, [arXiv:1503.07997 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 67 (2015) 93

RESCEU-35/15

*High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. I. The Innermost Mass Profile of the Lensing Elliptical Galaxy Probed by 30 Milli-Arcsecond Images* , Yoichi Tamura, Masamune Oguri, Daisuke Iono, Bunyo Hatsukade, Yuichi Matsuda, and Masao Hayashi, [arXiv:1503.07605 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 67 (2015) 72

RESCEU-34/15

*Chitah: Strong-Gravitational-Lens Hunter in Imaging Surveys* , James H. H. Chan, Sherry H. Suyu, Tzihong Chiueh, Anupreeta More, Philip J. Marshall, Jean Coupon, Masamune Oguri, and Paul Price, [arXiv:1411.5398 (astro-ph)] Astrophys. J. 807 (2015) 138

RESCEU-33/15

*Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam's 2.3 deg<sup>2</sup> Field* , Satoshi Miyazaki, Masamune Oguri, Takashi Hamana, Masayuki Tanaka, Lance Miller, Yousuke Utsumi, Yutaka Komiyama, Hisanori Furusawa, et al., [arXiv:1504.06974 (astro-ph)] Astrophys. J. 807 (2015) 22

RESCEU-32/15

*Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in  $D$  dimensions* , K. Takahashi, T. Suyama, and T. Kobayashi, [arXiv:1511.06083 (gr-qc)] Physical Review D 93 (2016) 064068

RESCEU-31/15

*Spatially covariant theories of gravity: disformal transformation, cosmological perturbations and the Einstein frame* , Tomohiro Fujita, Xian Gao, and Jun'ichi Yokoyama,

RESCEU-30/15

*Delensing Cosmic Microwave Background B-modes with Radio Continuum Survey by Square Kilometre Array* , T. Namikawa, D. Yamauchi, B. Sherwin and R. Nagata, [arXiv:1511.04653 (astro-ph)]

RESCEU-29/15

*Determination of mass of an isolated neutron star using gravitational wave at two frequency modes: Effects of misalignment angle* , Kazunari Eda, Kenji Ono, and Yousuke Itoh, [arXiv:1511.00358 (gr-qc)]

RESCEU-28/15

*All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna* , Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh, and Masaki Ando, [arXiv:1511.08354 (gr-qc)] Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01

RESCEU-27/15

*Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories* , H.Ogawa, T.Kobayashi and T.Suyama,

RESCEU-26/15

*Large scale CMB anomalies from thawing cosmic strings* , C. Ringeval, D. Yamauchi, J. Yokoyama and F.R. Bouchet, [arXiv:1510.01916 (astro-ph)]

RESCEU-25/15

*Probing primordial non-Gaussianity consistency relation with galaxy surveys* , D. Yamauchi and K. Takahashi, [arXiv:1509.07585 (astro-ph)]

RESCEU-24/15

*Chemical feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy* , T. Tsujimoto, M. Ishigaki N, T. Shigeyama, and W. Aoki, [arXiv:1504.03357 (astro-ph)]

RESCEU-23/15

*Revealing progenitors of type Ia supernovae from their light curves and spectra* , M. Kutsuna and T. Shigeyama, [arXiv:1504.01234 (astro-ph)]

RESCEU-22/15

*Reheating signature in the gravitational wave spectrum from self-ordering scalar fields* , Sachiko Kuroyanagi, Takashi Hiramatsu, and Jun'ichi Yokoyama,

RESCEU-21/15

*Spontaneous scalarization: asymmetron as dark matter* , Pisin Chen, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama,

RESCEU-20/15

*Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves* , T. Nakama and T. Suyama,

RESCEU-19/15

*EOSDB: The database for nuclear equations of state* , C. Ishizuka, T. Suda, H. Suzuki, A. Ohnishi, K. Sumiyoshi and H. Toki, [arXiv:1408.6230 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan, 67 (2015) 13

RESCEU-18/15

*High-Resolution Spectroscopy of Extremely Metal-Poor Stars from SDSS/SEGUE. II. Binary Fraction* , W. Aoki, T. Suda, T. C. Beers and S. Honda, [arXiv:1410.2674 (astro-ph)] Astronomical J., 149 (2015) 39

RESCEU-17/15

*Ground-based Pa  $\alpha$  Narrow-band Imaging of Local Luminous Infrared Galaxies. I. Star Formation Rates and Surface Densities* , K. Tateuchi, M. Konishi, K. Motohara, H. Takahashi, N. M. Kato, K. Yutaro, S. Todo, K. Toshikawa, S. Sako, Y. K. Uchimoto, and 26 coauthors, [arXiv:1412.3899 (astro-ph)] Astrophys. J. Suppl. 217 (2015) id.1

RESCEU-16/15

*Multimolecule ALMA observations toward the Seyfert 1 galaxy NGC 1097* , S. Martin, K. Kohno, T. Izumi, M. Krips, D. S. Meier, R. Aladro, S. Matsushita, S. Takano, J. L. Turner, D. Espada, and 10 coauthors, [arXiv:1410.2823 (astro-ph)] Astron. Astrophys., 573 (2015) id.A116

RESCEU-15/15

*A multi-transition study of molecules toward NGC 1068 based on high-resolution imaging observations with ALMA* , T. Nakaajima, S. Takano, K. Kohno, N. Harada, E. Herbst, Y. Tamura, T. Izumi, A. Taniguchi, T. Tosaki, [arXiv:1410.5912 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan, 67 (2015) 8

RESCEU-14/15

*The Sizes of  $z$  6-8 Lensed Galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 Data* , Ryota Kawamata, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, Masamune Oguri, and Masami Ouchi, [arXiv:1410.1535 (astro-ph)] Astrophys. J. 804 (2015) 103

RESCEU-13/15

*Predicted Properties of Multiple Images of the Strongly Lensed Supernova SN Refsdal* , Masamune Oguri, [arXiv:1411.6443 (astro-ph)] Mon. Not. R. Astron. Soc. 449 (2015) L86-L89

RESCEU-12/15

*Inferring Host Dark Matter Halo Masses of Individual Galaxies from Neighboring Galaxy Counts* , Masamune Oguri and Yen-Ting Lin, [arXiv:1410.0714 (astro-ph)] Astrophys. J. 801 (2015) 94

RESCEU-11/15

*Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at  $z$  5-10 for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization* , Masafumi Ishigaki, Ryota Kawamata, Masami Ouchi, Masamune Oguri, Kazuhiro Shimasaku, and Yoshiaki Ono, [arXiv:1408.6903 (astro-ph)] Astrophys. J. 799 (2015) 12

RESCEU-10/15

*Galilean Creation of the Inflationary Universe* , Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama,

RESCEU-9/15

*Weak lensing induced by second-order vector mode* , Shohei Saga, Daisuke Yamauchi, Kiyotomo Ichiki, [arXiv:1505.02774 (astro-ph)] Physical Review D 92 (2015) 6, 063533

RESCEU-8/15

*Disformal invariance of curvature perturbation* , Hayato Motohashi and Jonathan White,

RESCEU-7/15

*Multi-disformal invariance of nonlinear primordial fluctuations* , Yuki Watanabe, Atsushi Naruko and Misao Sasaki,

RESCEU-6/15

*Equation of state of dark energy in  $f(R)$  gravity* , Kazufumi Takahashi and Jun'ichi Yokoyama, [arXiv:1503.07412 (gr-qc)] Physical Review D 91 (2015) 084060

RESCEU-5/15

*Multi-field formulation of gravitational particle production after inflation* , Yuki Watanabe and Jonathan White,

RESCEU-4/15

*Cosmological long wavelength solutions and primordial black hole formation* , T. Harada, C. M. Yoo, T. Nakama and Y. Koga,

RESCEU-3/15

*Modified gravity inside astrophysical bodies* , Ryo Saito, Daisuke Yamauchi, Shuntaro Mizuno, Jerome Gleyzes, David Langlois, [arXiv:1503.01448 (gr-qc)] JCAP 1506 (2015) 008

RESCEU-2/15

*New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves* , Kenji Ono, Kazunari Eda, and Yousuke Itoh, [arXiv:1503.01231 (gr-qc)] Phys. Rev. D 91, 084032 (2015)

RESCEU-1/15

*Large tensor mode, field range bound and consistency in generalized  $G$ -inflation* , Taro Kunimitsu, Teruaki Suyama, Yuki Watanabe, and Jun'ichi Yokoyama, [arXiv:1504.06946 (astro-ph)]



## II

# 2015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・Cannon・大栗・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。

## 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リング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、などを行っている。さらに既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検証など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

## 星形成

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

## 重力波

2016 年 2 月 11 日に LIGO-Virgo collaboration が発表した連星ブラックホール合体現象 GW150914 の検出は、人類史に重力波天文学の創成という新たな 1 ページを加えた。日本の重力波直接検出計画 KAGRA も LIGO-Virgo と肩を並べ、重力波天文学・物理学を強力に推進すべく 2018 年の観測を目指している。現在 KAGRA は岐阜県飛騨市神岡町池の山地下に 3km のマイケルソン干渉型検出器を建設し終え、3 月 26 日より試験観測運転をおこなっている。2016 年度の実データ解析に向けて、2015 年度はデータ解析手法の研究や、解析環境の整備をおこなった。

また、KAGRA データ解析パイプライン開発の一環として、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻安東研究室と協力して、安東研究室が開発するねじれ型重力波検出器 TOBA のデータ解析をおこなっている。

## 1.1 初期宇宙論

### 特異点なきインフレーション宇宙の創生

宇宙のエネルギー密度は宇宙膨張と共に徐々に薄まっていくため、宇宙膨張を過去に遡ると、密度無限大の特異点に当たると考えられている。これまで、インフレーション宇宙論の初期条件もこのような仮定の下で考えられてきた。つまり、インフレーション宇宙論は特異点問題を解決するわけではないのである。本研究では一般化ガリレオン理論をさらに拡張した理論を考えることにより、ヌルエネルギー条件を安定的に破り、宇宙が漸近的ミンコフスキー時空からはじまり、インフレーション、再加熱を経験

し現在に至るまで、不安定性なく進化できる理論を構築することに成功した [3]。

### 一般化 G インフレーション理論の整合性

本研究では、インフレーションの最も一般的な枠組みである Generalized G inflation 理論を用いて、観測可能な重力波を生成しながら場の変位をプランクスケール以下にとどめられることを示した。また、それがどのような物理的な状況において意味を持つのかを理論の強結合領域を求めることにより明らかにし、そのような場合のモデルに対する量子補正が無視できる、すなわちモデルが整合的であるということを示した [4, 128, 129]

### ブラックホールからのインフレーション宇宙の生成

ブラックホール (BH) のホーキング温度は、BH の質量に反比例し、BH の蒸発が進むにつれて増加する。GUT スケールで一次相転移を起こすようなスカラー場が存在する場合、ホーキング温度が GUT スケールに到達したところで、BH の周りは真真空から偽真空へと相転移することが期待される。そこで BH の周りで量子的に生成された真空泡のダイナミクスを、イスラエルの接続条件を用いて議論し、ホーキング温度が GUT スケールに到達すると、BH はその内側に偽真空領域を含む子宇宙へと相転移し、その内側でインフレーションが再度始まる、というシナリオを提唱した [94, 185, 138, 109]。

### 超対称性理論におけるドメインウォール問題の解決法

素粒子相互作用の準極小超対称性標準理論は、極小理論における  $\mu$  項をスカラー一重項の期待値によって説明する理論であるが、 $Z_3$  対称性が破れる際ドメインウォールを生成してしまうという問題が指摘されていた。本研究では、インフレーション中のこの場の挙動を注意深く解析し、超重力理論に由来してこの場がインフレーション中にハッブルパラメタに比例した質量を十分得る場合には、観測可能な宇宙の全域が同一のドメインに落ちることが可能で、それによってドメインウォール問題を回避できることを示した [6]。

### 空間方向のみに不変性を持つ理論における背景量とゆらぎの変換性

XG3 理論と名付けた空間方向のみに座標変換に対する不変性を持つ理論において、一様等方宇宙を記述する変数とその周りのゆらぎを記述する変数が、disformal 変換によってどのように変換されるかを調べた。結果として、この理論はこの変換に対して閉じていること、摂動量、特にテンソルゆらぎは高階

微分相互作用を持つにもかかわらず、アインシュタイン重力の場合と同等の表現を持つ座標系を取ることができることを示した [8]。

### 大域的相転移を起こしたスカラー場からの重力波と宇宙の熱史

初期宇宙起源のスケール不変な重力波として、インフレーション中に生成する量子的重力波と並んで、大域的相転移を起こした多成分スカラー場が宇宙膨張と共に一様化する際に放出される重力波が挙げられる。本研究では、この場の時間発展を、インフレーション後の再加熱期の宇宙膨張と共に解き、生成する重力波のスペクトルを精細に求めると共に、再加熱温度に対する依存性を明らかにした。そして、DECIGO 等の観測衛星によって熱史を決定できる条件、ならびにインフレーション起源の重力波と峻別できるための条件を明らかにした [7]。

### 遅延スケールリング宇宙ひもが CMB に与える影響

インフレーション中に宇宙ひもが生成するモデルを考えた場合、典型的な長さスケールを与える相関長が指数的に引き伸ばされ、スケールリングに到達する時間が大きく遅延する。本研究では、このような「遅延スケールリング宇宙ひも」モデルに対して、その発展を探った。その結果として、近年の宇宙マイクロ波背景放射の精密観測によって指摘されている大スケールでのアノマリーがこの遅延スケールリング宇宙ひもによって説明可能であることを指摘した [9]。

### 宇宙論的摂動論の長波長解と原始ブラックホール

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 (PBH) が形成される。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。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近似的に解くことでゆらぎの時間発展を調べられる。この近似解を様々な座標条件に一般化し、さらに長波長ゆらぎ中に存在する短波長ゆらぎによる PBH 形成の条件を議論した [10]。

### 原始ブラックホールで探る短波長原始重力波

インフレーション理論では様々な波長の重力波が生成されると予想されるが、そのうち短波長の重力

波の振幅が大きいと、重力波の二次の効果により密度ゆらぎが生成する。密度ゆらぎの振幅が十分大きいと PBH が形成する。しかし PBH は観測的に見つからないので、PBH が大量に形成してしまうほど大振幅の短波長重力波は棄却されることになる。このような考察から得られるインフレーション起源の短波長重力波への制限は、ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景放射から得られる制限よりも厳しいことを明らかにした [11, 92, 265]。

## 1.2 観測的宇宙論

### 暗黒物質ミニハローで探る短波長原始ゆらぎ

短波長原始ゆらぎが大きいほど構造形成が早まり、より初期に高密度の暗黒物質ミニハローが多数形成する。暗黒物質が対消滅する場合には、これらのミニハローで発生したガンマ線やニュートリノが観測されるはずである。つまり、これらの観測は短波長原始ゆらぎに対する制限を与えることになる。この制限は暗黒物質の性質やミニハローの性質に依存するため、その依存性について詳細に調べた [130]。

### 将来の大型電波干渉計計画による宇宙論の探求

将来の精細観測時代を見据え、将来の大規模観測によってどのような宇宙論のフロンティアが開拓されていくかを探求することは重要である。特に、Square Kilometre Array (SKA) と呼ばれる次世代電波望遠鏡に着目している。宇宙大規模構造を用いた宇宙論探査はこれまで可視光・近赤外による探査がほとんど全てであった。しかし、SKA を用いることで電波域というこれまで宇宙論的には用いることができなかった波長域を通じて宇宙を見ることが可能になる。全く新しい宇宙論のツールとして重要視されており、我が国として寄与しうるサイエンストピックについてまとめ、今後の発展を議論した [51]。

### 将来の大型電波干渉計計画を用いたインフレーション模型の峻別

電波域による銀河探査も行うことが可能になり、宇宙の電波 3 次元地図を書くことができるようになる。可視光・近赤外探査による結果とは相補的な関係となっており、双方の解析が重要になる。解析の際に、電波銀河の形状による分類を応用することでマルチトレーサー法と呼ばれる手法を用いることが可能になり、インフレーション模型の峻別に対して重要な寄与をしうる。この際、Euclid 衛星 (可視光・近赤外) との協働により、あらゆるインフレーション模型が満たすべき「整合性条件」の可否を探査できる。もし今後の精密観測により整合性条件を破るような結果が得られた場合、これまで知られていた全てのインフレーションの研究は再検討を余儀なくさ

れる。また、宇宙マイクロ波背景放射観測との協働においても SKA は重要な地位を占める。日本が主導して行う予定の LiteBIRD 衛星計画において SKA のデータとの協働によって、精度を 2 倍以上改善することができることを示した [45]。

### 密度揺らぎによる高次ベクトル摂動の弱い重力レンズ効果による観測可能性

ベクトル摂動、テンソル摂動は弱い重力レンズ効果を通じて歪み場にパリティ負のモードを生成することが知られている。このモードは線形密度揺らぎでは生成することができないことから、非スカラー摂動の重要なプローブとなり得る。線形レベルでは密度揺らぎはベクトル摂動を作り得ないが、高次項を通じて関係付くことが期待されている。我々は高次密度揺らぎを通じて生成されるベクトル摂動を数値的に解くことでその観測可能性を探求した [44]。

### 弱重力レンズ現象の全天シミュレーション

すばる望遠鏡の広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた大規模銀河撮像観測による重力レンズ解析を念頭においた宇宙論研究を行った。現在世界各地ですすめられている銀河撮像観測は、いずれも 1000 平方度を超える広視野を観測する予定である。このような現状を鑑み、我々は全天を確保する弱重力レンズシミュレーションを行った。さらに、全天シミュレーションを応用して、HSC 観測領域である 1400 平方度をカバーする模擬観測を行い、HSC 観測における重力レンズ解析で再構築できる Convergence 分布が含む宇宙論的な情報の理解を進展させた。200 回の模擬観測によって明らかになった質量分布の統計的な性質は、暗黒物質が高密度に密集した領域であるハローの統計的な性質と密接に関連しており、ハローが持つ密度プロファイル、存在量と 2 点分布関数の適切なモデル化により、シミュレーション結果をよく説明できることを示した。また、シミュレーションにより綿密にテストされた解析モデルを用いて、宇宙加速膨張を説明するための 2 種類の物理的な宇宙モデルを制限する可能性を調査した。PLANCK 衛星による宇宙背景放射の観測結果を併せて用いることにより、HSC 観測による Convergence 分布の統計解析が、暗黒エネルギーの時間進化および一般相対性理論の破れを明らかにできる可能性を示した [23, 25]。

### 背景ガンマ線放射と大質量銀河の相関解析

銀河分光観測と多波長観測データの組み合わせにより、重力レンズの単独解析では明らかにできない暗黒物質の素粒子的性質を調査した。本研究では、暗黒物質の素粒子的な性質として、対消滅反応に着目した。暗黒物質がもし対消滅しているなら、宇宙の物質分布の高密度領域では、対消滅によるガンマ線

が発生していることが予想される。一方で、標準的な宇宙モデルにおける銀河形成理論では、物質分布の高密度領域に選択的に銀河が形成される。このことを考慮すると、銀河系外からくるガンマ線（背景ガンマ線放射）と銀河系外に位置している銀河の間には、角度相関が生じていることが期待される。

そこで、本研究では、実在するガンマ線観測と銀河分光観測の2種のデータの相関解析を行い、暗黒物質の対消滅可能性を探索した。Fermi Large Area Telescopeによる背景ガンマ線放射と、Sloan Digital Sky Survey (SDSS)による極めて明るく赤い銀河 (Luminous Red Galaxy; LRG) の角度相関関数の測定を行い、現行のデータでは有意な相関は見られなかった。この測定結果と理論モデルの比較から、暗黒物質対消滅に関する上限を与えることに成功した。本研究の提案する手法は、宇宙論的な距離スケールを利用した解析手法であり、近傍の矮小銀河や銀河中心のガンマ線観測からくる制限とは独立な制限を与える。また、将来銀河探索計画におけるLRGサンプルの蓄積により、期待される暗黒物質対消滅に関する制限は、幅広い暗黒物質質量の範囲で近傍の制限と同等かそれ以上になることを示した [24]。

### 超新星重力レンズ SN Refsdal の像の出現予測

Kellyらによって、強い重力レンズ現象をうけた超新星 SN Refsdal が銀河団 MACSJ1149.5+2223 内で 2014 年 11 月に発見された。この報告の直後構築された重力レンズモデルによって 5 番目の超新星像が約 1 年後に出現することが示された [22]。他のいくつかの研究グループも同様の像の出現を予測していたが、出現時期については異なるモデル間で 100 日以上の違いがあった [35]。その後 Kelly らの追観測により、2015 年 12 月のハッブル望遠鏡観測で新しい超新星像が検出され、いろいろなモデル予言の中でも我々の質量モデルがもっとも正確に超新星像の出現時期を予言していたことが明らかになった。この出現予測の一連の研究は、重力レンズ解析によるダークマター分布を含めた質量分布の再構築の妥当さと正確さをこれまでとまったく違う角度から検証できたという点で重要かつ画期的な成果である。

### 銀河団の増光を利用した遠方銀河の研究

遠方銀河を銀河団の重力レンズ増光効果を利用して調べるハッブル望遠鏡 Frontier Fields 計画の最初の銀河団 Abell 2744 のデータを用いて、 $z \sim 6-8$  の銀河のサイズの時間進化を調べた。特にダークハローのサイズと銀河のサイズの進化の関係を初めて調べ、その結果広い赤方偏移にわたってそれらのサイズの比が一定であることを見いだした [28]。また Frontier Fields 計画の最初の 4 つの銀河団の質量モデルを構築し、増光された遠方銀河を約 120 個同定した [29]。

### Hyper Suprime-Cam の弱い重力レンズ初期成果

すばる望遠鏡に取り付けられた広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) がいよいよ稼働をはじめた。カメラの試験中に撮影された 2.3 平方度の領域の弱い重力レンズ解析を行い、質量マップのピークから銀河団を 8 つ発見した [31]。これは現在の標準宇宙モデルで期待されるよりも多いという点で興味深く、より広い領域の重力レンズ解析が待たれる。この研究は HSC が当初の計画とおりの性能が達成されていることを実証し、また弱い重力レンズ研究における HSC の威力を示したものである。

### アルマ望遠鏡で観測された強い重力レンズ SDP.81 の詳細解析

アルマ望遠鏡が公開した重力レンズ SDP.81 の長基線データはハッブル宇宙望遠鏡の解像度をしのぐ 0.023 秒角の画像を撮影することに成功しており、大きな注目を集めた。この公開データをもとに詳細な質量モデル解析を行い、その結果観測された詳細な重力レンズパターンを精緻に再現する質量モデルの構築にいち早く成功した。その結果、レンズ銀河中心のブラックホールの質量に下限をつけることに成功した [37]。また、アルマ望遠鏡の解像度と重力レンズの増光のおかげで背後の銀河の個々の星形成領域を分解することができ、その結果ガス密度と星形成率の関係が爆発的星形成銀河でみられるものに近いことを突き止めた [14]。

### 強い重力レンズ探索

クエーサー重力レンズを大規模サーベイデータから効率的に探す手法を開発した [20]。また市民プロジェクト Space Warps から、赤外で非常に明るく、新しい重力レンズ天体を発見した [19]。SDSS-III BOSS のクエーサーサンプルから重力レンズを探し、新たに 13 個の重力レンズクエーサーを発見した [13]。

### 電波で暗いクエーサーの電波放射の起源

電波で暗い (radio-quiet) クエーサーからも弱い電波放射が観測されており、その起源がクエーサー母銀河の星形成に由来するかあるいはクエーサーの活動性に起因するかはよくわかっていなかった。スピッツァー望遠鏡によるクエーサーの赤外観測により得られたクエーサーの SED を詳細に解析することによりクエーサー母銀河の SED を見積もりそこから星形成率を見積もった結果、星形成由来の電波放射は観測を説明するには不十分であり、クエーサーの活動性がその電波放射の主な原因であることがわかった [27]。

## 近傍ボイドモデルによる $\sigma_8$ 問題と $H_0$ 問題解決の可能性

プランク衛星の宇宙背景放射の観測の結果、 $z = 1090$  の観測から期待される現在の宇宙での密度ゆらぎの量 ( $\sigma_8$ ) およびハッブル定数 ( $H_0$ ) の値が近傍宇宙で直接測定された値とずれていることが知られており、原因はわかっていない。この問題は我々が宇宙の低密度領域 (ボイド) に住んでいるとすれば解決される可能性がある。簡単なボイドモデルを用いて解析した結果、密度ゆらぎのずれを解決できる程度の低密度領域を考えると観測される近傍でのハッブル定数がちょうど観測されたものと近くなり、ボイドモデルがこの二つの問題を同時に解決しうることがわかった [12]。

## 重力レンズ効果を用いたグラヴィティーノ質量の制限

宇宙の大規模構造の観測を用いてダークマターのモデルを制限することは観測的宇宙論における重要な役割の一つである。ダークマターの有力候補の一つとして、超対称性粒子の light gravitino が提唱されてきた。light gravitino が構造形成に与える影響としては主に、(1) matter-radiation equality の時期を変える、(2) free-streaming による構造の減衰の二つがある。(1) の効果は比較的小さいため、(2) の効果に敏感な観測量を用いる必要がある。light gravitino による減衰が効くスケールを探る観測量として、宇宙背景放射光子の重力レンズ効果 (CMB lensing) と遠方銀河からの光の弱い重力レンズ効果 (cosmic shear) の二つが挙げられる。我々は Planck 衛星による CMB lensing の power spectrum、CFHTLenS サーベイによる cosmic shear の二点相関関数を用いて、light gravitino の質量にこれまでで最も良い制限 ( $m_{3/2} < 4.7 \text{ eV}$  (95% C.L.)) [21] を得た。さらに light gravitino を考慮した際の、low redshift と high redshift の宇宙論観測の間における、揺らぎの振幅の推定量のずれ ( $\sigma_8$  tension) についても議論した。

## ALMA によるサーベイ観測データを用いた遠方炭素輝線銀河探査

本研究の動機は、遠方星形成史を理解することである。星形成率密度の進化は、従来は静止波長系での紫外線波長域で理解されてきた。一方で、星形成活動のトレーサーは様々な波長帯で存在する。例えば、炭素イオンが放射する [CII] 輝線 (158cm) は、大質量星を伴う星形成領域中の光解離領域を主な起源とし、サブミリ波帯で最も明るい輝線の 1 つである。近年の ALMA の観測により、遠方宇宙では、紫外線では暗いが [CII] 輝線では明るい銀河が存在する事が分かってきた。そのため、紫外線のみで測られた星形成率密度は真の値と異なる可能性がある。以上のことから、遠方宇宙の星形成率密度を [CII] 輝線によって測れば、遠方星形成史の描像の新たな知見が得られると期待される。

我々は ALMA Cycle2 で得られた最新の観測データの解析を行い、5 平方分角の観測視野中に赤方偏移  $z = 6$  の [CII] 輝線銀河候補を 2 個検出した。そして、世界で初めて  $z = 6$  における [CII] 輝線銀河の数密度を求め、星形成率密度の下限値をつけることに成功した。この観測結果は、 $z = 6$  の星形成率密度がこれまでに考えていたよりも大きかった可能性を示唆している。本研究は、従来紫外線連続光による観測から見積もられていた遠方星形成率密度を、サブミリ波輝線により見積もることが可能であることを示した初の例である。

## AKARI FIS マップにおける SDSS 銀河のスタック解析

ダストは銀河形成及び銀河の化学進化を調べる上で重要な情報を持つ。ダストは星生成活動と関連する紫外光及び可視光を吸収散乱し、星からの光のおよそ半分を赤外線で再放射するためである。しかしながら明るい銀河を除いて、個々の銀河からの赤外線放射を直接検出するのは非常に難しい。パイアスの少ない形で銀河からの赤外線放射を特徴付けるために、統計的な検出をおこなうスタック解析が有用となる。

先行研究として IRAS 全天地図上における SDSS 銀河のスタック結果はあるが、その角度分解能は約 6 分と悪く定量的な解析は困難であった。そこで今回は、角度分解能が約 1 分まで向上した AKARI 全天地図を用いて同様のスタック解析を行った。

スタックによって得られるダスト赤外放射には、中心銀河からの寄与だけでなくその銀河と空間的に相関している他の銀河の寄与も含まれる。銀河の角度相関関数と AKARI の点拡がり関数をもとにした理論モデルにより、各成分からの寄与を可視光等級の関数として見積もった。中心銀河と空間的に相関している銀河からの寄与は SDSS 銀河の角度相関関数から予測可能であり、今回の観測値はその予測値と整合的であった。

さらに AKARI の 65,90,140 $\mu\text{m}$  の各波長で解析を行い、ダストの赤外線放射効率をかけた修正黒体放射でフィットすることで 40K という平均ダスト温度を得た。これは個々に測定されている典型的な SDSS 銀河のダスト温度と同程度であり、銀河のダスト温度が赤外線の放射量に依らないことを示唆している [33]。

## ダークマターハローの進化における速度分散の役割

球対称崩壊モデルはダークマターハローの非線形成長を記述するもっとも基礎的なモデルであるが、その予言が実際の個々のハローの成長をどの程度よく近似できているかは、これまで調べられた例がなかった。我々は N 体シミュレーションから取り出したハローを解析し、個々のハローの進化と球対称崩壊モデルの予言とを比較した。その結果、球対称崩壊モデルは、ハローの半径が増加から減少に転じるター

ンアラウンド時刻まではかなり正確にシミュレーション中のハローの進化を記述できているが、その後は両者のずれが大きくなることがわかった。特に、現在のハローの半径はモデルの予言に比べて平均的に1.2倍となっている。我々はずれの原因が主にダークマター粒子の速度分散にあることを示した。また、速度分散の影響は運動エネルギーなどの力学量に特に強く現れていることもわかった。これらの結果はダークマターの非線形成長についてより深い理解を与えるものである [15]。

### 大規模 $N$ 体シミュレーション群を用いた銀河-銀河レンズ効果のエミュレータ構築

銀河または銀河団をレンズ天体とする、背景銀河の像の歪みはレンズ天体周りの平均的な見えない暗黒物質を主成分とする宇宙の密度分布をレンズからの距離の関数として明らかにする強力な手法である。大まかには小スケールでは銀河、銀河団周りの密度プロファイルを、大スケールでは宇宙論的な揺らぎの情報を見ていることになるが、その広いダイナミックレンジにわたり精密にモデリングするためには大規模な数値計算が必要となる。さらに言えば、銀河-銀河レンズ効果から宇宙論の情報を引き出すためには、期待されるシグナルを宇宙論パラメータの関数として予言する必要がある。我々はパラメータ空間を効率的にサンプルする手法であるラテン超方格法に基づいて、6次元パラメータ空間をサンプリングし、約100億粒子を用いた  $N$  体シミュレーションを84試行実行した。得られた結果の一部を、機械学習の一種であるガウス過程を用いて学習することで、考えているパラメータ領域において任意の宇宙論パラメータについて予言を与え、残りのシミュレーションからその達成精度を検証した。その結果、すばる望遠鏡 HSC サーベイの初期データとの比較に十分な精度を達成していることを確認した [157, 220, 224, 172, 246, 253]。

### FastSound による高赤方偏移の重力法則の制限

銀河の特異速度場による赤方偏移空間の銀河分布の見かけ上の非等方性は、銀河バイアスの不定性に依らない揺らぎの成長率の測定を可能にする。これまでの観測は赤方偏移 1 未満の比較的近傍宇宙の観測データに基づくものであったが、揺らぎの成長率を用いて重力理論に強い制限を課すためには、より高赤方偏移から揺らぎの成長率の時間変化を追うことが重要となる。すばる望遠鏡の多天体同時分光器 FMOS を用いて得られた赤方偏移  $1.19 < z < 1.55$  にわたる 2783 個の輝線銀河はそのような解析を可能とする。我々は、それらの赤方偏移空間の相関関数を測定し、高赤方偏移における赤方偏移歪みの兆候を初めて観測した。これにより、赤方偏移 1.4 付近における実効的な構造成長率  $f(z)\sigma_8(z) = 0.482 \pm 0.116$  を導いた。これは約  $4.2\sigma$  レベルの非等方性の検出を意味する。この制限は  $1 - \sigma$  で一般相対性理論と整合的である。また、低赤方偏移の観測データと組み

合わせることで、宇宙マイクロ波背景放射の観測に頼ることなく赤方偏移歪みだけで重力模型に対する意味のある制限が可能であることを示した [34]。

### SDSS BOSS 銀河サンプルの分布の非等方性を用いた修正重力理論の制限

赤方偏移空間の銀河の非等方クラスタリングの解析では、重力法則は一般相対性理論に従うものとして構築された理論テンプレートをを用いて揺らぎの成長率を導き、その時間依存性を手掛かりに重力模型の制限を行うが、解析の際に一般相対性理論を仮定している以上、必ずしも整合的な解析にはなっていない。そこで、本研究では一般相対性理論の単純な拡張である  $f(R)$  重力理論のもとで摂動論的に計算された理論テンプレートをを用いて、SDSS BOSS から得られた約 70 万の銀河の分光サンプルの非等方性を解析し、この理論におけるモデルパラメータ  $|f_{R0}|$  を制限した。その結果は一般相対性理論と無矛盾であった [38]。

### キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いた宇宙論

宇宙大規模構造の観測によって、宇宙の進化の歴史を探ることが期待されている。特に赤方偏移歪みの観測によって、銀河の 3 次元分布に埋め込まれた銀河の特異速度の相関を測定することが可能となる。特異速度はニュートンの運動方程式によって重力ポテンシャルと直接関係しているため、修正重力理論への制限など、大規模構造の進化を追う上で非常に重要となっている。大スケールにおいては宇宙論的摂動論の線形理論が非常によく働くことが知られており、大スケールの二点相関関数を測定し理論と比較することで、宇宙論パラメータを制限することが可能となる。より高精度な宇宙論パラメータの制限のためには、非線形領域 (小スケール二点相関や多点相関) を考えなければならないが、非線形領域では非ガウスエラーの効果や理論モデルの不定性なども大きく、正しく宇宙論的情報を取り出すにはまだまだ解決しなければならない問題も多い。

キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果は銀河分布の赤方偏移歪みに加えて、大スケールの特異速度相関を測定することが可能であり、近年新たな宇宙論における観測量として注目されている。キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果は銀河クラスターのある場所でしか起こらないため、観測する量は赤方偏移歪みを受ける。我々は、赤方偏移歪みを含むキネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を宇宙論に適用するための理論モデルを構築し、将来観測においてどの程度パラメータへの改善を与えるかを初めて示した。

## 宇宙論的 6 次元 Vlasov シミュレーションの高次精度化

自己重力系での無衝突ボルツマンシミュレーション (Vlasov シミュレーション) は N 体シミュレーションで現れる離散粒子による二体緩和、物理量のショットノイズの影響がなく、また熱い成分であるニュートリノなどの大きな速度分散を持った系でも計算が可能であるので粒子法とは別のアプローチとして長年注目されている。しかしながら、この計算は位置空間 3 次元、速度空間 3 次元の 6 次元位相空間での計算なので膨大な計算コスト、メモリ領域が必要であり近年までは次元を削減した計算が行われていたが、計算資源の発達に伴い先行研究では初めて 6 次元位相空間上での Vlasov シミュレーションが可能となった。ところが、6 次元 Vlasov シミュレーションでは高精度化にあたり、計算資源の観点から単純にメッシュ数を増やすことが困難であるので別の方法で精度を上げる必要がある。

我々は、空間 5 次精度 (MP5) スキームをもとに、正值性を保証した手法を新たに開発し、先行研究で用いられた空間 3 次精度 (PFC) スキームと比べ、同じメッシュ数であってもよりも高精度の計算を行うことが可能となった。また、宇宙論的な計算への拡張を行い、現在使用可能な計算資源において空間 3 次精度では達成できなかった精度を新たに開発した手法を用いることにより解消することが確認できた [221]。

### 1.3 星形成

#### 初代星形成の降着期進化の 3D 計算: パースト的降着と間欠的 UV フィードバック

初代星形成の最終質量は原始星へのガス降着がいつまで継続するかに依存しているが、この長期進化を 3D 輻射流体シミュレーションにより調べた。これは我々がこれまで行ってきた 2D 軸対称計算を拡張したものである。3D にすることにより、星周円盤の重力トルクによる角運動量輸送過程、および円盤での重力不安定による分裂過程を追跡することができるようになった。我々の計算では原始星への質量降着率が激しく時間変動する、いわゆる”episodic accretion” が普遍的に現れる。降着率の変動にあわせて星の半径、そして星の有効温度も大きく変動するため、星周囲の電離領域が生成、消滅を繰り返す様子が見られた。これが起きると UV フィードバックは間欠的にしか働かず、中心星へのガス降着を効率よく抑制することが出来ない。結果として、場合によっては 1000 太陽質量に近いような非常に大質量の初代星が形成される可能性を示した。最近の 3D 計算では、UV フィードバックと円盤分裂の効果によって初代星質量は下がる傾向があることが指摘されていたが、我々の結果はこれとは逆の可能性を指摘したものである [17]。

## 第一世代星形成における密度ゆらぎモデルの影響

宇宙論的シミュレーションの初期条件は観測的な制限のある始原的密度ゆらぎを元に作成されるが、第一世代星を形成する程度の小規模なゆらぎは観測解像度以下であり、理論モデルによって補完されている。将来観測される小スケールゆらぎが一般的に採用されているゆらぎと異なると、第一世代星の形成モデルに影響を及ぼす可能性がある。この影響の有無について調べるため、小スケールの始原的密度ゆらぎを変えた場合の宇宙論的初期条件を用意し、それぞれ第一世代星の形成過程を調べた。数値シミュレーションの結果、ガス雲形成後の星形成シナリオはほぼ影響はないが、密度ゆらぎモデルによって第一世代星の形成時期と星質量が変化することを確認した。これは、もし将来の高解像度観測によって密度ゆらぎモデルが変更を受けた場合、第一世代星や宇宙初期の銀河形成のシナリオに影響が波及することを示唆している [32]。

## Stream Velocity が宇宙初期の天体形成に及ぼす影響

Tseliakhovich & Hirata (2010) は従来のシミュレーションには含まれていなかった宇宙再結合期のバリオン・ダークマター間の速度差が宇宙初期の天体形成を左右する可能性について示唆した。速度差の大きさが第一世代星の形成に与える影響を系統的に調べるため、異なる速度差の元での星形成過程を宇宙論的シミュレーションより調べた。速度差が一定以上ある場合、ダークマターハローへのガス収縮が妨げられて星形成が遅れる。このとき星形成ガス雲の質量が増大するが、一方ジーンズ質量はそれに対して十分小さく、ガス雲は分裂して複数の星形成サイトとなる。これは初代星からなる星団の形成可能性を示唆している。また極めて大きな速度差の元では、ガス雲が大質量・高温となるまで星形成が阻害される。このガス雲全体が重力不安定となって収縮すると、大質量星が形成される。

## 原始揺らぎの非ガウス性がブラックホールの形成・成長に与える影響

標準的な宇宙モデルでは原始の揺らぎの種はガウス統計に従うとされ、観測的にも非ガウス性は極めて小さいとされている。これまでの制限は主に大スケールの揺らぎの観測に基づくものであるため、スケールに依存する非ガウス性を考えることで観測の制限をクリアしつつも小スケールで構造形成を変えるような模型を考えることができる。本研究では高赤方偏移で見つかった巨大なブラックホールを持つクエーサーに注目し、そのような巨大なブラックホールを形成するための理論上の困難を解消するために非ガウス性が有用かどうか議論した。我々はガウス初期条件及び非ガウス初期条件に基づく 2 つの宇宙論的 N 体計算から、ブラックホールの形成や成長に



対する非ガウス性の影響を調査した。その結果、ブラックホールの数密度は正の歪度を持つ非ガウス初期条件の元で増加することが分かった。さらに、ハローの合体史に違いが生じ、その結果、最も重いブラックホールについて質量や数密度が増加し得ることを示した [26]。

### 超大質量星形成における間欠的質量降着と紫外線フィードバック

初期宇宙の超巨大ブラックホール (BH) 形成モデルの一つでは、太陽の 10 万倍程度の質量を持つ超大質量星が急速ガス降着により形成されることを仮定している。しかしながら、このガス降着の過程で放出される紫外線輻射は降着を抑制する (フィードバック) 可能性があり、実際に超大質量星が形成されるかどうかについてはまだ議論の余地がある。そこで本研究では、超大質量星形成過程でフィードバックが起きるかどうかを明らかにする。まず 2 次元流体シミュレーションを行い、これにより星に降り積もるガスの降着率を求め、次にこのより現実的な降着率を用いて、星の進化の計算を行い、星から放出される紫外線輻射量を求める。2 次元の流体シミュレーションから得た降着率は、平均で毎年 0.3 太陽質量程度で、100-1000 年程度の間隔で間欠的に変動するものであった。降着率が激しく変動するにもかかわらず、星の進化計算では、星が常に膨張し続け表面温度が低く保たれるために、フィードバックが効かない程度に紫外線輻射量が少なく保たれるという結果になった。これにより超大質量星は、少なくとも 1 万太陽質量程度までは成長できることが分かった。

### 宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性

近年  $z \sim 7$  の初期宇宙において、すでに  $10^9 M_{\odot}$  の質量を持った超大質量ブラックホール (SMBH) が存在する事が明らかになってきた。形成過程に関しては、初期宇宙において非常に特殊な環境下に存在するガス雲から超大質量星を経て  $\sim 10^5 M_{\odot}$  の BH が形成される Direct Collapse (DC) シナリオが提唱されている。この BH は観測された SMBH の種となることが期待される。DC に関しては様々な研究がなされているが、現在のところ宇宙論的な状況で実際に超大質量星が形成される過程は確かめられていない。そこで本研究では、DC が宇宙論的な環境下で起こりうるかを検証した。具体的な計算は、宇宙論的な初期条件から始める数値計算を Gadget を用いて行う。DC は非常に低金属なガス雲で、かつ非常に輻射の強い状況で起こると考えらる。このためにも、(1) 星形成活動による金属汚染の過程、(2) 近傍銀河からの輻射強度の計算、(3) 輻射場のもとでのガス雲の進化、を考慮する必要がある。本研究においては、N 体計算をもとに準解析的に星形成史を再現することで (1)、(2) を考慮する。次に、得られた DC 候補ガス雲の進化を流体計算することで (3) の過

程を追う。結果的に、20 Mpc/h のシミュレーション領域内で 2 例の超大質量星が形成され始めることを確認した。得られた DC の数密度は先行研究に比べて 1 桁ほど小さい。これは今まで DC シナリオにおいて考慮されて来なかった周囲からの環境効果 (潮汐力、ram pressure、など) に起因する。

### 低金属量ガス雲の重力収縮と星形成

銀河系外縁部 (ハロー) において発見されている極低金属量 ( $\sim 10^{-5}$  太陽金属量) かつ小質量 (1 太陽質量以下) の星の形成過程は明らかになっていない。低金属量においてもダストによる放射冷却が効果的となり、ガス雲が不安定となり分裂することで小質量星が形成されると考えられている。本研究ではガス雲の分裂条件を求めるために、ダストモデルについて詳細に扱いつつ、様々な金属量 ( $10^{-6}$ - $10^{-3} Z_{\odot}$ ;  $Z_{\odot}$  は太陽金属量) でガス雲の収縮シミュレーションを行った。まず、初期宇宙におけるダストの供給源は主に初代星の超新星であることから、初代星の超新星モデルと整合的に求められたダストの性質 (金属の凝縮率、ダスト組成、サイズ分布) を初期条件として用いる。また、分子雲中のダスト成長を 3 次元シミュレーションにおいて初めて考慮した [93]。そして 4 つのガス雲に対し、ポロノイ図を用いた粒子分割法 [16, 93] で収縮中心の解像度を高めつつ計算した。

まず、ダスト冷却によって分裂が促進されると先行研究では考えられていたのに対し、ダスト冷却が不十分である  $10^{-6} Z_{\odot}$  のガス雲 1 個について分裂が見られた。このことから、分裂条件は金属量のみによって決まるわけではないことがわかる。ただし、 $10^{-6} Z_{\odot}$  において、分裂は中心の原始星の降着円盤上で起きたのに対し、 $> 10^{-5} Z_{\odot}$  では、ダスト冷却によってフィラメント状に伸長したガス雲中で分裂が起きた。このように分裂の二つのモードを一連のシミュレーションで確認したのは本研究が初めてである。

また、 $> 10^{-5} Z_{\odot}$  において大半のガス雲について分裂が見られなかった。 $10^{-5} Z_{\odot}$  において、2 つのガス雲に対してダスト冷却が不十分であり分裂が見られず、1 つのガス雲については水素分子生成に伴う加熱によってガスが安定化し、ダスト冷却が十分であっても分裂が抑制された。 $10^{-4}$ - $10^{-3} Z_{\odot}$  についてはほぼすべてのガス雲に対して水素分子生成加熱により分裂が見られなかった。ただし、 $10^{-4} Z_{\odot}$  において、1 つのガス雲のみ OH 分子による冷却でガスの変形が促進され、続くダスト冷却により小質量の分裂片への分裂が見られた。OH 分子冷却がガス雲の分裂に関与することは本研究で初めて示されたものである。このようにガス雲によって効果的となる熱的過程が異なるのは、収縮時間の違いによって断熱圧縮加熱率が異なり、化学組成と放射冷却率の違いが現れたためである。本研究により、金属量だけではなく、収縮時間もガス雲の分裂条件を決定し得ることが初めて明らかになった [93, 145, 147, 154, 197, 209, 254]。

## 原始惑星系円盤の光蒸発

星間分子雲から星が形成するとき、星周りに形成される円盤のことを原始惑星系円盤という。原始惑星系円盤は、有限の時間で消失してしまうことが知られており、この有限の時間のことを原始惑星系円盤の寿命と呼ぶ。太陽近傍星団の円盤寿命が3-6百万年であるのに対して、低金属量環境下 ( $[O/H] \sim -0.7\text{dex}$ ) の円盤寿命は平均的に百万年以下と、明らかに互いに異なる円盤寿命の振る舞いを示す。

原始惑星系円盤が主にどのようなメカニズムで散逸するかについて、明確な結論は得られてはいないが、そのメカニズムとして有力なものひとつとして考えられているのが、光蒸発メカニズムである。光蒸発メカニズムとは、星から照射される高エネルギー光子 (FUV, EUV, X線) によって円盤表面の物質が加熱され、円盤表面の物質がエネルギーを獲得することで星からの重力束縛を振り切り円盤上空へと流れ出す機構のことをいう。

本研究では、原始惑星系円盤の光蒸発過程を流体シミュレーションし、原始惑星系円盤寿命の金属量依存性を明らかにすることが目的である。

本研究の段階的過程として、静流体力学的に円盤の熱化学構造を解くことでEUV+FUV光蒸発率の金属量依存性を見積もった。結果として、EUV+FUV光蒸発率の金属量依存性は大きく分けて二つの特徴を示すことを明らかにした。一つ目はFUV照射の有無に関わらず低金属量ほど光蒸発率が高いこと、二つ目はFUV加熱の光蒸発への寄与は円盤系の金属量が太陽金属量に近づくほど大きくなることである。一つ目は、低金属量ほど金属による輝線冷却率が小さくなるので、円盤表面付近の温度が低金属量ほど高くなり、ベース密度が大きくなったことが原因である。二つ目は、FUVが円盤表面に達するまでにどの金属量でもほぼ減光を受けないために、FUVによる加熱率が主にダスト量に依存したことが原因である。

将来的には、単純化した(静的な)円盤モデルを構築した後、光蒸発の流体シミュレーションをすることが必要とされる。

## 1.4 超新星爆発

### 音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究

重力崩壊型超新星爆発とは、 $8M_{\odot}$ 以上の大質量星がその最期に爆発を起こす現象である。大質量星が中心に作る鉄コアは重力崩壊し、中心が原子核程度の密度になった段階でバウンス衝撃波を形成する。このバウンス衝撃波は伝搬しながらエネルギーを失い、いずれ停滞する。停滞衝撃波が復活するメカニズムは長年議論されてきており、その最有力候補はニュートリノ加熱メカニズムである。これは、中心に形成される原始中性子星が高光度ニュートリノを

放射し、衝撃波にエネルギーを与えることで復活させるというメカニズムである。

一方で、音響メカニズムという仮説も提唱されている。原始中性子星は周囲の流体から撃力を受けて振動し、音波を放射する。音響メカニズムとは、この音波が二次衝撃波を形成して運動エネルギーを散逸し、衝撃波にエネルギーを与えるというものである。これは発見したグループを除きシミュレーションで再現されておらず、音波が衝撃波を復活させられるのか、そもそも原始中性子星から音波が放射されるのか、詳しくわかってはいない。

そこで、本研究ではある質量降着率とニュートリノ光度のもとで停滞衝撃波が存在する流れに音波を注入し、どのくらいの強度の音波が放射されれば爆発が起こるかを系統的に調べた [152, 195, 186]。爆発するかどうかの境目となる音波強度のことを臨界音波強度と呼ぶ。球対称を仮定した簡易モデルのシミュレーションのもとでは、臨界音波強度が小さいうちはニュートリノ加熱率が減った分を音波強度が補えば爆発するが、臨界音波強度が大きくなるとそれよりも大きなエネルギー注入が必要となるという結果が得られた。より現実的な軸対称シミュレーションにおいては、全体的に球対称シミュレーションの場合よりも少ないエネルギーで爆発するようになっていた。また、臨界音波強度が大きい場合に大きなエネルギー注入が必要という振る舞いは軸対称の場合にも見られた。こうした振る舞いの原因として、音波で加熱された流体は即座にニュートリノ放射で冷却されるという機構を指摘した [159, 122]。

## 1.5 曲がった時空の場の量子論

### Hawking-Moss インスタントンの解釈

スカラー場の有効ポテンシャルが、偽真空状態とポテンシャルトップを含む場合、偽真空からポテンシャルトップへの相転移が、ゼロではない確率で起こることが知られている。このような解は、Hawking-Moss インスタントンとして知られている。de Sitter 時空を静的な座標で記述し、ハミルトニアン条件から相転移間の状態は全エネルギーがゼロであることから、系のエントロピーだけが相転移に寄与する、という熱力学的解釈を与えた [5]。

### de Sitter 時空中の Schwinger 効果

インフレーション原始磁場形成理論において、強い電場を生じる場合があるので、de Sitter 時空中における Schwinger 効果について研究を行った。4次元の de Sitter 時空中における Dirac 粒子の Schwinger 効果について解析し、Schwinger 効果が誘起する電流の振る舞いが、電荷の持つスピンや電荷の質量によって大きく異なることを見出した。特に、背景電場強度が、Dirac 場の質量によって決まる特定の値より小さい場合、誘起電流が電場と反対向きに流れる

という反直感的な結果を得た。このことは、インフレーション宇宙において場の理論の非摂動効果まで取り入れれば、基本的な物理法則を変更することなしに、ある程度大きな電磁場のゆらぎを生成する可能性があることを示唆している [132, 133]。

一方で、誘起電流期待値の計算において必要となるくりこみの問題に関して、異なる手法による計算の結果が一致するかという疑問があったので、これまでカットオフ入りの断熱正則化によって計算されていた、4次元 de Sitter 時空中のスピン 0 粒子の場合の Schwinger 効果による誘起電流の期待値について、Point splitting に基づくゲージ不変性を保つくりこみを行い、これら 2 つの手法による結果が一致することを確かめた。

### 磁気双極子放射への QED 補正

中性子星などのコンパクト天体に付随する磁場は、パルサースピンの減速率の測定によって見積もられている。このスピンの減衰は磁気双極子放射などの効果によって天体の角運動量が失われることに起因する。現在までの観測で、最大で  $10^{15}$  Gauss を超える強度の磁場を持つ天体（マグネター）が見つかっている。このような磁場の強度は、QED 効果が顕著になる磁場のスケール ( $m_e^2/e \sim 10^{13}$  Gauss) を超えており、古典論的な磁気双極子放射公式を用いてこれを推定したのでは、無矛盾性の観点から問題を生じる可能性がある。そこで我々は、QED による効果を計算し、磁気双極子放射公式への補正項を摂動論を用いて具体的に書き下した。この補正項は、天体周りの比較的小スケールの磁場構造に依存して決まるが、その効果は一般的にあまり大きくなく、従前の古典的な磁場強度の見積もりで（天文学的な不定性の範囲内では）十分であることがわかった [55]。

### 高強度レーザーを用いたアンルー効果の検証

ELI によって、近い将来に  $10^{25}$  [W/cm<sup>2</sup>] の強度をもつレーザーが実現されると期待されている。この強度によって電子を加速させた場合、アンルー効果で電子は  $\sim 10^3$  [K] の熱浴を感じる。電子はその熱浴と相互作用することで熱的に揺らぎ、放射すると考えられている。量子場の真空揺らぎを考慮し、この放射の角度分布や強度を解析的に調べ、強レーザーを用いたアンルー効果の可能性について議論した [42, 43, 184, 139, 109]。

## 1.6 重力理論

### 自発的スカラー化

物質の密度がある臨界密度以上で、自発的スカラー化が起こるスカラーテンソル理論を提唱した [46]。スカラー場の質量がゼロのモデルは、Damour と

Esposito-Farese によってすでに提唱されていたが、今回の新しい点は、スカラー場に質量を持たせたことである。自発的スカラー化が起こっている相では、重力定数が小さくなること、有効宇宙定数が現れること、スカラー場と物質との相互作用が生じること、の 3 点において、重力の法則が一般相対論からずれることを明らかにした。そして、有質量のおかげで、スカラー場の振動成分が暗黒物質として振る舞うこと、一般相対論が宇宙論的アトラクターになること、宇宙初期インフレーション中に起こる自発的スカラー化により、暗黒物質として観測から要求される存在量も説明可能なことを示した。

### スカラー・テンソル理論とブラックホール

近年、スカラー場のシフト対称性を有するホルンデスキー理論の枠組みで、計量場は静的・球対称なブラックホール時空を表しているにもかかわらず、スカラー場は非自明な空間プロファイルを持つだけでなく時間にも依存するという大変興味深い解の集合が見つかった。この解集合の一部は、シュバルツシルト-ドジッター解になっているが、ドジッター膨張率から読み取った有効宇宙定数は、ラグランジアンに現れている宇宙定数とは別物になっており、その意味で宇宙定数のスクリーニングを実現した解になっている。こういった興味深い性質を持つ解であるが、その安定性は調べられていなかった。それを実際に奇パリティ型に限定して摂動解析を行ったのが、[47] である。解析の結果、シフト対称性という条件を満たすホルンデスキー理論の範囲では、ラグランジアンに具体的な形に依らず、摂動はブラックホールの地平線近傍では、必ずゴースト的になり不安定になってしまうことがわかった。よって、そのような解が現実世界を記述する可能性は棄却された。

### D 次元 Lovelock-Galileon 理論におけるブラックホールの不安定性

Lovelock-Galileon 理論は、場の方程式が 2 階かつスカラー場に関するシフト対称性を持つような、一般次元スカラーテンソル理論のサブクラスである。この理論において、近年非自明なスカラー場の配位を持つ 5 次元ブラックホール解が発見された。我々は、それらの解がテンソル型摂動に対し不安定であることを示した。さらに解を一般次元に拡張し、5 次元の場合に現れたのと同様の不安定性が次元によらず普遍的に生じることを示した [48]。

## 1.7 データ解析

### The first discovery of the gravitational wave: GW150914

Prof. Kipp Cannon joined RESCEU on February 1, 2016. His research focus is the detection and interpretation of gravitational waves, specifically gravitational waves from the inspiral and merger of black holes and neutron stars. Prof. Cannon is a member of the LIGO Scientific Collaboration, and participated in the first direct observation of gravitational waves on 2015-09-14. The results of that observation were published in early February of 2016, shortly after he joined RESCEU [67, 74, 71, 65, 61, 62, 63, 69, 72, 70, 64, 66, 68, 73, 59, 60]. He also gave several seminars, colloquiums on his works and those of the LIGO Scientific collaboration [272, 273, ?, 274, 275, 276]. Since then, Prof. Cannon has been working to prepare for the second scientific data collection period of Advanced LIGO scheduled for later in 2016.

### iKAGRA へ向けた連続重力波探査解析パイプラインの構築

連続重力波は、観測時間よりも十分に長い信号持続時間を持ち、周波数とその期間にわたってほぼ一定であるような重力波の総称である。非軸対称に回転する中性子星が主要な連続重力波源と考えられている。連続重力波の振幅は微小であるため、検出器雑音の中から信号を抽出するには長時間積分を必要とし、その計算コストが問題となる。これに対処するため、連続重力波データ解析には、 $\mathcal{F}$ -statistic と呼ばれる手法が広く用いられている。結果として、電磁波観測で既に知られているような高速回転する中性子星、パルサーの場合には探索パラメータはなく、既知の回転周波数とスピンドアウン率、パルサーの方向から一意に他の波形パラメータが算出される。一方で、全天探査の場合には、これらの4つのパラメータが未知であるので、広大なパラメータ領域から真の重力波のパラメータを精力的に見つけなければいけない。本研究では、重力波検出器 KAGRA の稼働へ向けて連続重力波の解析パイプラインの開発を行った [225, 239, 269]。

### Phase-II TOBA による低周波数帯連続重力波探査

ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA は地上低周波数帯重力波検出器であり、二本の直交する棒状のテストマスから構成され、検出器平面上の二本のマスの角度変動から重力波が読み取られる。TOBA は KAGRA や LIGO などの大型レーザー干渉計では探索できない低周波数領域に強みを持つ検出器である。今回新たに作成された Phase-II TOBA を用いて、検

出器が最も良い感度を持つ 6Hz から 7Hz の 1Hz バンドにわたって、データ長が約 1 日の全天探査を行い、低周波数帯において、未知のパルサーから放射される連続重力波を探索した。結果として、統計的に有意な重力波信号は発見されず、6.84Hz で最も厳しい振幅上限値  $3.6 \times 10^{-12}$  を信頼度 95% で課すことができた [57, 161, 165, 166, 167]。

### Student-t 分布を用いた非ガウス性の特徴付け

バースト性の重力波を探索すると、多くのイベント（信号候補）が現れるが、実際にはそれらはグリッチノイズと呼ばれる、短時間で励起、減衰する地球・人間活動・機器起源のノイズである。これらのイベントは発生原因についてはわかっていないことが多く、一概に棄却することはできない。また、真の信号の背景として、false alarm probability、ひいては信号閾値を上昇させており、低信号対雑音比の信号を検出する上で妨げになっている。本研究では、非ガウス性と非定常性を区別する重要性を説き、非ガウス性を Student-t 分布によって特徴付け、その度合いを計算する手法を提案、LIGO S5 データに適用することでその有用性を示した [75]。非ガウス性が強い領域では、従来のマッチドフィルターとは異なるフィルターを使うことによって、より統計的に最適な検出統計量を構成できる。今回の研究は、このような統計量を使うか否かの基準を提供する。

### 重力波検出器データに内在する非ガウス性の研究

重力波検出器データ解析の理論的研究においては、ガウス性が多くの場合に仮定されている。しかし、実際には重力波データは特に低周波数において顕著な非ガウス性を呈する。昨年、非ガウス性を考慮した場合に最適な検出統計量について研究をおこない発表した。今回独立成分分析を用いた定常非ガウスノイズの除去方法および、これにともなう信号対雑音比の向上について発表した [160]。また、この研究をさらに発展させ、チャンネル間相互作用に時間遅延がある場合、非線形相互作用がある場合に独立成分分析を適用し、重力波チャンネルから定常非ガウス成分を除去することで信号対雑音比を向上させることができることを示した [76]。比較的新しい手法である独立成分分析は、重力波データ解析においてはほとんど適用されておらず、有用性を含めて研究の価値がある。さらに定常性非ガウスノイズから伝達関数を推定し、グリッチノイズの除去に役立てようという構想・研究をすすめている。

### RESCEU クラスタ

96TB (RAID 6) のファイルサーバーと Xeon 2680v3 x 10 (120 コア) の計算ノードを擁する RESCEU クラスタを導入・整備した。本クラスタを用いて KAGRA 試運転観測データの解析をおこ

なっていく予定である。共同研究者への公開運用に向けて、関係各所と調整中である [270]。

## 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。

KAGALIは現在、version 04 (alpha) であり、3月のKAGRA試験運転データに適用する予定である。そのバージョン管理にはRESCEUが管理しているサーバーによってgit/redmineを用いておこなっている。このサーバーはnightly build、静的コード解析によってコード重複チェックによって、コードの質を担保する機構を提供している。

## 1.8 重力波天文学

### 連続重力波を用いた孤立中性子星の質量推定法

高速回転する非軸対称な中性子星(NS)は回転周波数の二倍の周波数を持つ重力波を放射する。しかし、NSの角運動量軸と慣性主軸が一致しない場合、NSは角運動量軸を中心とした自由歳差運動を行い、四重極モードに加えて歳差モードと呼ばれる回転周波数と同一の周波数を持つ重力波も放射する。さらに、近年ではNSの内部に超流動コアを含むモデルのもとでも、たとえ電磁波観測で歳差運動を示す信号の変調が観測されなかったとしても、NSから放出される重力波は回転周波数の1倍と2倍の二つのモードを持つことが示唆されている。そこで、このような2つのモードを持つNSからの重力波に焦点を当て、重力波観測によるNSの質量推定法を新たに提案した。そして、モンテカルロシミュレーションを用いることで、Einstein Telescopeのような第三世代の重力波検出器での観測では、歳差角が一様に分布しているという仮定のもとで、1kpc離れた扁平率が $10^{-6}$ である孤立NSの約半数を、その質量の20%程度の精度で推定できることを示した [2, 77, 162, 163]。

#### <受賞>

- [1] N. Oshita, JGRG presentation award, Gold Prize, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG25), 2015年12月7日-12月11日

- [2] Kenji Ono, “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, Student Poster Award, 1st place, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 (GWPAW2015), 17-20 June 2015, Osaka Japan

#### <報文>

(原著論文)

- [3] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” JCAP **1507** (2015) no.07, 017
- [4] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe and J. Yokoyama, “Large tensor mode, field range bound and consistency in generalized G-inflation,” JCAP **1508**, no. 08, 044 (2015)
- [5] N. Oshita and J. Yokoyama, “Entropic interpretation of the Hawking-Moss bounce,” arXiv:1603.06671 [hep-th]. Prog. Theor. Exp. Phys. in press.
- [6] A. Mazumdar, K. Saikawa, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Possible resolution of the domain wall problem in the NMSSM,” Phys. Rev. D **93** (2016) no.2, 025002
- [7] S. Kuroyanagi, T. Hiramatsu and J. Yokoyama, “Reheating signature in the gravitational wave spectrum from self-ordering scalar fields,” JCAP **1602** (2016) no.02, 023
- [8] T. Fujita, X. Gao and J. Yokoyama, “Spatially covariant theories of gravity: disformal transformation, cosmological perturbations and the Einstein frame,” JCAP **1602** (2016) no.02, 014 doi:10.1088/1475-7516/2016/02/014
- [9] C. Ringeval, D. Yamauchi, J. Yokoyama and F. R. Bouchet, “Large scale CMB anomalies from thawing cosmic strings,” JCAP **1602**, no. 02, 033 (2016)
- [10] T. Harada, C. Yoo, T. Nakama and K. Koga, “Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation,” Phys. Rev. D **91**, 084057 (2015)
- [11] T. Nakama and T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” Phys. Rev. D **92**, 121304 (2015)
- [12] Kiyotomo Ichiki, Chul-Moon Yoo, & Masamune Oguri: “Relationship between the CMB, Sunyaev-Zel’dovich Cluster Counts, and Local Hubble Parameter Measurements in a Simple Void Model”, Physical Review D, **93** (2016) 023529
- [13] Anupreeta More, Masamune Oguri, Issha Kayo, Joel Zinn, Michael A. Strauss, Basilio X. Santiago, Ana M. Mosquera, Naohisa Inada, et al. “The SDSS-III BOSS Quasar Lens Survey: Discovery of 13 Gravitationally Lensed Quasars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **456** (2016) 1595-1606

- [14] Bunyo Hatsukade, Yoichi Tamura, Daisuke Iono, Yuichi Matsuda, Masao Hayashi, & Masamune Oguri: “High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. II. Molecular Clump Properties of a Lensed Submillimeter Galaxy at  $z = 3.042$ ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, **67** (2015) 93
- [15] Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Ken Osato, Shin Sasaki & Yasushi Suto: “Confrontation of top-hat spherical collapse against dark halos from cosmological N-body simulations”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2016, 68, 14
- [16] Gen Chiaki, & Naoki Yoshida 2015, MNRAS, 451, 3955
- [17] Hosokawa, T., Hirano, S., Kuiper, R., Yorke, H.W., Omukai, K., & Yoshida, N.: “Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion” ApJ, (2016), in press
- [18] Inutsuka, S., Inoue, T., Iwasaki, K., & Hosokawa, T.: “The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency” A & A, **580** (2015) 49
- [19] James E. Geach, et al. (including Masamune Oguri): “The Red Radio Ring: A Gravitationally Lensed Hyperluminous Infrared Radio Galaxy at  $z = 2.553$  Discovered through the Citizen Science Project SPACE WARPS”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **452** (2015) 502-510
- [20] James H. H. Chan, Sherry H. Suyu, Tzihong Chiueh, Anupreeta More, Philip J. Marshall, Jean Coupon, Masamune Oguri, & Paul Price: “Chitah: Strong-Gravitational-Lens Hunter in Imaging Surveys”, The Astrophysical Journal, **807** (2015) 138
- [21] Ken Osato, Toyokazu Sekiguchi, Masato Shirasaki, Ayuki Kamada, and Naoki Yoshida: “Cosmological Constraint on the Light Gravitino Mass from CMB Lensing and Cosmic Shear”, submitted to Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2016, arXiv:1601.07386
- [22] Masamune Oguri: “Predicted Properties of Multiple Images of the Strongly Lensed Supernova SN Refsdal”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **449** (2015) L86-L89
- [23] Masato Shirasaki, Takashi Hamana & Naoki Yoshida: “Probing cosmology with weak lensing selected clusters - I. Halo approach and all-sky simulations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 453, Issue 3, p.3043-3067
- [24] Masato Shirasaki, Shunsaku Horiuchi & Naoki Yoshida: “Cross-correlation of the extragalactic gamma-ray background with luminous red galaxies”, Physical Review D, Volume 92, Issue 12, id.123540
- [25] Masato Shirasaki, Takashi Hamana & Naoki Yoshida: “Probing cosmology with weak lensing selected clusters. II. Dark energy and  $f(R)$  gravity models”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 1, id.414
- [26] Melanie Habouzit, Marta Volonteri, Muhammad Latif, Takahiro Nishimichi, Sebastien Peirani, Yohan Dubois, Gary A. Mamon, Joseph Silk & Jacopo Chevallard: “Black hole formation and growth with non-Gaussian primordial density perturbations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **456** (2016) 1901
- [27] Nadia L. Zakamska, et al. (including Masamune Oguri): “Star Formation in Quasar Hosts and the Origin of Radio Emission in Radio-Quiet Quasars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **455** (2016) 4191-4211
- [28] Ryota Kawamata, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, Masamune Oguri, & Masami Ouchi: “The Sizes of  $z \sim 6 - 8$  Lensed Galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 Data”, The Astrophysical Journal, **804** (2015) 103
- [29] Ryota Kawamata, Masamune Oguri, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, & Masami Ouchi: “Precise Strong Lensing Mass Modeling of Four Hubble Frontier Field Clusters and a Sample of Magnified High-Redshift Galaxies”, The Astrophysical Journal, **819** (2016) 114
- [30] S. Colombi, T. Sousbie, S. Peirani, G. Plum & Y. Suto, “Vlasov versus N-body: the Hénon sphere”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 450, 3724(arXiv:1504.07337)
- [31] Satoshi Miyazaki, Masamune Oguri, Takashi Hamana, Masayuki Tanaka, Lance Miller, Yousuke Utsumi, Yutaka Komiyama, Hisanori Furusawa, et al.: “Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam’s 2.3 deg<sup>2</sup> Field”, The Astrophysical Journal, **807** (2015) 22
- [32] Shingo Hirano, Nick Zhu, Naoki Yoshida, David Spergel & Harold W. Yorke: “Early Structure Formation from Primordial Density Fluctuations with a Blue Tilted Power Spectrum” The Astrophysical Journal, **814** (2015) 18
- [33] Taizo Okabe, Toshiya Kashiwagi, Yasushi Suto, Shuji Matsuura, Yasuo Doi, Satoshi Takita, & Takafumi Ootsubo: “Image stacking analysis of SDSS galaxies with AKARI Far-Infrared Surveyor maps at  $65\mu m$ ,  $90\mu m$ , and  $140\mu m$ ” Publications of the Astronomical Society of Japan, **68** (2016) 17
- [34] Teppei Okumura, Chiaki Hikage, Tomonori Totani, Motonari Tonogawa, Hiroyuki Okada, Karl Glazebrook, Chris Blake, Pedro G. Ferreira, Surhud More, Atsushi Taruya, Shinji Tsujikawa, Masayuki Akiyama, Gavin Dalton, Tomotugu Goto, Takashi Ishikawa, Fumihide Iwamuro, Takahiko Matsubara, Takahiro Nishimichi, Kouji Ohta, Ikkoh Shimizu, Ryuichi Takahashi, Naruhisa

- Takato, Naoyuki Tamura, Kiyoto Yabe & Naoki Yoshida: “The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at  $z \sim 1.4$ ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted (2016, arXiv:1511.08083)
- [35] Tommaso Treu, Gabriel B. Brammer, Jose M. Diego, Claudio Grillo, Patrick L. Kelly, Masamune Oguri, Steven A. Rodney, Piero Rosati, et al.: ““Refsdal” Meets Popper: Comparing Predictions of the Re-Appearance of the Multiply Imaged Supernova behind MACSJ1149.5+2223”, The Astrophysical Journal, **817** (2016) 60
- [36] Toshiya Kashiwagi and Yasushi Suto, “Constraining spatial extent and temperature of dust around galaxies from far-infrared image stacking analysis”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, **451**, 4162(arXiv:1506.00902)
- [37] Yoichi Tamura, Masamune Oguri, Daisuke Iono, Bunyo Hatsukade, Yuichi Matsuda, & Masao Hayashi: “High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. I. The Innermost Mass Profile of the Lensing Elliptical Galaxy Probed by 30 Milli-Arcsecond Images” Publications of the Astronomical Society of Japan, **67** (2015) 72
- [38] Yong-Seon Song, Atsushi Taruya, Eric Linder, Kazuya Koyama, Cristiano G. Sabiu, Gong-Bo Zhao, Francis Bernardreau, Takahiro Nishimichi & Tepei Okumura: “Consistent modified gravity analysis of anisotropic galaxy clustering using BOSS DR11”, Physical Review D, **92** (2015) 043522
- [39] Yuya Sakurai, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Harold W. Yorke, “Formation of primordial supermassive stars by burst accretion” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 452, p.755-764 (2015)
- [40] Yuya Sakurai, Eduard I. Vorobyov, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai, Harold W. Yorke, “Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, accepted (2016, arXiv:1511.06080)
- [41] A. Harada and A. Kamada, “Structure formation in a mixed dark matter model with decaying sterile neutrino: the 3.5 keV X-ray line and the Galactic substructure”, JCAP, **1**(2016), 031
- [42] N. Oshita, K. Yamamoto and S. Zhang, “Quantum radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motion,” Phys. Rev. D **93** (2016) in press, arXiv:1509.03038 [hep-th].
- [43] N. Oshita, K. Yamamoto and S. Zhang, “Quantum radiation from a particle in an accelerated motion coupled to vacuum fluctuations,” Phys. Rev. D **92**, 045027 (2015)
- [44] S. Saga, D. Yamauchi and K. Ichiki, “Weak lensing induced by second-order vector mode,” Phys. Rev. D **92**, no. 6, 063533 (2015)
- [45] T. Namikawa, D. Yamauchi, B. Sherwin and R. Nagata, “Delensing Cosmic Microwave Background B-modes with the Square Kilometre Array Radio Continuum Survey,” Phys. Rev. D **93**, no. 4, 043527 (2016)
- [46] P. Chen, T. Suyama & J. Yokoyama: “Spontaneous-scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant”, Phys. Rev. D **92**, 124016 (2015),
- [47] H. Ogawa, T. Kobayashi & T. Suyama: “Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories”, Phys. Rev. D **93**, 064078 (2016), [arXiv:1510.07400].
- [48] K. Takahashi, T. Suyama and T. Kobayashi, “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in  $D$  dimensions”, Phys. Rev. D **93**, 064068 (2016)
- (総説)
- [49] J. Yokoyama, “Issues on the inflationary magnetogenesis,” Comptes Rendus Physique **16** (2015) no.10, 1018.
- [50] K. Sato and J. Yokoyama, “Inflationary cosmology: First 30+ years,” Int. J. Mod. Phys. D **24** (2015) no.11, 1530025.
- [51] D. Yamauchi *et al.* [SKA-Japan Consortium Cosmology Science Working Group Collaboration], “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan,” Publication of Japan SKA Consortium, arXiv:1603.01959 [astro-ph.CO].
- (会議抄録)
- [52] J. yokoyama, “Birth of the inflationary universe and tensor fluctuations,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [53] T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [54] Y.F. Cai and T. Suyama, ”Summary of Parallel Session : Cosmology-Early Universe,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [55] T. Hayashinaka and T. Suyama, “QED correction to magnetic dipole radiation,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [56] N. Oshita, K. Yamamoto, and S. Zhang, “Unruh radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motions,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.

- [57] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh and M. Ando, “All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna,” *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2016) 011F01
- [58] Kenji Ono, Kazunari Eda, and Yousuke Itoh, “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, *Phys. Rev. D* 91, 084032 (2015)
- [59] J. Aasi et al. First low frequency all-sky search for continuous gravitational wave signals. *Phys. Rev.*, D93(4):042007, 2016.
- [60] J. Aasi et al. Search of the Orion spur for continuous gravitational waves using a loosely coherent algorithm on data from LIGO interferometers. *Phys. Rev.*, D93(4):042006, 2016.
- [61] B. P. Abbott et al. Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914. *Astrophys. J.*, 818(2):L22, 2016.
- [62] B. P. Abbott et al. Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914. *arXiv*, 1602.03845, 2016.
- [63] B. P. Abbott et al. Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914. *arXiv*, 1602.03844, 2016.
- [64] B. P. Abbott et al. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO. *arXiv*, 1602.03839, 2016.
- [65] B. P. Abbott et al. GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes. *Phys. Rev. Lett.*, 116(13):131102, 2016.
- [66] B. P. Abbott et al. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. *Phys. Rev. Lett.*, 116(13):131103, 2016.
- [67] B. P. Abbott et al. Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914. *Submitted to: Astrophys. J. Lett.*, 2016.
- [68] B. P. Abbott et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116(6):061102, 2016.
- [69] B. P. Abbott et al. Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions. *arXiv*, 1602.03843, 2016.
- [70] B. P. Abbott et al. Properties of the binary black hole merger GW150914. *arXiv*, 1602.03840, 2016.
- [71] B. P. Abbott et al. Tests of general relativity with GW150914. *arXiv*, 1602.03841, 2016.
- [72] B. P. Abbott et al. The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914. *arXiv*, 1602.03842, 2016.
- [73] Benjamin P. Abbott et al. All-sky search for long-duration gravitational wave transients with initial LIGO. *Phys. Rev.*, D93(4):042005, 2016.
- [74] S. Adrian-Martinez et al. High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube. *arXiv*, 1602.05411, 2016.
- [75] T. Yamamoto, K. Hayama, S. Mano, Y. Itoh, and N. Kanda, “Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise”, *Phys. Rev. D* 93, 082005 (2016)
- [76] Soichiro Morisaki, Jun’ichi Yokoyama, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, “Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises II. Independent Component Analysis”, submitted to Proceedings of the Japan Academy, Series B, arXiv:1605.01983 (2016).
- [77] K. Eda, K. Ono and Y. Itoh, “Determination of mass of an isolated neutron star using continuous gravitational waves with two frequency modes: an effect of a misalignment angle,” Proc. 11th Amaldi Conference, in press
- (国内雑誌)
- [78] 須藤 靖: 物理学、この 30 年: “宇宙論”、*パリティ* **30**(2015)5 月号, pp.6-8.
- [79] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その三十: 大学の存在意義”、東京大学出版会 UP **512**(2015)6 月号, pp.24-29.
- [80] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その三十一: 再現性のない世界”、東京大学出版会 UP **515**(2015)9 月号, pp.22-30.
- [81] 須藤 靖: “サイエンス最前線 6 2 : Advanced LIGO 一般相対論 100 年、重力波が直接検出されるか”、*週刊エコノミスト* 2015 年 10 月 13 日号, pp.70-71.
- [82] 須藤 靖: “サイエンス最前線 6 6 : ニュートリノをめぐる冒険 (1) 素粒子の階層と太陽ニュートリノ問題”、*週刊エコノミスト* 2015 年 11 月 10 日号, pp.70-71.
- [83] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その三十二: 「青木まりこ現象」にみる科学の方法論”、東京大学出版会 UP **518**(2015)12 月号, pp.24-31.
- [84] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 0 : ニュートリノをめぐる冒険 (2) 大気ニュートリノ問題とニュートリノ質量”、*週刊エコノミスト* 2015 年 12 月 8 日号, pp.78-79.
- [85] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 4 : アイスキューブ 南極の氷が宇宙線の謎を解明する”、*週刊エコノミスト* 2016 年 1 月 12 日号, pp.42-43.
- [86] 須藤 靖: “宇宙の加速膨張と高知家”、*文藝春秋* 巻頭エッセイ 2016 年 2 月号, pp.88-89.
- [87] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 8 : 現代天文学による占星術? 超新星重力レンズの理論予言が的中”、*週刊エコノミスト* 2016 年 2 月 9 日号, pp.70-71.



- [88] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十三: アインシュタイン、エディントン、マンドル”、東京大学出版会 UP 521(2016)3月号, pp.39–46.
- [89] 須藤 靖: “サイエンス最前線 82 : 重力波直接検出 アインシュタインの予言以来100年後の快挙”、週刊エコノミスト 2016年3月8日号, pp.74–75.
- [90] 須藤靖: 日本経済新聞 書評 2016年3月13日 (学位論文)
- [91] 國光太郎: “Classical and Quantum Aspects of Cosmic Inflation Models” (博士論文)
- [92] 中間智弘: “Cosmological constraints on short-wavelength primordial perturbations” (博士論文)
- [93] Gen Chiaki, “Chemo-thermal evolution of collapsing gas clouds and the formation of metal-poor stars (収縮ガス雲の熱化学進化と低金属量星の形成過程)” (博士論文)
- [94] 大下 翔誉: 「ブラックホールを種としたインフレーション宇宙の生成」(修士論文)
- [95] Ken Osato: “Cosmology with Weak Gravitational Lensing and Sunyaev-Zel’dovich Effect” (修士論文)
- [96] Taizo Okabe: “Far-infrared emission from SDSS galaxies in AKARI all-sky maps: Image stacking analysis and its implications for galaxy clustering” (修士論文)
- (著書)
- [97] 横山順一『輪廻する宇宙 ダークエネルギーに満ちた宇宙の将来』講談社 206 ページ。
- (国内解説記事)
- [98] Kipp Cannon、端山和大、伊藤洋介、高橋博毅「重力波の初検出と情報処理技術- LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術-」、情報処理 Vol.57 No.5 May 2016
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [99] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” Gordon research conference on string theory and cosmology, Hong Kong University of Science and Technology, June 1.
- [100] J. Yokoyama, “Gravitational waves from the early universe,” Hot topics in general relativity and gravitation, ICISE, Vietnam, August 10.
- [101] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” COSMO 15, Warsaw University, Poland, September 11.
- [102] J. Yokoyama, “Gravitational waves from the early universe,” CosPA 2015, Institute for the Physics of the Universe, IBS, Korea, October 16.
- [103] J. Yokoyama, “Birth of the inflationary universe and tensor perturbations,” 2nd LeCosPA symposium Everything about gravity, LeCosPA, National Taiwan University, Taiwan, December 17.
- [104] J. Yokoyama, “Gravitational radiation and CMB anisotropy from cosmic strings created during inflation,” Cosmic strings@Brazil, Sao Paulo University, San Carlos, Brazil, February 16.
- [105] J. Yokoyama, “Approaches to inflationary cosmology,” 1st CORE-U Conference: Intense Fields and Extreme Universe, Hiroshima University, March 7.
- [106] T. Suyama, “Spontaneous scalarization : asymmetron as dark matter,” Exploring Theories of Modified Gravity, U. Chicago, Oct. 12 - 14.
- [107] T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” 国立台湾大学, 台北, Dec. 14 - 18.
- [108] D. Yamauchi : “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan”; Dark Side of the Universe (Kyoto, 12/14, 2015)
- [109] N. Oshita, “Hawking radiation from the view point of the inflationary universe and laser cosmology”, First CORE-U international conference : Intense fields and extreme universe, Hiroshima, Hiroshima University, March, 8th, 2016.
- [110] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars”, South by High-Redshift (Austin, USA, April 1, 2015)
- [111] Naoki Yoshida: “Formation of Early Blackholes”, Olympian Symposium (Paralia, Greece, May 20, 2015)
- [112] Yasushi Suto: “Beyond the spherical dust collapse model”, Kyoto YITP-IAP workshop “Vlasov-Poisson: towards numerical methods without particles”, June 2, 2015, Yukawa Institute, Kyoto, Japan.
- [113] Takahiro Nishimichi, Francis Bernardeau, Atsushi Taruya: “Response function of the large-scale structure of the universe to the small scale inhomogeneities”, Vlasov-Poisson : towards numerical methods without particles, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University (June 2, 2015)
- [114] 細川 隆史: “The First Star Formation: towards understanding the mass spectrum” conference “First stars, galaxies, and black holes; Now and Then” (Groningen, Netherland, 6/16, 2015)
- [115] Naoki Yoshida: “From the First Stars to Massive Blackholes”, First stars, galaxies, and black holes: now and then (Groningen, Netherland, June 18, 2015)
- [116] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, Big Data Application Symposium (Tokyo, Japan, August 1, 2015)

- [117] Masamune Oguri: “The image plane approach to cosmic telescopes”; IAU XXIX General Assembly Focus Meeting 22: “The Frontier Fields: Transforming our Understanding of Cluster and Galaxy Evolution” (Honolulu, USA, August 2015)
- [118] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars and Origins of SMBHs” 国際スクール型研究会: High-energy Astrophysics & Astroparticle physics 2015 (KEK 理論センター, 10/7, 2015)
- [119] Naoki Yoshida: “Formation of the First Stars in the Universe”, Quarks to Universe in Computational Science (Nara, Japan, November 8, 2015)
- [120] Naoki Yoshida: “Multi-Component Cosmological Simulations”, SPPEXA Annual Meeting (Garching, Germany, January 26, 2016)
- [121] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, JST Symposium on Big Data Application (Tokyo, March 5, 2016)
- [122] Akira Harada, Wakana Iwakami, Shoichi Yamada: “Systematic study of the acoustic mechanism for core-collapse supernovae”; The Second ALPS Symposium on Photon Science, (Oral, Tokyo, Japan, 3/29, 2016)
- 一般講演
- [123] J. Yokoyama, “Independent Component Analysis for Gravitational Waves,” GWPAW, Osaka, June 16.
- [124] T. Suyama, “Probing primordial perturbation on small scales,” Mini-workshop on inflation, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, March 10.
- [125] T. Suyama, “Neutron stars in scalar-tensor theories,” 4th Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Kavli IPMU, the University of Tokyo, February 18 - 20.
- [126] T. Suyama, “Spontaneous scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant,” The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, December 7 - 11.
- [127] T. Suyama, “Generation of sparse and localized curvature perturbation from inflation,” COSMO15, COSMO-15, the University of Warsaw, Warsaw, Poland, September 7 - 11.
- [128] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Large Tensor Mode, Field Range Bound and Consistency in Generalized G-Inflation,” Gordon Research Conference on String Theory & Cosmology, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, May 31 - June 5, 2015.
- [129] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Field range bound and consistency in generalized G-inflation,” COSMO-15, the University of Warsaw, Warsaw, Poland, September 7 - 11, 2015.
- [130] T. Nakama, K. Kohri and T. Suyama, “Annihilation signals from dark matter minihalos as a probe of primordial power on small scales revisited,” MG14 (Fourteenth Marcel Grossmann Meeting), University of Rome “La Sapienza”, Rome, Italy, July 12 - 18, 2015.
- [131] T. Hayashinaka, “QED effective action for background field in de Sitter spacetime”, RESCEU AP-CosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Tochigi, 2 Aug. 2015
- [132] T. Hayashinaka, “Fermionic Schwinger current in 4-d de Sitter spacetime”, 12th Conference in the Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, Daejeon, Korea, 15 Oct. 2015
- [133] T. Hayashinaka, “Fermionic Schwinger Current in 4-d de Sitter Spacetime”, The 25th workshop on General Relativity and Gravitation, Kyoto, 8 Dec. 2015
- [134] T. Hayashinaka, “QED Correction to Radiation from Magnetors”, the Second LeCosPA Symposium Everything About Gravity, National Taiwan University, 14 Dec. 2015
- [135] K. Takahashi: “Equation of state of dark energy in  $f(R)$  gravity”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, (Nikko, Tochigi, 8/3, 2015)
- [136] K. Takahashi: “Equation of state of dark energy in  $f(R)$  gravity”, COSMO15, (Warsaw, Poland, 9/8, 2015)
- [137] K. Takahashi: “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in  $D$  dimensions”, JGRG25, (YITP, Kyoto, 12/9, 2015)
- [138] N. Oshita and Jun’ichi Yokoyama, “Black holes as seeds of baby universe”, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG25), Kyoto, Kyoto University, December, 8th, 2015.
- [139] N. Oshita, Kazuhiro Yamamoto, Sen Zhang, “Unruh radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motion”, Second LeCosPA International Symposium: Everything about Gravity, Taiwan, National Taiwan University, December, 17th, 2015.
- [140] Shingo Hirano: “First Star Formation with the Stream Velocity”; South By High Redshift (USA, 4/1-4/3, 2015)
- [141] Ryohei Nakatani: “Metallicity Dependence of Protoplanetary Disks’ Lifetime”; Star/Planet Formation Meeting (Tokyo, 4/9, 2015)
- [142] Naoki Yoshida: “Cross-correlation with Weak Lensing,” Physics of the intra-cluster medium (Garching, Germany, June 15, 2015)

- [143] Shingo Hirano: “Effect of Various Streaming Velocities on the First Star Formation”; First stars, galaxies and black holes: Now and Then (Netherlands, 6/15-6/19, 2015)
- [144] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation in the early universe with burst accretion for formation of SMBH seeds; First stars, galaxies, and black holes: Now and Then (Groningen, Netherlands, 6/15-19, 2015)
- [145] Gen Chiaki, “Studying star formation at low metallicity with SPH simulations”, First stars, galaxies, and black holes: Now and Then (Groningen, Netherlands, June 15–19, 2015)
- [146] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars: intermittent UV feedback with episodic mass accretion” symposia “Understanding the growth of the first supermassive black holes” in EWASS 2015 meeting (Tenerife, Spain, 6/22, 2015)
- [147] Gen Chiaki, “Star formation in the low-metallicity gas clouds”, EWASS 2015 (La Laguna, Spain, June 22–26, 2015)
- [148] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation in the early universe with burst accretion for formation of SMBH seeds”; EWASS 2015 (La Laguna, Spain, 6/22-26, 2015)
- [149] Yuya Sakurai: “Evolution of massive protostars and protostellar outflows in numerical simulations”; Star Formation Workshop 2015 (Mitaka, 6/29-7/1, 2015)
- [150] Ken Osato, Masato Shirasaki, and Naoki Yoshida: “Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias”; Accurate Astrophysics. Correct Cosmology. (London, 07/15)
- [151] Ken Osato, Masato Shirasaki, and Naoki Yoshida: “Investigating the  $\sigma_8$  tension by the cross-correlation of tSZ and cosmic shear”; Theoretical and Observational Progress on Large-scale Structure of the Universe (Munich, 07/20-24)
- [152] Akira Harada, Wakana Iwakami, Hiroki Nakagura, Shoichi Yamada: “Systematic study of acoustic mechanisms for core-collapse supernovae”; Numazu Workshop 2015, (Poster, Shizuoka, Japan, 9/1-4, 2015)
- [153] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disk instability and radiative feedback efficiency”; Cosmology and first light (Paris IAP, 12/7-10, 2015)
- [154] Gen Chiaki, “Numerical simulations of low-metallicity collapsing gas clouds”, Cosmology and First Light (Paris, France, December 7–10, 2015)
- [155] N. Hayatsu & ALMA Deep Field in SSA22 (ADF22) team: “The Search for  $z \sim 6.3$  [CII] Emitters in ALMA Cycle 2 deep survey data”; ALMA East Asia workshop (Osaka, 12/8-12/11, 2015)
- [156] Masamune Oguri: “Updates from Cluster WG”; Subaru Hyper Suprime-Cam Survey Collaboration Meeting (Taipei, Taiwan, January 2016)
- [157] Takahiro Nishimichi: “Simulation Effort for a Galaxy-Galaxy Lensing Emulator + Covariance”, HSC Collaboration Meeting Weak Lensing Working Group, Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, Taipei (Oral presentation, January 12, 2016)
- [158] Masataka Aizawa: “Search for planetary rings around long-period planets in Kepler photometric data”, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, February 24, 2016 at Ishigaki Island, Japan.
- [159] Akira Harada, Wakana Iwakami, Shoichi Yamada: “Systematic study of the acoustic mechanism for core-collapse supernovae”; 18th Workshop on Nuclear Astrophysics, (Oral, Kreuth, Germany, 3/14-19, 2016)
- [160] J. Yokoyama, “Independent Component Analysis for Gravitational Waves,” Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 (GWPAW2015), 17-20 June 2015, Osaka Japan
- [161] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “Search for low-frequency continuous gravitational waves with a torsion-bar antenna”, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 (GWPAW2015) 2015, Osaka, Japan, 2015/6/17-20
- [162] K. Eda, K. Ono, and Y. Itoh, “Search for mass of an isolated neutron star using gravitational wave observations”, 11th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Gwangju, South Korea, 2015/6/25
- [163] K. Eda, K. Ono, and Y. Itoh, “Determining mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14), Rome, Italy, 2015/7/12-18
- [164] Y. Itoh, “Search for continuous gravitational wave from neutron stars” Joint symposium by three innovative areas: Gravitational Wave Source / Underground Particle-Nuclear Research / Neutron Star Matter ”Universe and Astronomical Objects Uncovered by Multi-Fold Approach”, Tohoku University, Sendai, 2015/07/25
- [165] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “An all-sky search for continuous gravitational waves in low-frequency regime using the Phase-II TOBA data”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Nagano, Japan, 2015/8/3
- [166] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “Data analysis of continuous gravitational wave in low-frequency regime using the Phase-II TOBA data”, 10th Bi-Monthly Workshop on ”New Developments in Astrophysics Through

Multi-Messenger Observations of Gravitational Wave Sources”, Osaka City University, 2015/8/7

- [167] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “An all-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna”, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), Kyoto University, 2015/12/8

(国内会議)

招待講演

- [168] 西道 啓博: “宇宙大規模構造の統計解析の現状と今後”、研究会「天文学と統計的手法」、統計数理研究所 (2015年5月29日)
- [169] 大栗 真宗: “サーベイ時代の宇宙論”: 2015年度第45回天文・天体物理若手夏の学校 (信州・戸倉上山田温泉, 7/27, 2015)
- [170] 須藤靖: “すぐ役に立つものはすぐ役に立たなくなる 一昨今の大学をとりまく状況への懸念一” 日本学術会議公開シンポジウム「人文・社会科学と大学のゆくえ」(2015年7月31日)
- [171] 吉田 直紀: “広域宇宙撮像データによるビッグデータ宇宙論”; 情報論的学習理論と機械学習研究会 (愛媛大学, 9/15, 2015)
- [172] 西道 啓博: “大規模 N 体シミュレーション群を用いた宇宙大規模構造の精密理論モデルの構築”、第4回観測的宇宙論ワークショップ、京都大学基礎物理学研究所 (2015年11月18日)
- [173] 須藤靖: “日本学術会議提言「これからの理科教育のあり方」について”、日本物理学会第71回年次大会「物理学・天文学分野の参照基準」、東北学院大学 (2016年3月19日)

一般講演

- [174] 須山輝明、“自発的スカラー化、修正重力、暗黒物質,” 新学術領域「重力波天体」A05 班合宿, 伊豆, Jan. 7 - 9.
- [175] 須山輝明、“自発的スカラー化を伴うスカラー・テンソル理論と暗黒物質,” 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, Mar. 19 - 22.
- [176] 山内大介: “SKAによる宇宙論”; 日本天文学会2015年秋季大会 (甲南大学, 9/11, 2015)
- [177] 山内大介: “SKA-JP Cosmology SWGの活動”; 銀河進化と遠方宇宙2015 (兵庫, 9/7, 2015)
- [178] 中間 智弘、須山照明、横山順一: “短波長原始ゆらぎの観測的探求”; 日本物理学会2015年秋季大会、大阪市立大学、大阪府、日本、2015年9月25日 - 28日.
- [179] 林中貴宏、天文若手夏の学校2015、「インフレーション中のQEDにおける非摂動効果の研究と原始磁場形成理論への応用」、長野県、2015年7月28日
- [180] 林中貴宏、SKAサイエンス会議 宇宙磁場2015、「インフレーション磁場形成とSchwinger効果」、鹿児島大学、2015年9月17日

- [181] 林中貴宏、藤田智弘、横山順一、日本物理学会、「インフレーション原始磁場形成とSchwinger効果」、大阪市立大学、2015年9月28日
- [182] 高橋 一史: 「 $f(R)$ 重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式」、日本物理学会2015年秋季大会 (大阪市立大学、9/28、2015)
- [183] 高橋 一史: 「 $D$ 次元 Lovelock-Galileon理論におけるブラックホールの不安定性」、日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学、3/20、2016)
- [184] 大下翔誉、山本一博、張森, “Radiation from a particle in an accelerated motion coupled to vacuum fluctuations”, 日本物理学会秋季大会, 大阪市立大学, 大阪, 2015年9月27日
- [185] 大下翔誉、横山順一, “ブラックホールが生成するインフレーション宇宙”, 日本物理学会春季大会, 東北学院大学, 宮城, 2015年3月21日
- [186] 原田了、岩上わかな、長倉洋樹、山田章一: “音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究”; 2015年度第45回天文・天体物理若手夏の学校 (ポスター発表、長野、7/27-30, 2015)
- [187] 上赤 翔也: “高速自転星と超短周期惑星からなる系外惑星系 PTFO 8-8695 の光度曲線の解析”; 2015年度第45回天文・天体物理若手夏の学校 (長野県千曲市, 7/27-30, 2015)
- [188] 岡部泰三、柏木俊哉、須藤靖、松浦周二、土井靖生、瀧田怜、大坪貴文 “AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析”; 天文若手夏の学校 (長野県ホテル圓山荘, 7/28, 2015)
- [189] 杉山 尚徳: “kSZ 効果の理論モデルの構築”; 日本天文学会秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [190] 須藤大地: “ダークマターの速度分散の成長とハローの自己相似的進化”; 天文学会2015年秋季年会 (甲南大学, 9/9, 2015)
- [191] 仲谷峻平: “原始惑星系円盤の光蒸発 I; 輻射流体コードの開発”; 日本天文学会2015年秋季年会 (甲南大学, 9/9-9/11, 2015)
- [192] 櫻井祐也: “Supermassive stars forming with episodic accretion in the early universe”; 日本天文学会2015年秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [193] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト降着と間欠的 UV フィードバック” 天文学会2015年秋季年会 (甲南大学、9/10、2015)
- [194] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性” 天文学会2015年秋季年会 (甲南大学, 9/10, 2015)
- [195] 原田了、岩上わかな、長倉洋樹、山田章一: “音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究”; 天文学会2015年秋季年会 (口頭発表、兵庫、9/9-11, 2015)
- [196] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 日本天文学会2015年秋季年会 (甲南大学, 9/9-9/11, 2015)

- [197] 千秋元、「低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション」、星形成の諸階層—銀河から惑星まで—、(フォレスト箱根、2015年9月14~16日)
- [198] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 星形成の諸階層 - 銀河から惑星まで - (箱根, 9/14-9/16, 2015)
- [199] 櫻井祐也: “始原ガス中での超大質量星形成と間欠的降着: 輻射フィードバックの影響”; 星形成の諸階層 (箱根, 9/14-16, 2015)
- [200] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト降着と間欠的 UV フィードバック” 研究会” 星形成の諸階層” (箱根、9/16、2015)
- [201] 大栗 真宗: “Mapping Dark Matter”; 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか?-徹底的究明と将来への挑戦-」発足シンポジウム (カブリ IPMU, 9/20, 2015)
- [202] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars and Origins of SMBHs” 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第3回ワークショップ (甲南大学、10/17、2015)
- [203] 櫻井祐也: “間欠的質量降着による超大質量星形成と輻射フィードバック”; 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第3回ワークショップ (甲南大学、10/17-18, 2015)
- [204] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第3回ワークショップ (甲南大学、10/17-10/18, 2015)
- [205] 西道 啓博、吉田 直紀、白崎 正人、大里 健: “摂動理論と N 体計算を組み合わせた宇宙の大規模構造高速計算法の開発”、第7回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム 多分野に広がる計算科学の発展と将来像、筑波大学計算科学研究センター (ポスター講演、2015年10月20日)
- [206] 大栗 真宗: “超新星重力レンズ SN Refsdal の像の出現予測”; 第4回観測的宇宙論ワークショップ (京都大学、11/18, 2015)
- [207] 大里 健、関口 豊和、白崎 正人、鎌田 歩樹、吉田 直紀: “Constraint on Mass of Light Gravitino from CMB Lensing and Cosmic Shear”; 第四回観測的宇宙論ワークショップ (基礎物理学研究所、京都大学、11/19)
- [208] 早津夏己, ADF22 team; “ALMA CYCLE2 サーベイデータを用了  $z = 6.3$  [CII] 輝線銀河探査”; 初代星・初代銀河研究会 2015 (群馬, 11/30 - 12/2)
- [209] 千秋元、「低金属量ガス雲の熱的進化と低質量星形成」、初代星・初代銀河研究会 2015、(草津セミナーハウス、2015年11月30日~12月2日)
- [210] 平野 信吾: “宇宙初期の天体形成における Streaming Velocity の影響”; 初代星・初代銀河研究会 (草津, 11/30-12/02, 2015)
- [211] 櫻井祐也: “超大質量星形成の降着段階における間欠的降着と輻射フィードバックの影響”; 初代星・初代銀河研究会 2015b (草津, 11/30-12/2, 2015)
- [212] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性” 初代星・初代銀河研究会 2015 at 草津温泉 (草津,11/30,2015)
- [213] 早津夏己, 吉田直紀, 松田有一, 清水一紘; “数値シミュレーションと ALMA 観測で探る遠方星形成史”; 若手銀河研究者研究会 (京都, 12/6 - 12/7)
- [214] 平野 信吾: “宇宙初期の天体形成における Streaming Velocity の影響”; 第28回理論懇シンポジウム (大阪大学, 12/23-12/25, 2015)
- [215] 櫻井祐也: “間欠的質量降着による超大質量星形成星周円盤の不安定性と輻射フィードバック”; 第28回理論懇シンポジウム 「宇宙における天体形成から生命まで」 (大阪大, 12/23-12/25, 2015)
- [216] 細川 隆史: “急速降着による超大質量星形成と巨大ブラックホールの起源” 新学術領域研究” 重力波天体” 理論班合宿 (伊豆長岡、1/8、2016)
- [217] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”初期宇宙における超大質量 BH の種形成” 新学術領域 A05 班合宿 (熱海,1/8,2016)
- [218] 吉田 直紀, 白崎正人, 堀内俊: “Cross-correlation of cosmic shear with extragalactic gamma-ray background”; 高エネルギーガンマ線で見える極限宇宙 (東京大学柏キャンパス, 1/14, 2015)
- [219] 平野 信吾: “Supersonic Streams Drive the Formation of Cluster of / Supermassive First Stars”; 平成 27 年度 CfCA ユーザーズミーティング (水沢, 1/28-1/29, 2016)
- [220] 西道 啓博: “大規模宇宙論的シミュレーション群を用いた宇宙大規模構造の精密理論テンプレートの構築”、CfCA ユーザーズミーティング、国立天文台水沢キャンパス (口頭講演、2016年1月29日)
- [221] 田中 賢、吉川 耕司、吉田 直紀: “6次元位相空間上での Vlasov シミュレーションにおける高精度化”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/14-17, 2016)
- [222] 杉山 尚徳: “ハローパワースペクトルの展開法”; 日本天文学会春季年会 (首都東京大学, 3/14-17, 2016)
- [223] 岡部泰三、柏木俊哉、須藤靖、松浦周二、土井靖生、瀧田伶、大坪貴文 “AKARI FIS 全天地図による SDSS 銀河のスタック解析”; 天文学会 (首都大学東京, 3/16, 2016)
- [224] 西道 啓博、高田 昌広、吉田 直紀、大里 健、大栗 真宗、白崎 正人、浜名崇、高橋 龍一: “大規模シミュレーション群に基づく銀河-銀河レンズ効果のエミュレータ”、日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京南大沢キャンパス (口頭講演、2016年3月16日)
- [225] 枝和成、伊藤洋介、神田展行、田中一幸、有馬司、藤井善範、端山和大、平沼悠太、廣林茂樹、金山雅人、Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平、三宅恭平、宮本晃伸、中西雄大、中野将也、中尾隼人、成川達也、大石奈緒子、大原謙一、酒井一樹、佐々木幸次、正田亜八香、諏訪部直、田越秀行、高橋弘

- 毅, 植木聡史, 上野昂, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 譲原浩貴, 「iKAGRA へ向けた連続重力波探査パイプラインの構築」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 27 日
- [226] 端山和大, 阿久津智忠, 伊藤洋介, 神田展行, 苔山圭衣子, 辰巳大輔, 都丸隆行, 成川達也, 間野修平, 宮川治, 宮本晃伸, 山本尚弘, 譲原浩貴, 横澤孝章, 上野昂, 「KAGRA Detector Characterization 開発進捗状況 (III)」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [227] 神田展行, 大原謙一, 伊藤洋介, 植木聡史, 金山雅人, 佐々木幸次, 高橋弘毅, 田越秀行, 田中一幸, 端山和大, 平沼悠太, 三代木伸二, 山本尚弘, 譲原浩貴, 「iKAGRA データ転送・保管システムの開発 II (ソフトウェア開発)」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [228] 田越秀行, 上野昂, 譲原浩貴, 大原謙一, 成川達也, 有馬司, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 伊藤洋介, 神田展行, 金山雅人, Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中西雄大, 中野将也, 中尾隼人, 大石奈緒子, 酒井一樹, 佐々木幸次, 正田亜八香, 諏訪部宙, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 「iKAGRA へ向けた解析パイプライン開発状況」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [229] 大原謙一, 上野昂, 譲原浩貴, 伊藤洋介, 高橋弘毅, 有馬司, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 神田展行, 金山雅人, Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中西雄大, 中野将也, 中尾隼人, 成川達也, 大石奈緒子, 酒井一樹, 佐々木幸次, 正田亜八香, 諏訪部宙, 田越秀行, 田中一幸, 植木聡史, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 「KAGALI (KAGRA Algorithmic Library) の開発 I」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [230] 上野昂, 譲原浩貴, 田越秀行, 大原謙一, 成川達也, 有馬司, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 伊藤洋介, 神田展行, 金山雅人, Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中西雄大, 中野将也, 中尾隼人, 大石奈緒子, 酒井一樹, 佐々木幸次, 正田亜八香, 諏訪部宙, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 「iKAGRA へ向けたコンパクト連星合体 low latency 探査パイプライン開発状況」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [231] 植木聡史, 酒井一樹, 高橋弘毅, 金山雅人, 大原謙一, Jordan . Camp, 有馬司, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 伊藤洋介, 神田展行, Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中西雄大, 中野将也, 中尾隼人, 成川達也, 大石奈緒子, 佐々木幸次, 正田亜八香, 諏訪部宙, 田越秀行, 田中一幸, 上野昂, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 譲原浩貴, 「KAGALI を用いた Hilbert-Huang 変換解析コードの開発」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [232] 成川達也, 田越秀行, 上野昂, 譲原浩貴, 大原謙一, Hyung Won Lee, Chunglee Kim, Jeongcho Kim, 有馬司, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 伊藤洋介, 神田展行, 金山雅人, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中西雄大, 中野将也, 中尾隼人, 大石奈緒子, 酒井一樹, 佐々木幸次, 正田亜八香, 諏訪部宙, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 「重力波を用いた重力理論の検証に向けたデータ解析パイプライン」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 27 日
- [233] 安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 阿久津智忠, 武者満, 上田暁俊, 青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 牛場崇文, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 奥富弘基, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 権藤里奈, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 柴田和憲, 正田亜八香, 真貝寿明, 末正有, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (64): DECIGO 計画の概要」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 2015 年 9 月 28 日
- [234] 安東正樹, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 有富尚紀, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 牛場崇文, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 奥富弘基, 兼村晋哉, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 川村静児, 神田展行, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 権藤里奈, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 佐藤孝, 柴田大, 柴田和憲, 正田亜八香, 真貝寿明, 末正有, 杉山直, 鈴木理恵子, 瀬戸直樹, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高島健, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高

- 森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中貴浩, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 坪野公夫, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中村卓史, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 船木一幸, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (68): DECIGO 計画の概要」日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日
- [235] 神田展行, 端山和大, 伊藤洋介, 金山雅人, 宮川治, 宮本晃伸, 三代木伸二, 大原謙一, 酒井一樹, 佐々木幸次, 田越秀行, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 山本尚弘, 横澤孝章, 譲原浩貴, 「iKAGRA データ転送・保管システムの開発 III (システム構築と試運転)」, 日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日
- [236] 大原謙一, 端山和大, 伊藤洋介, 神田展行, 金山雅人, 宮川治, 宮本晃伸, 三代木伸二, 酒井一樹, 佐々木幸次, 田越秀行, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 山本尚弘, 横澤孝章, 譲原浩貴, 「KAGRA データ転送システムの開発: 基本設計と性能テスト」, 日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日
- [237] 端山和大, 阿久津智忠, 熱田将, 伊藤洋介, 神田展行, 苔山圭衣子, 宗宮健太郎, 成川達也, 宮川治, 宮本晃伸, 中野雅之, 山本尚弘, 譲原浩貴, 横澤孝章, 上野昂, 「KAGRA Detector characterization 開発進捗状況 (IV)」日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日
- [238] 譲原浩貴, 枝和成, 藤井善範, 端山和大, 平沼悠太, 廣林茂樹, 伊藤洋介, 神田展行, 金山雅人, Jeongcho Kim, Chunglee Kim, Hyung Won Lee, 間野修平, 三宅恭平, 宮本晃伸, 中野将也, 成川達也, 大石奈緒子, 大原謙一, 酒井一樹, 佐々木幸次, 真貝寿明, 正田亜八香, 諏訪部宙, 田越秀行, 高橋弘毅, 田中一幸, 植木聡史, 上野昂, 若松剛司, 山本尚弘, 横山順一, 横澤孝章, 「KAGRA データ解析: 重力波探索パイプラインの開発状況」, 日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日
- [239] 枝和成, 伊藤洋介, 「連続重力波探査におけるカイ二乗検定を用いた検出器雑音の棄却法」, 日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日 (セミナー)
- [240] 細川 隆史: “ファーストスター誕生: コンピュータ中に再現された宇宙最初の星形成”; 天文学教室セミナー (東北大学, 4/15, 2015)
- [241] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars”; 宇宙進化研究室コロキウム (大阪大学, 4/22, 2015)
- [242] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars”; astrophysics seminar (Tubingen univ., Germany, 6/22, 2015)
- [243] 須藤靖: “加速する宇宙論”; 東京工業大学、地球惑星教室セミナー (2015 年 6 月 24 日)
- [244] 須藤靖: “重力レンズ越しにみる夜空: 宇宙の果てから系外惑星へ”; 日本物理学会 2015 年度科学セミナー「物理学と光-光の基礎と最先端研究」(2015 年 8 月 21 日)
- [245] Kento Masuda: “Obliquity and orbital precession of the Kepler-13A system probed with gravity-darkened transit light curves,” MIT Astrophysics Brown Bag Lunch Series, October, 2015
- [246] Takahiro Nishimichi: “Simulation effort for galaxy-galaxy lensing signal from SuMIRe-HSC”, Argonne National Laboratory, USA, (October 16, 2015)
- [247] 西道 啓博: “宇宙大規模構造の精密理論模型と統計解析”, 弘前大学理工学部地球環境学科 (2015 年 10 月 26 日)
- [248] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”The formation of SMBH in cosmological simulation” Waseda (早稲田, 11/20, 2015)
- [249] 西道 啓博: “宇宙論の問題設定とゼルドビッチ近似”, 統計数理研究所 (2015 年 11 月 27 日)
- [250] 大栗 真宗: “超新星重力レンズの発見”; 東京大学天文学教室談話会 (東京大学, 11/24, 2015)
- [251] 平野 信吾: “Mass Distribution of Primordial Stars: Various Star Formation in the Early Universe”; 理論コロキウム (国立天文台, 12/9, 2015)
- [252] 西道 啓博: “On the nonlinear mode coupling in the gravitational growth of cosmic structures”, 早稲田大学理論宇宙物理学研究室 (2016 年 1 月 22 日)
- [253] 西道 啓博: “大規模シミュレーション群を用いた銀河-銀河レンズ効果の理論テンプレート構築”, 名古屋大学宇宙論研究室 (2016 年 2 月 18 日)
- [254] 千秋元, 「低金属量ガス雲の熱化学進化と星形成」(甲南大学, 2016 年 3 月 2 日)
- [255] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” McGill University, December 2.
- [256] J. Yokoyama, “Creation of the inflationary universe out of a black hole,” ICTP Brazil seminar, February 22.
- [257] J. Yokoyama, “Creation of the inflationary universe out of a black hole,” ETH Physics seminar, March 2.
- [258] 横山順一, 「インフレーション宇宙論と宇宙の創生」山口大学セミナー 3 月 9 日。
- [259] 須山輝明, “Discrimination of the origin of the primordial perturbation” 名古屋大学素粒子セミナー 2015 年 5 月 12 日
- [260] 須山輝明, “Spontaneous scalarization : asymmetron as dark matter” CENTRA セミナー (リスボン) 2015 年 9 月 3 日

- [261] 須山輝明、“Spontaneous scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant” 国立台湾大学 LeCosPA セミナー (台北) 2015年12月21日
- [262] 須山輝明、“インフレーションと修正重力理論について” 神戸大学セミナー 2016年1月28日
- [263] D. Yamauchi: “Cosmic strings and their future detectability”; Astrophysics & Cosmology Group seminar (Waseda University, Tokyo, 7/3, 2015)
- [264] D. Yamauchi, “Cosmic strings and their future detectability”; EHQG seminar (Nagoya University, Nagoya, 4/7, 2015)
- [265] T. Nakama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves”; KEK Theory Seminar (Tsukuba, Japan, October 14, 2015)
- [266] K. Takahashi, “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in  $D$  dimensions”; Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, (RESCEU, University of Tokyo, Japan, February 8, 2016)
- [267] N. Oshita, “Birth of an inflationary universe out of a black hole,” Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, (RESCEU, University of Tokyo, Japan, February 8, 2016)
- [268] Y. Itoh, “Determining mass of an isolated neutron star using GW” Colloquium of the physics department of the Rikkyo University, 2015/05/26
- [269] 枝和成、“連続重力波データ解析の基礎”、重力波研究交流会、東京大学、2015年10月30日
- [270] Y. Itoh, “Getting Ready for KAGRA data” The University of Tokyo, RESCEU seminar, 2015/11/09
- [271] 伊藤洋介、“重力波で探る中性子星” 中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ京都大学理学研究科セミナーハウス、京都、2015/12/21-22
- [272] Kipp Cannon, 2016-02-08 RESCEU (seminar) ”Searching for Compact Object Collisions with Latencies of Seconds”
- [273] Kipp Cannon, 2016-02-12 UTokyo (colloquium) ”Summary of Advanced LIGO’s Observation of GW150914, a Binary Black Hole Merger”
- [274] Kipp Cannon, 2016-02-23 KEK (colloquium) ”Initial Results From Advanced LIGO’s First Science Run”
- [275] Kipp Cannon, 2016-03-07 RIKEN (colloquium) ”Initial Results From Advanced LIGO’s First Science Run”
- [276] Kipp Cannon, 2016-03-29 Canadian Institute for Theoretical Astrophysics (colloquium) ”Initial Results From Advanced LIGO’s First Science Run”
- (集中講義)
- [277] 伊藤洋介、“重力波データ解析入門”、立教大学、2015年5月19日、20日、26日、27日
- [278] 伊藤洋介、“重力波データ解析”、宇宙線研究所、2016年3月11日  
(アウトリーチ)
- [279] 横山順一、“静岡県立袋井高校見学会 進路講座” 東京大学理学部、5月22日
- [280] 横山順一、“恵泉女学園高校見学会 進路講座” 東京大学理学部、7月3日
- [281] 横山順一、“重力波で探る宇宙のはじまり” 一般相対論100周年記念講演会、東京大学駒場祭、11月21日
- [282] 横山順一、“重力波でさぐる輪廻する宇宙” SSH講演会、日比谷高校、1月29日
- [283] 伊藤洋介、“アインシュタインの重力波をとらえる”、東京大学オープンキャンパス、東京大学、8月6日
- [284] 伊藤洋介、工大祭2015一般相対論100周年記念市民講演会パネルトーク、東京工業大学 10月11日
- [285] 須藤靖: “宇宙を眺めて世界を知る”、駿台予備学校講演会 (2015年6月27日)
- [286] 吉田直紀: “天の川探索: 現代宇宙論と宇宙考古学の交差点” サイエンスカフェ宇宙2015 (多摩六都科学館, 7/5, 2015)
- [287] 吉田直紀: “ビッグデータ宇宙論”; ナガセ 大学学部研究会 (ガーデンシティ品川, 8/19, 2015)
- [288] 吉田直紀: “宇宙のダークマター”; 宇宙の進化を支配した暗黒物質 (朝日カルチャーセンター湘南教室, 9/12, 2015)
- [289] 吉田直紀: “宇宙はこうして生まれた”; コズミックフロントプラネタリウム版 座談会 (とよた科学体験館, 9/19, 2015)
- [290] 吉田直紀: “宇宙の夜明け”; 第19回自然科学研究機構シンポジウム (名古屋大学豊田講堂, 9/20, 2015)
- [291] 吉田直紀: “宇宙の夜明け -ファーストスターと超巨大ブラックホールの謎-”; 第31回湯川記念講演会 (大阪大学中之島センター, 10/11, 2015)
- [292] 須藤靖: “宇宙の起源について”、三鷹市民大学 総合コース「科学」(2015年10月31日)
- [293] 吉田直紀: “ファーストスターと超巨大ブラックホールの謎”; 市民講演会「計算」から見える素粒子・原子核・宇宙の世界 (奈良春日野国際フォーラム I・RA・KA, 11/7, 2015)
- [294] 吉田直紀: “ファーストスター”; コズミックフロントプラネタリウム版 講演会 (豊橋市視聴覚教育センター, 2/21, 2016)



## 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・須田)

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, 舎川, 岡田)

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 プロジェクトの推進を行った. プロジェクトの総まとめとして, 主要科学目的である赤方偏移歪み効果を用いた赤方偏移1を超える宇宙での史上初めての一般相対性理論の検証を行い, 標準  $\Lambda$  CDM モデルと一致することが確かめられた. [1]

### 2.2 銀河系及び近傍矮小銀河

金属欠乏星の起源 (須田)

金属欠乏星の中でもとりわけ鉄組成が少ない星は極超金属欠乏星と呼ばれる。これらの星の鉄組成は典型的には太陽の十万分の一以下程度とされ、銀河

系内に3個程度見つっている。これらの星はすべて炭素過剰を示しており、AGB段階における元素合成と物質混合、連星間質量輸送を経たものと考えられる。超金属欠乏な AGB 星における  $s$ -過程元素合成を考えることにより、ヘリウム対流層での元素合成ネットワーク計算を通じて理論と観測との比較を行い、極超金属欠乏星の元素組成パターンが再現可能であることを示した。[18, 34, 32, 38]

金属欠乏星データベースの開発・拡張 (須田)

恒星の元素組成データは宇宙の星形成史、恒星進化、元素合成、化学進化を理解するための重要な情報源であり、それらのデータを収集することは理論と観測を比較するための基礎資料となる。我々は銀河系ハローの金属欠乏星と矮小銀河中の恒星の元素組成データを文献から収集し Web で公開するシステムを構築してきた (Suda *et al.*, PASJ, 60, 1159, 2008)。今年度では、データの拡張だけでなく、これまで考慮されていなかった太陽組成の違いを取り入れ、よりバイアスの少ないデータベースになるよう改良した。また、膨大になったデータを効率よく検索するためにデータベースの構造を変更し、検索の効率化と検索機能の向上に着手し、近日中に公開する予定である。登録データの解析を行い、矮小銀河の恒星データから銀河系と矮小銀河の星形成史にどのような違いが見られるかを検証した。[17, 29, 27, 23, 31, 37, 41, 44]

銀河系ハローにおける超金属欠乏星の観測 (須田)

銀河系ハローに属する金属欠乏星の中には特殊な元素組成パターンを示すものが見つかり、そのような星の元素組成を詳細に調べることが恒星モデルや化学進化に制限を与えることができる。LAMOSTの多天体分光による金属欠乏星の候補天体探査を行い、特に金属量の低い星 ( $[Fe/H] < -3.5$ ) の候補についてすばる望遠鏡による追観測を通じて元素組成データを得た。その中でも  $r$ -過程元素が特に増大した星 ( $r$ -II 星)、金属量が  $[Fe/H] < -4$  である中性子捕獲元素の過剰を持たない炭素過剰星 (CEMP-no 星)、および  $[Fe/H] < -4$  で炭素過剰でなく、リチウムの減少を示す星について報告した。[6, 7]

極超金属欠乏星の鉄組成の起源 (小宮, 須田)

宇宙最初の星は、金属を全く含まない種族 III 星であった。種族 III 星はこれまで1個も見つからないが、極超金属欠乏星とよばれる鉄族元素が太陽の10万分の1以下しかない星は3天体が見つっている。特に昨年、鉄組成が太陽の1000万分の1以下しかない星が発見された。これらの星の起源として、種族 III 星が金属を含む星間物質の降着を受け表面組成が変化したものである可能性を提唱してきた。本研究では、銀河の階層的形成を考慮した化学進化モデル計算により、観測された最も低金属量の

星たちの組成分布が表面汚染によりよく再現されることを示した。[3, 10]

### 種族 III 星の現在の宇宙における生き残り (小宮、須田)

種族 III 星の多くは、現在までの間に星間物質降着で表面組成が変化していると考えられるが、一部の星は力学的相互作用により形成された銀河から放出され、そのままの組成を保っていると期待される。これら純粋な種族 III 星の数や分布を推定し、100kpc 程度離れた銀河系周縁部にいるとの結果をえた。これらの星の観測可能性を議論した。[4, 10]

### 連星中性子星合体による r 過程元素化学進化 (小宮、茂山)

金などの重元素は r 過程によって合成される。R 過程元素の起源天体として、連星中性子星の合体が有力視されているが、化学進化の観点からは連星中性子星起源説と金属欠乏星の組成との矛盾が指摘されていた。本研究では連星中性子星からの放出物が通常の超新星放出物よりはるかに広く拡散することを考慮した化学進化モデル計算を行うことで、金属欠乏星の組成分布を再現することに成功した。[16, 28, 35, 40]

### 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。国立天文台の青木和光、辻本拓司、IPMU の石垣美歩との共同研究。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一つである Draco 矮小銀河に属する恒星を Subaru 望遠鏡で分光観測を行い、これらの元素の組成を調べてみた。その結果、鉄の含有量が太陽に比べて 1/200 以下しかない恒星では r-過程元素の 1 つであるユーロピウムの含有量は低く検出できなかった一方、鉄の含有量が太陽に比べて 1/200 以上ある恒星ではユーロピウムはほぼ一定の含有量を持っていることを確認した。つまり、ある時点で一発の中性子星合体が起き、それ以前に形成された恒星では r-過程元素は含まれず、一回の中性子星合体で放出された r-過程元素にはほぼ一様に汚染されたガスから形成された恒星は一定の含有量を示すと考えると観測結果が説明できる。他方、超新星が主に r-過程元素を供給するとすると r-過程元素が増えると同時に鉄の含有量も増える必要があるので観測結果を説明するのは難しい。矮小銀河の星のスパルによる観測を引き続き行っている。[2, 15, 26]

## 2.3 新星

### 新星風の定常理論モデルの構築 (和田、茂山)

新星は、白色矮星と恒星の連星系において、白色矮星表面への質量降着の結果、引き起こされる熱核暴走と質量放出であると考えられている。軟 X 線を放射するようになった比較的後期の新星には、超 Eddington 光度で光り、また質量放出が継続しているものが存在することが、観測的に示唆されているが、これらには十分な理論的説明があたえられてこなかった。本研究では、こうした現象が、質量放出によって外層が希薄になった際に、光球の外側にかけて新星風の加速が続いているような状況において引き起こされるのではないかと想定し、変動 Eddington 因子法を用いた輻射流体シミュレーションを行うことで検証を試みた。数値計算の結果、球対称な定常状態を仮定しても、光球の外側にかけて新星風の加速が続き、光球での局所 Eddington 光度を超える光度を持つような、比較的後期の解が存在することがわかった。白色矮星の質量と半径の関係が新星にあたる影響、残される質量の見積もり、実現し得る最大光度等の検証を続けている。

## 2.4 超新星

### Ia 型超新星の起源 (野田、須田、茂山)

Ia 型超新星が連星間質量輸送によって引き起こされる可能性を検証するため、質量を供給する伴星の検出条件を調べた。超新星の爆風によって巨星の外層がはがれた場合、星の光度が数百年でどのように変化するか、恒星進化モデルを用いて調べた。[5, 39]

### マグネターを持つ超新星残骸の研究 (中野、増山、茂山)

マグネターを持つ超新星残骸 CTB109 のすぐくによるエックス線観測結果を解析し、超新星残骸の基本的な物理量を推定するとともに、その観測を再現する超新星爆発モデルを探す。マグネターを残す超新星は様々な観測から示唆されているように初期質量が 30 から 40  $M_{\odot}$  という大質量星だったのか、爆発エネルギーはいくらだったのかという問いに対する答えをこのエックス線観測を再現できるモデルを探すことで見つける。[43, 20, 30]

### マグネターからのエネルギーで駆動される超新星 (増山、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かどうか調べる。密度分布が中心のエネルギー源からの距離にのべき上に比例する時の球対称爆発を記述する自己相似解を見つけ、PASJ から出版した。境界条件を満たす解を得るには、密度分布のべき指数やエネルギー源の時間依存性に制限がつくことを見出した。[8, 21, 25, 36, 42, 14]

### 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。伝播速度が光速に非常に近い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した。また、唯一観測例がある SN 2008D での shock breakout の光度の時間変化とスペクトルを同時に説明できる非球対称モデルを構築し、衝撃波の速度とその形の球面からのズレ、視線の角度に制限をつけた。京大の前田啓一、鈴木昭宏との共同研究。[13, 19, 24]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tonegawa, M., Totani, T., Okada, H., et al. "The Subaru FMOS galaxy redshift survey (Fast-Sound). I. Overview of the survey targeting H  $\alpha$  emitters at  $z \sim 1.4$ ", 2015, Publ. Astron. Soc. Japan, 67, 81
  - [2] Tsujimoto, T., Ishigaki, M. N., Shigeyama, T., & Aoki, W. "Chemical feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy", 2015, Publ. Astron. Soc. Japan, 67, L3
  - [3] Y. Komiya, T. Suda, M. Y. Fujimoto: "The most iron-deficient stars as the polluted population III stars", ApJ Letters, 2015, 808, L47, 5pp
  - [4] Y. Komiya, T. Suda, M. Y. Fujimoto "Population III stars around the Milky Way" ApJ, 2016, 820, 59, 11pp
  - [5] K. Noda, T. Suda, T. Shigeyama "On the brightness of surviving companions in type Ia supernova remnants" Publ. Astron. Soc. Japan, 2016, 68, 11
  - [6] H. Li, W. Aoki, G. Zhao, S. Honda, N. Christlieb, T. Suda "High-resolution spectroscopic studies of ultra metal-poor stars found in the LAMOST survey" Publ. Astron. Soc. Japan, 2015, 67, 84
  - [7] H. Li, W. Aoki, S. Honda, G. Zhao, N. Christlieb, T. Suda "Discovery of a strongly r-process enhanced extremely metal-poor star LAMOST J110901.22+075441.8" Research in Astronomy and Astrophysics, 2015, 15, 1264
  - [8] Miyu Masuyama, Toshikazu Shigeyama, Yoichiro Tsuboki 2016, "Spherical explosion with central energy source", PASJ, 68, 2
- (会議抄録)
- (国内雑誌)
- [9] 茂山 俊和, "超新星研究最前線" パリティ 2015 年 5 月号
  - [10] 小宮 悠, "宇宙黎明期の生きた化石: 極超金属欠乏星の遍歴をたどる" 天文月報 2015 年 8 月号
  - [11] 小宮 悠, "VO で探る超巨大ブラックホールと周囲の銀河のクラスタリング" 天文月報 2015 年 9 月号
  - [12] 須田 拓馬 "金属欠乏星データベースの成果" 天文月報 2015 年 9 月号 特集 データベース天文学 vol.108, p.577
- (学位論文)
- 博士
- [13] 大谷友香理; Study of relation between emission of supernova shock breakout and central engine activity
- (修士)
- [14] 増山美優; マグネター駆動超新星の進化シミュレーション
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] Nitta Ishigaki, M., Tsujimoto, T., Shigeyama, T., & Aoki, W. 2015, IAU General Assembly, Honolulu, Hawaii, United States of America, August, 2015
  - [16] Yutaka Komiya & Toshikazu Shigeyama "Chemical evolution of r-process elements in the hierarchical galaxy formation" IAU symposium 317, The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution, Honolulu, Hawaii, U.S., Aug. 3-7, 2015
  - [17] T. Suda, W. Aoki, J. Hidaka, Y. Katsuta, M. Y. Fujimoto, "Star formation history in the local group explored using the SAGA database for dwarf spheroidal galaxies", RESCEU Summer School 2015, Nikko, Tochigi, Aug. 2, 2015
  - [18] T. Suda, S. Yamada, M. Y. Fujimoto "s-process in metal-poor AGB stars: CEMP-s and CEMP-no", First stars, galaxies, and black holes: Now and Then, University of Groningen, Groningen, Netherland, June 15-19, 2015

- [19] Ohtani, Y., Suzuki, A., Shigeyama, T.; "Radiative transfer calculations of ultra-relativistic shock breakout in circumstellar medium: Dependence on the central engine activity", in the conference "IAU General Assembly", Honolulu, Hawaii, United States of America, August, 2015
- [20] T.Nakano : "X-ray Studies of Supernova Remnants and Neutron Stars, from Suzaku toward ASTRO-H", "RESCEU APCosPA Summer School 2016", Nikko, Tochigi, Japan, August, 2015

招待講演

(国内会議)

一般講演

- [21] 増山美優、中野俊男、茂山俊和: "Numerical calculations of magnetar-powered supernovae", ガンマ線バースト研究会 2015, 2015年8月31日-9月2日, 理研 (ポスター発表)
- [22] 大谷友香理、鈴木昭宏、茂山俊和: "Radiative transfer calculations of ultra-relativistic shock breakout in circumstellar medium", GRB workshop 2015, 理化学研究所 和光キャンパス 鈴木梅太郎ホール, 2015/8/31
- [23] 須田 拓馬, 大谷友香理, 野田和弘, 増山美優, 小宮悠, 勝田豊, 山田志真子, 日高潤, 青木和光, 藤本 正行, "恒星進化モデルで探る矮小銀河の星形成史", 星形成の諸階層-銀河から惑星まで-, フォレスト箱根, 2015年9月16日
- [24] 大谷友香理、鈴木昭宏、茂山俊和: "Scattered X-ray photons in supernova ejecta when shock breakout occurs in circumstellar medium", SNSNR2015, ISAS/JAXA 相模原キャンパス 研究管理棟, 2015/11/9
- [25] 増山美優、中野俊男、茂山俊和: "Numerical calculations of magnetar-powered supernovae", 超新星・超新星残骸シンポジウム, 2015年11月9-11日, ISAS/JAXA
- [26] 茂山俊和: "R-Process in Mergers between Neutron Stars", Comprehensive Studies of Neutron Stars (RIKEN symposium), 理化学研究所 和光キャンパス 仁科ホール, 2015/11/25
- [27] "初代星探査のための矮小銀河版 SAGA データベース", 須田 拓馬, 日高潤, 勝田豊, 山田志真子, 大谷友香理, 野田和弘, 増山美優, 小宮悠, 青木和光, 藤本 正行, 初代星・初代銀河研究会@草津温泉, 草津セミナーハウス, 2015年11月30日
- [28] 小宮悠、須田拓馬、藤本正行: 「中性子星連星合体による r プロセス元素の化学進化」理論懇シンポジウム, 大阪大学, 2015/12/23
- [29] 須田 拓馬, 日高潤, 勝田豊, 山田志真子, 大谷友香理, 増山美優, 野田和弘, 青木和光, 藤本 正行, "SAGA データベースで探る銀河系および局所銀河群の化学進化", 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」大阪大学豊中キャンパス, 2015年12月23-25日
- [30] 中野俊男, "超新星残骸の観測によるマグネターの誕生と進化の研究: 観測から理論に向けて", 中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ、京都大学, 2015/12/21-22

招待講演

- [31] 須田 拓馬, 大谷友香理, 野田和弘, 増山美優, 小宮悠, 勝田豊, 山田志真子, 日高潤, 青木和光, 藤本 正行, "恒星進化モデルと SAGA データベースで探る矮小銀河の星形成史", 理論天文学研究会 2015, 大仁ホテル, 2015年10月27日
- [32] 須田 拓馬 "小質量星の進化と元素合成" 宇宙核物理連絡協議会 (宇核連) 研究会国立天文台, 2016年2月22日
- [33] 茂山俊和 "銀河の化学進化についての理論研究" 宇宙核物理連絡協議会 (宇核連) 研究会国立天文台, 2016年2月22日
- [34] T. Suda "Stellar evolution models and seismology" Workshop on Galactic archaeology - Asteroseismology, 国立天文台, 2016年3月22日

日本天文学会 2015年秋季年会、甲南大学 2015/9/9-11

- [35] 小宮悠、茂山俊和、藤本正行 "階層的化学進化モデルによる r 過程元素の中性子星連星起源説の検証", 2015年日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015年9月9日, X13a
- [36] 増山美優、中野俊男、茂山俊和 "マグネターが与える超新星及び超新星残骸への影響", 2015年日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015年9月9日, K14a
- [37] 須田拓馬, 大谷友香理, 野田和弘, 増山美優, 日高潤, 勝田豊, 青木和光, 藤本正行, "矮小銀河中の恒星のデータベース (2)" 2015年日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015年9月9日, N05a
- [38] 山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 藤本正行 "s-過程核種合成と炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星形成の統一的描像" 2015年日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015年9月9日, N04a
- [39] 野田和弘, 須田拓馬, 茂山俊和, "Ia型超新星残骸における生き残り伴星の検出可能性" 2015年日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2015年9月10日, K06a

日本天文学会 2016年春季年会、首都大学 2016/3/14-17

- [40] 小宮悠, 茂山俊和, 藤本正行, "連星中性子星合体による r プロセス元素の化学進化", 2016年日本天文学会春季年会, 首都大学, 2014年3月14日, N05a
- [41] 須田拓馬, 小宮悠, 大谷友香理, 増山美優, 野田和弘, 日高潤, 勝田豊, 山田志真子, 青木和光, 藤本正行, "SAGA データベースを用いた銀河の化学進化の検証" 2016年日本天文学会春季年会, 首都大学, 2014年3月14日, N03a
- [42] 増山美優、中野俊男、茂山俊和 "マグネター駆動超新星の進化シミュレーション", 2016年日本天文学会春季年会, 首都大学, 2014年3月14日, K01a

日本物理 2016年春季年会、東北学院大学 2016/3/18-22

- [43] 中野俊男、古田禄大、増山美優、村上浩章、榎戸輝揚、牧島一夫、茂山俊和: “超新星残骸 CTB109 の X 線観測によるマグネター 1E 2259+586 の親星質量の推定 ”、2016 年 3 月、

(セミナー)

- [44] 須田 拓馬: “Galactic archaeology using the database of stellar abundances in the local group dwarf galaxies”, 北海道大学理学部、2016/2/4

## 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

重力レンズ効果を利用して測定した銀河サイズで探る  $z \sim 6-9$  の銀河の性質

石垣真史, 大内正己 (宇宙線研究所), 大栗真宗 (東大物理) との共同研究.

我々のこれまでの研究によって,  $z \sim 6-8$  の銀河のサイズと光度の関係が明らかになり, 単位質量あたりの角運動量などが議論された. 発表時点で最大のサンプルを用いた研究であったが, さらにサンプルを拡大すべく, Hubble Frontier Fields の他の 3 つの銀河団データの解析を進めた. このより大きなサンプルに基づいて,  $z \sim 6-9$  の銀河の性質を議論する予定である.

**Hubble Frontier Fields 銀河団の質量分布モデル構築**

大栗真宗 (東大物理), 石垣真史, 大内正己 (宇宙線研究所) との共同研究.

重力レンズ効果はより暗い天体の観測を可能にする強力なツールであるが, 事前にレンズ天体の質量分布を知っておく必要がある. Hubble Frontier Fields という銀河団のレンズ効果を活用した観測を利用することを念頭に置き, 観測の完了している 4 つの銀河団の質量分布モデルを構築した. 偶然にも, そのうちの 1 つの銀河団である MACS J1149 に, 多重像をなす超新星爆発が観測された. 我々は, この発見後に遅れて出現すべくもう 1 つの多重像の出現時期と光度を良い精度で予言した. この結果は, 我々のモデルの精度の高さを実証するものとなった.

$z \sim 3$  の星形成銀河のダークハローの研究

銀河の星質量-サイズ関係には正の相関があり, また同じ星質量でも銀河サイズには 1 桁程度の分散が存在している. 我々は 3D-HST のカタログを用いて, GOODS South, COSMOS の領域において星質量-

サイズ関係のこの物理的性質を調べた.  $z \sim 3$  の星形成銀河のサイズを SExtractor を用いて測定し, またクラスタリング強度を測定することでハロー質量を求めた. 星質量とクラスタリング強度には正の相関が見られ, 星質量-サイズ関係の正の相関を説明することが可能である. しかし, サイズとクラスタリング強度の関係を調べると領域により異なる結果となっており, さらに詳しい解析を進めている.

$z \sim 2$  の Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAEs) の星形成活動とその多様性

中島王彦 (ヨーロッパ南天文台), 橋本拓也 (リオン天文台), 大内正己 (宇宙線研究所) との共同研究.

遠方の小質量銀河は, より近傍で見られるより重い銀河のパーツ, “building block” として, 銀河形成・進化において重要な役割を果たす. 本研究では, 一般的に小質量とされる,  $z \simeq 2.2$  の Ly $\alpha$  Emitters (LAEs) の星形成活動と, その多様性について調べた. 昨年度, GOODS-South 領域の 213 個の LAEs について, Spitzer/MIPS と Herschel/PACS の深い画像の stacking 解析を行い, LAEs は典型的に赤外線 (IR) 光度が大変暗く, 赤外線光度の  $3\sigma$  の上限値が  $L_{\text{IR}} = 1.1 \times 10^{10} L_{\odot}$  であること, 減光曲線は一般的に使われている Calzetti curve よりも SMC curve の方が適していることを明らかとした. 本年度は, その結果を基にして, LAEs を星形成活動を反映したサブサンプルに分けて星形成活動の多様性に迫った. 用いた LAEs は, SXDS 領域の 604 個である. 4 つの物理量 ( $M_{\text{UV}}, \beta, L_{\text{Ly}\alpha}, \text{EW}_{\text{Ly}\alpha,r}$ ) に基づいてサブサンプルに分け, クラスタリング解析と SMC curve を仮定した SED fit からダークマターハローの質量と星種族のパラメータをそれぞれ求めた. 全体の LAEs の三分の二は,  $z \sim 2$  の star formation main sequence の小質量側の外挿にのる ( $M_{\star} \sim 10^9 M_{\odot}$ ). ところが, 残りの三分の一は,  $\sim 10^7 M_{\odot}$  という非常に低い星質量を持ち, 爆発的に星を形成していて, 星形成率は, ダークマターハローのバリオン降着率よりも大きい程である. これらの小質量 LAEs は, 宇宙の星形成が最も盛んな  $z \sim 2$  の時代において, 銀河形成初期のフェーズにある可能性がある. 今後は, 他の領域にある LAEs も用いてサンプルを増やし, 統計的精度をあげて議論を行う予定である.

$z \sim 0-3$  の星形成銀河の紫外連続光の脱出率とダストのジオメトリー

清水一紘 (大阪大学), 竹内努 (名古屋大学), 矢島秀伸 (東北大学) との共同研究.

銀河の若い星からの紫外連続光放射の一部は, ダストによって減光されずに銀河から脱出する. 紫外連続光の脱出率は銀河の性質に深く関係する重要な物理パラメーターである. しかし, これまでは近傍から遠方の星形成銀河を統一的に扱って, 紫外連続光脱出率のダスト質量やダストの柱密度の依存性は調

べられておらず、理論で仮定されるダスト減光モデルも観測的に確かめられていない。我々は、Herschel Reference Survey から  $z \sim 0$  の gas rich 星形成銀河、 $z \sim 1$  の PEP 銀河、 $z \sim 1.5$  の BzK 銀河、 $z \sim 1-3$  の重力レンズ銀河を用いて、紫外連続光脱出率をダストの柱密度を用いてモデル化することに成功した。観測結果は、既存の一樣平板ダスト減光モデルであるスラブモデルやサンドウィッチモデル (Shimizu et al. 2014) では表現できないが、ダストと若い星で同じ exponential profile を仮定した我々の新しいモデルでは、表現できる。シミュレーションでは、シミュレーションの銀河のもつダストのジオメトリーの情報を用いず、既存の単純なモデルを組み込んでいるものがある。一方で、 $z \sim 0-3$  のシミュレーションの銀河 (Shimizu et al. 2014) のもつダストのジオメトリー情報に基づいて輻射輸送を解き、紫外線脱出率を求めると、我々の観測に基づいたモデルと矛盾しない結果が得られた。ジオメトリーとして組み込んでいた既存モデルを我々の新しいモデルに替えることで、理論モデル (シミュレーション/準解析的モデル) の銀河がより観測される銀河に近くなり、さらに理論モデル内での整合性も増すことがある。ジオメトリーのモデルを替えると、結果として得られる赤外の光度関数、銀河の色の質量や光度に対する依存関係、サブミリ帯での銀河の個数密度などが変わりうる。今後は、理論モデルに我々の新しいジオメトリーモデルを組み込んだ結果の検証も行う予定である。

### 遠方銀河の爆発的星形成史の研究

中島王彦 (ジュネーブ天文台)、橋本拓也 (リヨン天文台)、大内正己 (宇宙線研究所)、小野 宜昭 (宇宙線研究所) との共同研究。近年、遠方銀河で特に低質量のものは、複雑な星形成史を辿ると示唆されている。そのような銀河の SED は過去の星形成と現在進行中の星形成を表す 2 つの成分で近似できる。しかしながら、2 成分をもつ銀河の観測がほとんど無いため、どのような銀河が 2 成分の SED をもつのか、それぞれの成分の性質はどのようなものなのかは明らかにされていない。そこで我々は、複雑な星形成史を辿る銀河に特化して、紫外の測光データを用いて 2 成分の銀河を効率よく選び出す手法を開発した。今年度は、 $z = 2.2$  の Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAEs) のサンプルの中からこの手法の適用できる天体を選びだし、測光観測の結果についてモデルとの比較をおこなった。今後は分光観測の提案を行い、より詳細を調べる予定である。

### 超新星 SN1978K のスペクトルの変化

Kuncarayakti, H., Hamuy, M. (チリ大学)、前田 啓一 (京都大学)、Anderson, J.P., Galbany, L (ESO)、Nomoto, K. (東大カブリ IPMU) との共同研究。

近傍超新星 SN1978K の出現位置付近を VLT による分光観測を 2007 年と 2014 年に行い、以下の結果

を得た。超新星は 30 年を経過してもまだ輝いており、スペクトルには多数の狭い (FWHM 約  $600 \text{ km s}^{-1}$  以下) 輝線が存在している。結果は超新星として放出された物質が密度の高い星周物質と相互作用し続けていることを示している。スペクトルの変化から、放出物質と星周物質の境界は 2 回の分光でさほど変化しておらず、また星周物質は非対称性をもって分布しているらしいことなどがわかった。

### 近傍渦巻銀河の高分解能撮像による渦状腕構造の起源の観測的研究

銀河の渦状腕の起源は密度波理論によって説明されてきているが、理論的には近年渦状腕は短命であるというシミュレーションの結果が発表され、また観測的にはいくつかの銀河で密度波の兆候が見られない場合が見ついている。本研究では後者について、VLT の多色画像から兆候が見られない銀河についてダスト分布と星団分布を系統的に調べ、バーが強い銀河において兆候が見えにくくなることを示した。さらに、それらの銀河の一つをハッブル宇宙望遠鏡の高空間分解能画像を使ってダスト分布と星団分布を詳しく調べ、高い空間分解能で調べると密度波で予想されるような分布の遅延を示した。全体として、大部分の渦状腕が密度波理論と矛盾しない可能性が高いことを示した。結果は橋場康人の博士論文として発表され、投稿準備中である。

### 広視野カメラによる超新星の初期観測

超新星の親星の起源に迫るため、超新星の早期発見を広い視野カメラで試みた。まず木曾観測所の 1m シュミット望遠鏡の広視野カメラ KWF C (視野 4 平方度) を用いて探査、2 個の Ia 型超新星と 1 個の重力崩壊型超新星を発見、特に後者については追加分光観測を中国の 2.4m 望遠鏡を用いて実施、早期からの詳細スペクトルの取得に成功した。またすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam に Ia 型超新星の観測提案を提出、2016 年 4 月に 1.5 夜を獲得した。これらの結果は Jian Jiang の修士論文としてまとめられた。

## 3.2 系外惑星

### 可視低分散分光による系外惑星掩蔽観測

伊藤洋一、森鼻久美子 (兵庫県立大学)、福井 堯彦 (国立天文台) との共同研究。

西はりま天文台口径 2 m なゆた望遠鏡に可視低分散分光撮像装置 LISS を搭載、系外惑星系 XO-3 の掩蔽観測を 2015 年 12 月 13 日に実施した。スリット幅を 10 秒角と広くとり、近傍の恒星と同時に波長分解能約 80 で、波長域 600–1000nm を望遠鏡をガイドしながら連続観測を行った。掩蔽に入ると約 1% の減光が測定された。しかしながら、天候が途中から悪

化したため、最終的な掩蔽の光度曲線を得ることはできなかったが、天候に恵まれれば国内望遠鏡で分光による掩蔽観測の実施し、惑星大気モデルに制限を与えることが可能であることが示すことができた。

### 3.3 重力波

#### 木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の開発

大型の CMOS の広視野カメラを搭載したカメラの開発を進めた。キャノン社の大型センサーを 8 個搭載したプロトタイプ Tomoe-PM を開発、2015 年 11 月下旬より試験観測を開始し、ほぼ想定通りの性能が出せることを示した。2016 年 3 月にも観測を行い、解析システムを開発しながら流星、可視短時間発光天体探索、変光現象の探索などを行っている。同じセンサー 84 個を搭載した 20 平方度の視野を有する Tomo-e にむけて科学研究費への応募を行った。読み出し回路の開発や性能評価は菊池勇輝の修士論文として発表、国際学会での発表も準備している。

< 報文 >

(原著論文)

#### (a) 2015/1 - 2015/12 の間に出版されたもの

- [1] Kashikawa, N., Ishizuka, Y., Willot, C.-J., Onoue, M., Im, M., Furusawa, H., Toshikawa, J., Ishikawa, S., Niino, Y., Shimasaku, K., Ouchi, M., Hibon, P., 2015, “The Subaru High- $z$  Quasar Survey: Discovery of Faint  $z \sim 6$  Quasars”, *Astrophys. J.*, **798**, id.28 (10pp)
- [2] Ishigaki, M., Kawamata, R., Ouchi, M., Oguri, M., Shimasaku, K., Ono, Y., 2015, “Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at  $z \sim 5-10$  for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization”, *Astrophys. J.*, **799**, id.12 (21pp)
- [3] Kusakabe, H., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ouchi, M., 2015, “First Infrared-based implications for the dust attenuation and star formation of typical Ly $\alpha$  emitters”, *Astrophys. J. Lett.*, **800**, L29 (5pp)
- [4] Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Oguri, M., Ouchi, M. 2015, “The sizes of  $z \sim 6-8$  lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 data”, *Astrophys. J.*, **804**, id.103 (13pp)
- [5] Hashimoto, T., Verhamme, A., Ouchi, M., Shimasaku, K., Schaerer, D., Nakajima, K., Shibuya, T., Rauch, M., Ono, Y., Goto, R. 2015, “A Close Comparison between Observed and Modeled Ly $\alpha$  Lines for  $z \sim 2.2$  Ly $\alpha$  Emitters”, *Astrophys. J.*, **812**, id.157 (22pp)
- [6] Hayashi, M., Ly, C., Shimasaku, K., Motohara, K., Malkan, M. A., Nagao, T., Kashikawa, N., Goto, R., Naito, Y. “Physical conditions of the interstellar medium in star-forming galaxies at  $z \sim 1.5$ ”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **67**, id.80 (22pp)
- [7] Taniguchi, Y., Shimasaku, K. et al. 2015, “The Subaru COSMOS 20: Subaru optical imaging of the HST COSMOS field with 20 filters”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **67**, id.104 (14pp)

#### (b) 2016/1 - 3 に出版されたもの

- [8] Jiang, L., Finlator, K., Cohen, S. H., Egami, E., Windhorst, R. A., Fan, X., Dave, R., Kashikawa, N., Mechtley, M., Ouchi, M., Shimasaku, K., Clement, B. 2016, “Physical Properties of Spectroscopically Confirmed Galaxies at  $z \geq 6$ . III. Stellar Populations from SED Modeling with Secure Ly $\alpha$  Emission and Redshifts”, *Astrophys. J.*, **816**, id.16 (18pp)
- [9] Treu, T., Brammer, G., Diego, J. M., Grillo, C., Kelly, P. L., Oguri, M., Rodney, S. A., Rosati, P., Sharon, K., Zitrin, A., Balestra, I., Bradač, M., Broadhurst, T., Caminha, G. B., Halkola, A., Hoag, A., Ishigaki, M., Johnson, T. L., Karman, W., Kawamata, R., Mercurio, A., Schmidt, K. B., Strolger, L. G., Suyu, S. H., Filippenko, A. V., Foley, R. J., Jha, S. W., Patel, B. 2016, “”Refsdal” Meets Popper: Comparing Predictions of the Re-appearance of the Multiply Imaged Supernova Behind MACSJ1149.5+2223”, *Astrophys. J.*, **817**, id.60 (25pp)
- [10] Kawamata, R., Oguri, M., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Ouchi, M. 2016, “Precise Strong Lensing Mass Modeling of Four Hubble Frontier Field Clusters and a Sample of Magnified High-redshift Galaxies”, *Astrophys. J.*, **819**, id.114 (26pp)
- [11] Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M. 2016, “Statistical properties of diffuse Ly $\alpha$  haloes around star-forming galaxies at  $z \sim 2$ ”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **457**, 2318–2330.

#### (c) 2016/3 月時点で印刷中または投稿中のもの

- [12] Harikane, Y., Shimasaku, K. et al. 2016, “Evolution of Stellar-to-Halo Mass Ratio at  $z=0-7$  Identified by Clustering Analysis with the Hubble Legacy Imaging and Early Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey Data”, *ApJ*, in press.
- [13] Konno, A., Ouchi, M., Nakajima, K., Duval, F., Kusakabe, H., Ono, Y., Shimasaku, K. 2016,



“Bright and Faint Ends of Ly $\alpha$  Luminosity Functions at  $z = 2$  Determined by the Subaru Survey: Implications for AGN, Magnification Bias, and ISM HI Evolution”, *Astrophys. J.*, in press.

- [14] Kuncarayakti, H., Anderson, J.P., Hamuy, M., Nomoto, K., Galbany, L, Doi, M. 2016, “Evolving into a remnant: optical observations of SN 1978K at three decades”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **458**, pp.2063-2073

(学位論文)

- [15] 日下部晴香 “The Star Formation Activity and Its Diversity of Low-Mass Galaxies at Cosmic Noon” (修士論文)
- [16] Jiang Jian “Studying Early-Phase Type Ia Supernovae with Wide-Field Surveys” (修士論文)
- [17] 橋場康人 “An Observational Study of the Origin of Spiral Structures with High Resolution Imaging of Nearby Spiral Galaxies” (博士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [18] Shimasaku, K: “Updates from High- $z$  WG”: Subaru Hyper Suprime-Cam Survey Collaboration Meeting, 2016/1/13–15, Taipei (Taiwan)
- [19] H. Kusakabe, K. Shimasaku, I. Shimizu. 2015, “UV escape fraction and dust distribution of star forming galaxies at  $z = 0 - 3$ : a new dust attenuation model”: The 29th International Astronomical Union General Assembly, Honolulu, Hawaii, 2015/08/10–17

(国内会議)

一般講演

- [20] 嶋作一大: “Ly $\alpha$  Emitters”, 系外銀河 ISM 研究会, 国立天文台, 2015/5/11–12
- [21] 後藤亮介他: “極度に青い銀河の研究”, 第 2 回銀河進化研究会, 口頭発表, 2015/06/03–05, 名古屋大学, 愛知県
- [22] 日下部晴香他: “A Novel Method for Selecting Secondary Starburst Galaxies and Its Application to  $z \sim 2$  LAEs”, 第 2 回銀河進化研究会, 口頭発表, 2015/06/03–05, 名古屋大学, 愛知県
- [23] 日下部晴香他: “ $z = 0 - 3$  の星形成銀河のダスト分布と紫外光脱出率”, 銀河・銀河間物質に関する観測・理論合同ミニワークショップ, 口頭発表, 2015/6/10–11, 筑波大学, 茨城県
- [24] 日下部晴香他: “clustering と SED fit でみる LAEs の多様性”, 科研費基盤 B 「すばる HSC 観測と宇宙再電離大規模シミュレーションによる電離度マップ描画」銀河進化研究会, 口頭発表, 2015/11/25–27, 大阪大学, 大阪府

- [25] 日下部晴香他: “Stellar population and dust properties of optically selected galaxies”, ALMA workshop: “ALMA deep surveys on GOODS-S and beyond”, 口頭発表, 2015/12/15–16, 国立天文台, 東京都

- [26] 岡村拓他: “ $z \sim 4$  の星形成銀河の銀河サイズとダークハロー質量”, 第 2 回銀河進化研究会, 口頭発表, 2015/06/03–05, 名古屋大学, 愛知県

(学会発表)

日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学 (2015/09/09–11)

- [27] 川俣良太, 大栗真宗, 石垣真史 (東京大学): 4 つの Hubble Frontier Fields 銀河団の質量分布モデルの構築, X25b
- [28] 日下部晴香, 嶋作一大, 清水一紘 (大阪大学):  $z \sim 0 - 3$  の星形成銀河のダストジオメトリー: 新しい減光モデル, X30a
- [29] 日下部晴香, 嶋作一大, 中島王彦 (ジュネーブ天文台), 橋本拓也 (リヨン天文台), 後藤亮介, 大内正己 (宇宙線研究所), 小野宜昭 (宇宙線研究所): 遠方銀河の星形成史: Second (or more) star-burst の銀河を調べる手法, X39b
- [30] 岡村拓, 嶋作一大, 川俣良太:  $z \sim 4$  における銀河サイズとダークハローの関係, X23b

< 学術講演 >

(国際会議)

ポスター発表

- [31] Doi, M., Kokubo, M. et al., “The first trial of transit observations with a very low resolution slit spectroscopy with LISS”: Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III, 2016/2/32–24, Ishigaki-shi (Japan)

(学会発表)

日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学 (2015/09/09–11)

- [32] 小久保充, 橋場康人, 土居守 (東京大学) 他: 可視光ファブリ・ペロー分光撮像装置 LISS の開発: 西はりま天文台 2.0m なゆた望遠鏡への搭載, V216b

(学会発表)

日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学 (2015/09/09–11)

- [33] 酒向重行, 土居守 (東京大学) 他: 木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の開発 基本設計の完了, V207b
- [34] 大澤亮, 酒向重行, 土居守 (東京大学) 他: 木曾超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e のバックエンドデータ転送システムの設計と評価, V208b

- [35] 菊池勇輝, 酒向重行, 土居 守 (東京大学) 他: 木曾超  
広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e のイメージセンサ  
評価試験, V209a

日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京  
(2016/03/14-17)

- [36] 菊池勇輝, 酒向重行, 土居 守 (東京大学) 他: 木曾超  
広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e プロトタイプ機  
の性能評価, V240a

- [37] 大澤亮, 酒向重行, 土居 守 (東京大学) 他: 木曾超広  
視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の開発 — Tomo-e  
プロトタイプ機の開発および試験観測の報告, V241a

(学位論文)

- [38] 菊池勇輝 “高感度 CMOS イメージセンサの性能評価  
及び木曾超広視野高速カメラ試作機の開発 (修士論文)

## 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)

### 4.1 山本 研究室

#### 【星・惑星系形成】

恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観測・理論両面から活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。本研究室では、銀河系および系外銀河における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によって研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成される。星間ガスの集まり（星間雲）の中で最も密度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系が形成される現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在している。これまでの研究で、それらの組成は星間分子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることがわかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

#### 【なぜ電波か】

星間分子雲の温度はおおよそ 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。

#### 【ALMA（アルマ）の本格的稼働】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)A は、日本、北米、欧州の共同で、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に建設された 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ある。2011 年 10 月から運用が始まっており、我々のグループでも以下に述べるように成果が出つつある。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進させつつある。

#### 【テラヘルツ帯観測の開拓】

テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そ

こには  $C^+$ ,  $N^+$  などの原子スペクトル線の他、 $CH$ ,  $H_2D^+$ ,  $HD_2^+$  などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。本研究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指しており、2011 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ分子観測を進めている。

#### 4.1.1 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、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。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。この点についても、ALMA を用いた本研究室の研究により理解が大きく進みつつある。角運動量を保ちつつ回転落下するガスは、遠心力バリア（近日点）より内側には入り込めないため、その近傍で後から落下するガスと衝突して弱い降着衝撃波が発生する。その様子が ALMA で捉えられつつある。さらに遠心力バリア近傍を境として、ガスの分子組成が劇的に変化することが明らかになってきている。これらの成果は、原始惑星系円盤への物質進化を理解する上で非常に重要な一歩である。本研究室では、これらの点を中心に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開している。

#### 【TMC-1A における遠心力バリアの同定】

TMC-1A はおうし座にある進化の進んだ (Class I) WCCC 天体である。この天体における分子分布を ALMA を用いて 0.5" の分解能で調べた。CS は主に回転落下エンベロープに存在し、SO はその遠心力バリア近傍に存在することが確かめられた。これは、Class 0/I 段階にある WCCC 天体 L1527 における特徴と非常に類似している。SO は遠心力バリア近傍で星間塵から蒸発してきたものと見られる。回転落下エンベロープの速度構造の解析から、遠心力バリアの半径が 50 AU、中心星の質量が 0.2-0.3 太陽質量であることがわかった。一方で、進化が進んだ結果として回転落下する分子ガスの非対称分布が顕著に見られた。本研究により、Class I 天体においても遠心

## 星間分子雲から惑星系への物質進化

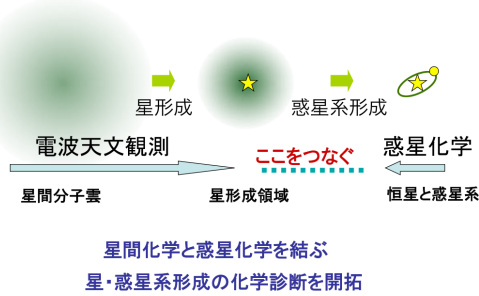


図 4.1: A schematic illustration of our goal

力バリアが力学構造に重要な影響を与えており、また、その近傍で劇的な分子組成の変化が起きていることが示された。

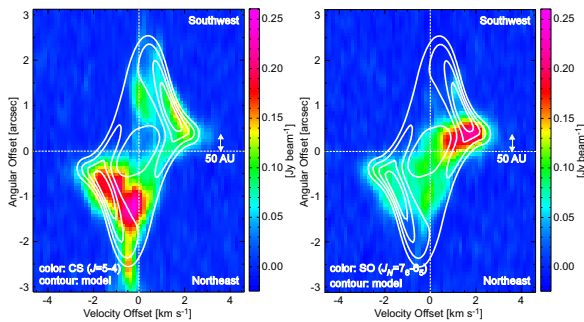


図 4.2: Position-velocity diagrams of CS and SO observed toward TMC-1A. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while CS reside in the envelope.

## 【低質量原始星 IRAS 16293-2422】

IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星の連星 (Source A, B) であり、複雑な飽和有機分子を多く含む hot corino 天体の代表例として活発な研究対象となっている。ALMA のアーカイブデータの解析の結果、Source A において、エンベロープガスの回転落下運動が明瞭に捉えられた。その速度構造は回転しながら落下するガス円盤のモデルで再現された。また分子種によって捉えられる成分が異なり、エンベロープからその内側の原始星円盤にかけて劇的な分子組成の変化が見られた (図 4.3)。特に、遠心力バリア付近に  $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{HCOOCH}_3$  などの有機分子が局在していることがわかった。 $\text{H}_2\text{CS}$  の観測から、この位置でガスの温度が高くなっていることが示され、力学構造と分子組成の関連性が示唆

される。

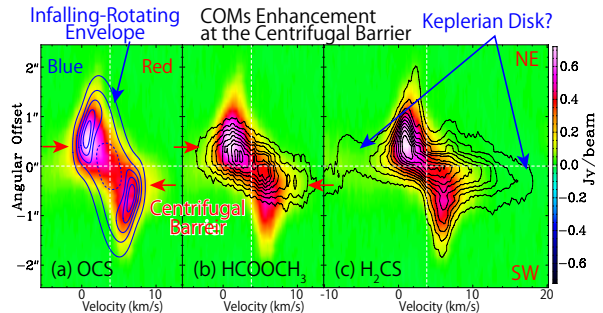


図 4.3: PV diagrams of OCS ( $J=19-18$ ; color),  $\text{HCOOCH}_3$  ( $19_{9,10}-19_{8,11}$  E; contours in panel b),  $\text{H}_2\text{CS}$  ( $7_{0,7}-6_{0,6}$ ; contours in panel c) along the line along which the disk/envelope system is extended. Blue contours in panel (a) represent the result of an infalling-rotating envelope model.

## 【低質量原始星 L483】

L483 は低質量 Class 0 原始星を擁する原始星コアである。この天体の数 1000 AU スケールでの分子組成は、炭素鎖分子を豊富に含む WCCC 天体の特徴を示すことが知られている。ALMA を用いて  $0.5''$  (100 AU) の分解能で観測した結果、炭素鎖分子の一種である CCH や  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  の分布が数 100 AU スケールでも見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。一方で、原始星近傍の数 10 AU スケールの領域には、 $\text{HCOOCH}_3$  や  $\text{NH}_2\text{CHO}$  などの大型飽和有機分子が検出された。これらの分子は hot corino 天体に特有のものであることから、この天体は hot corino の性質を内部に併せ持つ WCCC 天体と言える。このような中間的な分子組成を持つ天体の存在は数 1000 AU スケールでは示唆されていたが、本研究により高分解能観測で初めて捉えられた。

## 【低質量原始星 B335】

B335 は低質量 Class 0 天体であり、また、Bok Globule に存在する孤立した星形成領域としても知られる。本研究では、この天体に対して、ALMA による高分解能観測 ( $0.5''$ ) を行った。その結果、 $\text{HCOOCH}_3$  や  $\text{CH}_3\text{CHO}$  などの多くの大型飽和有機分子を検出し、B335 が hot corino 天体であることを初めて示した。大型飽和有機分子は原始星近傍の 10 AU 程度のコンパクトな領域に存在することが速度幅の解析から明らかになった。この天体ではエンベロープの回転運動は明瞭ではなく、原始星近傍まで落下運動を続けていると見られる。今後各分子を詳細に解析することで、原始星天体の力学構造の理解につながると考えられる。

## 【原始星 L1527 における CCH および CCD】

おうし座分子雲にある原始星 L1527 に対して CCH および CCD 分子を ALMA を用いて観測した。その結果、CCH が多く存在する原始星近傍のエンベロー

プとその外側とで CCD/CCH 比を比べると、原始星近傍で D/H 比が低いことがわかった。L1527 は WCCC 天体であり、原始星近傍ではダストから蒸発した  $\text{CH}_4$  が CCH 分子を作ると考えられている。従って、 $\text{CH}_4$  の D/H 比が CCD/CCH 比に反映されていると考えられ、一方外側では星なしコア時代の CCD/CCH 比が残っていると考えられる。このように D/H 比から、原始星コア内部における分子形成の起源を多読することができることを示した。

**【星形成領域での c- $\text{C}_3\text{H}_2$  分子の  $^{13}\text{C}$  同位体比異常】**  
IRAM 30 m 望遠鏡を用いた進化段階の異なる 11 の星形成領域に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測 (ASAI プロジェクト) のデータを用いて、c- $\text{C}_3\text{H}_2$  分子とその  $^{13}\text{C}$  同位体種の観測を行った。その結果、星なしコア TMC-1 および 2 つの原始星 B1, IRAS4A において、c- $\text{C}_3\text{H}_2$  分子とその  $^{13}\text{C}$  同位体の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が元素の同位体比 (60-70) より高く、さらに 2 種類の  $^{13}\text{C}$  同位体の存在量が異なることを明らかにした。これらの異常は低質量原始星 L1527 で確認されていたが、今回の結果からそれらが天体によらず見られることがわかった。

**【NGC 2264 の ALMA によるラインサーベイ】**  
非常に若い進化段階の大質量原始星 NGC 2264 に対して、336 – 359 GHz 帯のラインサーベイ観測を ALMA を用いて行なった。原始星近傍のスペクトルは高励起の分子輝線が卓越しており、ASTE 望遠鏡による同一周波数帯のラインサーベイ観測の結果と大きく異なっていた。特に、ASTE で検出されていた高励起の  $\text{CH}_3\text{OH}$  輝線は、原始星にも付随しており、ホットコアを形成していることがわかった。さらに、連続波の観測から、この原始星が連星系であることが示された。

**【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】**  
hot corino 天体と WCCC 天体に代表される低質量原始星天体の化学的多様性を生み出す原因として、星間ガスが収縮して原始星が誕生するまでの「星なしコア」時代の時間の長短が考えられている。そこで、同様に「星なしコア」時代の時間を反映すると考えられる重水素濃縮度を 37 の低質量原始星天体で統計的に比較した。その結果、重水素濃縮度と天体の化学組成の間には相関が示唆され、上記の仮説を支持する。さらに、原始星天体の化学組成はそれが分子雲内のどの位置にあるかに依存している傾向が見られ、「星なしコア」の長短が周囲の星形成などの環境効果を反映している可能性がある。

#### **【TMC-1 における大型有機分子の検出】**

飽和有機分子の生成メカニズムについて理解を深めるため、星なしコア TMC-1 の観測研究を行っている。観測により、 $\text{CH}_3\text{CHO}$  が星間塵上で生成される  $\text{CH}_3\text{OH}$  とよく似た輝線プロファイルを示し、 $\text{CH}_3\text{OH}$  と同様に星間塵上で生成されることを示唆する結果を得た。一方、 $\text{H}_2\text{CCO}$ 、c- $\text{C}_3\text{H}_2\text{O}$  は気相反応で生成される炭素鎖分子や CS とよく似たプロファイルを示し、気相反応による生成が示唆された。また、 $\text{H}_2\text{CO}$  はその中間的なプロファイルであり、気

相と星間塵上の両方の反応の寄与が考えられる。また、TMC-1 近傍の  $\text{CH}_3\text{OH}$  ピーク位置で、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ 、 $\text{HCOOCH}_3$ 、 $(\text{CH}_3)_2\text{O}$  のスペクトルを検出した。これらの結果は、星形成の初期の段階から複雑な有機分子は生成されており、その生成メカニズムの理解には気相と星間塵上の両方の反応を精査する必要があることを示す。

#### **【おおかみ座領域における OH 18 cm 線観測】**

おおかみ座分子雲の Lupus-1 は特徴的な直線構造を形成している。これに垂直なストリップに対して OH 18 cm 線の観測を行った。この遷移は 4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) からなり、最近の我々の研究から、この 4 本の強度からガスの運動温度が決定できることが示されている。観測の結果、Lupus-1 では、直線構造に垂直な方向 (南西から北東) に温度勾配および速度勾配が見られ、北東で線幅が大きくなることがわかった。以上の結果は、Lupus-1 が北東にある OB アソシエーションと相互作用をもつ可能性を示唆している。

#### **【OH 18 cm 線の強度異常 (1702 MHz 吸収線)】**

おうし座分子雲の HCL2 領域は北東部に特徴的な直線構造をもつ。この直線構造に対して OH 18 cm 線の観測を行ったところ、1720 MHz 線の吸収線が検出された。この吸収線は、これまで用いてきた LVG 計算では再現することができなかったが、ダストの遠赤外線放射の効果を考慮することで、柱密度が大きい ( $> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) 場合にある程度再現することができた。即ち、1720 MHz の吸収線は直線構造の密度の高い構造を反映していると考えられ、直線構造の起源、即ち、分子雲形成過程に関連している可能性がある。

### 4.1.2 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子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、中心核活動性と分子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 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。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明らかにすることが、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、本研究室では以下の研究を推進している。

#### **【M83 のバーと渦状腕の化学組成】**

近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕とバー領域に対して、ALMA を用いて巨大分子雲のサイズに相当する  $\sim 30$  pc の空間分解能で観測を行ない、それぞれの領域で

8種の分子の分布を明らかにした(図4.4)。CH<sub>3</sub>OHの組成は、渦状腕よりもバー領域で高い傾向が見られた。その理由としてバー領域で発生した衝撃波によりダスト上のCH<sub>3</sub>OHが蒸発したことが考えられる。これは分子雲の化学組成が大局的なガスの運動を反映することを示唆する重要な結果である。

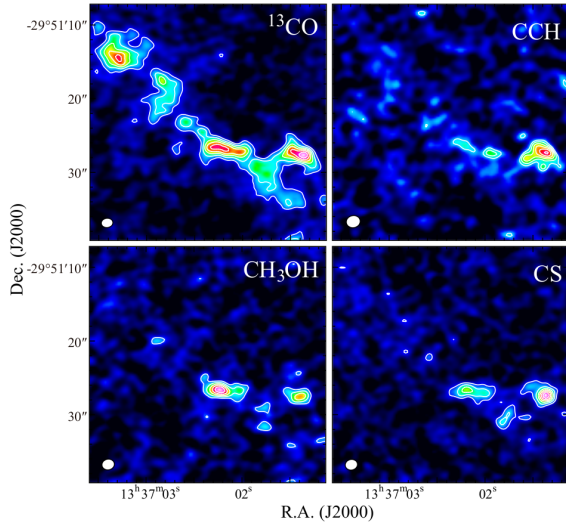


図 4.4: Distributions of <sup>13</sup>CO, CCH, CH<sub>3</sub>OH, and CS observed toward the bar region in M83 with ALMA.

#### 【NGC 3627 における化学組成】

近傍銀河 NGC 3627 の渦状腕とバーエンド領域に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3mm 帯のラインサーベイ観測を実施した。1 kpc スケールでの化学組成には領域ごとの違いが見られないが、星形成が活発なバーエンドの速度成分では化学組成にわずかな違いが見られた。その原因を明らかにするために、ALMA を用いて 60 pc スケールの空間分解能でのマッピング観測を行なっている。現在、<sup>13</sup>CO、C<sup>18</sup>O、CS の観測は完了しており、詳細な解析が進行中である。

#### 【IC10 におけるラインサーベイ】

重元素量の低い環境にある分子雲では、太陽系近傍とは質的に異なる化学組成が見られると考えられる。低重元素量の銀河である IC10 の化学組成を調べるため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm 帯のラインサーベイ観測した。得られたスペクトル線パターンは同様に重元素量の低い大マゼラン雲の星間分子雲でのスペクトル線パターンと類似しており(図4.5)、CCH分子が豊富でCH<sub>3</sub>OHが少ないという特徴が見られた。これらの特徴は、いずれも星間塵の存在量が少ないため光解離領域が分子雲内部まで広がることに起因していると思われる。このことから、これらの化学的特徴は低重元素量銀河に共通する性質であると考えられる。

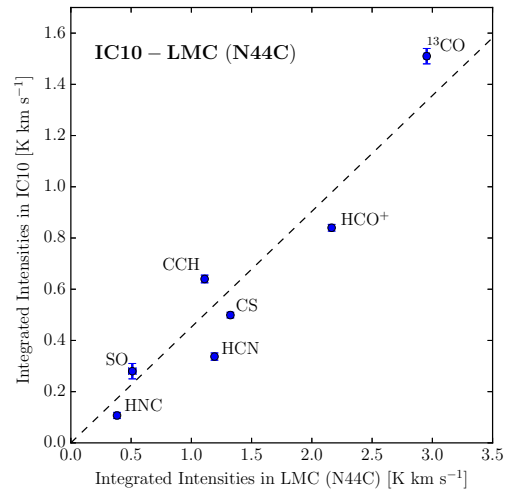


図 4.5: Correlation plot of integrated intensities between IC 10 and N44C (LMC).

#### 【NGC6822 におけるラインサーベイ】

IC10 や大マゼラン雲で見られた化学組成の特徴が低重元素量の銀河で一般的なものかさらに検証するため、低重元素量の銀河 NGC6822 に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm と 2 mm 帯のラインサーベイ観測を行った。その結果、NGC6822 の化学組成も IC10 の化学組成と同様の特徴を示すことがわかった。この観測により、低重元素量銀河に共通の化学的特徴がはっきりと同定され、今後、遠方銀河を含む低重元素量銀河における化学組成研究の重要な指針となると考える。

#### 【低重元素量の矮小銀河における CO サーベイ】

上述のように、低重元素量環境に特徴的な化学組成が明らかになりつつある。新たな観測対象を開拓するため、ASTE 10 m 望遠鏡を用い、9 個の近傍低重元素量銀河で CO( $J=3-2$ ) 輝線を観測した。結果として、6 つの銀河で輝線の検出に成功した。これらは今後、高感度の観測で化学組成を調べるための良い対象として期待できる。

#### 【巨大分子雲 W51 のマッピングラインサーベイ】

銀河系内の巨大分子雲 W51 を Mopra 22m 望遠鏡で広域マッピング観測 (40 pc×50 pc) を行なった。分子雲全体で平均したスペクトルは、Hot Core でのスペクトルとは大きく異なり、M51 などの系外銀河の渦状腕で観測されるスペクトルと酷似していることがわかった。これによりは、系外銀河で観測されるスペクトルは、空間的に広がった分子ガス成分が主要な寄与をしていることが示された。

### 4.1.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器（ヘテロダイナミックサ）の開発が不可欠である。そのための最も有力なデバイスが超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ（HEB）ミクサ素子である。HEB ミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」（中間周波信号）に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブ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。本研究室では、主に NbTiN や NbN を用いた「格子冷却型」HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。

#### 【ASTE への THz 受信機搭載実験】

2015年9月下旬から10月下旬の約1ヶ月間、チリ・アタカマ砂漠（標高5000m）のASTE 10m望遠鏡に、0.9THzと1.5THzを観測するHEBミクサを利用した受信機の搭載実験を行った。前回の搭載では、基準周波数信号（LO）をジュワー側面から準光学的に入射していたため、光学系調整の難しさとジュワーの振動によるLO強度の不安定性が問題であった。そこで今回、LOの最終通倍器をカートリッジ内に設置した新たな受信機を開発した。搭載した受信機は良好に動作し、降水量が0.5mmでの0.9THzにおける大気込みの受信機雑音は約3200Kであった。降水量が1mm以下の条件で観測できたのは7日間のみであった。0.9THzについては、連続波による月と木星の観測とOrion KLの $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ の分光観測に成功した。木星の観測から求めた主ビーム能率は20%程度であった。さらに、4天体の中小質量星原始星において $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ を検出した。1.5THzについては大気の状態が悪く、R-Skyの測定で受信機の性能を確認できなかった。



図 4.6: THz experiment at ASTE

【ASTE 望遠鏡を用いた  $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  輝線観測】  
本研究室で開発した THz 受信機を用いて、低質量原

始星領域 (RCrA IRS7B, NGC1333 IRAS2A, OMC2 FIR4) の  $^{13}\text{CO}(J=8-7, 881\text{ GHz})$  の輝線観測を行った。RCrA IRS7B における  $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  輝線は、その速度構造から RCrA からの紫外線によって影響を受けている温かい領域をトレースしており、その分布を探るよいプローブとなることわかった。また、NGC1333IRAS2A においては、原始星近傍の密度の高い領域から放射されているようであることが観測から示唆された。 $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  輝線が原始星周辺の高温ガスのよいトレーサとなることを示し、 $^{13}\text{CO}$  の高励起線観測の意味を示すことができた。

#### 【Al 緩衝層を使った HEB ミクサーの評価】

HEB ミクサーの広帯域化を目指して、基板と超伝導薄膜の間に AlN の緩衝層を挟んだ素子を作成し、性能評価を行った。AlN 薄膜は基板と超伝導薄膜のマッチングを改善すると考えられており、これにより超伝導薄膜の厚みを従来の 10.8 nm から 8 nm 程度まで薄くすることができた。薄膜化によって、熱電子の格子冷却の効率が向上するため、HEB ミクサーの広帯域化につながる可能性がある。これまでのところ雑音温度 690 K を確認し、今後は帯域幅の測定を目指している。

#### 【導波路型 1.9THz 帯 HEB ミクサーの開発】

有限要素法による3次元高周波電磁界シミュレータと解析モデルを用いて、E/H面の対称性やサイドローブレベルを改良したダイアゴナルホーンを設計し、これを実装したミクサマウントを切削加工した。マウントはレーザー顕微鏡で計測しながらアセンブリする。また、電子ビーム描画パターンや光露光マスクも製作し、超伝導 NbTiN 細線を集積した HEB ミクサ素子チップの製作を開始した。この研究は大阪府立大学の前澤裕之准教授との共同研究である。

## 4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究

### 4.2.1 高赤方偏移銀河の観測研究

#### SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 2 arcmin<sup>2</sup> deep survey

ALMA を使い、SXDF-UDS-CANDELS の 2 平方分領域における 1.1mm 帯での高解像度 (0".5) deep imaging 観測を行った。観測は ALMA cycle 1 の highest priority program として採択されたが、cycle 2 に carry over され、2014 年の 7 月 17 日-18 日にかけて、アンテナ 30 台を使って実施された。ベースライン長は 20 m から 650 m の範囲をカバーし、可降水量 (PWV) は 0.42-0.55mm という非常によい大気条件の下で観測が行われた。達成された  $1\sigma$  感度は最も深いところで  $55\mu\text{Jy}$  であり、これは、赤外線光度

$L_{\text{IR}} \sim 6 \times 10^{11} L_{\odot}$  (ただしダスト温度  $T_{\text{dust}} = 40$  K の場合. 温度が高くなるにつれて対応する赤外線光度での検出限界は高くなる) あるいは星生成率  $\text{SFR} \sim 100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  の天体があれば  $z \sim 10$  まで検出可能な感度となっている. この結果,  $4\sigma$  以上の continuum source が合計 23 個検出された. また, 観測周波数範囲内で, 周波数幅 60 MHz での slice(channel map) を作成し, “3 次元 cube”(空間 2 次元+周波数方向 (redshift 方向)1 次元) として, 3 次元空間内で閉じた構造を同定する clump find algorithm を適用した解析を行ったところ, 複数の輝線銀河候補天体が検出された.

観測した領域は, SXDF-UDS-CANDELS や VLT/HAWK-I による深い撮像 (HUGS), Spitzer(SpUDS, SEDS), および JVLAA(K-band および C-band) の深い撮像データがあるため, ALMA で検出された天体の対応天体を同定し, その性質を調べる研究が進められ, 山口裕貴の修士論文としてまとめられると共に, PASJ 誌へ論文を投稿した (Yamaguchi et al. submitted to PASJ). また, この観測領域内には, すばる望遠鏡 + MOIRCS(narrow band filter) による  $\text{H}\alpha$  輝線銀河や [OII] 輝線銀河が多数検出されており, こうした  $z \sim 2$  の輝線銀河種族との対応関係についても解析が進められ, 論文が ApJ letters 誌にて出版された (Tadaki et al. 2015). この領域内で検出されたサブミリ波銀河の銀河計数 (Hatsukade et al. 2016), K-band 選択の銀河に対する stacking 解析 (Wang et al., submitted to ApJL) などの論文が出版/投稿された.

clump find により検出された輝線銀河候補のうち, 最も significance の高いものについては, 銀河と考えると矛盾のない線幅を持ち ( $\text{FWHM} \sim 100 \text{ km s}^{-1}$ ), 近/中間赤外線域で顕著な対応天体が存在しないことから,  $z = 5.955$  の [CII] 輝線の可能性がある. この場合, 観測された [CII] 輝線の光度は  $L_{\text{[CII]}} = 5.1 \times 10^8 L_{\odot}$  に及ぶ. 波長 1mm 付近で ALMA を使った掃天観測を行うと, 検出される輝線銀河としては low redshift での CO 輝線銀河よりも  $z \sim 6$  の [CII] 輝線銀河の割合が高くなるとする経験的予測や理論的な検討 (たとえば Geach & Papadopoulos 2012, ApJ, 757, 156) とも整合している可能性があり, ALMA を含めた follow up が提案されている. [34][44][41][42][15]

#### 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 ALMA を使った高分解能追観測

SSA22 はライマンブレイク銀河やライマン  $\alpha$  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. ALMA を使った大規模なフォローアップ観測が実施され,  $z = 3$  の  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河を指標とした銀河の密集度 (環境) をパラメーター化して大質量爆発的星生成銀河やそでの活動的巨大ブラックホールの発現

頻度を定量的に比較し, 高密度環境化では, サブミリ波銀河や活動銀河核の存在量が ( $\text{Ly}\alpha$  銀河でトレースされるような, 質量の軽い銀河の個数の増加で期待される増え方よりも) 非線形に増加していること, すなわち, 銀河の環境効果によりこうした激しい活動性を伴う銀河の生成が加速されること, を明快に示した. [44][41][42][17]

#### 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

##### ALMA を使った NGC1097 における巨大ブラックホールの質量測定

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 (super massive black hole = SMBH) が存在すると考えられている. その質量の測定方法は, 水メーザーの運動を VLBI で測定する方法, 星の速度分散を測定する方法, 電離ガスの運動を測定する方法, などが知られているが, それぞれ適用できる銀河の性質に偏りがある. 我々は, 従来の方法では SMBH の質量測定があまり測定されていなかった, 晩期型銀河での SMBH 質量測定を行う方法として, cold molecular gas のトレーサーである分子輝線の運動を高い解像度で調べる手法に着目し, ALMA cycle 0 で観測された活動銀河 NGC1097 での HCN(1-0) および  $\text{HCO}^+(1-0)$  輝線の高解像度データを使って, SMBH 質量測定を試みた. ショックやアウトフローなどの影響を受けやすい電離ガスと異なり, 低温の分子ガスは, 銀河中心領域のポテンシャルをより忠実に反映した運動を示すことが期待される. 星の質量分布としては HST による I-band の撮像データを利用し, これに様々な SMBH 質量を加えた時に期待される速度場を計算して, 分子輝線で観測された速度場と比較, これを最もよく再現する SMBH 質量を推定する. この結果, SMBH 質量として  $M_{\text{BH}} = (1.40^{+0.27}_{-0.32}) \times 10^8 M_{\odot}$  (このときの I-band 出の mass/luminosity 比は  $5.14^{+0.03}_{-0.04}$ ) が得られた. この結果は, 近傍の晩期型銀河で知られている SMBH 質量とバルジの速度分散との関係と整合していることが分かった. 今後, ALMA の感度と解像度が向上していくことにより, より多数の銀河で, より信頼性の高い SMBH 測定が可能になると期待される. 以上の成果は, Onishi et al. 2015 として, ApJ 誌に掲載された. [9]

##### ALMA を用いた近傍高光度活動銀河核 NGC 7469 周辺の高密度分子ガス観測

ALMA の Cycle 1 観測で得られた近傍の高光度 1 型セイファート銀河 (AGN) NGC 7469 における高密度ガストレーサー輝線データの解析を行った. NGC 7469 は, 近傍宇宙では稀な 1 型 AGN であり, かつ高光度 AGN でもある. これは, 我々の先行研究で調査した低光度 1 型 AGN である NGC 1097 の観



測結果と比較する上で絶好のターゲットである。また、NGC 7469 は高光度かつ高 Eddington 比を持つ天体でもあるので、得られた結果は高赤方偏移のクエーサーを探索する際のテンプレートとしても重要である。今回 ALMA で得た HCN(4-3), HCO<sup>+</sup>(4-3), CS(7-6) 輝線放射の空間分布からは、これらの放射が空間的に強い中心集中を示すことが分かった。具体的には、HCN(4-3) 輝線の場合、観測視野内 (約 6 kpc) のフラックスの 80%以上が中心数百 pc 領域 (circumnuclear disk = CND) から放射されている。また、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3), HCN(4-3)/CS(7-6) 輝線強度比は、CND で 1 以上の値を示すが、CND を取り囲む環状の爆発的星形成領域 (スターバーストリング) では 1 以下の値しか示さなかった。この結果は、これらの強度比が AGN の存在を示す経験的指標になりうると示唆した Izumi et al. (2013) と合致するものである。AGN 環境における HCN 輝線放射の原因として、これまで X 線による特異な化学組成の実現 (X-ray dominated region = XDR) が挙げられてきた。しかし、我々の観測結果では、高光度 AGN の NGC 7469 における輝線比は、低光度 AGN の NGC 1097 における比よりも有意に小さかった。約 1000 倍も異なる両者の X 線光度を考慮すると、AGN 環境における HCN 輝線放射の増加は、単に X 線による化学組成の変化だけでは説明することが難しい。X 線のような放射過程によるガスの加熱に加えて、AGN からのジェットやアウトフローによる力学的な加熱も、系の物理化学状態を決定する上で重要になると考えられる。以上の成果は、Izumi et al. 2015a として ApJ 誌にて出版された。[14][40]

#### 高密度分子ガス輝線の強度比を用いた銀河中心の熱源診断法の提唱

ALMA の観測成果に基づく Izumi et al. (2013), Izumi et al. (2015, submitted to ApJ) により、AGN 周辺の分子ガス中では、サブミリ波帯の分子輝線比、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3) や HCN(4-3)/CS(7-6) 輝線の強度比が、爆発的星形成銀河に比べて有意に高いという現象 (HCN-enhancement) が報告されている。ただし、これまでの研究では、ごくわずかなサンプル天体の観測に基づく議論が展開されているに過ぎなかった。そこで、我々は、HCN-enhancement 現象をさらに詳しく理解するために、ALMA のアーカイブデータや、文献を詳細に調べることで、サンプル天体数を先行研究より大幅に増やした上で、上述の 2 つの輝線強度比の天体のタイプへの依存性を調べた。その結果、やはり AGN においては HCN-enhancement が発現していることを確認した。たとえば、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3) 強度比は、AGN では 1 以上だが、星形成銀河では 1 以下である。ただし、このような顕著な HCN-enhancement が見られるのは、少なくとも数百 pc スケールの空間分解能が達成されている場合である。電波単一鏡観測の kpc スケールの観測では、この兆候を見出すことは難しい。これは、AGN の活動 (たとえば X 線放射やジェット) が分子ガスに影響を及ぼす範囲が小さいことに起因すると考えられる。また、この HCN-enhancement 現

象が発現する原因に対して知見を得るために、観測された分子輝線強度のモデリングを行なった。ここでは、密度、温度、組成が一様なガス雲を考え、そこでの分子種 (たとえば HCN) の存在量を変化させた際の輻射輸送を RADEX というオープンコードを用いて解くという操作を、様々なパラメータセットに対して行なっている。その結果、AGN で見られるような HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3) 比を再現するためには、HCN 分子の存在量が、通常の分子雲における分子組成と比較して 10 倍以上増加していなければならないことが分かった。これは、AGN の活動に起因して、周囲の分子ガス中に特異な化学組成が実現していることを示すものである。こうした分子化学組成を実現し得るいくつかの化学モデルとの比較を行った結果、AGN 環境において分子ガスが高温に加熱されることが、HCN 分子存在量の増加を説明するもっとも重要な要因であることが示唆された。以上の成果は、Izumi et al. 2015b として ApJ 誌にて出版された。[18][40]

#### ALMA calibrator sources での分子吸収線探索

遠方クエーサーを背景光源とする分子吸収線系は、銀河系内から遠方まであらゆる星間物質の化学的性質や進化を探索する上で極めて重要な観測対象であるが、その半面、強い背景光源が必要であることから、現在知られている吸収線系の数は極めて限られる。本研究では、新たな分子吸収線系を探索する対象として、過去に ALMA で観測されている膨大な数のキャリブレーション天体に着目した。ALMA アーカイブデータに含まれるキャリブレーション天体 36 個のスペクトル解析を行った結果、4 天体において銀河系内の星間物質由来の分子吸収線を検出することに成功し、このうち 3 天体は先行研究のない新たな銀河系内吸収線系であることが明らかになった。また 2 天体においては、過去に 2 例しか報告のない銀河系内の希薄なガスにおける HCO(ホルミル・ラジカル) の吸収線を検出したことに加え、HCO が PDR(光解離領域) のトレーサーであることから、観測された希薄なガスが PDR 的な環境下にあることが示唆された。さらに、HCO を含む 10 種もの分子吸収線を検出した新たな吸収線系 J1717-337 については、炭素同位体比の測定及び検出された速度成分の議論から、吸収を生じているガスまでの距離を約 2.5 kpc 以内と制限することができた。本研究を通して、複数の新たな分子吸収線系の検出に成功したことに加え、銀河系内のガスの化学的性質に関する知見を得られたことから、ALMA のキャリブレーション天体を用いた分子吸収線系探索が有効な手法であることが確かめられた。本研究は Ando et al. 2016 として PASJ 誌にて出版された。[19][40]

### 4.2.3 ミリ波サブミリ波観測装置の開発

#### ASTE 望遠鏡搭載ミリ波サブミリ波超伝導遷移端カメラの試験観測とその評価

我々は、初期宇宙におけるダストに覆われた爆発的星形成銀河(サブミリ波銀河)を広域し、さらにそのミリ波/サブミリ波でのフラックス比(カラー)を使った赤方偏移への制限を得るため、270GHz帯と350GHz帯の2波長同時撮像が可能なミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。UC Berkeley等との共同研究により開発した超伝導遷移端センサー( TES) ボロメーターを使ったカメラであり、これまでの試験観測の結果を踏まえた改良を進めてきた。2014年3月-4月に2回目の commissioning 観測を実施し、その解析結果を踏まえ、より改良した TES アレイの製作とそれを踏まえた2016年3月-7月期におけるASTE望遠鏡への再搭載/Commissioning and Science Verification (CSV) キャンペーンの実施に向け、LCボード部の新規設計や、実験室での評価試験、観測計画の策定などを担当して進めた。2016年3月から実際に搭載試験に着手している。[43]

#### ASTE 望遠鏡搭載ミリ波サブミリ波帯超広帯域中分散分光システム DESHIMA の開発

到来する電磁波を波として検出するヘテロダイナ分光が効率的に利用できる電波からミリ波サブミリ波帯では、従来、高分散分光は得意である一方で、中～低分散であるが非常に幅広い波長域(オクターブ)にわたるような分光というのは不得手な分野であった。一方で、上述の TES カメラなど、直接検出器を周波数方向に並べ、分光分散素子と組み合わせ、中～低分散ながら超広帯域の分光計を実現しようとする動きが活発化している。このような中、デルフト工科大学・SRON が提唱した on-chip 型超広帯域分光システム DESHIMA は、325GHz から 905GHz という帯域幅を one-shot で分光(波長分解能  $R \equiv \lambda/\Delta\lambda = 500 - 1000$ )する極めて野心的な specification であり、ALMA 時代において、ALMA と相補的なパラメータスペースを開拓する上で鍵となる次世代装置と期待されている。今年度は、読み出し系ソフトウェアの開発を引き続き進めると共に、ASTE 望遠鏡に搭載する上で必須となる冷却系の配管(ヘリウム配管)の敷設作業やコンプレッサーの再配置作業を実施し、今後の搭載実施に向けて、準備を進めることができた。[43]

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., “Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1”, *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [2] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., Ceccarelli, C., Bachiller, R., Caux, E., Vastel, C., & Yamamoto, S., “Abundance Anomaly

of the  $^{13}\text{C}$  Isotopic Species of  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  in the Low-Mass Star Formation Region L1527 ”, *ApJ*, 807, 66 (2015).

- [3] Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Furuya, R., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., and Yamamoto, S. “Spectral Line Survey toward the Young Massive Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands”, *Astrophys. J.* 809, 162 (2015).
- [4] Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., and Yamamoto, S., “Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observation of CS”, *Astrophysical Journal*, 812, 59 (2015).
- [5] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Sakai, N., Menten, K. M., Maezawa, H., & Yamamoto, S., “OH 18 cm Transition as a Thermometer for Molecular Clouds ”, *ApJ*, 815, 13 (2015).
- [6] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., and Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud”, *ApJ*, 818, 161 (2016).
- [7] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Ueda, J., and Yamamoto, S., “Molecular Distribution in the Spiral Arm of M51 ”, *ApJ*, 819, 144 (2016).
- [8] Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., and Yamamoto, S., “Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535 ”, *ApJ*, 820, L34 (2016).
- [9] Onishi, K., Iguchi, S., Sheth, K., Kohno, K., “A Measurement of the Black Hole Mass in NGC 1097 Using ALMA”, *The Astrophysical Journal*, 806, id. 39 (2015)
- [10] Fathi, K., Izumi, T., Romeo, A. B., Martín, S., Imanishi, M., Hatziminaoglou, E., Aalto, S., Espada, D., Kohno, K., Krips, M., Matsushita, S., Meier, D. S., Nakai, N., Terashima, Y., “Local Instability Signatures in ALMA Observations of Dense Gas in NGC 7469”, *The Astrophysical Journal Letters*, 806, L34 (2015)
- [11] Matsuda, Y., Nagao, T., Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Tamura, Y., Yamaguchi, Y., Shimizu, I., “The ALMA Patchy Deep Survey: a blind search for [C II] emitters at  $z \sim 4.5$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, p.1141-1145 (2015)
- [12] Tamura, Y., Kawabe, R., Shimajiri, Y., Tsukagoshi, T., Nakajima, Y., Oasa, Y., Wilner, D. J., Chandler, C. J., Saigo, K., Tomida, K., Yun, M. S., Taniguchi, A., Kohno, K., Hatsukade, B., Aretxaga, I., Austermann, J. E., Dickman, R., Ezawa,

- H., Goss, W. M., Hayashi, M., Hughes, D. H., Hiramatsu, M., Inutsuka, S., Ogasawara, R., Ohashi, N., Oshima, T., Scott, K. S., Wilson, G. W., “Extremely Bright Submillimeter Galaxies beyond the Lupus-I Star-forming Region”, *The Astrophysical Journal*, 808, id. 121 (2015)
- [13] Ikarashi, S., Ivison, R. J., Caputi, K. I., Aretxaga, I., Dunlop, J. S., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Izumi, T., Kawabe, R., Kohno, K., Lagos, C. D. P., Motohara, K., Nakanishi, K., Ohta, K., Tamura, Y., Umehata, H., Wilson, G. W., Yabe, K., “Compact Starbursts in  $z \sim 3 - 6$  Submillimeter Galaxies Revealed by ALMA”, *The Astrophysical Journal*, 810, id. 133 (2015)
- [14] Izumi, T., Kohno, K., Aalto, S., Doi, A., Espada, D., Fathi, K., Harada, N., Hatsukade, B., Hattori, T., Hsieh, P.-Y., and 23 co-authors, “ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469”, *The Astrophysical Journal*, 811, id. 39 (2015)
- [15] Tadaki, K., Kohno, K., Kodama, T., Ikarashi, S., Aretxaga, I., Berta, S., Caputi, K. I., Dunlop, J. S., Hatsukade, B., Hayashi, M., and 16 co-authors, “SXDF-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> Deep Survey: A Compact Dusty Star-forming Galaxy at  $z = 2.5$ ”, *The Astrophysical Journal Letters*, 811, L3 (2015)
- [16] Bonato, M., Negrello, M., Cai, Z.-Y., De Zotti, G., Bressan, A., Wada, T., Kohno, K., Maiolino, R., Gruppioni, C., Pozzi, F., Lapi, A., “Predictions for surveys with the SPICA Mid-infrared Instrument”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, p.356-367
- [17] Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., Ivison, R. J., Alexander, D. M., Geach, J. E., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Ikarashi, S., Kato, Y., Izumi, T., Kawabe, R., Kubo, M., Lee, M., Lehmer, B., Makiya, R., Matsuda, Y., Nakanishi, K., Saito, T., Smail, I., Yamada, T., Yamaguchi, Y., “ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a  $z = 3.09$  Protocluster Core”, *The Astrophysical Journal Letters*, 815, L8 (2015)
- [18] Izumi, T., Kohno, K., Aalto, S., Espada, D., Fathi, K., Harada, N., Hatsukade, B., Hsieh, P.-Y., Imanishi, M., Krips, M., Martín, S., Matsushita, S., Meier, D. S., Nakai, N., Nakanishi, K., Schinnerer, E., Sheth, K., Terashima, Y., “Submillimeter-HCN Diagram for Energy Diagnostics in the Centers of Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, 818, id. 42 (2016)
- [19] Ando, R., Kohno, K., Tamura, Y., Izumi, T., Umehata, H., Nagai, H., “New detections of Galactic molecular absorption systems toward ALMA calibrator sources”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id. 6 (2016)
- [20] Casey, Caitlin M.; Hodge, Jacqueline A.; Lacy, Mark; Hales, Christopher A.; Barger, Amy; Narayanan, Desika; Carilli, Chris; Alatalo, Katherine; da Cunha, Elisabete; Emonts, Bjorn; Ivison, Rob; Kimball, Amy; Kohno, Kotaro; Murphy, Eric; Riechers, Dominik; Sargent, Mark; Walter, Fabian, “Next Generation Very Large Array Memo No. 8 Science Working Group 3: Galaxy Assembly through Cosmic Time”, NRAO Next Generation Very Large Array Memos Series, No. 8, arXiv:1510.06411
- [21] Kohno, K., Ando, R., Taniguchi, A., Izumi, T., and Tosaki, T., “High resolution ALMA observations of dense molecular medium in the central regions of active galaxies”, the proceedings of IAU Symposium 315 “From Interstellar Clouds to Star-forming Galaxies: Universal Processes?”, eds. P. Jablonka, P. Andre, and F.F.S. van der Tak, in press.
- [22] Kohno, K., Yamaguchi, Y., Tamura, Y., Tadaki, K., Hatsukade, B., Ikarashi, S., Caputi, K. I., Rujopakarn, W., Ivison, R. J., Dunlop, J. S., Motohara, K., Umehata, H., Yabe, K., Wang, W.-H., Kodama, T., Koyama, Y., Hayashi, M., Matsuda, Y., Hughes, D., Aretxaga, I., Wilson, G. W., Yun, M. S., Ohta, K., Akiyama, M., Kawabe, R., Iono, D., Nakanishi, K., Lee, M., Makiya, R., “SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> deep survey”, the proceedings of IAU Symposium 319, Galaxies at High Redshift and Their Evolution over Cosmic Time, eds. S. Kaviraj & H. Ferguson, in press.
- [23] Yamaguchi, Y., Kohno, K., Tamura, Y., Matsuda, Y., “Constraints on the CO Luminosity Function at  $z \sim 1$  Using ALMA Archival Data”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014.* Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.61
- [24] Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Hashimoto, T., Kohno, K., “Gamma-ray Bursts from Dusty Regions with Little Molecular Gas”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014.* Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.47
- [25] Lee, M., Suzuki, K., Kohno, K., Tamura, Y., Iono, D., Hatsukade, B., Nakanishi, K., Tanaka, I., Kodama, T., Tadaki, K., Ikarashi, S., Ueda, J., Umehata, H., Saito, T., Kawabe, R., “Dusty, Intensely Star Forming H  $\alpha$  Emitters (HAEs) in Protocluster 4C23.56”, *Revolution in Astron-*

- omy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.27
- [26] Umehata, H., Kohno, K., Tamura, Y., Iono, D., Nakanishi, K., Hatsukade, B., Ikarashi, S., Izumi, T., Matsuda, Y., Ivison, R., Yun, M., Wilson, G., Hughes, D., “Dusty Starbursts within a  $z=3$  Large Scale Structure”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.29
- [27] Nakajima, T., Takano, S., Kohno, K., Harada, N., Herbst, E., Tamura, Y., Izumi, T., Taniguchi, A., Tosaki, T., “High-Resolution Imaging in 3-mm and 0.8-mm Bands and Abundances of Shock/Dust Related Molecules Toward the Seyfert Galaxy NGC 1068 Observed with ALMA”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.109
- [28] Takano, S., Nakajima, T., Kohno, K., Harada, N., Herbst, E., Tamura, Y., Izumi, T., Taniguchi, A., Tosaki, T., “Distribution of Molecules in the Circumnuclear Disk and Surrounding Starburst Ring in the Seyfert Galaxy NGC 1068 Observed with ALMA”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.99
- [29] Taniguchi, A., Kohno, K., Tamura, Y., Izumi, T., Takano, S., Nakajima, T., Tosaki, T., “Spatial Distribution of CO Isotopologue Abundance Ratios in the Center of NGC 1068”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.107
- [30] Nakanishi, K., Sorai, K., Nakai, N., Kuno, N., Matsumayashi, K., Sugai, H., Takano, S., Kohno, K., Nakajima, T., “Ionized Gas Observation Toward a Nearby Starburst Galaxy NGC 253”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.117
- (学位論文)
- [31] 相馬達也, “Development of the HEB Receiver for Ground-Base THz Astronomical Observations” (博士論文)
- [32] 吉田健人, 「星形成領域における  $^{13}\text{C}$  および重水素同位体比の研究」 (修士論文)
- [33] 海老澤勇治, 「OH 18 cm 線の吸収線で探る分子雲の構造形成」 (修士論文)
- [34] 山口裕貴, 「ALMA で検出された暗いサブミリ波銀河の多波長解析及び CO 輝線銀河探索」 (修士論文)
- [35] 石田剛, 「A New Algorithm of Source Plane Reconstruction and Resolved Star-Formation Properties for a highly Lensed Submillimeter Galaxy」 (課題研究)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [36] Yoshimasa Watanabe, Yuri Nishimura, Nami Sakai, Kazuo Sorai, Satoshi Yamamoto “Chemical Composition of Molecular Gas from kpc- to 10 pc-scale in Nearby Galaxies” Star Formation Workshop 2015, From Clouds to Cores, NAOJ, 2015 年 6 月 29 日-7 月 1 日.
- [37] Satoshi Yamamoto & Nami Sakai “Carbon-Chain Molecules in Astrophysics” Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, NAOJ, 2015 年 6 月 29 日-7 月 1 日.
- [38] Nami Sakai, Yoko Oya, “Disk and Outflow System in Low-Mass Protostellar Sources” Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, JAMSTEC, 2015 年 9 月 29 日-10 月 2 日.
- [39] Yoko Oya, Nami Sakai, Yoshimasa Watanabe, Ana López-Sepulcre, Satoshi Yamamoto, Yuri Aikawa, Tomoya Hirota, Takeshi Sakai, Cecilia Ceccarelli, Bertrand Lefloch, “A drastic change in the disk forming regions”, Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, RIKEN, 2016 年 2 月 16 日.
- [40] Kohno, K., “High resolution ALMA observations of dense molecular medium in the central regions of active galaxies” (Invited), IAU Symposium 315 From Interstellar Clouds to Star-forming Galaxies: Universal Processes?, August 3-7, 2015, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA

- [41] Kohno, K., “Deep Surveys using ALMA”, ALMA Workshop for ALMA Large Proposal of galactic Cold gAs (ALPACA) Survey, December 1–3, 2015, NAOJ, Mitaka, Japan
- [42] Kohno, K., “ALMA deep surveys”, December 9–11, 2015, MPE IR retreat 2015, Ringberg, Germany
- [43] Kohno, K., “IoA Overview”, December 9–11, 2015, MPE IR retreat 2015, Ringberg, Germany

一般講演

- [44] Kohno, K., “SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> deep survey”, IAU Symposium 319, Galaxies at High Redshift and Their Evolution Over Cosmic Time, August 11–14, 2015, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA
- [45] Kohno, K., “ALMA-TAO/SWIMS synergies”, SWIMS Science Workshop 2015, September 17–18, 2015, IoA, Mitaka, Japan

(国内会議)

招待講演

- [46] 河野孝太郎, 「宇宙初期の巨大ブラックホール」(招待講演), 2015/10/17–18, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第3回ワークショップ, 甲南大学

一般講演

【天文学会 2015 年秋季年会、甲南大学、2015 年 9 月 9–11 日】

- [47] 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、「低重元素量の銀河 IC10 にある分子雲の 3 mm 帯ラインサーベイ」、R05a
- [48] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「近傍銀河で観測される分子雲スケールの化学組成の意味」、R06a
- [49] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、Cecilia Ceccarelli、「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析」、P123a
- [50] 坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、「Unbiased Chemical Survey of Protostellar Sources in Perseus」、P124a
- [51] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、ASAI メンバー、「星形成領域における c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> の <sup>13</sup>C 同位体存在量異常」、P125a
- [52] 海老澤勇治、猪熊宏士、渡邊祥正、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線と構造形成の関係の研究」、P126a

【天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 14–17 日】

- [53] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、原田ななせ、山本智、「棒渦巻銀河 M83 における GMC スケールの CS と CH<sub>3</sub>OH 分布」、R10a
- [54] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、山本智、「低重元素量の矮小銀河における CO 輝線の観測」、R11a
- [55] 坂井南美、大屋瑠子、Ana López-Sepulcre、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、相川祐理、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Claudine Kahane、Emmanuel Caux、Charlotte Vastel、「Centrifugal Barrier of Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535」、P101a
- [56] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Cécile Favre、「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析 (2)」、P102a
- [57] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、「星形成領域 L1527 における CCH および CCD の高分解能観測」、P104a
- [58] 海老澤勇治、猪熊宏士、前澤裕之、坂井南美、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線で探る HCL2 領域における構造形成」、P107a
- [59] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、「ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究」、P219a
- [60] 河野孝太郎、泉拓磨 (東京大学)、松下聡樹、原田ななせ (ASIAA)、中井直正 (筑波大学)、S. Martín (ESO/JAO)、K. Fathi (Stockholm Univ.)、K. Sheth (NASA) 他 ALMA NGC1097 チーム、「ALMA でみた 10 pc スケールでの 1 型低光度活動銀河核 NGC1097」、R22a

【その他】

- [61] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「若い低質量原始星に付随するエンベロープガスの速度構造の解析」、星形成の諸階層 - 銀河から惑星まで -、フォレスト箱根、2015 年 9 月 14–16 日
- [62] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、「ペルセウス座分子雲の原始星天体に対する重水素濃縮度のサーベイ観測」、星形成の諸階層 - 銀河から惑星まで -、フォレスト箱根、2015 年 9 月 14–16 日
- [63] 河野孝太郎、「電波望遠鏡における「能動鏡」と指向誤差計測：Green Bank Telescope の例」、2015/11/27, Large Submillimeter Telescope (LST) 拡大検討会、キャンパスプラザ京都
- [64] 河野孝太郎、「ショートコメント：ngVLA による銀河研究への展望」、2016/03/09–10, 宇宙電波懇談会シンポジウム、国立天文台三鷹

(セミナー)

- [65] Kohno, K., “Deep surveys of dusty star-forming galaxies using ALMA”, 2015/12/08, MPE Colloquium, Garching, Germany
- [66] Kohno, K., “Dust-obscured cosmic star-formation unveiled by ALMA”, 2015/07/23, Hokkaido University, Sapporo, Japan

(その他講演 (アウトリーチ活動))

- [67] 河野孝太郎, 「南米アタカマの砂漠から探る宇宙のダークサイド」, 2015/05/21, 熊谷高校 平成 27 年度スーパーサイエンス講演会, 熊谷市

(プレスリリース)

- [68] 安藤亮, 河野孝太郎, 永井洋 (国立天文台), 「電波の影絵で希薄な星間分子ガスを “見る”」 2015/12/07 <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/57.html>

## 5 重力波観測

### ——重力波によるビッグバン

#### 宇宙の探索——（安東，道村）

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。中でも、重力波望遠鏡の開発とそれによる天文学は一貫して研究室の中心テーマとなっている。2016年2月には米国のLIGOによって、重力波信号の初観測が報告され、「重力波天文学」が幕をあげた。国内でも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完了し、2014年度からは本格的なインストールが開始されている。また、2015年度末にはiKAGRAと呼ばれる比較的単純な干渉計構成で、システム全体を用いた試験運転も行われ、2018年頃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。宇宙空間重力波アンテナPre-DECIGOの実現へ向けた検討や基礎開発も行われている。独自の方式のねじれ型重力波検出器TOBAに関しては、プロトタイプ機の開発が進められ、それを用いた観測運転と重力波信号探査も行われた。それらと並行して、われわれは重力波研究で必要とされる技術を用いた関連研究を進めている。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 大型重力波望遠鏡 KAGRA

大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)は岐阜県神岡の地下に一辺3kmのL字型レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである。神岡鉱山地下の静寂な環境の中に建設することで地面振動による雑音を軽減し、鏡を20Kの低温に冷やすことで熱雑音の低減を図る計画となっている。2010年10月にプロジェクトがスタートし、2016年3月に常温かつ簡易な構成での試験運転が開始された。2018年には低温での運転を行う予定である。

2016年2月にアメリカのLIGOグループにより重力波の初観測が発表されたが、重力波源の位置特定には複数台による観測が必須である。そのため、KAGRAが重力波の国際観測ネットワークに一刻も早く参加することが期待されている。当研究室ではKAGRAの根幹部分となる、主干渉計光学系や制御系の設計開発を行っている。

#### 5.1.1 iKAGRA 試験運転

KAGRAは2016年3月に試験運転を開始したが、このフェーズをiKAGRAと呼ぶ。iKAGRAは常温懸架鏡を用いた一辺3kmのMichelson干渉計となっており、簡易な干渉計構成であるため重力波の検出は難しい。全長6kmに及ぶ真空槽・真空ダクト(図5.1)のレイアウト確認や計算機やそのネットワーク系の動作確認、データ取得系の動作確認、観測シフト体制の確認を目的とした試験運転である。当研究室は、このiKAGRA主干渉計の制御で用いる電気回路や配線の取りまとめ、3km光を往復させるための鏡の初期アラインメント、干渉計の制御と重力波信号の較正、雑音源の特定などにおいて、主要な役割を担った。また、当研究室所属の全スタッフ、全学生が観測シフトに参加した。



図 5.1: KAGRA の X 腕 3 km 真空ダクト

iKAGRA 主干渉計に入射するレーザーの空間モードの整形や周波数安定化のために用いられるプリモードクリーナー、インプットモードクリーナーの開発も、東京大学宇宙線研究所の重力波グループなどと共に進めた。特に、計算機を用いたプリモードクリーナーの自動制御システムや、インプットモードクリーナーの自動制御システムの開発や性能評価を行った。インプットモードクリーナーに関しては、変調サイドバンドと呼ばれる光を使うことにより、その周回長を6桁の精度で測定し、設計値から1.5cmのずれがあることを確認した。また、インプットモードクリーナーが設計値通りの500程度のフィネスを持つことを確認し、十分なクリーン環境下でインストールが行われたことを確認した。

iKAGRA 主干渉計の動作確認も順調であり、制御系やデータ取得系が期待通りに動いており、90%近い高い稼働率を誇っている。感度は重力波によるひずみ換算で $3 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 100\text{Hz}$ と、原理的な雑音に比べて3桁程度悪くなっており、試験運転と平行して、現在雑音源特定のための測定や計算が行われている。iKAGRAの試験運転は2016年4月末まで続けられる予定である。

### 5.1.2 主干渉計制御設計

iKAGRA の試験運転後は、bKAGRA と呼ばれる低温での運転を行うフェーズに移行する。当研究室では bKAGRA に向けた入射光学系や主干渉計の制御設計も進めている。

主干渉計に入射するレーザー光には高い強度安定度と周波数安定度が要求される。そこで、今年度はレーザー光の強度安定化や周波数安定化のための光学系配置と制御システムの設計をほぼ固めた。特に、周波数安定化は複数の光共振器を用いた多段安定化が必要となるため、制御システムをモデル化し、雑音や制御帯域の検討を行った。今後は実際にこの設計での入射光学系統合テストが宇宙線研究所で行われ、性能評価が行われる予定である。

また、主干渉計制御に用いる鏡のアクチュエータについても、設計を進めた。レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるためには鏡の位置と姿勢を高精度に制御しなければならないが、この制御にはコイル-マグネットアクチュエータが用いられる。鏡に磁石を貼り付け、近くにおいたコイルに電流を流すことで鏡を駆動する。この磁石のサイズが大きいほど、大きな駆動力が得られるが、環境磁場の変動によって鏡の位置が揺らいでしまい、雑音となる。この磁場雑音と駆動レンジの検討を行い、全ての常温鏡に対して、磁石サイズの決定を行った。低温鏡については低温懸架系の設計とともに、現在計算を進めている。

## 5.2 宇宙重力波望遠鏡

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある NGO(LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であるため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM<sub>UV</sub> を打ち上げ、そのデータを用いた重力波探査解析を行っている。

2015 年度は、DECIGO の前段階となる宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO の検討を進めた。LIGO が観測したような  $30 M_{\odot}$  の質量をもつブラックホールの連星であれば、赤方偏移 30 の遠方まで観測可能であること、長時間の観測によって位置の特定も可能であることなどが示され、その科学的な意義の検討を進めた。また、中性子星連星や中間質量ブラックホールの合体といった観測の可能性で得られる科学的成果の検討や、その観測を行うためのミッション検討も進めた。

## 5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振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 光学系の検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの変位センサとしてファイバー干渉計を用いていたが、ファイバー干渉計を用いたことによる位相雑音によって感度が制限されていた。そこで我々は空間光を用いた光学系、特にモノリシック光学系を用いた変位センサの開発を進めている。

今年度はモノリシック光学系の設計、試験マスや光学素子、光学系土台の設計、発注を行った。

今後はモノリシック光学系を組み上げ、その変位読み取り雑音を評価し、TOBA の変位センサとして十分な性能があることを確認する。

### 5.3.2 防振・懸架装置の検討・開発

検出器の感度を制限する主要な雑音源の一つが地面振動による試験マスの回転である。回転方向の地面振動が伝達され回転するものと、並進方向の地面振動がねじれ振子の非対称性などを通して回転にカップルするものがあり、いずれも目標感度を達成できるレベルまで抑える必要がある。

本年度は、回転地面振動雑音を低減するための設計や、並進地面振動からのカップリング経路の系統的研究およびその低減実証のための実験が進められた。回転地面振動雑音に関しては、既存の構成に中段マスを 1 つ追加し 3 段ねじれ振子とすることで受動防振を強化する設計を行った。また中段マスを防振効率のよい形状にすることで、さらなる防振性能の向上もはかっている。並進地面振動からのカップリングに関しては、カップリングが導入される経路の洗い出しにより、マイケルソン干渉計を用いる単純なねじれ振子の場合には少なくとも 5 つの経路が存在することが明らかになった。そこから各経路について目標感度を達成するための低減方法が考えられ、ねじれ振子の非対称性に対する要求値も導かれた。現在はそのうちの 1 つの経路について低減の実証実験が進められている。



### 5.3.3 アクチュエータの検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの制御にコイルマグネットアクチュエータを用いていたが、アクチュエータ磁石と環境磁場とのカップリング雑音が問題になっていた。そこで我々は磁石を用いず、かつ駆動力の大きい、コイルコイルアクチュエータという新型のアクチュエータの開発を進めている。

今年度は TOBA に用いられる試験マスと同じサイズの試験マスをコイルコイルアクチュエータによって制御することに成功し、その感度評価を行った。

今後はコイルコイルアクチュエータの磁場雑音や熱雑音といった雑音の評価を進め、TOBA のアクチュエータとして十分な性能があることを確認する。

### 5.3.4 データ解析研究

TOBA の観測データを用いた重力波探査として、これまでは数 10mHz から数 Hz 帯における背景重力波探査や特定の質量 ( $200 M_{\odot}$ - $200 M_{\odot}$ ) を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波探査、特定のパルサー (PSR J2144-3933) からの連続波探査などが行われてきた。今年度は Phase-II TOBA の 2014 年 12 月の観測データを用いて、6-7 Hz 帯における全天連続波探査、 $100 M_{\odot}$  から  $500 M_{\odot}$  の広い質量範囲での中間質量ブラックホール連星からの重力波探査を行うことで、TOBA における解析パイプラインの開発を進めた。

全天連続波探査については、 $\mathcal{F}$ -statistic と呼ばれる統計を用いて、6-7 Hz 帯において上限値をつけた。この周波数帯での最も厳しい上限値は 6.84 Hz における重力波によるひずみに対する上限値で、95 % 信頼区間で  $3.6 \times 10^{-12}$  であった。この上限値は天文学的に面白い領域には達していないが、TOBA のアップグレードによって  $\sim 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$  の感度が達成されれば、重力波の検出や連星中性子星の楕円度への上限値の設定ができることと期待されている。

また、中間質量ブラックホール連星からの重力波探査では 1 つのブラックホールの質量を  $100 M_{\odot}$  から  $500 M_{\odot}$  の範囲で刻み、2 つのブラックホールの質量が同じとして 162 個のテンプレート波形を作り、マッチドフィルターを用いて探査を行った。現時点では重力波の候補は見つかっていないが、2 つのブラックホールの質量が異なる場合のテンプレート波形を作成し、より広い質量範囲での探査を行う予定である。Phase-II TOBA のこの質量範囲でのブラックホール連星に対する検出可能距離は 0.1 pc 程度であり、重力波が見つかることはまずないが、イベントレートなどに上限値がつけられると考えられる。

## 5.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

安東研究室では次世代の周波数標準として期待される光格子時計の性能を向上させるための周波数安

定化光源の開発を行っている。本研究では低温重力波検出器 KAGRA の開発で培った技術を応用して、単結晶シリコンで製作した光共振器を低温に冷却することによって、従来の周波数安定化の妨げとなっていた熱雑音を低減し、1 秒のアラン標準偏差で  $10^{-17}$  という非常に高い周波数安定度を実現する。これにより、光格子時計は 100-1000 秒という非常に短時間の積算時間で  $10^{-18}$  の安定度が実現可能になる。

今年度は昨年度に構築を終えた周波数安定化セットアップを用いて 10 K まで冷却したシリコン光共振器にレーザーの周波数を安定化し、開発したレーザーの周波数安定度を測定した。得られた周波数安定度は 0.8 秒のアラン標準偏差で  $7.03_{-0.34}^{+0.38} \times 10^{-15}$  の安定度で、この結果は 1 秒近傍の時間スケールにおいて、極低温の光共振器にレーザー周波数を安定化した先行研究の結果を上回る周波数安定度となっている。

しかしながら、現在達成されている  $7.03_{-0.34}^{+0.38} \times 10^{-15}$  という周波数安定度は目標としていた  $10^{-17}$  に到達していない。したがって、今後の安定度向上のためには現状の安定度を制限している雑音源を特定する必要がある。そこで、周波数雑音源となり得る雑音を定量的に評価することにより現在の安定度を制限している雑音源の特定を行った。

その結果、1 Hz 以上の高周波数帯では共振器に加わる振動の影響が大きく、1 Hz 以下の低周波数帯では共振器の温度変動の影響が大きいことが分かった。また、今回調査したその他の雑音については目標を達成するのに十分なレベルまで雑音が小さいことも確認できた。これにより、振動の低減・温度安定度の向上を行うことで目標が達成可能であることがわかった。

## 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オプトメカニクス研究

熱浴から十分に孤立した巨視的な、特に質量の大きな振動子は、質量依存性のある未知の量子デコヒーレンス (重力デコヒーレンス) の検証や、空間の最小単位の高精度な検証など、様々な基礎物理に実験的な知見を与える可能性を秘めている。これらの検証のため、我々は重力波検出器で用いられているような細線で懸架された鏡に着目し、レーザー光を利用して懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却することを目指している。

基底状態冷却のために、まずレーザー光の量子的な揺らぎ (量子輻射圧揺らぎ) によって励起される振り子運動が熱雑音よりも大きくなるような懸架鏡の開発に取り組んだ。5 mg 鏡を一端とした三角光共振器を構成し回転方向を光ねじればねで束縛することで、これまで問題となっていた共振器内光量と懸架線から導入される振り子の熱雑音のトレードオフを解消した。量子輻射圧揺らぎの直接測定には至らな

かったものの、振り子運動の大きさの入射レーザー光量依存性を測定することに成功し、量子輻射圧揺らぎと振り子の熱雑音の信号雑音比は  $1.4 \pm 0.2$  と推定される [5].

続いて、懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却する冷却主婦の原理検証を行った。共振周波数の低い懸架鏡においては、基底状態まで冷却するにはフィードバック冷却が必要となるが、小さな 5 mg の鏡にアクチュエータを取り付けることは困難である。そこで、三角光共振器を構成する別の大きな鏡にアクチュエータを取り付け、この大きな鏡と 5 mg 鏡を光ばねで束縛することで、光ばねを介し遠隔的に 5 mg 鏡を冷却する手法を用いた。これにより、振り子モードの実効温度を  $15 \pm 3$  mK まで冷却することに成功した [45, 27].

さらに、例え基底状態まで冷却されたとしても、基底状態を 1 周期以上保てなければその振動子を基礎物理の検証に用いることはできない。基底状態を何周期保つことができるのかを実測することには大きな意義があるが、いまだ測定例はない。そこで我々は、基底状態まで冷却された場合にその基底状態を保つ周期数の測定に取り組んだ。実測に成功し、懸架鏡の共振周波数 2.14 Hz を光ばねで 1.06 kHz まで上昇させた効果で、周期数を  $10^{-11}$  程度から  $10^{-7}$  程度と 4 桁改善することにも成功した [27].

現在、実効温度や基底状態を保つ周期数を制限しているのはレーザー光の周波数雑音であることが分かっている。今後は周波数安定化をはじめ、真空度の向上、懸架線の改良 [46] など古典的な雑音を抑える工夫を施し、基底状態到達、基底状態を保つ周期数 1 以上を目指す。

### 5.5.2 光学浮上鏡の開発

熱浴から十分に孤立した巨視的な振動子の実現を目指す。前節で用いられた振り子とは別の手法として、鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている。基底状態への到達を目指すにあたって、振り子の場合には鏡の懸架に伴う熱雑音が問題となりうる事が分かっていた。そこでそのような熱雑音を導入しない鏡の支持方法として、光輻射圧で鏡を浮上させることが考えられる。光学浮上鏡が実現できれば、その他の雑音を十分に低減することで基底状態への到達が見込まれている。

この光学浮上が可能となるためには、浮上した鏡が安定となる必要がある。安定な構成として、私たちは鏡の上下から光を当てるサンドイッチ構成を提案し、その実現に向けてこれまでに 1.6 mg の浮上鏡の製作とねじれ振り子を用いた基礎実験を行ってきた。浮上鏡は mg 程度以下かつ曲率つきという条件があり、このような鏡の製作は容易ではない。そこでねじれ振り子の端に鏡をつけることで微小な力を感じうる系を作り、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を作ることで光学浮上に向けた技術開発を行ってきた。本年度は、基礎実験を超えて実際にねじれ振り子を用いてサンドイッチ構成の安定性の検証を行うべく、装置を設計し直して組み上げた。その上

で装置の特性評価を行い、要求値を満たす仕様であることを確認した [11, 28]. 今後はこの装置を用いてサンドイッチ構成の検証を行い、光学浮上鏡の実現を目指していく。

### 5.5.3 光リング共振器を用いた光速の等方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論の登場から、Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性であると考えられてきた。しかし、重力と他の相互作用を統一的に理解しようとする理論的研究から、あるエネルギースケールでは Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。そのため、よりよい精度での Lorentz 不変性の破れ探査が世界中で行われている。

Lorentz 不変性の検証実験の中で、古くから行われている種類に光速の異方性探査実験がある。特に、直交する方向で往復する光速の差を測る、Michelson-Morley 型の実験が数多く行われてきた。しかし、このタイプの実験では光速の行き帰りの差、つまり片道光速の異方性を測定することができない。そこで我々はこの片道光速の異方性に着目し、その探査実験を行っている。

光速の行きと帰りの差は、非対称な光リング共振器を用いて測定することができる。非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ、光路の一部の屈折率を変えることで導入している。この非対称性により、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し、異方性の null 測定が可能となる。また、この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで、異方性信号の変調を行う。

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い、そのデータ解析を行うことで片道光速の異方性に世界最高精度となる  $10^{-15}$  レベルの上限値をつけた。拡張標準理論と呼ばれる検証理論の枠組みでデータ解析を行い、光子における高次の Lorentz 不変性の破れを表すカモフラージュ係数のうち、奇パリティ成分へ世界最高精度の、または世界初の上限値をつけた。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した装置改良を進めた。これまでの感度は装置の回転に伴う振動によって制限されていたため、振動感度の低いセミモノリシック光学系 (図 5.2) を製作した。また、これまでは信号取得や電源供給のためのワイヤがねじれてしまうことを防ぐため、回転と逆回転を交互に繰り返していたが、今後は連続回転を行うことで周波数分解能を上げて雑音レベルを下げることを考えている。そのため連続回転しながら電源を供給するためのスリップリングを導入するとともに、回転する装置からデータを無線で取得するためのシステムを開発した。

新しい装置での雑音レベルは今のところ、前のものよりも高くなってしまっている。散乱光雑音ではないかと考えているが、現在その原因究明中である。ま

た, スリップリング経由での電源供給由来と思われる, 回転に同期した雑音が見つかった. これは Lorentz 不変性の破れ信号と区別がつかないため, 対策が必要である. 今後は電源供給の見直しなどを進めていく.

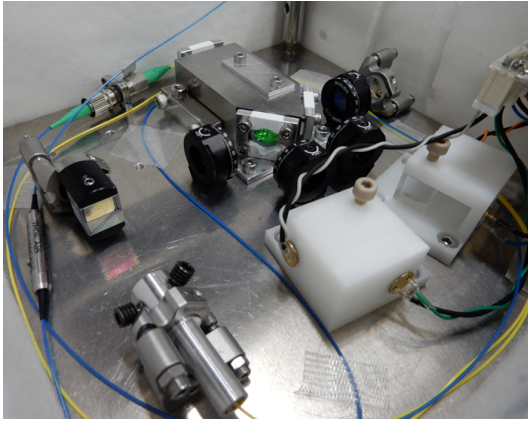


図 5.2: セミモノリシック光学系

#### <受賞>

- [1] 道村唯太: 第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (宇宙線・宇宙物理領域), 日本物理学会, 2015 年 10 月 16 日.
- [2] Nobuyuki Matsumoto: Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action, Springer Theses Prize (2015).
- [3] 佐藤遼太郎: 東京大学 理学部学修奨励賞 (2015 年度).

#### (原著論文)

- [4] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01.
- [5] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, Phys. Rev. A, 92, 033825 (2015).
- [6] K. Okutomi, T. Akutsu, M. Ando, et al.: Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder Journal of Physics Conference Series 610 (2015) 012040.

#### (国内雑誌)

- [7] S. ドワイヤー, 安東正樹 (訳): 量子雑音のスケーリング, パリティ (丸善出版) 2015 年 8 月号.

#### (学位論文)

- [8] 牛場崇文: Laser Frequency Stabilization with a Cryogenic Optical Cavity, 博士論文 (2016 年 3 月).
- [9] 道村唯太: Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, 博士論文 (2015 年 6 月).

- [10] 小森健太郎: 巨視的振動子の遠隔光冷却, 修士論文 (2016 年 3 月).
- [11] 桑原祐也: 巨視的量子現象の観測に向けた光輻射圧による鏡の支持方法の開発, 修士論文 (2016 年 3 月).

#### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 一般講演

- [12] Naoki Aritomi: Monolithic Optics and Coil-Coil Actuator, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).
- [13] T. Shimoda, M. Ando: Design of New TOBA - Vibration Isolation Systems, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).
- [14] M. Ando: Torsion Bar Antenna Experiments, Low-Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 2nd 2016, ANU, Canberra, Australia).
- [15] M. Ando: bKAGRA Schedule, KAGRA Face-to-Face Meeting (Feb. 22, 2016, Kashiwa, Tokyo).
- [16] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Initial Alignment Procedure for iKAGRA, 13th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2016, Kashiwa).
- [17] M. Ando: Possibility of contribution to ESA L3 from Japan, ESA L3 GOAT#5 (September 17th, 2015, Noordijk, NL).
- [18] M. Ando: Preliminary bKAGRA Plan, KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (August 29th, 2015, Toyama).
- [19] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA MIF Status Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).
- [20] Tomofumi Shimoda: Shift Work Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).
- [21] Yuta Michimura, Jake Guscott, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando: Higher Order Test of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (July 2015, Rome).
- [22] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, and M. Ando: Search for stochastic gravitational wave background at 1-3 Hz with Torsion-bar Antenna, GWPAW2015 (June 17-20, 2015, Osaka, Japan).
- [23] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA Lock Acquisition Overview, GWADW 2015 (May 2015, Alaska).

##### 招待講演

- [24] M. Ando: The GW Research in Japan - Current Status of KAGRA -, ELiTES 4th General Meeting (December 3rd 2015, Delegation of the European Union to Japan, Tokyo).

- [25] M.Ando: Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO, GWPAW2015 (June 19th, 2015, INTEX-Osaka, Osaka).
- [26] M. Ando, A.Shoda, K. Yamamoto, Y. Aso, R. Takahashi: Lessons learned and the next steps of Torsion-Bar Antenna experiments, GWADW2015 (May 19th, 2015, Alaska, USA).
- (国内会議)
- 一般講演
- [27] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光学トラップによる懸架鏡の遠隔冷却および熱的デコヒーレンスの低減, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [28] 桑原祐也, 道村唯太, 牛場崇文, 安東正樹: 光輻射圧による鏡支持方法の開発, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [29] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章: 重力波望遠鏡 KAGRA における主干渉計制御, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [30] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 低温シリコン光共振器を用いたレーザー周波数安定化, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [31] 下田智文, 有富尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (1), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [32] 有富尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (2), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [33] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (68): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学, 仙台).
- [34] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, JGWC 総会 (2016 年 3 月 10 日, 大阪市立大学).
- [35] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2016 年 2 月 11 日, 東京大学 宇宙線研究所).
- [36] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO と Pre-DECIGO, 第 16 回 宇宙科学シンポジウム (2016 年 1 月 7 日, 宇宙科学研究所).
- [37] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO / Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 12 月 21 日, 東京大学柏キャンパス).
- [38] 安東正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO Workshop (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [39] 有富尚紀: Pre-DECIGO の加速度雑音の評価 (1), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [40] 下田智文, 有富尚紀, 奥富弘基: PreDECIGO システム検討 PreDECIGO の加速度雑音の評価 (2), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月, 京都大学).
- [41] 安東正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [42] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 高安定光共振器開発に向けた低温環境下での温度安定化, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学, 大阪).
- [43] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章, KAGRA Collaboration: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計制御設計 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学).
- [44] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (64): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [45] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光ばねを用いた懸架鏡の遠隔冷却, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [46] 桑原祐也, 松本伸之, 牛場崇文, 井上翼, 苺田基志, 小森健太郎, 道村唯太, 安東正樹: カーボンナノチューブ線を用いた低損失振り子の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- 招待講演
- [47] 道村唯太: 光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [48] 安東正樹: 重力波が切り拓く新たな天文学, NHK 視点・論点 (2016 年 2 月 22 日).
- [49] 安東正樹: 重力波で見る宇宙 - 重力波の観測 -, 東京大学 駒場祭公開講座 (2015 年 11 月 21 日, 東京大学 駒場キャンパス).
- [50] 安東正樹: アインシュタインの宿題 — 重力波 —, 一般相対性理論誕生 100 年記念市民講演会 (2015 年 10 月 03 日, 弘前大学).
- [51] 安東正樹: アインシュタインの相対論と重力波天文学, 高校生のための夏休み講座 2015 (2015 年 8 月 18 日, 東京大学).
- [52] 安東正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 物理学教室オープンラボ (2015 年 5 月 29 日, 小柴ホール, 東京大学).
- (セミナー)
- [53] M. Ando: KAGRA and Pre-DECIGO, ANU CGP Group Seminar (March 1st 2016, Australian National University, Canberra).
- [54] Yuta Michimura: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Department of Physics Lunch Talk (Nov 2015, Tokyo).

## 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)

蓑輪研究室は、教授の定年退職により平成 27 年度でその活動を終了した。最終年度の報告をする。

#### 6.1 原子炉ニュートリノモニター

原子炉モニタリングに応用するための小型反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) を開発した。運転中の原子炉からは、透過力の強い反電子ニュートリノが核分裂反応に伴って大量に放出されている。この反電子ニュートリノのフラックスを原子炉建屋の外から測定することで、原子炉の運転状況や燃料組成の変化を監視することができる。ニュートリノ検出技術を応用した原子炉モニタリングは、国際原子力機関 (IAEA) によって実施されている査察に代わる、非侵襲的で負担の少ない画期的な保障措置の手法となることが期待されている。

我々のグループが開発している PANDA は、液体シンチレータと比べてより安全性の高いプラスチックシンチレータをターゲットとして使用しており、セグメント化した構造を採用することで効率的なバックグラウンド事象の排除を可能にしている。またトラックやコンテナに積載した状態で測定が可能であるため、原子炉建屋の外からのモニタリングに適している。

2008 年から現在までに第 1~3 次プロトタイプとして lesserPANDA、PANDA36、PANDA64 を開発してきた。2011-2012 年には PANDA36 を大飯発電所に設置し、原子炉建屋の外から原子炉運転中と停止中のニュートリノフラックスの差を約  $2\sigma$  で検出することに世界で初めて成功した。最終型の検出器 PANDA100 の開発が終了し、検出器は北里大学理学部の川崎健夫研究室に移動している。今後、関西電力大飯発電所の再稼働を待って第 2 回めの検出実験を行う予定である。

#### 6.2 雷雲ガンマ線

PANDA36 を大飯発電所に設置していた冬季の 2 か月間に、数分間にわたるカウントレートの予期しない上昇が 3 バースト見つかった。これらのバーストは、エネルギースペクトルが 10-15MeV の高エネルギーまで伸びていることや気象庁の提供する雷情報との一致などから、雷雲に由来する長時間持続性のガンマ線バーストであることがわかった。長時間

持続性の雷雲由来バーストは山岳地帯での観測例が多いが、冬季の日本海沿岸は雷雲が低い高度に発生するため海面レベルで雷雲バーストを観測することができる世界でも珍しい地域である。

雷雲内に存在する電場の強さが  $\sim 300\text{kV/m}$  以上になると、空気中の電子は電場による加速が大気分子との衝突による減速を上回って加速され、相対論的逃走電子が発生する。電子が相対論的速度に達する過程でさらに新しい逃走電子が次々に生成するため、逃走電子数は雷雲電場中で  $10^5$  倍程度まで増倍するという相対論的逃走電子雪崩 (RREA) モデルが提唱されている。

このモデルに従えば、一定以上の活動度のある雷雲中では、その電場により宇宙線中の電子が加速・増倍されて制動放射を起こし、大量の電磁シャワーが下方に向かって定常的に放射されていることになる。雲底高度の高い夏の雷雲の場合は、電磁シャワーは大気に吸収され地上まで到達することは少ないが、冬季の日本海沿岸や山岳地帯では雲底と地表の距離が小さいために多くの電磁シャワーが降り注ぐことになる。バーストの持続時間は、雷雲の通過時間または雷雲活動度の持続時間で決まることになる。

RREA モデルに基づく逃走電子の増倍とそれに伴う電磁シャワーが、これまで山岳地帯や日本海沿岸で検出されてきた長時間持続性バーストを十分に説明できるかどうかはまだわかっていない。

大飯発電所で PANDA36 が観測したバーストの解析から、 $\gamma$  線の到来方向がほぼ天頂方向からでありバースト持続中に変化しないこと、さらにシミュレーションでは電場加速後の逃走電子のエネルギーが 17MeV で単色であると仮定して高度 400-1000m から発射した場合に観測スペクトルをよく再現することがわかった。

空気中の窒素分子との光核反応によって生成した中性子と思われるイベントも 1 つのバーストと同時に検出されている。このようにして発生した中性子は空気中の窒素原子核  $^{14}\text{N}$  に吸収されて  $^{14}\text{C}$  を生成する。このことは、今まで知られていなかった  $^{14}\text{C}$  の新たな源があることを示しており、炭素年代測定に影響を及ぼす可能性がある。

山岳地帯での観測のために、第 3 次プロトタイプ PANDA64 をトラックに積載した状態で東大宇宙線研究所乗鞍観測所の屋外に設置して、2014 年 7 月から 9 月に測定をおこなった。全測定期間で 12 回の雷雲由来長時間持続性バーストが観測され、そのエネルギースペクトルは最大規模のバーストで 25MeV 程度まで伸びていた。気象庁提供の雷情報との関連を調べたところ、12 回のバースト全てが「雷可能性あり」を示すレベル 1 以上の状態で観測されていた。

乗鞍で観測したバーストについて、大飯発電所で測定時と同様に単色の逃走電子を仮定したシミュレーションをおこなうと、40-80MeV の電子を 400-1000m の高度から発射した場合に測定スペクトルをよく再現した。この結果から、逃走電子のエネルギーは山岳地帯である乗鞍観測所のほうが日本海沿岸の大飯発電所よりも高く、一方で、大気中での逃走電子フラックスは大飯のほうが乗鞍より小さいという結果が得られた。このことは、山岳地帯のほうが大

気密度が低いことを考えれば、RREA モデルと定性的に矛盾しない。

## 6.3 Hidden photon 暗黒物質探索

### 6.3.1 概要

過去数十年の天文観測の結果、宇宙には光では観測できない非バリオンの暗黒物質が存在することが確実であると考えられている。暗黒物質の性質をつきとめることは今日の天文学および宇宙論にとって最重要の課題であり、暗黒物質を直接探索する様々な実験的試みが続けられている。

一番よく知られており、我々も過去に探索を行った暗黒物質の候補で、また現在行われているほとんどの探索実験が狙っているのは、Weakly Interacting Massive Particles (WIMP) である。しかし、暗黒物質には、axion-like particles (ALP) や hidden-sector photons (HP) のような Weakly Interacting Slim Particles (WISP) と呼ばれるもうひとつの重要な候補がある。

Hidden-sector photon または単に hidden photon は、通常の photon(光子) との間での kinetic mixing を利用して実験的探索が可能である。なかでも、最近提案された球面鏡を使う方法では広範囲の質量領域の探索実験が可能である。

この方法では、雰囲気中の hidden photon が球面鏡の表面でその質量にほぼ等しいエネルギーの通常の photon を垂直に放出するので、球面鏡の中心に hidden photon 由来の光子が集中する。この比較的単純な手法の有効性を実証するために、我々は質量が  $\sim eV$  の光学領域と  $\sim \mu eV$  の電波領域でふたつの探索実験を行った。これらの実験で探索したのは、いずれもこれまでに未探索のパラメータ領域である。

### 6.3.2 光学領域

Hidden photon の質量が  $\sim eV$  の光学領域では、過去に solar hidden photon の探索実験に用いた直径 500mm 焦点距離 1007mm の放物面鏡と光電子増倍管を用いた。この鏡は球面鏡ではないが、直径に対して焦点距離が長いために球面鏡として近似できる。その結果、現在のセットアップで到達可能な感度では hidden photon CDM の証拠は見つからなかった。これを用いて、質量  $3.1 \pm 1.2 eV$  における mixing parameter について、 $\chi < 6 \times 10^{-12}$  という制限を得た。

### 6.3.3 電波領域

Hidden photon の質量が  $\sim 50 \mu eV$  付近の電波領域では、直径 2.2 m の市販されている安価なパラボ

ラアンテナを用いて、BS 放送で使われている Ku バンド ( $\sim 12 GHz$ ) について実験を行った。これも球面鏡ではなく放物面鏡であるが、この場合は焦点距離が短く、球面鏡として近似できないので、新たな工夫が必要となる。

そのために我々は図 6.1 に示すように、パラボラアンテナの前面にアルミ板の平面鏡を光軸に垂直に設置する新しい手法を考案した。この配置では、hidden photon が平面鏡の表面で通常の photon を垂直に放出し、正面のパラボラでその焦点に集光される。

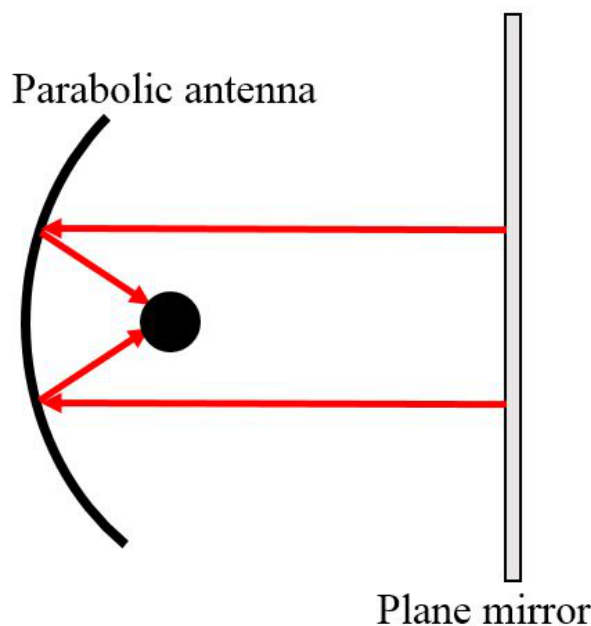


図 6.1: 放物面鏡と平面鏡の組み合わせによる新手法

探索実験の結果、hidden photon 由来の信号は見つからなかったが、そのことを利用して質量  $\sim 50 \mu eV$  近傍に  $\chi < 2 \times 10^{-12}$  という制限を得た。

現在のセットアップでは極めて限られた質量領域しか探索できていないが、球面鏡を使う hidden photon 探索実験の有効性を世界に先駆けて実証することができた。とりわけ、放物面鏡と平面鏡を組み合わせることで市販の安価なパラボラアンテナを利用できるようになり、新たに球面鏡を製作する必要がなくなった。

より広範囲の質量領域に探索を拡張することは容易で、上記いずれの実験でも、目的の波長領域に感度を持つ光子検出器を取り付けることで可能である。

<報文>

(原著論文)

- [1] J. Suzuki, T. Horie, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental Search for Hidden Photon CDM in the eV mass range with a Dish Antenna, JCAP 09 (2015) 042, arXiv:1504.00118 [hep-ex].
- [2] Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: Observation of

gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds, *Phys. Lett. B* 758 (2016) 286–291, arXiv:1601.06349 [astro-ph.HE].

(会議抄録)

- [3] Jun 'ya Suzuki, Yoshizumi Inoue, Tomoki Horie, Makoto Minowa: Hidden photon CDM search at Tokyo, Proceedings, 11th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (Axion-WIMP 2015) : Zaragoza, Spain, June 22-26, 2015, <http://www-library.desy.de/preparch/desy/proc/proc15-02.pdf>, arXiv:1509.00785 [hep-ex].
- [4] Tomita, N. et al.: World's Cheapest Readout Electronics for Kinetic Inductance Detector by Using RedPitaya, *J. Low Temp. Phys.* doi:10.1007/s10909-016-1485-0.
- [5] Oguri, S. et al.: GroundBIRD: Observing Cosmic Microwave Polarization at Large Angular Scale with Kinetic Inductance Detectors and High-Speed Rotating Telescope, *J. Low Temp. Phys.* doi:10.1007/s10909-015-1420-9.
- [6] Ishitsuka, H. et al.: Front-End Electronics for the Array Readout of a Microwave Kinetic Inductance Detector Towards Observation of Cosmic Microwave Background Polarization, *J. Low Temp. Phys.* doi:10.1007/s10909-015-1467-7.
- (学位論文)
- [7] 熊原充志: 雷雲から飛来する放射線の研究, 平成 28 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.
- [8] 堀江友樹: Experimental search for hidden photon dark matter by using dish antenna method, (パラボラアンテナを用いた手法による hidden photon ダークマターの実験的探索), 平成 27 年 6 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [9] 加藤陽: Observational study of thundercloud radiation bursts using a segmented organic scintillator installed at a mountaintop, (セグメント化有機シンチレータを用いた山頂における雷雲放射線バーストの観測研究), 平成 27 年 9 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [10] 井上慶純: Search for solar axions with the Tokyo axion helioscope, (東京アクシオンヘリオスコープ装置による太陽アクシオンの探索), 平成 28 年 1 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [11] 鈴木惇也: Experimental search for hidden photon CDM in the eV mass range with a concave mirror, (和文:凹面鏡を用いた質量 eV 領域における hidden photon ダークマター探索), 平成 28 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [12] J. Suzuki: Hidden photon CDM search at Tokyo, 11th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (Axion-WIMP 2015), University of Zaragoza, Spain, 22–26 June 2015.
- [13] N. Tomita: World's cheapest readout electronics for kinetic inductance detector by using RedPitaya, 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Grenoble, France, 20–24 July 2015.
- [14] Y. Kato: Thundercloud-related radiation bursts observed at a coastal area and a mountaintop using segmented organic scintillators, Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA), Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia, 5-9 October 2015.
- [15] Y. Kato: Development of Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), Applied Antineutrino Physics (AAP), Virginia Tech Research Center, Arlington, United States, 7-8 December 2015.
- (国内会議)
- 一般講演
- [16] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索、Cosmophysics seminar、高エネルギー加速器研究機構 2015 年 4 月 15 日.
- [17] 富田望: RedPitaya を用いた世界一安い MKID 読み出し回路の構築、日本天文学会 2015 年度秋季年会、兵庫県甲南大学 2015 年 9 月 9 日.
- [18] 加藤陽: 原子炉モニタリング用反電子ニュートリノ検出器を用いた雷雲ガンマ線の観測、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25 日.
- [19] 加藤陽: Development of Plastic Anti-Neutrino Detector Array (PANDA) for reactor monitoring、新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会、静岡県熱海市「ニューウェルシティー湯河原」、2015 年 12 月 2 日.
- [20] 蓑輪眞: 素粒子物理学実験と低温物理、東京大学低温センター研究交流会、2016 年 2 月 23 日.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

## 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——  
——（中澤）

はじめに

中澤研究室では、高エネルギー天体からくる X 線、ガンマ線を、軌道上にあげた人工衛星に搭載した検出器で観測し、宇宙の高エネルギー現象の研究を進めている。JAXA 宇宙科学研究所とともに、日本で 5 番目の宇宙 X 線衛星「すざく」(2005 年 7 月打ち上げ)に検出器開発、衛星運用、そしてそれを用いた宇宙観測の形で深く参加し、2007 年からは次世代の衛星 ASTRO-H に取り組んできた。2015 年 2 月 17 日には ASTRO-H がついに打ち上げられ、「ひとみ」と命名された。観測装置は全て立ち上がったものの、3 月 26 日にトラブルに見舞われ、今も復旧運用を続けているところである。しかし、その観測性能の高さは、初期観測のデータからも見て取れており、現在そのデータ解析を進めている。

### 7.1 科学衛星の運用と稼働状況

「すざく」は、2016 年 2 月現在も軌道上を回っているが、電源系の経年劣化などにより観測を停止している状態である。後継機の「ひとみ」は、「すざく」と比較して、広い X 線帯域を(帯域によっては 2 桁近く)高い感度で観測する能力に加え、鉄などの蛍光輝線を FWHM 5 eV というこれまでより 30 倍も優れたエネルギー分解能で観測することができる。主量子数に由来するエネルギーの違いに加えて、軌道角運動量やスピン相互作用などが見えることで、原子の量子状態を詳しく見ることができる。また、ドップラー効果を用いた速度測定では、100 km/s という宇宙の高温ガスの音速(数百 km/s)を大きく下回る速さを分離できるようになり、高エネルギー天体におけるガスの流れを初めて精度よく観測できる。

3 月 26 日のトラブルは、JAXA の発表によれば姿勢制御系の設定ミスが原因であり、これにより衛星は数秒周期の早い自転に陥ってしまっている。衛星本体はまだ健在だと考えられるものの、幾つかの部品が離脱しており、状況は予断を許さない。しかし、観測能力を復旧できる可能性はあるため、これを試みるためのコマンドを送信し続けているところである。現在の早い自転がある程度収まれば、この作業の実現性が高まると想定され、今後数カ月をかけて地道に回復運用を継続する予定である。

「ひとみ」の打ち上げを前に、2015 年度には次世代衛星の検討を本格的に開始した。特に中澤研究室

が得意とする、エネルギーの高い X 線の観測をかつてない角度分解能で実現すべく、FORCE という計画に主要メンバーとして参加している。また、MeV ガンマ線の全天観測の実現を目指し、CAST 計画も推進しており、「ひとみ」の硬 X 線、ガンマ線検出器の開発経験を生かし、またその軌道上データを解析しつつ、より高感度の観測衛星の実現を目指している。

### 7.2 中性子星とその親星の研究

強磁場中性子星への質量降着

中性子星は、太陽の 1.4 倍程度の質量が半径 10 km の中に閉じ込められている高密度天体で、形成時に親星の磁束を抱え込むことで、 $10^{12}$  G (=  $10^8$  T) の強磁場を持つ場合があることが知られている。表面磁場  $10^{12}$  G の強磁場中性子星に連星系の相手星からガスが流れ込むと、磁場に捕らえられて磁極に集中するため、中性子星の自転に合わせたパルス周期が見えることが多い(X 線パルサー)。磁場が強いため、電子のサイクロtron共鳴周波数のエネルギーは  $h\nu = 11 \times (B/10^{12} \text{ G}) \text{ keV}$  と硬 X 線に対応し、X 線スペクトルに強い吸収線が現れる。室田らは「すざく」衛星で得られた 4U1700-37 という天体の 1–150 keV の広帯域スペクトルを解析した。この天体は X 線パルスは検出されていないが、そのスペクトルが他の X 線パルサーに酷似し、55 keV 付近にサイクロtron共鳴の吸収構造をもつことを確認した。さらに、鉄の K 輝線の中心エネルギーを調べ、これが X 線光度にあわせて上昇することから、連星の星風ガスの電離が進む様子を明らかにした [22]。

弱磁場中性子星への質量降着

磁場が  $10^9$  G 程度に低くなると、降着物質の磁極への収束が(少なくとも降着の多い=明るい時には)発生しなくなり、中性子星周辺に形成される降着円盤と、付随する高温コロナの放射が卓越するようになる。このような天体の多くは、小質量星と連星をなし、中性子星 Low Mass X-ray Binary (NS-LMXB) と呼ばれる。我々のグループの櫻井ら (2015) の研究により、Aql X-1 という明るい NS-LMXB において、降着率が高い時に、降着円盤と中性子星の表面の一部が双方とも黒体放射で光り、顕著なコロナの存在しないフェーズ(ソフト状態)から、降着率が減ってゆくにつれ降着円盤の内縁半径が後退し、代わりに発達するコロナが中性子星表面の黒体放射を叩き上げて、硬 X 線まで伸びる広帯域放射をするフェーズ(ハード状態)へと遷移する様子を明らかにした。各成分のエネルギー放射量は推定したジオメトリーから計算される重力エネルギーの解放量と概ね一致しており、定量的なモデル化に成功している [61]。小野らは GS 1826-238 という NS-LMXB の「すざく」スペクトルを調べ、ハード状態で最も明るい状態に近い段階にある時には、降着円盤の内縁をも覆う少し大きなコロナが発達することを確認した [6, 16, 57]。また、Zhang らは、降着円盤を真横に近い方向から



見ている NX-LMXB EXO 0748-676 の「すざく」スペクトルを調べ、同様の結論を得た。特にコロナによるコンプトン叩き上げの平均回数が大きくなることから、コロナが降着円盤上へ長く伸びる円盤に近い形状をしている可能性を指摘した [9]。

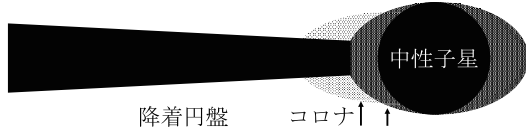


図 7.1: 弱磁場中性子星と低質量星連星の X 線データ解析から明らかになってきた、降着物質のジオメトリの断面模式図。降着円盤の内側、中性子星との間に、2 種類の高温コロナが存在する。模式図で右側の降着円盤とコロナは省略している。

### 極強磁場中性子星の自由歳差運動

極強磁場中性子星はマグネターと呼ばれ、ここ 10 年ほどでその存在がクローズアップされてきた新しい天体で、 $10^{15}$  G に達する極めて強い磁場を持つ。マグネターは全て孤立天体であり、連星をなしているものは知られていない。牧島、村上らは、京都大学の榎戸とともに、マグネターの 4U 0142+61 を「すざく」で見た 2009 年のデータに、中性子星の自転を表している  $P = 8.6$  sec のパルスの特に硬 X 線帯域が、周期  $T_{prec} = 55$  ks で位相変調される現象を発見した。中性子星の内部に  $B \sim 10^{16}$  G に達する強いトロイダル磁場があり、これでわずかにレモン型に変形したことで自由歳差運動が現れ、スピン周期と歳差周期のビート (スリップ周期) が  $T$  として観測されたと考えると、周期の位相変調を説明できる (牧島ら, PRL 2014)。これは中性子星の内部磁場という「見えない」はずの物理量にアクセスする全く新しい観測手段であり、本年度は他のデータを使ってこの描像の検証、確立を試みている。村上らは 4U 0142+61 の 2011 年および 2013 年の「すざく」データを解析し、同様の位相変調を確認した。また、別のマグネター 1E 1547.0-5408 のデータからは、周期  $T_{prec} \sim 36$  ks の位相変調を発見している [8, 33, 60]。

### 中性子星を産んだ超新星爆発の特徴

中性子星は超新星爆発の中で生まれるとされている。実際、超新星残骸 (Super Nova Remnant: SNR) の中に中性子星が観測される例は多い。このうち 3 割ほどは、マグネター天体を付随している。中野、古田らは、SNR の性質を調べ、マグネターの親星と、通常の強磁場あるいは弱磁場中性子星の親星に違いがないか探っている。中野らを中心にマグネターを中心に持つ SNR CTB109 の観測から親星の質量が  $\sim 40 M_{\odot}$  であることを確認し、[2]、さらに古田らを中心に活動性の低い中性子星を中心に持つ RCW 103 にも同様の解析を行った。「すざく」および欧州の XMM-Newton 衛星のデータから、親星の質量は少なく見積

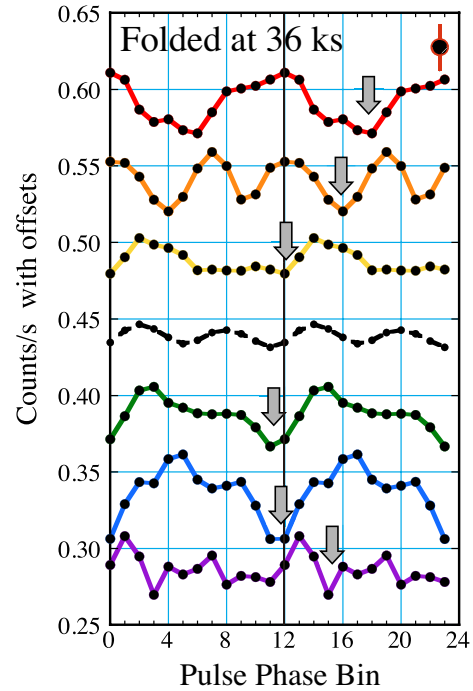


図 7.2: The 15–40 keV pulse profiles (shown for 2 cycles) of the magnetar 1E 1547.0–5408, observed in 2009 with the *Suzaku* HXD, folded at the barycentric pulse period of 2.07214 sec in 6 different phases of the  $T = 36$  ksec slip period. The middle trace shows the overall average [8]. The periodic drift in the pulse minimum is indicated by arrows.

もって  $\sim 18 M_{\odot}$  程度、多ければ  $\sim 40 M_{\odot}$  と見積もられた [35]。RCW 103 の中心天体 1E 161348-5055 は、6.7 hr という異常に遅い自転周期を持ち、実はマグネターの一種である可能性も高い。マグネターの親星はいずれも大質量星であるという説 (Gaensler+2005) があり、我々の結果はこの説を支持する。

## 7.3 ブラックホールの X 線研究

### 恒星質量 BH 連星 Cyg X-1 のソフト状態

ブラックホール (Black Hole: BH) は全てを飲み込み光さえ脱出できない天体であるが、その高密度ゆえに物質が降着する際に数千万度の高温になり、莫大なエネルギーを放出するため、X 線で非常に明るい天体となる。奥田らは、首都大学東京の山田らとともに、我々の銀河系内にある代表的な BH-大質量星連星 Cyg X-1 がソフト状態であった、2010-2014 年の「すざく」の広帯域 X 線データを解析した。降着円盤からの放射に加えて、MeV まで伸びると言われるハード成分が見えているが、後者の光度が 30 倍も変化する一方で、スペクトルの形 (特に傾き) が驚くほど不変であることを発見した。NS-LMXB の節でも議論したコロナ中の高温電子によるコンプ

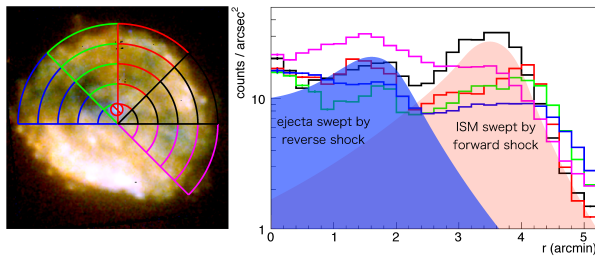


図 7.3: (左) SNR RCW 103 の XMM-Newton 衛星の X 線イメージ。爆発の中心から放射状に表面輝度を見ると、右図のように 2 つの典型的なスケールが見える。より外側のピークが、forward shock で掃かれた星間ガス・または親星がそれまでに放出した星の外装のガスであり、内側のそれが超新星からのイジェクタが周辺物質とぶつかって形成する reverse shock に対応すると考えられる。

トン叩き上げを考えると、電子数が増えるにせよ種光子数が増えるにせよ、この不変さは説明困難である。最も明るい時のスペクトルは、他の BH 連星で時折見られる Very High State と呼ばれる、中間温度 ( $kT \sim 10$  keV) の厚いコロナの存在を示唆する特徴的な形状であった。このことは、Cyg X-1 の周辺には幾何学的に小さなコロナが多数存在し、その数が大きく増えたり減ったりすることでソフト状態のハード成分の光度変動を生み出している、という描像で説明できる可能性があり、その研究を進めている [30, 50]。

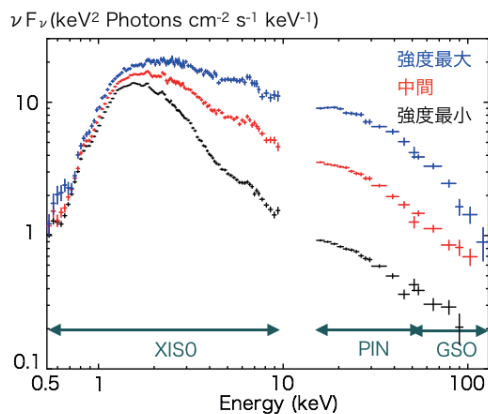


図 7.4: BH 連星 Cyg X-1 の X 線スペクトルを、X 線高度別にまとめたもの。

### 活動銀河中心核からの X 線放射

恒星質量 BH Cyg X-1 の質量は  $M \sim 10 M_{\odot}$  程度であるが、銀河の中心には  $M = 10^6 \sim 10^{11} M_{\odot}$  に達する巨大 BH が存在する。ここに大規模にガスが降着すると、莫大なエネルギーを放射し活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) という天体現象

を起こす。三宅らは、首都大学東京の野田、理研の牧島らとともに、AGN IC4329A の「すざく」広帯域 X 線データを解析した。野田ら (2013a, ApJ, 771, 100) で確立した、X 線スペクトルの時間変動からそのスペクトル成分を分解する C3PO 技法を適用して、IC4329A もまた光子指数  $\Gamma = 2.0$  の変動の大きなパワーロー成分に加え、 $\Gamma = 1.4$  の成分と、両者の反射成分でスペクトルが解釈できることを確認した。これにより AGN の巨大 BH の周りに、少なくとも 2 種のコロナ (と遠方の反射体) が存在するという描像が、最も明るいセイファート 1 型銀河でも成立することが示された。

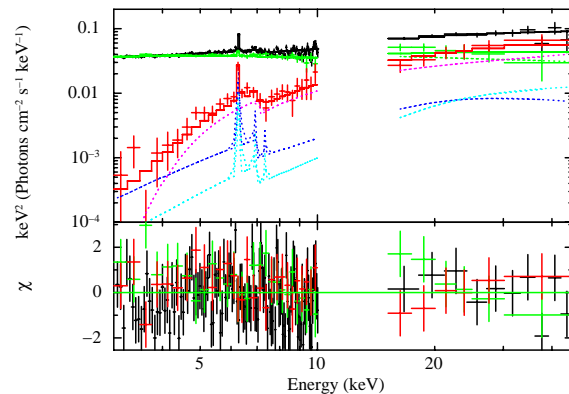


図 7.5: IC4329A の「すざく」2007 年観測スペクトル (黒)。C3PO 技法により分解された  $\Gamma = 2.0$  の変動パワーロー成分 (緑) と、不変成分 (赤)。不変成分は、 $\Gamma = 1.4$  の成分 (マゼンタ) と、 $\Gamma = 2.0, 1.4$  の反射成分 (青、シアン) で構成される。

### Ultra-Luminous X-ray sources (ULX)

Ultra-Luminous X-ray Sources (ULXs) は、近傍の銀河の腕に時折見られる、X 線光度が  $10^{39-40}$  erg  $s^{-1}$  を超える点源である。中心にいないことから巨大 BH 起源でないと考えられているが、 $\sim M_{\odot}$  の天体の Eddington 限界光度  $1.5 \times 10^{38}$  erg  $s^{-1}$  の 10 倍を超える明るさであり、NS ( $M \sim 1.4 M_{\odot}$ ) はもとより通常の恒星質量 BH ( $M \sim 10 M_{\odot}$ ) でも説明できない謎の天体で、我々はこれが  $M = 30 - 300 M_{\odot}$  程度の中間質量 BH に、Eddington 限界を超える質量降着が起きている系ではないかと考えている (牧島ら 2000)。小林らは X 線フラックスの大きな ULX Hol IX X-1 と NGC1313 X-1 の「すざく」および XMM-Newton 衛星の X 線データ解析を進め、そのゆっくりとした光度変動に合わせて X 線スペクトルが変化する際、2 つのピークを持つ状態から、より明るい 1 つのピークに統合される状態を行き来することを確認した [11, 18, 52]。ULX のスペクトルは恒星質量 BH の VHS スペクトルと似ている一方で、その全体的な形がよりハードである特徴を持ち、その関連についても研究を進めている。2016 年 2 月にアメリカの LIGO グループが報告した世界初の重力波源は、世紀の発見である。約  $30 M_{\odot}$  の BH 同士の合体現象と解釈されているが、この事実はこれまで

理論的に形成困難と言われていた  $M > 20 M_{\odot}$  の BH が宇宙に比較的多数存在する可能性を示しており、ULX 研究にも大きな追い風となっている。

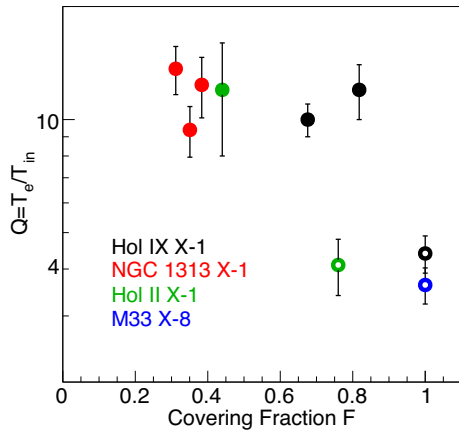


図 7.6: ULX 天体を、降着円盤からの黒体放射とそれを高温コロナが叩き上げた成分で解釈した際の、円盤内縁温度とコロナの温度の比をたて軸に、コロナが円盤を覆う割合を横軸に取ったもの。4つの ULX 天体の結果を示している。温度比は2つの特徴的な値を取り、これはスペクトル形状の差異を表す。2つのフェーズの間では、天体ごとに明確な区切りがあるように見える。

## 7.4 白色矮星への質量降着

激変星 (Cataclysmic Variable: CV) は、白色矮星 (White Dwarf: WD) に連星からガスが降着している系であり、銀河系内に無数に存在する降着系である。WD は低質量 ( $M \sim 1 M_{\odot}$ ) の恒星が縮退し地球サイズとなった天体である。その磁場の強さ次第では、降着物質は磁極に集中して落ち、自転周期のパルスを示す。この天体でも降着物質の流れをそのスペクトル形状から推定し、WD の質量などの物理量を導出する手法が有効である。具体的には和田らは、理研の湯浅らとともに、まず降着円盤が形成されるその内縁が磁極にむかって落下する Intermediate Polar と呼ばれる CV の代表的な天体 V1223 Sagittarii の「すざく」データを解析した。降着柱に発生する衝撃波の温度から WD の質量を導出し、その質量を  $M = 0.8 \pm 0.1 M_{\odot}$  と求めた。さらに、GK Per という別の CV の「すざく」および硬 X 線衛星 NuSTAR のデータ解析を進めている。

## 7.5 銀河団の衝突・合体

銀河団は、暗黒物質、X線を放つ高温プラズマ (Intra Cluster Medium: ICM)、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、その研究は宇宙論的な意義が大きい。銀河団は大規模構造の節であり、宇宙年齢の中で衝突合体を繰り返しながら、

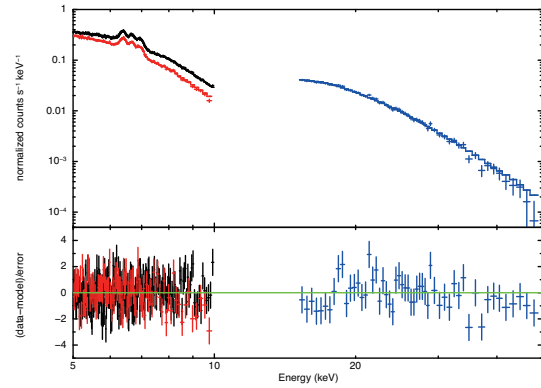


図 7.7: 「すざく」によって 2014 年 3 月に観測された V1223 Sagittarii の平均スペクトル。黒が XIS0+XIS3、赤が XIS1、青が HXD-PIN のスペクトルを示す。降着柱の多温度プラズマ放射、白色矮星表面での反射、星間吸収を取り込んだモデルでフィッティングを行い、降着柱の衝撃波温度を  $33.4 \pm 3.1$  keV と測定した。

成長してきたと考えられている。加藤、中澤、Gu らは、銀河系から  $z = 0.07$ 、距離 300 Mpc という近傍にある銀河団 CIZA J1358.9 – 4750 を「すざく」で観測し、これが衝突の初期段階にあることを発見し、その研究を進めてきた [1]。「すざく」による周辺領域の追観測 4 点に加え、角分解能に優れるアメリカの Chandra 衛星による観測を実施し、2つの銀河団の合体部でマッハ  $\sim 1.3$  の衝撃波が発生していること、その前方・後方衝撃波を発見し、post-shock 領域が 170 kpc 幅しかないことを確認した。マッハ数および pre-shock 領域の ICM 温度から導出した音速を用いて、この衝撃波が post-shock 領域から見て  $1200 \text{ km s}^{-1}$  で動いていることを導出し、これが誕生から 70 Myr しか経っていない (銀河団としては) 極めて若い衝撃波であることを確認した [37, 44]。現在、XMM-Newton による長時間露光の観測が予定されており、Chandra の追観測の提案も提出したところである。また、山形大の滝沢准教授、大阪大学の藤田准教授、鹿児島大の赤堀准教授らとともに、衝突前の銀河団質量、衝突速度と角度等のパラメータ導出を進めている。

中澤らは同等の温度をもつ他の銀河団よりも 1 桁近く暗い銀河団 Abell 548W の「すざく」データの解析を進め、その形状が丸いこと、ICM に顕著な温度構造は無いことを確認した。様々な可能性の中で、2つの小型の銀河団が、視線上で高速 ( $3000 \text{ km s}^{-1}$ ) で衝突し、通常の銀河団よりも 2 倍ほど ICM 温度が上昇した状態と考えられることを議論し、論文にまとめた [7]。

## 7.6 雷雲ガンマ線の研究

### 2015-16 年シーズンの観測

近年になって雷雲そのものから 20-30 MeV に達する高エネルギーのガンマ線が数分間に渡って放射

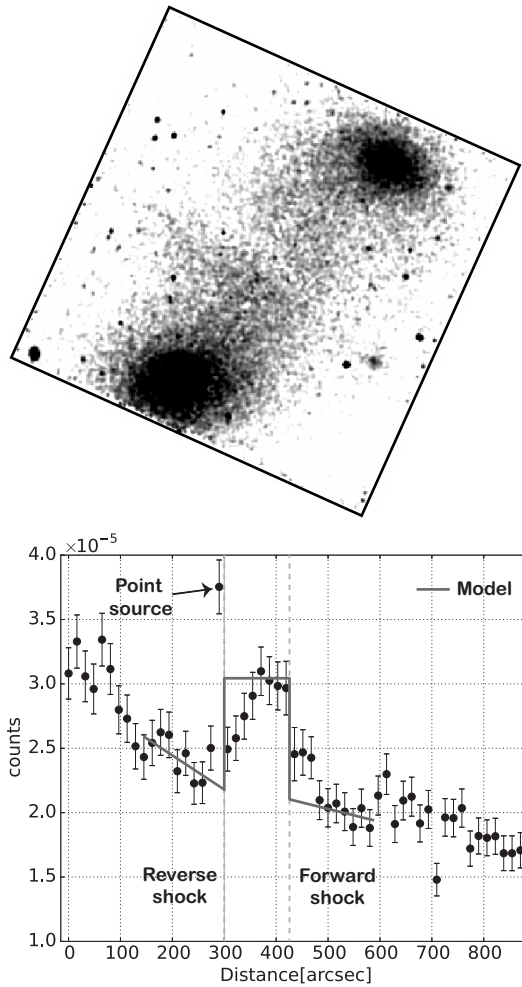


図 7.8: (上)Chandra 衛星で得た CIZA J1358.9 – 4750 銀河団の X 線画像。2つの銀河団の中心に衝撃波が立っている。(下) その X 線輝度の断面図。幅 2 分角に渡って輝度が明るくなっているところが、post-shock 領域と考えられる。

されていることが明らかになった(鳥居ら 2000)。このほかにも落雷に同期するガンマ線が地上および衛星軌道上で観測されており、雷雲・雷において静電場による電子加速が広く起きていることがわかってきた。特に冬期の日本海岸の雷雲は、大きな落雷エネルギーと低い雲底高度が特徴でガンマ線観測に適している。我々は 2006 年冬期より新潟県柏崎市の原発内や乗鞍山頂にガンマ線検出器を設置してこれを観測している。

2015-2016 冬期は、奥田、古田、和田らを中心に、柏崎にガンマ線検出器を 1 台設置し 2015 年 11 月 12 日から 2016 年 4 月 18 日まで観測を続けた。また、和田、奥田らが、京都大学の榎戸、理研の湯浅らと共に、今年より初めて金沢市内に 3 台の検出器を設置した(2015 年 11 月 16 日から 2016 年 2 月 19 日)。後者は現地の大学・高校との連携で、市街地に多数の検出器を置く計画の先駆けである。今年は北陸の

雷が非常に少なかったが、11 月 14 日に柏崎で 1 イベント、2 月 9 日に金沢で 1 イベントの検出に成功した。柏崎では 2014-15 冬期には 8 イベントが検出されていたので、前者から今年はイベントの少ない年であったことがわかる。そして金沢でも検出に成功したことは、今後予定している金沢市での検出器展開へ向けて大きな弾みとなった [55, 28]。

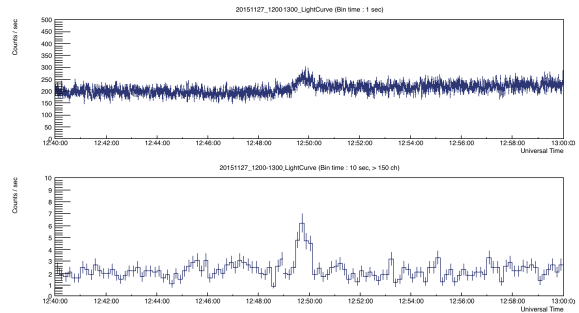


図 7.9: 柏崎で 2015 年 11 月 27 日に観測されたイベント。上が 100–20 MeV 全帯域、下が 3–20 MeV 帯域の時間変動。中央に 1 分ほどの継続時間をもつ典型的なロングバーストが検出されている。

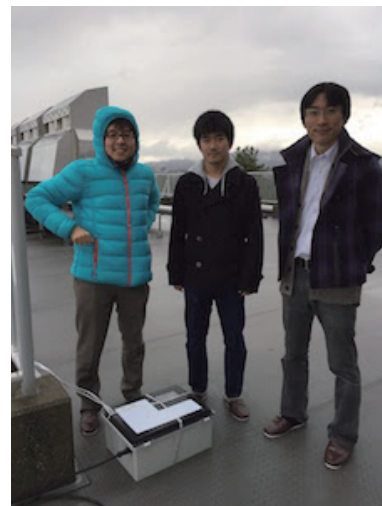


図 7.10: 金沢の高校の屋上に設置した検出器の記念写真。

### 過去データの系統解析

我々らはこれまでの全データ 23 イベントを、特に放射が 1 分以上続くロングバーストと名付けた現象を中心に系統的に解析した。一つだけ 511 keV の電子・陽電子対消滅線が際立って強かったイベントについては、これを論文にまとめた [4]。またその他のイベントについて、特にその継続時間を調査したところ、暗いイベントは継続時間が長く、明るいイベントは短いという傾向を得た。一方で、同一イベントを複数の検出器で見ている場合、明るいほうがより中心に近いと考えられるが、暗いほうでも同等の継続時間であった。このことから、継続時間は雷雲加速器それぞれに固有であり、加速器の強度もし

くは雲底の高度と相関があるのではないかという仮説がたてられる。現在そのほかのデータも合わせて、その検証を行っている [21, 56]。

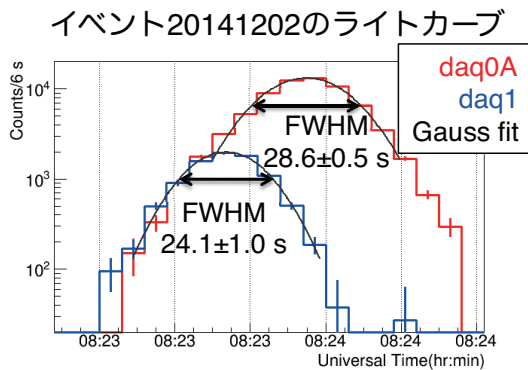


図 7.11: 雷ガンマ線の時間変動。1つのイベントを2つの検出器で捉えた例。タイムスケールがほぼ等しい。

### 7.7 宇宙 X 線衛星「ひとみ」の開発・運用



図 7.12: (上)「ひとみ」衛星の打ち上げ。2015年2月17日。(左下) 搭載される硬 X 線イメージャ 2 台。(右下) 打ち上げ前の組み立て中の「ひとみ」衛星。

我々が 2007 年よりその開発に取り組んできた ASTRO-H 衛星は、2016 年 2 月 17 日に打ち上げられ

「ひとみ」と名付けられた。「ひとみ」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、広い帯域での観測感度、高い精度の X 線分光能力において、これまでとより桁違いの性能をもち、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。この衛星には、0.5–10 keV 域で X 線エネルギーを 5–7 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、38' の広い視野を持つ X 線 CCD カメラに加え、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 (HXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。我々は、JAXA、広島大、理研ほか国内外の大学研究機関、スタンフォード大、フランス CNES などと共同し、研究室の総力を挙げて HXI と SGD の開発に参加してきた。

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、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 [63]。

SGD は 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 の帯域で動作する。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去し、「すざく」HXD より感度を 1 桁上げる。

2015 年度は、HXI、SGD とともに衛星へ搭載した状態で、小林、村上、三宅、中澤らを中心に、衛星全体での環境試験 (熱真空試験、振動試験、音響試験) を実施し、特に衛星熱真空試験において、要求する性能が達成できていることを確認した [25, 26, 27, 40, 41, 42, 49]。2 月 17 日の打ち上げ後、2 月 28 日には HXI 搭載部を 6 m 伸展する作業を実施したのち、ゆっくりと検出器の温度を下げた。3 月 8 日から 15 日にかけて、鹿児島県内之浦より検出器の立ち上げを実施し、検出器が正常に動作していることを確認した。幾つかの天体の初期観測の結果も得ている。3 月 26 日に衛星が異常となつてからはデータは得られていないものの、それまでのデータを解析して検出器の性能を検証するとともに、より感度よく観測するためのデータスクリーニングの手法の確立、および将来の硬 X 線検出器を一段と高感度にするための指針を得るために、軌道上でのバックグラウンドの起源を詳しく調査しているところである。

並行して HXI の主検出部である両面シリコンストリップ検出器の検出器応答を調べる実験を行った。これにより、p 層表面のストリップ電極間にある SiO<sub>2</sub> 層へ溜まる + 電荷により、p 側に見「負」の波高値をもつイベントが形成されることを確認した [24, 53]。

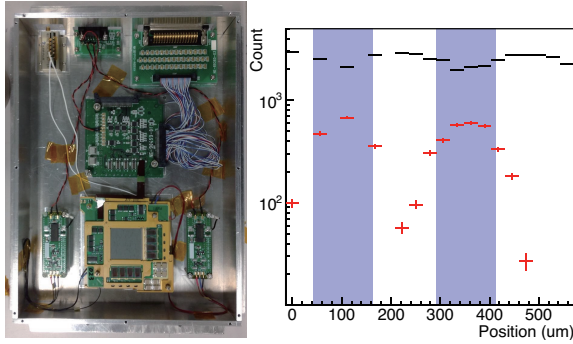


図 7.13: (左) DSSD を測定したセットアップの写真。下の方にある基板の中央に DSSD が存在し、上方の読み出し基板へ接続されている。(右) DSSD で検出された各種イベント数の位置依存性。正の波高値をもつ通常のイベント(黒)と、負の波高値イベント(赤)。負の波高値イベントは p 層ストリップ電極間(青)でその数が増えている。

## 7.8 将来衛星計画へ向けた装置開発

### 広帯域 X 線撮像観測 NGHXT/FORCE 衛星計画

ASTRO-H に続く世界の宇宙 X 線観測衛星としては、2028 年打ち上げ予定の ATHENA という大型衛星が ESA 主導でプロジェクト化されている。この衛星は、ASTRO-H の 2 つの特徴の一つ、精密分光を引き継ぐもので、望遠鏡の有効面積を 1 桁、角度分解能を 1 桁改善する計画である。日本もこの計画に参加しており、分光検出器の冷却機構や、もう一つの広視野イメージャの評価試験などへの貢献が期待されている。一方で ASTRO-H のもう一つの特徴、0.5-80 keV までの広帯域の撮像分光観測は、天体のスペクトルからその正体を探る有力なツールであるが、ASTRO-H 以後にこの特徴を引き継ぐ衛星計画は世界に存在しない。

FORCE 計画 (Focusing Optics for Relativistic universe and Cosmic Evolution, 旧名 NGHXT 計画) は、2020 年代前半の打ち上げを目標に、ASTRO-H 同様の 1-80 keV の広帯域を、角分解能を 1 桁改善し、同等の有効面積を 1 t ほどの比較的小型の衛星で実現しようという計画である。中澤は、宮崎大、京都大、大阪大、NASA のゴダード宇宙センターの研究者とともに、この計画の発起人を勤めている。2015 年度は、NEC とともに衛星のシステム検討を進め、電力・重量・サイズ、そしてコストの見積もりを行った [38, 39, 46, 47, 62]。FORCE の種検出部は、我々が開発してきた「ひとみ」HXI と似たシステムながら、1 keV という軟 X 線までをカバーするため、そのアクティブシールドには特別な配慮が必要となる。古田らは簡単な地上実験とモンテカルロシミュレーションにより、BGO アクティブシールドからの蛍光 L、M 輝線を吸収しつつ、X 線の散乱によるバックグラウンドを増やさないようなパッシブシールド素材を、銅、アルミ、テフロンなどで実

現できることを示した [12, 14, 19, 48]。

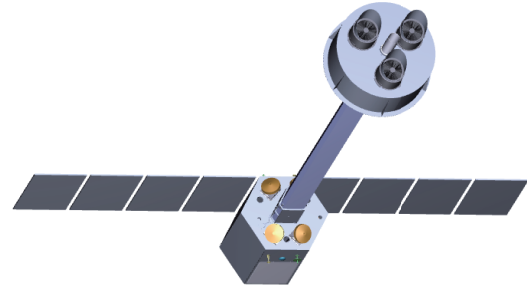


図 7.14: 検討中の FORCE の概念図。

### MeV の将来計画

もう一つの方向性は、ASTRO-H の観測帯域より上のエネルギーを目指すことである。0.1 から数 MeV の帯域は物質と光子の相互作用のうちコンプトン散乱が支配的で、ガンマ線検出が難しい。ASTRO-H SGD は Si と CdTe を組み合わせた半導体コンプトンカメラでこの難題に取り組むが、同じ技術を使って広い視野をコンプトン撮像し、0.2-2 MeV という sub-MeV から MeV の帯域の全天観測を目指すのが CAST (Compton telescope for Astronomy and Solar Terrestrial physics) 計画である。国際計画としてはフランスを中心に計画している ASTROGAM 計画にも参加している。

2015 年度はこれに加えて、CAST の構想の中で感度が低いままである数 MeV の帯域を補うために、光電吸収断面積が桁違いに優れる BGO 結晶シンチレータをもちいた改良の検討を行っている。具体的には長さ 30 cm、幅  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  の棒状のシンチレータの両端に光検出器を接合し、2 者の光量比から光子の相互作用位置を、光量和からそのエネルギーを得る。これを多数並べることで、簡素な読み出し系で 3 次元の位置・エネルギー検出を行うことを目指した。表面を粗面にする加工を適切に施すことで、光量和を損なうことなく、3 cm (FWHM) の位置分解能を得ることに成功した。半導体コンプトンカメラの外側にこれをアクティブシールド検出器、兼、MeV 帯域用の光子吸収検出器として使うことで、数 MeV 帯域での観測感度を大きく向上できる可能性が示された [15, 54]。

<受賞>

なし

<報文>

(原著論文 (Refereed))

- [1] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, Li., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: "Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9-4750", *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id.71 (2015)

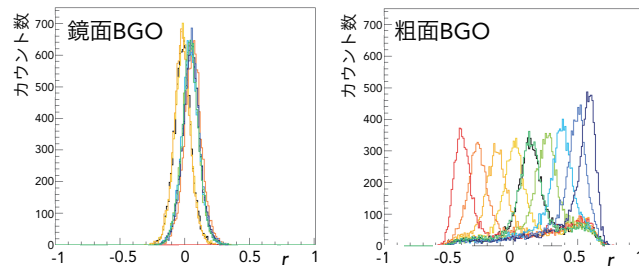


図 7.15:  $30 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  の BGO の両端に PMT をつけ、コリメートした 511 keV ガンマ線を 3 cm ずつ動かしながら照射した時の結果。横軸は左右の PMT の光量比  $r$  である。(左) 表面が綺麗に研磨された BGO では位置分解能はほとんど得られないが、(右) 800 番手で粗面に加工した場合、3 cm (FWHM) ほどの位置分解能が得られた。

- [2] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K. Hiraga, J. S., Uchiyama, Hi., Kaneda, H., & Enoto, T.: “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586” *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id 9 (2015)
- [3] Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, T., Fujita, Y., Takizawa, M., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Futamase, T., Kawaharada, M., Miyazaki, S., Mochizuki, Y., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., Sasaki, T., Sato, K., & Tam, S. I.: “Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478”, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **456**, 4475–4487 (2015)
- [4] D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, K. Nakazawa, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, T. Tamagawa, and K. Makishima: “On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds”, *Phys. Rev. E* **93**, 021201(R) (2016)
- [5] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “The New Primary X-ray Component Confirmed in the Seyfert I Galaxy IC 4329A”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [6] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “A Suzaku observation of the low-mass X-ray binary GS 1826-238 in the hard state”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [7] Nakazawa, K., Kato, Y., Gu, L., Kawaharada, M., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [8] Makishima, K., Enoto, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakano, T., Sasano, M., & Nakazawa, K.: “Evidence for a 36 ks phase modulation in the hard X-ray pulses from the magnetar 1E 1547.0–5408”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [9] Zhang, Z., Sakurai, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Ono, K., Yamada, S., & Xu, H.: “Suzaku Observation of the High-Inclination Binary EXO 0748-676 in the Hard State”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [10] Gu, L., Wen, Z., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Xu, H., & Makishima, K.: “Galaxy Infall by Interacting with its Environment: a Comprehensive Study of 340 Galaxy Clusters”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [11] S. Kobayashi, K. Nakazawa & K. Makishima, “A New Characterization of the Compton Process in the ULX Spectra”, *Astronomische Nachrichten*, (2016) in press
- (会議抄録)
- 国際学会
- [12] Furuta, Yoshihiro, Murota, Yuki, Hiraga, Junko S., Sasano, Makoto, Murakami, Hiroaki, Nakazawa, Kazuhiro “A Study of Active Shielding Optimized for 1-80 keV Wide-Band X-ray Detector in Space”, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015) 2015 年 6 月 2–6 日 ; 東北大学, 査読なし, arXiv:1507.00876v2
- 天文・天体物理若手夏の学校 2015 (長野 : 2015 年 7 月 27 日–30 日) 集録
- [13] 「すざく」による激変星 V1223 Sagittarii の白色矮星質量の推定 (太陽・恒星分科会 a7)、和田有希 (東大理)、湯浅孝行 (理研)、中澤知洋 (東大理)、牧島一夫 (理研)
- (学位論文)
- [14] 古田 緑大: 「次世代 X 線衛星での応用を目指した 1–80 keV の広帯域におけるアクティブシールドの最適化」、修士学位論文
- [15] 室田 優紀: 「棒状シンチレータを用いたガンマ線 3 次元位置検出の技法の開発」、修士学位論文
- < 学術講演 >
- (国際会議講演)
- European Week of Astronomy and Space Science, 22–26 June 2015, La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain
- [16] 小野光、櫻井壮希、ZhangZhongli、中澤知洋、牧島一夫 “Broadband X-ray Study of LMXBs in the Hard State with Suzaku”, poster
- [17] Murakami, H., Makishima, K., Enoto, T., Furuta, Y., Nakano, T., & Nakazawa, K.: “Evidence of Free-Precession in Magnetars” (Poster), id.Sp1.7
- “The Extremes of Black Hole Accretion”, ESAC, MADRID, SPAIN, 8–10 June, 2015
- [18] S. Kobayashi, et al. “A New Characterization of the Compton Process in the ULX Spectra”, 口頭, 2015 年 6 月 10 日

- International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015) 2015 年 6 月 2-6 日 ; 東北大学
- [19] Furuta, Y., Murota, Y., Hiraga, J. S., Sasano, M., Murakami, H., Nakazawa, K.: "A Study of Active Shielding Optimized for 1-80 keV Wide-Band X-Ray Detector in Space", ポスター発表
- ASTRO-H Summer School (2015 年 8 月 27 日-8 月 29 日 奈良女子大学)
- [20] Yuuki Wada, Kazuhiro Nakazawa (University of Tokyo), Kazuo Makishima, Takayuki Yuasa (RIKEN), "Phase-resolved spectroscopy of V1223 Sagittarii with ASTRO-H"
- (国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (2015 年 5 月 24 日 (日)~5 月 28 日 (木); 幕張メッセ ; 口頭)
- [21] 榎本大悟, 土屋晴文, 湯浅孝行, 中澤知洋, 榎戸輝揚, 古田禄大, 山田真也, 牧島一夫 : 「冬の日本海沿岸に到来する雷雲由来のガンマ線バースト観測」, M-IS29-15(2015/05/29)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2015 年 9 月 25 日 ~28 日 ; 大阪市大 ; 口頭)
- [22] 室田優紀, 笹野理, 中澤知洋, 牧島一夫 : 「「すざく」衛星で探る大質量星と中性子星の連星系 4U 1700-37 の磁場強度と降着の幾何」, 25aSJ-1
- [23] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 古田禄大, 中野俊男, 笹野理, 中澤知洋 : 「「すざく」によるマグネター自由歳差運動の二例目の発見 : 1E1547.0-5408」, 25aSL-9
- [24] 三宅克馬, 齊藤新也, 中野俊男, 萩野浩一, 三村健人, 佐藤悟朗, 渡辺伸, 国分紀秀, 中澤知洋, 武田伸一郎, 田島宏康, 深沢泰司, 高橋忠幸 : 「ASTRO-H 搭載の Si 両面ストリップ検出器の表面付近の応答特性」, 25aSN-7
- [25] 林克洋, 田島宏康, 深沢泰司, 渡辺伸, 内山秀樹, 内山泰伸, 榎戸輝揚, 太田方之, 大野雅功, 小高裕和, 片岡淳, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 佐藤理江, 高橋忠幸, 高橋弘充, 武田伸一郎, 田代信, 田中孝明, 寺田幸功, 中澤知洋, 中森健之, 原山淳, Roger Blandford, 牧島一夫, Grzegorz Madejski, 水野恒史, 森國城, 谷津陽一, 山岡和貴, 山田真也, 湯浅孝行, 米徳大輔, Philippe Laurent, Olivier Limousin, Francois Lebrun, ほか SGD チーム : 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星総合試験における試験結果」, 25pSJ-3
- [26] 小林翔悟, 中野俊男, 中澤知洋, 湯浅孝行, 榎戸輝揚, 牧島一夫, 萩野浩一, 佐藤理江, 佐藤悟朗, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 齊藤新也, 内山泰伸, 片岡淳, 谷津陽一, 北口貴雄, 大野雅功, 高橋弘充, 水野恒史, 深沢泰司, 田島宏康, 寺田幸功, 中森健之, Olivier Limousin, Philippe Laurent, Francois Lebrun, 他 HXI/SGD チーム : 「ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の地上試験における最終性能」, 25pSJ-4
- [27] 三村健人, 佐藤悟朗, 小林翔悟, 村上浩章, 三宅克馬, 片岡淳, 大野雅功, 古田禄大, 室田優紀, 小野光, 加藤佑一, 笹野理, 櫻井壮希, 中野俊男, 中澤知洋, 牧島一夫, 萩野浩一, 小高裕和, 川原田円, 佐藤理江, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 湯浅孝行, 齊藤新也, 勝田準一郎, 高橋弘充, 深沢泰司, 山岡和貴, 田島宏康, 谷津陽一, 内山秀樹, 他 HXI チーム : 「ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器エネルギー較正手法と実機検証」, 25pSJ-5
- [28] 湯浅孝行, 榎戸輝揚, 土屋晴文, 米徳大輔, 澤野達哉, 中澤知洋, 牧島一夫, 榎本大悟, 古田禄大, 山田真也 : 「GROWTH 実験 : 雷雲起源ガンマ線放射の石川県での 2014 年度冬季観測結果と検出器小型化に向けた開発状況」, 25pSK-9
- [29] 安東正樹, ほか : 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (64) : DECIGO 計画の概要」, 28aSK-3
- 日本天文学会・秋季年会 (2015 年 9 月 9 日 ~11 日 ; 甲南大学 ; 特記なき場合は口頭)
- [30] 奥田和史, 中澤知洋, 牧島一夫, 山田真也 : 「「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析」, J101a
- [31] 信川正順, 上田佳宏, 鶴剛, 久保田あや, 中澤知洋, 高橋忠幸, 栗木久光, 寺島雄一, 森浩二, 井上一, 他 NGHXT チーム : 「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス II」, J126a
- [32] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 村上浩章, 古田禄大, 中野俊男, 中澤知洋 : 「「すざく」によるマグネター 1E1547.0 - 5408 の自由歳差運動の検出 (2)」, J135a
- [33] 村上浩章, 牧島一夫, 中澤知洋 : 「マグネター 1E1841-045 および 1RXSJ170849.0-400910 の「すざく」による硬 X 線パルス復調解析」, J136a
- [34] 和田有希, 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫 : 「「すざく」観測による激変星 V1223 Sagittarii の X 線スペクトル解析」, J211a
- [35] 古田禄大, 中野俊男, 村上浩章, 中澤知洋, 牧島一夫 : 「長周期のパルサー 1E161348-5055 に付随する超新星残骸 RCW103 の親星質量の推定」, K03a
- [36] 小野光, 村上浩章, 中澤知洋, 牧島一夫 : 「太陽フレア MeV 中性子の検出に向けた基礎開発実験」, M44a
- [37] 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 : 「衝突銀河団 CIZAJ1358.9-4750 の衝撃波付近における鉄原子の電離状態」, T06a
- [38] 森浩二, 村上弘志, 久保田あや, 中澤知洋, 馬場彩, 幸村孝由, 内山泰伸, 齊藤新也, 北山哲, 高橋忠幸, 渡辺伸, 佐藤悟朗, 中島真也, 小高裕和, 萩野浩一, 松本浩典, 古澤彰浩, 鶴剛, 上田佳宏, 田中孝明, 内田裕之, 信川正順, 武田彩希, 常深博, 中嶋大, 穴吹直久, 栗木久光, 寺島雄一, 深沢泰司, 高橋弘充, 大野雅功, 岡島崇, 山口弘悦, 森英之, 他 NGHXT WG : 「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT の現状 (2)」, V316a
- [39] 鶴剛, 武田彩希, 田中孝明, 幸村孝由, 渡辺伸, 中島真也, 佐藤悟朗, 高橋忠幸, 常深博, 中嶋大, 穴吹直久, 中澤知洋, 森浩二, 深沢泰司, 高橋弘充, 大野雅功, 他 NGHXT チーム : 「NGHXT に搭載する広帯域ハイブリッド X 線撮像分光器 WHXI の開発 (2)」, V323c (ポスター)
- [40] 中澤知洋, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 萩野浩一, 太田方之, 小高裕和, 川原田円, 佐藤理江, 高橋忠幸, 武田伸



- 一郎、原山淳、渡辺伸、榎戸輝揚、田中孝明、寺田幸功、内山秀樹、谷津陽一、中野俊男、牧島一夫、田島宏康、山岡和貴、大野雅功、勝田隼一郎、高橋弘充、深沢泰司、水野恒史、中森健之、野田博文、湯浅孝行、内山泰伸、斉藤新也、片岡淳、Philippe Laurent、Francois Lebrun、Olivier Limousin、他 HXI チーム：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状打上げに向けて」、V330a
- [41] 高橋弘充、田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、大野雅功、北口貴雄、田中康之、水野恒史、太田方之、小高裕和、国分紀秀、佐藤悟朗、佐藤理江、武田伸一郎、林克洋、原山淳、森國城、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫、田中孝明、榎戸輝揚)、片岡淳、谷津陽一、内山泰伸、内山秀樹、中森健之、山岡和貴、Roger Blandford、Grzegorz Madejsk、田代信、寺田幸功、山田真也、湯浅孝行、米徳大輔、Philippe Laurent、Olivier Limousin、Francois Lebrun、他 SGD チーム：「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の現状と解析ソフトウェアについて」、V331a
- [42] 大野雅功、河野貴文、枝廣育実、白川裕章、大橋礼恵、岡田千穂、幅田翔、勝田隼一郎、田中康之、高橋弘充、水野恒史、深沢泰司、村上浩章、小林翔悟、三宅克馬、小野光、室田優紀、中澤知洋、牧島一夫、三村健人、片岡淳、一戸悠人、内田悠介、桂川美穂、米田浩基、武田伸一郎、佐藤悟朗、佐藤理江、川原田円、原山淳、小高裕和、林克洋、太田方之、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、木下将臣、山岡和貴、田島宏康、谷津陽一、内山秀樹、斉藤新也、湯浅孝行、他 HXI/SGD チーム：「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応答関数の構築」、V333a
- 日本天文学会・春季年会 (2016 年 3 月 14 日 (月)~17 日 (木))；首都大学東京 南大沢キャンパス；特記なき場合は口頭)
- [43] 牧島一夫、Gu Liyi、稲田直久、児玉忠恭、中澤知洋、川原田円：「誰も気づかなかった銀河と銀河団高温プラズマの相互作用」、Z232b
- [44] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、Aurora Simionescu、牧島一夫：「衝突銀河団 CIZA1358.9-4750 における 2 つの衝撃波の観測的研究」、Z 233c (ポスター)
- [45] 板花まどか、滝沢元和、赤松弘規、R. van Weeren、河原創、深沢泰司、J. Kaastra、河原田円、中澤知洋、大橋隆哉、太田直美、H. Roettgering、J. Vink、F. Zandanel：「すざく衛星による RXCJ1053.7+5453 の電波レリク周辺領域の解析」、T03a
- [46] 森浩二、村上弘志、久保田あや、中澤知洋、谷津陽一、馬場彩、幸村孝由、内山泰伸、斉藤新也、北山哲、高橋忠幸、渡辺伸、佐藤悟朗、中島真也、小高裕和、萩野浩一、松本浩典、古澤彰浩、鶴剛、上田佳宏、田中孝明、内田裕之、武田彩希、常深博、中嶋大、穴吹直久、信川正順、太田直美、栗木久光、寺島雄一、深沢泰司、高橋弘充、大野雅功、岡島崇、山口弘悦、森英之、他 NGHXT WG：「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT の現状 (3)」、V324a
- [47] 鶴剛、武田彩希、田中孝明、内田裕之、幸村孝由、渡辺伸、中島真也、佐藤悟朗、高橋忠幸、常深博、中嶋大、穴吹直久、中澤知洋、森浩二、深沢泰司、高橋弘充、大野雅功、他 NGHXT チーム：「NGHXT に搭載する広帯域ハイブリッド X 線撮像分光器 WHXI の開発 (3)」、V325a
- [48] 古田禄大、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫：「次世代 X 線衛星での応用を目指した 1-80keV の広帯域におけるアクティブシールドの最適化」、V328a
- [49] 中澤知洋、国分紀秀、佐藤悟朗、○萩野浩一、太田方之、小高裕和、川原田円、佐藤理江、高橋忠幸、武田伸一郎、原山淳、渡辺伸、榎戸輝揚、田中孝明、寺田幸功、内山秀樹、谷津陽一、中野俊男、田島宏康、山岡和貴、大野雅功、勝田隼一郎、高橋弘充、深沢泰司、水野恒史、中森健之、野田博文、牧島一夫、湯浅孝行、内山泰伸、斉藤新也、片岡淳、Philippe Laurent、Francois Lebrun、Olivier Limousin、他 HXI チーム：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状~打ち上げ~」、V345a
- [50] 奥田和史、小林翔悟、中澤知洋、山田真也、牧島一夫：「「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析 (2)」、W121a
- [51] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、中澤知洋「マグネター 4U0142+61 の硬 X 線パルス位相変調:NuSTAR データの解析」、W137a
- [52] 小林翔悟、中澤知洋、牧島一夫：「熱的コンプトン過程を用いた ULX 天体の統一的な描像」、W144a
- 日本物理学会・春季大会 (2016 年 3 月 19~22 日；東北学院大学；口頭)
- [53] 三宅克馬、斉藤新也、中野俊男、萩野浩一、小林翔悟、奥田和史、三村健人、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀秀、中澤知洋、武田伸一郎、田島宏康、深沢泰司、高橋忠幸：「ASTRO-H 搭載の Si 両面ストリップ検出器の表面付近の応答特性 (2)」、21aAH-4
- [54] 室田優紀、中野俊男、笹野理、中澤知洋、牧島一夫：「棒状シンチレータを用いた光量差によるガンマ線位置検出技法の基礎研究」、21aCD-5
- [55] 和田有希、榎戸輝揚、湯浅孝行、中野俊男、中澤知洋、奥田和史、古田禄大、榎本大悟、土屋晴文：「雷雲ガンマ線の多地点観測に向けた検出装置の小型化と 2015 年度冬季における北陸地方への展開」、21pAZ-13
- [56] 榎本大悟、土屋晴文、中澤知洋、古田禄大、奥田和史、和田有希、加藤博、湯浅孝行、榎戸輝揚、牧島一夫：「GROWTH 実験：2006-2015 年における柏崎刈羽原発内における雷雲ガンマ線検出データの全解析」、21pAZ-13
- [57] 小野光、櫻井壮希、ZhangZhongli、中澤知洋、牧島一夫：「ハード状態における GS 1826-238 の「すざく」によるワイドバンド分光」、21pCD-7
- [58] 牧島一夫、杉崎睦、小野光、中澤知洋、櫻井壮希：「硬 X 線スペクトルで探る中性子星の表面状態」、21pCD-8
- [59] 安東正樹、ほか：「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (68)：DECIGO 計画の概要」、21a-CE-1
- その他

- [60] 村上浩章：「マグネターの自由歳差運動と ASTRO-H への見通し」、理研シンポジウム「中性子星の包括的研究」(2015 年 11 月 24-25 日, 理研和光キャンパス 仁科ホール)
- [61] 小野 光：「『すざく』を用いたハード状態における LMXB 降着流の研究」、～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ (2015 年 12 月 21-22 日, 京都大学理学研究科セミナーハウス)
- [62] 中澤知洋：「次世代の硬 X 線観測装置」、第 1 回 XRT 勉強会 (2015 年 11 月 16 日, 名古屋大学)
- [63] 中澤知洋：招待講演：「The Hard X-ray Imager on-board ASTRO-H」、第 13 回 X 線結像光学シンポジウム (2015 年 11 月 17-18 日, 名古屋大学)

## 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・杉田・生駒・河原)

### 8.1 田村研究室

#### 系外惑星および惑星形成現場の直接観測

太陽系外惑星やその誕生現場である原始惑星系円盤などを直接撮像観測する「SEEDS プロジェクト」を、2009年からすばる望遠鏡を用いて進め、2015年に主たるサーベイをほぼ完了した。そのデータに基づく成果出版・報告を継続している。今年度は、SEEDSのレビュー論文を出版した [8]。さらに、TW Hyaのまわりの円盤の20AUに位置する空隙の発見 [9]、SU Aurのまわりの円盤の特異な構造の発見 [10]、DoAr 28のまわりの円盤の空隙の詳細構造の解明 [11]、HD 169142のまわりの円盤の空隙の詳細構造の解明 [12]、LkCa 15のまわりの傾いた内側円盤の発見 [13]などに成功した。さらに、すばる望遠鏡とHiCIAOを用いた国際共同研究により、FU Ori型星を高コントラスト観測し、質量降着による重力不安定に起因する構造を発見した [14]。

#### 系外惑星研究のための観測装置の開発

(a) 系外惑星・円盤の直接観測のためのすばる望遠鏡用高コントラスト装置HiCIAOを保守・運用している。(b) その機能を向上させるために、2000素子相当の超補償光学(SCEXAO)の開発も行っており、その装置論文を出版した [15]。(c) すばる望遠鏡用面分光器装置CHARIS(カリス)の開発にも関与している。地球型惑星探査のための、すばる望遠鏡用超高精度視線速度分光器IRD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。(d) 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。(e) NASAが計画するWFIRST宇宙望遠鏡への搭載を目指したコロナグラフWACOの基礎開発を進めている。位相マスクの開発に関する装置論文を北海道大学の共同研究者らと出版した。(f) IRSF望遠鏡のための偏光器SIRPOL(サーポール)の保守・運用も行っている。

### 8.2 須藤研究室

同一軌道面内にある外惑星の摂動を受けた内惑星の天体力学的進化

近年、主星の自転軸と惑星の公転軸の向きが大きく異なる系が数多く発見されている。それらに対する形成モデルはいくつか提案されているが、それらは向きをずらすことは可能であっても、完全に逆行する(すなわち、主星の自転軸に対して反並行な公転をする)惑星を形成することは極めて困難である。その可能性として、内側にある惑星が、外側にあつて(したがって、直接観測されている訳ではない)楕円軌道を描く惑星によって摂動を受けて、1に近い極端な離心率を獲得し、その結果、公転軸を反転させるというモデルが提唱されている。我々は、そのモデルに対して、より現実的な効果(一般相対論的補正、主星と惑星の自転の効果、主星と惑星の潮汐相互作用)を考慮した天体力学的数値シミュレーションを行い、それらの系の系統的な進化を調べた [7]。その結果、このような系は強い潮汐作用のために、ほとんどの場合潮汐破壊を受けて、安定な逆行惑星を形成することはほとんど不可能であることが分かった。一方で、ある割合は安定な順行惑星を形成することがわかり、観測されているホットジュピターの一部はこの経路を経て形成されたものであるかもしれない。

#### 重力減光を用いた高温星まわりのウォームジュピター Kepler-448b のスピン軌道角測定

有効温度6100 K以上の高温星まわりの近接巨大ガス惑星(ホットジュピター)では、その公転軸がしばしば主星の自転軸と大きくずれている。この事実はホットジュピターが惑星散乱などの力学的過程を経て短周期の軌道に移動した証拠とされるが、そもそもより長周期の惑星で2つの軸が揃っているか否かは確かめられていない。このような検証の一環として、我々はKepler-448bという高温星(有効温度6800 K)まわりのウォームジュピター(公転周期17.86日)に着目した。この系では分光観測により、主星自転軸と惑星公転軸の天球面内におけるずれ( $12.6^{\circ} \pm_{-2.9}^{+3.0}$ )が報告されていた。我々はケプラー宇宙望遠鏡によって得られたこの惑星のトランジット光度曲線において、高速自転に起因する主星の輝度分布の非一様性(重力減光)による非対称性を発見し、これをモデル化することにより、主星自転軸と惑星公転軸のずれが3次元的にみても同程度であることを示した。この結果は、両軸の大きなずれがやはりホットジュピターに特有の性質であることを支持する [76]。

### 重力減光とスピン-軌道歳差運動を起こす系外惑星系 PTF08-8695 のトランジット光度曲線の再解析

系外惑星系 PTF08-8695 は T タウリ型星と近接巨大ガス惑星からなる系である。この系に関して、2009 年と 2010 年に 2 回観測されているトランジット (惑星が主星前面を通過する際の食) 光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている。この光度曲線の時間変化は、0.671 日以下という主星の高速自転と 0.448 日という惑星の超短周期軌道に起因した、主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動によるものと考えられている。過去の研究では、歳差運動の力学モデルを通して惑星の半径や質量、軌道傾斜角などといった系のパラメータを決定しているが、そこでは“主星の自転周期が惑星の公転周期と等しい”という、この系においては非自明な仮定が課されている。そこで本研究では、その仮定を除いた上でより広いパラメータ範囲に対してデータを再解析した結果、歳差運動の周期がそれぞれおよそ 200 日、500 日、800 日に対応する 3 つの解が存在することを発見した。加えて我々は、2014-15 年にかけて京都産業大学・神山天文台においてこの系の追測光観測を行い、そのデータを解析することで真の解は 200 日の歳差周期に対応する解に近いという予備的な結果を得た。[6, 57, 58, 75]

### 3 重食連星系の測光データによる構造決定

我々はケプラー宇宙望遠鏡によって発見された短周期 (2.4 日) の食連星系 KIC 6543674 の光度曲線において、食連星の周囲を公転する 3 つめの星 (tertiary star) による食を発見した。さらにその光度曲線を、内側の連星の食の光度曲線およびそのタイミング変化と組み合わせて解析することで、系を構成する 3 つの恒星の質量・半径および軌道を測光データからすべて決定した。この解析から、tertiary star の軌道は公転周期 1100 日、離心率 0.6 で、かつ内側の連星の軌道面と非常によく揃っている (相互傾斜角  $3.3^\circ \pm 0.6^\circ$ ) ことが明らかとなった。標準的なシナリオでは、KIC 6543674 に含まれるような短周期連星は tertiary star による古在機構とその後の潮汐散逸によって形成され、最終的な連星軌道と tertiary star の軌道は典型的に約  $40^\circ$  ほど傾くとされている。従って、今回得られたフラットな構造は標準シナリオとは相容れず、永年摂動の高次項のような標準シナリオで考慮されていない過程が形成に寄与したことを示唆する [3, 77]。

### トランジット惑星による重力定数の時間変動への制限

トランジット惑星系では、食の中心時刻の解析から各時刻  $t$  における惑星の公転周期  $P(t)$  を高精度で決定することが可能である。このような惑星系を長期的にモニタリングすることで、 $P(t)$  の時間変動の上限から重力定数  $G$  の時間変動に対する制限が得られる。我々は、ケプラー宇宙望遠鏡によって観測された 10

個のトランジット惑星系においてこのような解析を行い、2009 年-2013 年にかけて  $\Delta G/G < 5 \times 10^{-6}$ 、あるいは  $\dot{G}/G < 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$  ( $G$  の変化率  $\dot{G}$  を一定と仮定する場合) を示した。上記の制限はパルサータイミングや月レーザー測距実験による結果と比較すると弱いものの、制限できる変動のタイムスケール等の観点でそれらと相補的であるうえ、また長期間観測されたより多くの系を解析することでより強い制限を得ることも可能である [4]。

### 目視による長周期トランジット惑星候補の発見

ケプラー宇宙望遠鏡の測光データから通常のアロリズムでトランジットを検出するには、トランジットが複数回生じている必要がある。従って、公転周期が長く、観測期間中に 1 度しかトランジットしないような惑星は見落とされてしまう。そこで我々は、7557 個のトランジット惑星候補天体の光度曲線から、目視による single transit events (STEs; 観測期間中に 1 回のみ生じるトランジット) の探査を行い、28 個の STE を発見した。さらにその光度曲線を、同じ系の他のトランジット惑星の光度曲線あるいは主星密度への制限と組み合わせて解析することで、STE を生じている惑星の半径と公転周期を推定した。結果、上記のうち 7 つの STE は惑星によるものである可能性が高く、その場合公転周期が数年-20 年ほどの海王星-木星サイズ惑星であることを明らかにした。またこれらの結果から、惑星系の軌道面が一般によく揃っていると仮定する場合、コンパクトな複数トランジット惑星系のうち少なくとも約 20% が周期 3 年程度以上の巨大ガス惑星を持つことを示した [5]。

### ケプラー測光データを用いた長周期惑星のリング探査

太陽系外において惑星周りで、惑星と同程度の大きさを持つリング構造は発見されていない。最近の研究では、ケプラー望遠鏡で発見された 21 の短周期惑星をターゲットに、測光データからリング探査が行われたが、リングの兆候はみつからなかった。この結果は、惑星が恒星に近いとリング粒子が物性的にも軌道的にも不安定なことから矛盾しない。

そこで、我々はケプラーのデータから、95 の長周期惑星およびその候補に絞ってリングの系統的な探査を行った。その結果、KIC 10403228 がリングに特徴的な蝕を示していることがわかった。我々はリング付き惑星の蝕のモデルを作成し、光度曲線を解釈した結果、この蝕が、ガス型惑星と同程度の惑星半径を持つリング付き惑星でうまく説明できることが判明した。また、リング以外の要因による誤検出の可能性について議論し、結果リングの出すシグナルである確率が高いとした。一方で、ケプラー則から推定される公転周期は 600 年程度と、Kepler 衛星で検出される惑星にしては非常に長いことも指摘した。このことは KIC 10403228 の光度曲線の減光を惑星による蝕と解釈すること自体が誤っている可能性がある事を示唆する [61, 78]。

### 8.3 生駒研究室

#### 巨大ガス惑星の形成理論：大気凝結成分が臨界コア質量に与える影響

巨大ガス惑星形成モデルでは、集積する円盤ガスは太陽組成であると仮定されることがほとんどである。しかし、円盤ガスが氷微惑星と同時に集積すること、さらに形成初期には氷微惑星の集積率の方がガス集積率に比べて圧倒的に高いことを考えると、太陽組成であるという仮定は非現実であり、むしろ形成期の原始エンベロープは重元素に非常に富んでいたと考えるべきである。そこで我々は、太陽組成成分に加えて、氷成分として炭素や酸素からなるガスとそれらの凝結成分の存在を考慮し、原始エンベロープの重力安定性を調べた。その結果、暴走的なガス集積が発生するために必要なコア質量（臨界コア質量）が従来の値に比べて1-2桁小さくなることがわかった。巨大ガス惑星の形成時間が長すぎる問題や、木星内部に大きなコアが存在しない問題の解決に重要な影響を与える結果であると言える [32]

#### 巨大氷惑星の熱進化学理論：大気凝結成分の潜熱が熱進化速度に与える影響

天王星と海王星は、質量と半径について非常に似ており、バルク組成はほぼ同じであると考えられる。しかし、赤外放射量は一桁以上異なっており、天王星について言えば、観測精度の範囲内で光っていないと言える。先行研究では、その原因として、惑星内部での組成勾配や相転移による対流の阻害の効果を検討しているが、どれも天王星の暗さおよび両氷惑星の放射量に関する大きな違いを説明できていない。そこで我々は、先行研究とは全く異なるアイデアとして、大気に凝結成分が大量に存在した場合、その潜熱の解放によって進化過程を通じて高温状態が維持され、それによって冷却が加速されるというアイデアを提案した。そして、実際に、天王星の現在の暗さを説明できることを数値計算によって示した。海王星とは異なり、天王星は自転軸が横倒しであり、それは巨大天体衝突が原因であると考えられている。巨大天体衝突時には、深部の凝結成分が大気中に容易に巻き上げられるので、我々のアイデアは天王星のみが暗いという観測事実と整合的である [54]。

#### トランジット系外惑星の透過分光観測

系外惑星の大気成分を知ることは、惑星の多様性や起源などを知る上で重要である。その1つの観測手法として、トランジット惑星に対する大気透過分光観測が有用である。我々は、岡山天文台188cm望遠鏡に三色同時バンド測光カメラ (MuSCAT) を2014年末に設置した。そして今回、F型星HAT-P-14をまわるホットジュピターに対して大気透過分光観測を行い、その性能および応用性を評価した。K2

やTESSで発見されるトランジット惑星の大気成分の特定に有用であることが示された [33]

### 8.4 河原研究室

#### 直接撮像による惑星キャラクタリゼーション：周波数変調を用いた赤道傾斜角推定法

将来の直接撮像衛星による地球型惑星キャラクタリゼーションの新しい手法を開発し論文発表した。具体的には、惑星の自転による光度変動の周波数が、赤道傾斜角や軌道傾斜角により変調を受けることを発見し、これのモデリングを行った。また具体的にPseudo Wigner Ville distributionを用いて、シミュレートした光度変動曲線から周波数変調を検出できる事を示し、先のモデルとあわせて赤道傾斜角等が推定できる事をしめした。これらの結果は、Astrophysical Journalに掲載予定 [26] である。

#### 長周期巨大トランジット惑星の発見

ケプラー衛星のデータ中から、長周期惑星を探す新しい方法論を開発し、実際に探査を行った。これにはケプラー衛星が稼働した4年分のデータから単一トランジット現象 (一回もしくは二回のみトランジットがあるもの) を目視により探査を行い、結果、7個の長周期トランジット惑星候補を発見した。これらのうち6個は内側に複数の惑星が発見されているため惑星である蓋然性が極めて高い。発見した惑星候補はケプラーチームによりKOI (Kepler Object of Interest) として正式に認められる予定である。これらの結果は、Astrophysical Journalに掲載された [27]。

#### 光度曲線のみによる階層的三重連星系の軌道決定

連星系においてもこのような単一トランジット現象を発見し、惑星よりは恒星に近い天体だったものの、この詳細解析をおこなった。結果、単一トランジット中に連星による食が3回観測された事と光速が有限である効果を利用し、光度曲線のみから軌道パラメータを全て決定する事に成功したこれらの結果は、Astrophysical Journal Lettersに出版された [30]。

#### マグマオーシャン惑星の直接撮像キャラクタリゼーションの可能性

将来の直接撮像衛星による地球型惑星キャラクタリゼーションとしてマグマオーシャン惑星がどのように観測されるかを調べた。結果、水蒸気による強い吸収があるが、水の吸収の効きにくく、かつ輻射スペクトルが十分にあるKs, Lバンドにおいてはコ

ントラストにして10の-7から-8乗程度の高いコントラストが期待され、将来のコロナグラフ計画で検出可能であることが示唆された [31]。

### 電波レリック銀河団の観測的研究

銀河団の中には電波で見ると弓上の構造がみられる電波レリック銀河団と呼ばれるものが存在する。我々はこれまですざく衛星を用いて電波レリック前後の温度構造をしらべることでレリックが衝撃波面に対応している事を示してきた (e.g. Akamatsu & Kawahara 2013 PASJ, 65,16)。本年度は未解析だった CIZA J2242.8+5301 の反対側レリックと Toothbrush 銀河団の解析を行いランキンユゴニエ関係からマッハ数を求めた [28, 29]。結果、電波レリックから求めたマッハ数より低めのマッハ数が示唆されるという従来の傾向をより明確にすることができた。系統的な違いが起きる原因は今後の課題となる。

## 8.5 杉田研究室

### はやぶさ2による地球・月スイングバイ観測

はやぶさ2探査機は2015年12月3日に地球スイングバイを行った。はやぶさ2の可視カメラは、この機会に地球と月を撮像した。得られた画像は、小惑星リュウグウに到着する前に撮像できる最後の面光源画像であるため、本カメラの性能評価をする上で非常に貴重な機上データとなる。また、一般市民からの非常に高い期待と注目を集める「はやぶさ2」探査機だが、どのように報道されるかは、その可視カメラが撮像する画像の良否や速報性にも大きく左右される。実際、今回の「はやぶさ2」地球スイングバイはマスコミからも高い注目があつた。この意味で、今回の撮像機会は、取得画像を正確かつ迅速に解析し、平易で且つ誤解を招かない説明を付して広報発表する予行演習ともなつた。

打上げから地球スイングバイまでの撮像によって得た画像データによって、ONCの各カメラのCCDおよび光学系が正常な機能と性能を有していることが確認された。具体的には、暗電流値、バイアス値、各バンドでの感度、電磁ノイズレベル白キズなどの確認を行った。スイングバイ前後の地球・月撮像で得た画像データは、複雑な輝度分布を持つ面光源の撮像に耐える画質をONC-TやW2が持っていることを示した。また、地球・月画像は、点像関数(PSF)の裾野領域の詳細な形状を推算したり、視野外迷光レベルの上限値を高い精度で計測するために非常に有効なデータである。これらのデータは、環境光の完全除去ができない室内実験に比べて質が高いこと、また打上げ等の擾乱によってカメラ性能が劣化した可能性も含めて、性能評価ができる点で優れている。特に、スペクトル特性が非常に正確に計測されている月の分光計測データを得られたことは、高い精度の分光計測校正の確認ができることを意味しており、その異議は非常に高い。また、今回の一連の

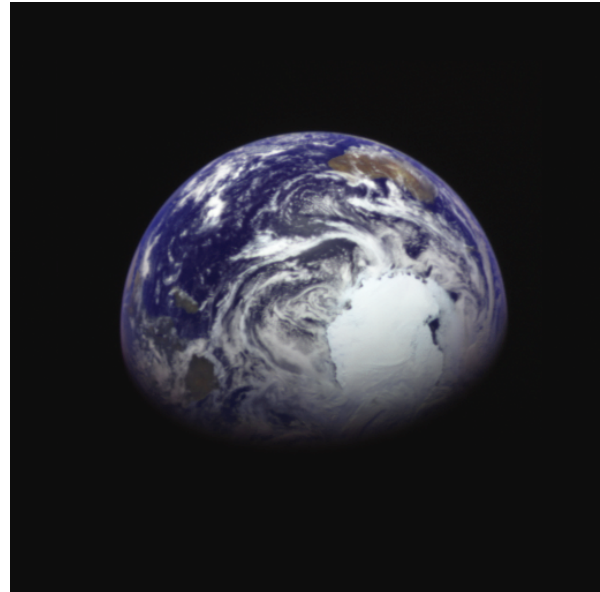


図 8.1: 地球スイングバイ直前の2015年12月3日9:00から18:15(日本時間)に側方視のW2で撮影された19枚の地球像。左下は、同時刻の地球の模擬画像†。北アフリカからアラビア半島、インドに掛けての赤道域が移っていることが分かる。†: 地球の模擬画像は宇宙科学研究所、科学衛星運用・データ利用センター(C-SODA)が運営するData ARchives and Transmission System(DARTS)にて公開されているFLOWプロジェクトで公開されているソフトウェアを利用(<https://darts.jaxa.jp/planet/tools/flow/>)。

撮像で得たデータは、NIRS3やTIRなどとの同時観測も行なっているので、アラインメント確認やデータ統合の予行演習の材料を提供してくれる見込みである。これらの多機器との統合解析は、2016年度に予定されている火星観測や恒星観測で得られるデータと共に今後引き続き実施していく予定である。

### 惑星探査機搭載測器開発

火星および月の探査ローバに搭載可能な重量・電力・寸法の条件を満たして且つ宇宙仕様部品のみで構成できる飛行時間型質量計のプロトタイプ(寸法と機能は宇宙仕様品と同等だが耐環境性能と重量は民生品レベルの部品で構成)の製作を行った。試験運転と機器調整の結果、K-Ar年代計測に必要な質量分解能 $M/\Delta M \geq 100$ を達成できることが確認した。また、2014年度に導入した小型レーザーを用いて耐環境実験とLIBS(レーザー誘起絶縁破壊分光計測)実験を実施し、月・火星探査に必要な耐環境性能を持つこと及び十分な精度のLIBS計測を成立させられる光量を確保できることを確認した。また、このレーザーの直流電源ユニットも宇宙仕様品で構成できることも確認した。両者を組み合わせれば、小型ローバに搭載可能な寸法に収めることができるため、来年度の伊豆大島でのフィールド実験の目処が立った。加えて、使い捨て部品を用いずに繰り返し

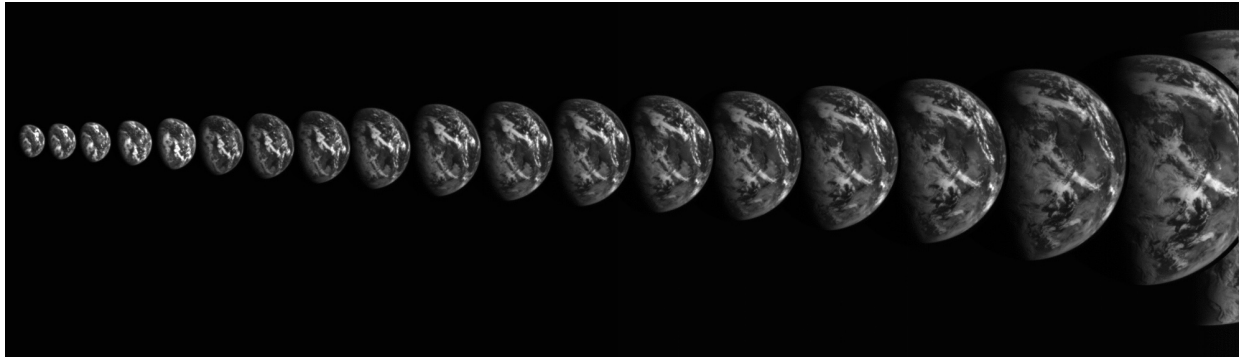


図 8.2: 2015 年 12 月 4 日 13 時 9 分 (日本時間) に ONC-T で撮影した地球の画像。地球と「はやぶさ 2」の距離は約 34 万 km。画像右上にオーストラリア大陸、右下に南極大陸が見えている。

開閉が可能で且つ必要トルクが低い O リングによる真空保持機構の開発を昨年引き続き行った。2015 年度は特に低温耐性を持つ O リング材質のバイトンからの脱ガスを調査し、K-Ar 年代計測に必要な性能が確保されることが分かった。さらに、月および火星の着陸探査機に搭載するための試料取り回し機構の検討を行い、小型カメラ、試料捕獲アーム、試料保持カップ、コア抜きドリルという最小限のコンポーネント構成で、惑星表面に期待される様々な大きさの岩石を捕獲して K-Ar 計測に必要な一定の大きさと形状の試料に成形できるシステムの概念設計を完了した。

### 地球型惑星の大気初期進化

地球型惑星の大気組成の初期進化を検討するため、超高速実験のデータと化学平衡計算を組み合わせた理論解析を行った。

高速衝突実験で得られるユゴニオ曲線上の EOS データは、衝突脱ガス大気の化学組成推定にも役立つ。このデータはユゴニオ曲線上から外れた超高温高压条件での物質状態の推定に直接使うことはできないが、衝突蒸気の持つエントロピーは正確に予測することができる。超高温高压条件では化学反応は非常に速く進行するため、熱化学平衡状態にあると仮定してもよい場合が多い。むしろ、理想気体の状態方程式が成り立つような低压にまで断熱膨張した後には化学反応がクエンチする可能性が高い。そのため、衝突蒸気雲が持つエントロピーさえ正確に計算できれば、クエンチが起きる可能性のある温度圧力条件での平衡組成や反応速度は理想気体の状態方程式を用いて議論できるのである。

このような発想のもとで、断熱膨張曲線に沿った衝突蒸気雲の化学平衡計算を行ったところ、CI コンドライトのような揮発性物質に富む炭素質コンドライトから生ずる衝突蒸気雲は、断熱膨張する間は広い温度圧力条件にわたって CH<sub>4</sub>/CO 比や CO/CO<sub>2</sub> 比をほぼ一定に保つという結果を得た。特に、地球の海への衝突や火星への衝突のように衝突蒸気雲のエントロピーが低く抑えられる条件では、数 100ppm~% レベルのメタンが生成する可能性のあることが判明

した (Kuwahara and Sugita, 2015)。これは、前生命時代の地球における有力なメタン源となるかもしれない。

この炭素質隕石からのメタンに富むガス放出は、惑星進化を理解する上で様々な意味を持っている。例えば、古火星気候の温暖化である。過去の火星の大気が温暖湿潤であったか否かは、マリナー計画で流水地形が見つかって以来 40 年来の謎である。Kasting (1991) が火星は CO<sub>2</sub> のみでは温暖湿潤気候の成立が困難であることを理論的に示して以来、多くの研究者がこの問題に取り組んできたが、有力な解決策は見つかっていない。しかし、この天体衝突によるメタンの大量生成過程は、この問題を解決できる可能性を秘めている。Wolf and Toon (2010) の推算では、メタンに富む大気ではエアロゾルが大量に生成されるため紫外線遮蔽が有効に働き、メタンの紫外線による分解が阻害される。そのような状況になれば、温室効果の非常に高いメタンが長期間に渡って大気中に滞留できるので、温暖湿潤気候が地質学的にも長期間存在できる可能性が出てくる。同様の議論は、生命が生まれた後である太古代の地球の大気の温暖化について議論されてきたプロセスであるが、もし天体衝突のような無生物的な機構によって大量のメタンが大気中に供給されることになれば、前生物地球や火星についても成立するため、その意義は大変に大きい。

ただし、このような衝突による大量メタン生成仮説が成り立つためには、幾つか越えなければならないハードルも存在する。例えば、衝突天体の種類と落下時期についての議論は重要である。もし CI コンドライトや CM コンドライトに近い組成の天体が比較的遅い時代に大量に降ってきたのであれば、この衝突によるメタンの直接生成モデルには非常に都合がよい。しかし、現在の地球のように普通コンドライトの衝突が主体であったら、メタン生成の効率はかなり落ちてしまうかもしれない。このような天体衝突の歴史は、小惑星帯における物質分布とその軌道状態を詳細に理解することによって達成される。より具体的には、はやぶさ 2 や OSIRIS-REx のような C 型小惑星の探査によって、現在把握されている小惑星帯の小惑星のスペクトル分布が物質分布と具体的にどう結びつくかが明確化されることが重

要である。

<受賞>

- [1] 藤井友香「惑星光による系外地球型惑星の表層環境の推定：将来の直接撮像観測にむけて」、第32回（2015年度）井上研究奨励賞、井上科学財団、2016年2月4日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Kento Masuda: “Spin-Orbit Angles of Kepler-13Ab and HAT-P-7b from Gravity-darkened Transit Light Curves,” *The Astrophysical Journal*, **805** (2015) 28
- [3] Kento Masuda, Sho Uehara, & Hajime Kawahara: “Absolute Dimensions of a Flat Hierarchical Triple System KIC 6543674 from the Kepler Photometry,” *The Astrophysical Journal Letters*, **806** (2015) L37
- [4] Kento Masuda & Yasushi Suto: “Transiting planets as a precision clock to constrain the time variation of the gravitational constant,” *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2016; doi: 10.1093/pasj/psw017
- [5] Sho Uehara, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Shin'ya Yamada, & Masataka Aizawa: “Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest,” arXiv:1602.07848
- [6] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Revisiting a gravity-darkened and precessing planetary system PTFO 8-8695: A spin-orbit non-synchronous case”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67** (2015) 94
- [7] Yuxin Xue and Yasushi Suto, “Difficulty in Formation of Counter-orbiting Hot Jupiters from Near-coplanar Hierarchical Triple Systems: A Sub-stellar Perturber”, *The Astrophysical Journal*, 820, 55(17pp) (arXiv:1602.04428)
- [8] Tamura, M. : *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B*, 92, pp. 45-55 (2016)
- [9] Akiyama, E. et al.: *Astrophys. J.* 802, article id. L10, 5 pp (2015)
- [10] de Leon, J. et al.: *Astrophys. J.* 806, article id. L10, 6 pp (2015)
- [11] Rich, E. A. et al.: *Astron. J.* 150, article id. 86, 9 pp (2015)
- [12] Momose, M. et al.: *PASJ*, 67, id. 8316 pp (2015)
- [13] Oh, D. et al.: *PASJ*, 68, id. L3 6 pp (2016)
- [14] Liu, H. B. et al.: *Science Advances*, 2, id. e1500875 (2016)
- [15] Jovanovic, N. et al.: *PASP*, 127, pp. 890-910 (2015)
- [16] Hong, P. K., H. Miyamoto, T. Niihara, S. Sugita, K. Nagata, J. M. Dohm, M. Okada (2016), Deconvolution of reflectance spectra of synthetic clinopyroxene using the exchange Monte Carlo method, *J. Geol. Geophys.*, 5, 243, pp. 1-15, DOI:10.4172/2381-8719.1000243.
- [17] Miyamoto, H., T. Niihara, T. Kuritani, P. K. Hong, J. M. Dohm, and S. Sugita (2016), Cluster analysis on the bulk elemental compositions of Antarctic stony meteorites, *Meteo. Planet. Sci.*, 906-919, doi: 10.1111/maps.12634.
- [18] Kameda, S., H. Suzuki, T. Takamatsu, Y. Cho, T. Yasuda, M. Yamada, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, M. Sato, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2016), Preflight calibration test results for optical navigation camera telescope (ONC-T) onboard the Hayabusa2 spacecraft, *Space Sci. Rev.*, DOI 10.1007/s11214-015-0227-y.
- [19] Kameda, S., H. Suzuki, Y. Cho, S. Koga, M. Yamada, T. Nakamura, T. Hiroi, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, A. Takei, K. Takamatsu, Y. Okumura, M. Sato, T. Yasuda, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2015) Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa-2 spacecraft. *Adv. Space Res.* 56, 1519-1524. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.037
- [20] Kurosawa, K. Y. Nagaoka, H. Senshu, K. Wada, S. Hasegawa, S. Sugita, and T. Matsui (2015), Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *J. Geophys. Res.*, 120, 1237-1251. DOI: 10.1002/2014JE004730
- [21] Kuwahara, H. and S. Sugita (2015), Chemical composition diversity among early terrestrial atmospheres generated by impacts, *Icarus*, 257, 290-301. DOI: 10.1016/j.icarus. 2015.05.007
- [22] Cho, Y., S. Sugita, S. Kameda, Y. N. Miura, K. Ishibashi, S. Ohno, S. Kamata, T. Arai, T. Morota, N. Namiki, and T. Matsui (2015), High-precision potassium measurements using laser-induced breakdown spectroscopy under high vacuum conditions for in situ K-Ar dating of planetary surfaces, *Spectrochim. Acta Part B*, 106, 28-35.
- [23] Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, E. Tajika, K. Kuramoto, and F. Nimmo (2015), The relative timing of Lunar Magma Ocean solidification and the Late Heavy Bombardment inferred from highly degraded impact basin structures, *Icarus*, 250, 492-503. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.12.025
- [24] Kadono, T., A.I. Suzuki, K. Wada, N.K. Mitani, S. Yamamoto, M. Arakawa, S. Sugita, J. Haruyama, A.M. Nakamura (2015), Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles, *Icarus*, 250, 215-221. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.11.030



- [25] 杉田精司, 桑原秀治, 黒澤耕介 2015, 超高速衝突実験が明らかにした衝突蒸発現象・化学反応過程, 日本惑星科学会誌 遊星人, 24, 182-191.
- [26] Hajime Kawahara: "Frequency Modulation of Directly Imaged Exoplanets: Geometric Effect as a Probe of Planetary Obliquity", ApJ accepted, arXiv:1603.02898
- [27] Sho Uehara, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Shin'ya Yamada, Masataka Aizawa: "Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest", ApJ 822, 2
- [28] Itahana, M. Takizawa, H. Akamatsu, T. Ohashi, Y. Ishisaki, H. Kawahara, R. J. Van Weeren: "Suzaku Observations of the Galaxy Cluster 1RXS J0603.3+4214: Implications of Particle Acceleration Processes in Toothbrush Radio Relic", PASJ 67,113 (2015)
- [29] Akamatsu, R. J. van Weeren, G. A. O'Greehan, H. Kawahara, A. Stroe, D. Sobral, M. Hoeft, H. Rottgering, M. Bruggen, J. S. Kaastra "Suzaku X-ray study of the double radio relic galaxy cluster CIZA J2242.8+5301", A&A 582, A87 (2015)
- [30] Kento Masuda, Sho Uehara, Hajime Kawahara: "Absolute Dimensions of a Flat Hierarchical Triple System KIC 6543674 from the Kepler Photometry", ApJL, 806, L37 (2015),
- [31] Keiko Hamano, Hajime Kawahara, Yutaka Abe, Masanori Onishi, George L. Hashimoto: "Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere: Its Detectability by Future direct Imaging", ApJ, 806, 216 (2015)
- [32] Venturini, J., Alibert, Y., Benz, W., & Ikoma, M. 2015. Critical Core Mass for Enriched Envelopes: The Role of H<sub>2</sub>O Condensation. *Astronomy and Astrophysics* 576, A114.
- [33] Fukui, A., Narita, N., Kawashima, Y., Kusakabe, N., Onitsuka, M., Ryu, T., Ikoma, M., Yanagisawa, K., and Izumiura, H. 2016. Demonstrating High-precision, Multiband Transit Photometry with MuSCAT: A Case for HAT-P-14b. *Astrophys. J.* 819, 27 (11pp)
- (国内雑誌)
- [34] 須藤 靖: 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境 論説 2015年4月16日、6月1日、7月10日、8月6日、9月11日、10月20日、2015年1月8日、1月22日
- [35] 須藤 靖: "サイエンス最前線 38 : パンスターズ地球に衝突する小天体を監視", 週刊エコノミスト 2015年4月15日号, pp.72-73.
- [36] 須藤 靖: 物理学、この30年: "宇宙論", パリティ **30**(2015)5月号, pp.6-8.
- [37] 須藤 靖: "サイエンス最前線 42 : SETI 今も進行中 地球外文明発見プロジェクト", 週刊エコノミスト 2015年5月19日号, pp.64-65.
- [38] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その三十: 大学の存在意義", 東京大学出版会 UP **512**(2015)6月号, pp.24-29.
- [39] 須藤 靖: "サイエンス最前線 46 : GAIA 10億個の星の精密3次元地図作り", 週刊エコノミスト 2015年6月16日号, pp.68-69.
- [40] 須藤 靖: "サイエンス最前線 50 : LSST 「広く、速く、深く」で拓く新たな天文学", 週刊エコノミスト 2015年7月14日号, pp.76-77.
- [41] 須藤 靖: "サイエンス最前線 54 : 太陽系外惑星ほんの20年前まで存在しないと信じられていた", 週刊エコノミスト 2015年8月11・18日号, pp.80-81.
- [42] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その三十一: 再現性のない世界", 東京大学出版会 UP **515**(2015)9月号, pp.22-30.
- [43] 須藤 靖: "サイエンス最前線 58 : 系外惑星リングの発見? 土星の200倍サイズのリングを持つ天体", 週刊エコノミスト 2015年9月15日号, pp.74-75.
- [44] 須藤 靖: "サイエンス最前線 62 : Advanced LIGO 一般相対論100年、重力波が直接検出されるか", 週刊エコノミスト 2015年10月13日号, pp.70-71.
- [45] 須藤 靖: "サイエンス最前線 66 : ニュートリノをめぐる冒険 (1) 素粒子の階層と太陽ニュートリノ問題", 週刊エコノミスト 2015年11月10日号, pp.70-71.
- [46] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その三十二: 「青木まりこ現象」にみる科学の方法論", 東京大学出版会 UP **518**(2015)12月号, pp.24-31.
- [47] 須藤 靖: "サイエンス最前線 70 : ニュートリノをめぐる冒険 (2) 大気ニュートリノ問題とニュートリノ質量", 週刊エコノミスト 2015年12月8日号, pp.78-79.
- [48] 須藤 靖: "サイエンス最前線 74 : アイスキューブ 南極の氷が宇宙線の謎を解明する", 週刊エコノミスト 2016年1月12日号, pp.42-43.
- [49] 須藤 靖: "宇宙の加速膨張と高知家", 文藝春秋 巻頭エッセイ 2016年2月号, pp.88-89.
- [50] 須藤 靖: "サイエンス最前線 78 : 現代天文学による占星術? 超新星重力レンズの理論予言が的中", 週刊エコノミスト 2016年2月9日号, pp.70-71.
- [51] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その三十三: アインシュタイン、エディントン、マンドル", 東京大学出版会 UP **521**(2016)3月号, pp.39-46.
- [52] 須藤 靖: "サイエンス最前線 82 : 重力波直接検出 アインシュタインの予言以来100年後の快挙", 週刊エコノミスト 2016年3月8日号, pp.74-75.
- [53] 須藤 靖: 日本経済新聞 書評 2016年3月13日
- (学位論文)
- [54] Kenji Kurosaki "Evolution of ice giants in and outside the solar system" (博士論文)
- [55] Yuhiko Aoyama "Theoretical estimate of intensity of hydrogen line emission from accreting gas giants" (修士論文)

- [56] Yusuke Shirai “Late stage capture of solids by accreting proto-gas-giant planets” (修士論文)  
 < 学術講演 >  
 (国際会議)  
 一般講演
- [57] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Re-characterization of a gravity darkened and pre-processing planetary system PTFO 8-8695”; Emerging Researchers in Exoplanet Science Symposium (State College, 5/28-29, 2015)
- [58] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Re-characterization of a gravity darkened and pre-processing planetary system PTFO 8-8695”; 3rd DTA Symposium The Origins of Planetary Systems: from the Current view to New Horizons (Tokyo, 6/1-4, 2015)
- [59] Kento Masuda: “Spin-orbit angle of Kepler-13Ab from gravity-darkened transit light curves,” Dynamical Problems in Extrasolar Planets Science (Focus Meeting 1), IAU XXIX General Assembly, Honolulu, Hawaii, August, 2015
- [60] Yasushi Suto: “Hot Jupiters from near-coplanar hierarchical triple systems”, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, February 23, 2016 at Ishigaki Island, Japan.
- [61] Masataka Aizawa: “Search for planetary rings around long-period planets in Kepler photometric data”, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, February 24, 2016 at Ishigaki Island, Japan.
- [62] Sugita, S., M. Yamada, H. Sawada, S. Kameda, T. Kouyama, H. Suzuki, R. Honda, T. Morota, C. Honda, K. Ogawa, K. Shirai, E. Tatsumi, N. Ogawa, Y. Iijima, and ONC Team (2016), Earth-Moon imaging with HAYABUSA2 Optical Navigation Camera (ONC) during the Earth Swing-by, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII, Houston, TX, USA, March 21-25, #2826, pp.1-2.
- [63] Kouyama, T., Y. Yokota, Y. Ishihara, R. Nakamura, S. Yamamoto, T. Matsunaga, M. Yamada, S. Kameda, H. Sawada, H. Suzuki, R. Honda, T. Morota, C. Honda, K. Ogawa, and S. Sugita (2016), Lunar Calibration for Planetary Explorers using SELENE/SP Lunar Reflectance Model, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII, Houston, TX, USA, March 21-25, #1723, pp.1-2.
- [64] Doan, D., E. Tatsumi and S. Sugita (2016), An experimental investigation on the yield of Hayabusa2 sampler system using different grain-size distribution”, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXVII, Houston, TX, USA, March 21-25, #2420, pp.1-2.
- [65] Cho, Y., M. Horiuchi, K. Shibasaki, S. Kameda, K. Wada, T. Nakamura, T. Mikouchi, Y. Miura, R. Okazaki, K. Ishibashi, K. Yoshioka, S. Sugita, A laser-induced breakdown spectroscopy instrument for elemental analyses on Phobos, Phobos, Deimos, and Mars Workshop, February 15th - 16th, 2016, ELSI Hall, ELSI-1 Building, 東京工業大学 東京都目黒区, Poster presentation.
- [66] Sugita, S. and H. Kuwaraha (2015), Impact-induced methane formation on early Mars and Earth, Goldschmidt, Prague, Czech Republic, Aug. 16-21.
- [67] Cho, Y., S. Kameda, Y. N. Miura, Y. Saito, S. Yokota, S. Kasahara, R. Okazaki, K. Yoshioka, K. Shibasaki, T. Oishi, M. Umeyama, S. Sugita, An In-situ Dating Instrument Package for a Future Mars Rover Mission, 30th International Symposium on Space Technology and Science, July 9, 2015, 兵庫県神戸市 Kobe Convention Center, Oral presentation
- [68] Miura, Y. N., Y. Cho, T. Morota, H. Miyamoto, T. Usui, S. Kameda, S. Sugita and R. Okazaki (2015), Possible landing sites on Mars for an in-situ K-Ar dating by future Japan’s Mars rover mission, JpGU, 2015.5.28, 千葉県千葉市 幕張メッセ
- [69] Tatsumi, E. and S. Sugita (2015), Cratering Efficiency Reduction due to Armoring on the Coarse-Grained Targets, Bridging the Gap III, Freiberg Germany, Sept 21-23, Oral
- [70] Ikoma, M. ”Effects of snow on giant planet formation. International Workshop on Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”. Ishigaki, Okinawa, February 22-24, 2016.
- 招待講演
- [71] Yasushi Suto: “Beyond a pale blue dot”, The 2015 Kyoto Prize Workshop in Basic Sciences “Formation mechanism of planetary systems and the quest for earth-twins”, November 12, 2015, Kyoto, Japan.
- [72] Ikoma, M. Theoretical perspective on super-Earths and mini-Neptunes with a focus on the origins and compositions of short-period exoplanets. 31st int’l colloquium of the Institut D’Astrophysique de Paris From super-Earths to brown dwarfs: who’s who? Paris, June 29 - July, 2015
- [73] Ikoma, M. What can we learn from atmospheres of transiting low-mass exoplanets as a stepping stone towards habitable planets? Pathways 2015: Pathways towards habitable planets. Bern, July 13-17, 2015

- [74] Ikoma, M. Role of Magma Ocean and Primitive Atmospheres for the Hydration of Planetary Embryos. The Delivery of Water to Protoplanets, Planets and Satellites. Bern, Switzerland, January 11-15, 2016

(国内会議)

一般講演

- [75] 上赤 翔也, 増田賢人, Yuxin Xue, 須藤靖, 西岡翼, 村上里茶, 稲山廣一郎, 斎藤まどか, 田中道祐, 米原厚憲: “重力減光とスピン軌道歳差運動を起こす系外惑星系 PTFO 8-8695 のトランジット光度曲線の再解析”; 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [76] 増田賢人: “重力減光を用いた高温星まわりのウォームジュピターのスピン軌道角測定”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/15 2016)
- [77] 増田賢人、上原翔、河原創: “3 重食連星系 KIC 6543674 の測光データによる構造決定”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/14-17, 2016)
- [78] 逢澤正嵩、上原翔、増田賢人、河原創、須藤靖: “ケプラー測光データを用いた長周期惑星のリング探査”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/15, 2016)
- [79] 生駒大洋 “惑星系の多様性と起源の解明に向けた系外惑星トランジット観測の重要性”; 日本天文学会 2016 年春季年会「東京大学アタカマ天文台のサイエンス戦略」(首都大学東京, 3/16, 2016)

招待講演

- [80] 須藤靖: “すぐ役に立つものはすぐ役に立たなくなる一昨今の大学をとりまく状況への懸念一” 日本学術会議公開シンポジウム「人文・社会科学と大学のゆくえ」(2015 年 7 月 31 日)
- [81] 須藤靖: “日本学術会議提言「これからの理科教育のあり方」について”, 日本物理学会第 7 1 回年次大会「物理学・天文学分野の参照基準」、東北学院大学 (2016 年 3 月 19 日)
- [82] 生駒大洋 “見えはじめた系外惑星の大気” 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 秋季講演会 (2015.11.2 東大・小柴ホール)

(セミナー)

- [83] Kento Masuda: “Obliquity and orbital precession of the Kepler-13A system probed with gravity-darkened transit light curves,” MIT Astrophysics Brown Bag Lunch Series, October, 2015
- [84] 生駒大洋 「系外惑星に対する紫外 *sim* 赤外観測の重要性」, 宇宙望遠鏡による系外惑星に関する小研究会 (2015.5.23, 東大)
- [85] 生駒大洋 「低質量惑星の組成と起源 *sim* トランジット惑星観測への期待」, TESS と地上望遠鏡等との連携で広がる多様なサイエンス (2015.11.27, 国立天文台)

(講演)

- [86] 須藤靖: “系外惑星から宇宙生物学へ”、駿台学園天文講座 (2015 年 5 月 16 日)
- [87] 須藤靖: “宇宙を眺めて世界を知る”、駿台予備学校講演会 (2015 年 6 月 27 日)
- [88] 生駒大洋 「惑星科学の最前線 *sim* 新しい太陽系像」, かわさき市民アカデミー講座 9・新しい科学の世界, 2015 年 6 月 23 日
- [89] 生駒大洋 「系外惑星から学んだ太陽系の不思議」, 東大理学部オープンキャンパス 2015, 2015 年 8 月 5 日, 6 日