

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

## Annual Report

2009

平成21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



## ご挨拶

ビッグバン宇宙国際研究センター(英語名 Research Center for the Early Universe, 略称 RESCEU)は、「宇宙はどのように生まれ、どのように進化し、現在の多彩な姿に至ったか」という人類の根源的な問いに答えることを研究目的とし、科研費 COE 形成基礎研究の実行母体「初期宇宙センター」を前身として、1999 年度に理学系研究科に付属施設として設置されました。本センターは、純理論から出発してトップダウン的に宇宙を理解する「初期宇宙論部門」、観測結果からボトムアップ的に宇宙像を構築する「初期宇宙データ解析部門」、および外国人客員教授ポスト 1 から成る「素粒子論的宇宙論」部門を擁します。センター本体はこのように理論研究を主体としますが、その周囲に、おもに理学系研究科で物理学や天文学を専門とする約 10 名の「研究協力者」を配置することで、最先端の観測や実験も活発に推進しており、合計 7 つのプロジェクトが進行しています。

センターは昨年度で設立 10 年を経過し、今年度からは、新たな 10 年が始まりました。そこで、「バリオン、暗黒物質、暗黒エネルギーの三段階で宇宙を理解すること」、および「東半球の宇宙研究のハブとして地位を固めること」を新たに掲げて研究を進めています。これに合わせ、プロジェクトおよび研究協力者も見直しを行い、これまで 2 つのプロジェクトだった光赤外線観測を 1 つにまとめるとともに、重力波探査を新規プロジェクトとして、また遠方のサブミリ波銀河の観測を、電波観測の新たなサブプロジェクトとして加えました。このため、物理学専攻の坪野公夫教授、天文学教育研究センターの河野孝太郎教授、および天文学専攻の嶋作一大准教授を、新たに研究協力者としてお迎えしています。

センター固有のメンバーとしては、昨年度に着任した坂井南美助教(実質所属は物理学専攻・山本研究室)に続き、2010 年 2 月には、男女共同参画プロジェクトに基づき理学系研究科で選ばれた女性助教 3 名の 1 人として、平賀純子助教がセンターに着任しています。

また 2009 年 4 月には 1 年任期の特任研究員として、伊藤裕貴さんと高水裕一さんが加わりました。センターは今年度も、学振先端拠点形成事業の 1 つである「暗黒エネルギー研究国際ネットワーク(DENET)」と協力し、多彩な研究活動を行いました。5 月には「すばる」ジェミニ研究会の開催、6 月には第 3 回「すざく」国際会議の共催、8 月には全学オープンキャンパスへの参加、9 月にはサマースクール(沖縄)の実施、11 月には「すばる」Hyper Supreme Cam 国際ワークショップおよび重力波探査の DPF サイエンス検討会の開催などを行い、12 月には初の試みとして、小柴ホールにて一般向けの「クリスマス講演会」を行い、好評を博しました。

2010 年 8 月 センター長 牧島一夫

# 目次

<b>I</b>	<b>2009 年度</b>		
	<b>ビッグバン宇宙国際研究センター</b>		
	<b>全般に関する報告</b>		<b>5</b>
<b>1</b>	<b>教員, 職員, および研究員</b>		<b>7</b>
<b>2</b>	<b>シンポジウム・研究会</b>		<b>8</b>
2.1	暗黒エネルギー研究国際ネットワーク (DENET) . . . . .		8
2.2	Joint Subaru/Gemini Science Conference . . . . .		9
2.3	第 3 回すざく国際会議: 「The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H」 . . . . .		11
2.4	ビッグバン宇宙国際研究センター第四回公開講演会: 「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」 . . . . .		14
2.5	第 9 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会: “Dark Energy in the Universe” サマースクール . . . . .		14
2.6	JSPS Workshop: “Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe” . . . . .		15
2.7	DECIGO Path Finder (DPF) サイエンス検討会 . . . . .		17
2.8	ビッグバン宇宙国際研究センター第五回公開講演会: 「ビッグバンセンタークリスマス講演会」 . . . . .		17
<b>3</b>	<b>プレプリント・リスト</b>		<b>18</b>
<b>II</b>	<b>2009 年度</b>		
	<b>プロジェクト別</b>		
	<b>研究活動報告</b>		<b>25</b>
<b>1</b>	<b>初期宇宙進化論</b>		<b>27</b>
1.1	初期宇宙・相対論 . . . . .		27
1.2	観測的宇宙論 . . . . .		29
1.3	天体物理 . . . . .		31
1.4	太陽系外惑星 . . . . .		32
<b>2</b>	<b>銀河進化理論</b>		<b>40</b>
2.1	銀河系 . . . . .		40
2.2	超新星 . . . . .		41
<b>3</b>	<b>銀河と宇宙構造の進化</b>		<b>43</b>
3.1	宇宙及び系外銀河 . . . . .		43
3.2	銀河系および星間物質 . . . . .		47
3.3	太陽及び太陽系 . . . . .		47
3.4	機器・ソフトウェア開発 . . . . .		47
<b>4</b>	<b>サブミリ波観測</b>		<b>51</b>
4.1	山本研究室 . . . . .		51
4.1.1	星形成の観測研究 . . . . .		51
4.1.2	スペクトル線サーベイ . . . . .		53
4.1.3	テラヘルツ帯観測技術の開拓 . . . . .		54
4.2	河野研究室 . . . . .		57
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究 . . . . .		57
4.2.2	ミリ波サブミリ波観測装置の開発 . . . . .		58

<b>5</b>	<b>重力波探査</b>	<b>61</b>
5.1	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO . . . . .	61
5.1.1	DECIGO . . . . .	61
5.1.2	DECIGO パスファインダー . . . . .	61
5.1.3	DPF レーザーセンサー . . . . .	61
5.1.4	DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験 . . . . .	62
5.1.5	DPF を利用した地球重力場観測 . . . . .	62
5.1.6	SWIM <sub><math>\mu\nu</math></sub> . . . . .	62
5.2	磁気浮上型重力波検出器の開発 . . . . .	62
5.2.1	超伝導磁気浮上型重力波検出器による観測 . . . . .	62
5.2.2	超伝導磁気浮上重力波検出器における磁場雑音の研究 . . . . .	63
5.3	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化 . . . . .	63
5.3.1	スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化 . . . . .	63
5.3.2	スクイーズド光の発生 . . . . .	63
5.4	超高安定レーザー光源の開発 . . . . .	63
5.4.1	低温サファイア光共振器を用いた超高安定光源 . . . . .	63
5.4.2	光共振器の支持法の研究 . . . . .	64
<b>6</b>	<b>暗黒物質・太陽アクシオン直接検出</b>	<b>68</b>
6.1	衰輪 研究室 . . . . .	68
6.1.1	原子炉ニュートリノモニター . . . . .	68
6.1.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験 . . . . .	69
6.1.3	太陽 Hidden photon 探索実験 . . . . .	69
6.1.4	暗黒物質探索検出器の開発 . . . . .	70
<b>7</b>	<b>飛翔体を用いた宇宙観測</b>	<b>73</b>
7.1	衛星によるX線・線観測 . . . . .	73
7.1.1	科学衛星の運用と稼働状況 . . . . .	73
7.1.2	質量降着するブラックホール . . . . .	74
7.1.3	強磁場コンパクト天体の研究 . . . . .	75
7.1.4	星間空間における高エネルギー現象 . . . . .	75
7.1.5	銀河団および銀河群の研究 . . . . .	76
7.1.6	雷活動に伴う静電加速現象の研究 . . . . .	77
7.1.7	ASTRO-H 衛星計画 . . . . .	77
7.1.8	将来の衛星計画 (ASTRO-H 以外) . . . . .	79
7.2	気球による反物質探査 . . . . .	79
7.2.1	はじめに . . . . .	79
7.2.2	南極からの BESS-Polar II スペクトロメータの回収 . . . . .	80
7.2.3	BESS-Polar II のデータ解析 . . . . .	80
7.2.4	まとめ . . . . .	80



I

2009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 教員，職員，および研究員

## ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫 (センター長 / 教授; 併任)  
 横山 順一 (教授)  
 茂山 俊和 (准教授)  
 樽家 篤史 (助教)  
 坂井 南美 (助教)  
 平賀 純子 (2010/2/16-)(助教)  
 Xu, Haiguang (2009/6/5-2009/8/14)(外国人客員教授)  
 Starobinsky, Alexei A. (2009/10/31-2009/11/30)(外国人客員教授)  
 Carr, Bernard J. (2010/1/4-2010/3/31)(外国人客員教授)  
 伊藤 裕貴 (特任研究員)  
 永田 竜 (特任研究員)  
 高水 裕一 (特任研究員)  
 永野 早百合 (事務補佐員)  
 南澤 三恵子 (事務補佐員)  
 仲家 増美 (事務補佐員; 岡村研究室)

## 研究プロジェクト及び担当者

(無印はセンター固有の教員、上添字付きは研究協力者)

- |                      |                    |                    |                    |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 . 初期宇宙進化論          | 横山 順一              | 樽家 篤史              | 須藤 靖 <sup>1</sup>  |
| 2 . 銀河進化理論           | 茂山 俊和              |                    |                    |
| 3 . 銀河と宇宙構造の進化       | 岡村 定矩 <sup>2</sup> | 嶋作一大 <sup>2</sup>  |                    |
| 4 . サブミリ波観測          | 坂井 南美              | 山本 智 <sup>1</sup>  | 河野孝太郎 <sup>3</sup> |
| 5 . 重力波探査            | 坪野 公夫 <sup>1</sup> |                    |                    |
| 6 . 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>1</sup> |                    |
| 7 . 飛翔体による宇宙観測       | 牧島一夫 <sup>1</sup>  | 平賀 純子              | 山本 明 <sup>4</sup>  |

<sup>1</sup> 物理学専攻、<sup>2</sup> 天文学専攻、<sup>3</sup> 天文学教育センター、<sup>4</sup> KEK

## 2 シンポジウム・研究会

### 2.1 暗黒エネルギー研究国際ネットワーク (DENET)

ビッグバン宇宙国際研究センターは、日本学術振興会 先端拠点形成事業に採択され、暗黒エネルギー国際研究ネットワークを展開している。

近年の観測的宇宙論の飛躍的進展によって宇宙のエネルギー密度の7割以上が暗黒エネルギーという未知の成分からなっていることが明らかにされた。しかしながら、それらの具体的な正体については未だ理解できていない。本事業は、米国と英国の国際的拠点との密接な共同研究を推進することによって、天文学と高エネルギー物理学、さらにはあらゆる自然科学における最大の謎ともいえる暗黒エネルギーの正体の解明を目的とするものである。

2009年5月18日～21日に京都大学において、すばる観測所と Gemini 天文台との共催による国際会議「Joint Subaru/Gemini Science Conference」を開き、両観測所間の交流を図ることで今後の共同研究をより一層推進させるべく、すばる望遠鏡および Gemini 望遠鏡を用いた最新の観測成果発表を主とする研究会を行った (§ 2.2)。2009年6月29日～7月2日にかけては、北海道小樽市において、東京大学理学系研究科、理化学研究所、宇宙航空研究開発機構、DENET 等との共催により、第3回すざく国際会議「The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H」を開催し、すざく衛星を用いて得られた観測成果についての報告、および Astro-H 衛星計画への展望を行った (§ 2.3)。さらに、2009年11月9日～11日にプリンストン大学において、すばる望遠鏡の次期観測装置として計画されている Hyper-Suprime Cam (HSC) を用いた将来のサーベイ観測のデザインを検討する国際ワークショップを開催した (§ 2.6)。HSC は現在すばる望遠鏡に装着されている Suprime Cam をはるかに凌ぐ広大な視野を持つ観測装置としてその作成が進められており、国内外の研究者からその動向について大きな注目を集めている。Joint Subaru/Gemini Science Conference と同様に、この国際会議においても日本側の研究協力機関から多くの研究者が出席し、暗黒エネルギーの解明をはじめとする様々な研究提案を行うことで日本の研究体制を強くアピールしつつ、国際共同プロジェクト推進に向けた協力関係を築きあげた。

加えて、2009年8月5日に「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」、2009年12月25日に「ビッグバンセンタークリスマス講演会」と題する2つの一般向けの公開講演会を開催した (§ 2.4, § 2.8)。また、2009年8月30日～9月2日には、沖縄県宜野湾市「健康文化村 カルチャーリゾート・フェストーン」において「Dark energy in the Universe」というタイトルのサマースクールを行い、海外の協力機関などから講師を招いて、国内の大学院生と若手研究者を対象とするダークエネルギーに関する系統的な講義を行っている (§ 2.5)。

## 2.2 Joint Subaru/Gemini Science Conference

日時：2009年5月18日(月)–5月21日(木)

場所：京都大学百周年時計台記念館

### プログラム

#### 5月18日(月)

9:45 – 12:40

SOC chairs	Opening remark
Masa Hayashi	Subaru Telescope - An Introduction -
Tomonori Usuda	Introduction of Subaru Telescope instruments
Doug Simons	WF MOS as a Pathfinder into the Future of Astronomy
Joe Jensen	Gemini's Instrumentation
Naoyuki Tamura	Subaru FMOS: Commissioning status of a wide-field near-infrared multi-object spectrograph
Markus Hartung	NICI - the new Gemini South AO facility coronagraph

14:10 – 17:55

Karl Glazebrook	Review of Cosmology, Large-scale Structure and Galaxy Formation - Observations
Ikuru Iwata	Observations of Forming Galaxies at $z \sim 4$ and Cosmic Reionization
Raymond Carlberg	Supernova Legacy Survey Third Year Results
Eva Noyola	Kinematical evidence for an intermediate-mass black hole in M54
Davor Krajnovic	Masses of the central black holes in low mass early-type galaxies using LGS AO
Annette Ferguson	Viewing the Outskirts of Nearby Galaxies with Subaru and Gemini
Yuichi Matsuda	A Panoramic Search for Ly-alpha Blobs at $z=3$
Kazuaki Ota	Deep Survey of $z=7$ Ly-alpha Emitters in the Subaru/XMM-Newton Deep Field: Implications for Reionization
Tomohiro Yoshikawa	Young Dusty Starburst Galaxies at $z \sim 2$

#### 5月19日(火)

9:30 – 12:30

Yusei Koyama	Panoramic Views of Cluster Evolution with Subaru
Howard Yee	GMOS Spectroscopy of $z \sim 1$ Galaxy Clusters from the SpARCS Survey
Masahiro Takada	LoCuSS: Subaru Weak Lens Study of 30 Galaxy Clusters
Masayuki Akiyama	Toward Complete Understanding of Accretion History in the Universe and Its Relation to the Galaxy Evolution
Chris J. Willott	The most distant black holes
Hajime Sugai	Observations of active galaxies with high spatial resolution with Kyoto tridimensional spectrograph II
Nancy Levenson	Isotropic Mid-Infrared Emission from Active Galactic Nuclei

13:50 – 18:15

- |                    |  |
|--------------------|--|
| Masatoshi Imanishi | Luminous buried AGNs in the local universe   |
| Mitesh Patel       | The Search for High-Redshift Quasars with UKIDSS   |
| James Radomski     | High Resolution Mid-Infrared Imaging of Dusty Narrow Line Regions (NLR) in Seyferts  |
| Kentaro Aoki       | Dramatic change of FeLoBAL SDSS J163255.46+420407.7 to LoBAL   |
| Ken'ichi Nomoto    | The Final Fates of Massive Stars: Theory vs. Observations  |
| Wako Aoki          | First generations of stars and the origins of carbon-enhancement in metal-poor stars   |
| Stuart Ryder       | Finding Hidden Supernovae with Laser Guide Star Adaptive Optics on Gemini  |
| Oliver Krause      | Subaru light-echo spectroscopy of historic Galactic Supernovae: Revealing the nature of Tycho Brahe's SN 1572 and Cassiopeia A |
| Sun Kwok           | Mid-infrared Imaging of Planetary Nebulae and Proto-Planetary Nebulae  |
| Yutaka Ihara       | A rate study of Type Ia supernovae with Subaru/XMM-Newton Deep Survey  |
| Hiroko Ito         | The Exceptionally Bright Carbon-Enhanced Metal-Poor Star BD+44 493   |
| Chiaki Kobayashi   | Galactic Archaeology with WFMOS and chemodynamical simulations   |
| Thomas Geballe     | Do Hydrogen-deficient Carbon Stars Have Winds?   |

**5月20日(水)**

9:30 – 12:05

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Shigeru Ida                        | Modeling for formation of extrasolar planetary systems                  |
| Motohide Tamura and the SEEDS team | Direct Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru                 |
| Christian Marois                   | From Gl229B to HR8799bcd: 15 years of Direct Exoplanet Imaging Research |
| Bun'ei Sato                        | Doppler Planet Searches with Subaru/HDS                                 |
| Norio Narita                       | Measuring Spin-Orbit Alignment of Transiting Exoplanets with Subaru/HDS |
| Henry Roe                          | Titan's Methan Weather  |

**5月21日(木)**

9:30 – 12:40

- |  |   |
|--|---|
| Tadafumi Ootsubo                           | Mid-infrared observations of comets with Subaru/COMICS  |
| Leigh N. Fletcher, Padma Yanamandra-Fisher | Spatially-Resolved Mid- and Near-InfraRed Observations of Outer Planets With SUBARU and GEMINI Observations |
| Shu-ichiro Inutsuka                        | Recent Progress in Theory of Interstellar Medium and Star Formation   |
| Yoshiko K. Okamoto                         | Subaru/COMICS view on star and planet formation   |
| Cassio L. Barbosa                          | Gemini Telescopes: Giant Eyes to Study Young Massive Stars  |
| John H. Lacy                               | Studies of Star Formation with TEXES  |
| Tae-Soo Pyo                                | Studying the Origin of Outflows from YSOs with SUBARU and GEMINI  |

14:00 – 16:30

- James De Buizer    Five Years of Keeping it Cool: The Contributions by Gemini Mid-Infrared Instrumentation to the Understanding of Massive Star Formation
- Itsuki Sakon        Attempts to Explore the Formation and Evolution Processes of Circumstellar Dust
- Hideki Takami      Future perspective on collaboration between Gemini and Subaru
- Timothy C. Beers    The Future of the Gemini Observatory
- Masanori Iye        TMT for Subaru/Gemini's Future
- Kotaro Kohno        AzTEC-ASTE Survey of Submillimeter Galaxies: Optical/Infrared Properties of Dusty Extreme Starburst Populations in the Early Universe

## 2.3 第3回すざく国際会議 : 「The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H」

日時 : 2009年6月29日(月)–7月2日(木)

場所 : 北海道小樽市グランドパーク小樽

### プログラム

#### 6月29日(月)

14:30 – 16:15

- K. Makishima    opening
- K. Mitsuda        Suzaku status
- K. Matsushita    Metal enrichment histories from galaxies to clusters
- M. Sun            ICM-ISM interaction in galaxy clusters
- E. Miller          Groups of Galaxies at Intermediate Redshift

16:45 – 18:30

- T. Ohashi        Search for WHIM with Suzaku and its future prospects
- A. Comastri      AGN Unified Scheme and Evolution
- Y. Terashima     Obscured AGN Population and its Evolution
- M. Ajello        Blazars at high energies: News from Swift/BAT and Fermi/LAT
- D. Yotenoku      The dark energy measurement in the early universe with Gamma-Ray Bursts

#### 6月30日(火)

8:30 – 10:15

- Y. Fukazawa      Probe of material around the AGN central engine with Suzaku
- D. Psaltis        Testing the No-Hair Theorem of General Relativity with Iron Lines from Accreting Black Holes
- A. Fabian        The SED and X-ray spectra of AGNs
- R. Sambruna      Radio-loud Active Galactic Nuclei: The Suzaku View
- C. Done          Continua of black hole binaries and AGN

10:45 – 12:25

- H. Kunieda Disentangling multiple components from AGN based on the temporal variability observed with Suzaku XIS and HXD
- E. Cackett A Suzaku survey of Fe K emission lines in neutron star LMXBs
- H. Takahashi Reflection Continuum and Fe Lines in Spectra of the Low-Mass X-ray Binary Ser X-1
- K. Makishima Continua and Iron-K lines from Accreting Black Holes
- P. Gandhi Rapid timing studies of black hole binaries in Optical and X-rays: correlated and non-linear variability
- G. Chartas High Velocity Outflows in Narrow Absorption Line Quasars; The X-ray View

14:30 – 16:15

- N. Isobe Suzaku detections of luminosity-dependent spectral changes from two ultraluminous X-ray sources, X1 and X2, in NGC 1313
- K. Nakazawa Suzaku wide-band observation of anomalous dips in Hercules X-1
- R. Mushotzky The Nature of the Swift/BAT Hard X-ray Sources
- R. Romani Fermi LAT Pulsars: The New Gamma-ray View of the Pulsar Machine
- S. Tsuruta Thermal and Nonthermal Radiation from Pulsars
- W. Iwakiri Possible Detection of a Cyclotron Resonance Emission-Line Feature from the Accretion-Powered Pulsar 4U1626-67

16:45 – 18:30

- M. Ishida Accreting white dwarf binaries observed with Suzaku
- D. Takei Discovery of non-thermal emission from the classical nova V2491 Cygni
- S. Mereghetti Soft and hard X-ray observations of Anomalous X-ray Pulsars and Soft Gamma-ray Repeaters
- T. Enoto Suzaku Studies of the Extremely Hard Emission Components from Three Magnetars
- W. Hermsen Observational constraints on scenarios for the production of persistent nonthermal emission in magnetospheres of Anomalous X-ray Pulsars

7月1日(水)

8:30 – 10:15

- A. Hayato The Onion-like Metallicity Structure of Tycho 's Supernova Remnant as Revealed by Doppler Broadened X-ray Emission Lines
- S. Park Suzaku Observation of the Kepler Supernova Remnant
- S. Katsuda A Suzaku view of supernova remnants
- H. Yamaguchi Discovery of strong radiative recombination continua from IC443? relic of a past gamma-ray burst?
- J. Kaastra Progress in X-ray plasma diagnostics

10:45 – 12:25

- M. Bautz Galaxy Clusters Near the Virial Radius  
 T. Reiprich Suzaku Studies of Galaxy Cluster Outskirts  
 C. Sarazin Thermal and Nonthermal Hard X-ray Emission from Clusters of Galaxies  
 N. Ota Extremely hot gas in the most X-ray luminous cluster RXJ1347  
 A. Simionescu Variations in chemical composition across a strong surface brightness discontinuity in the outskirt of M87  
 M. Gilfanov Unresolved emission and ionized gas in the bulge of M31

14:30 – 16:00

- J. Cuadra Accretion of Stellar Winds on to Sgr A\*  
 K. Koyama A Suzaku View of the Galactic Diffuse X-Rays  
 M. Nobukawa Discovery of Ka lines of neutral sulfur, argon, and calcium atoms from the Galactic Center  
 Y. Fukui Correlation between high energy objects and molecular clouds in the Galaxy  
 T. Mizuno Fermi-LAT Study of Galactic Cosmic Rays by Observing Diffuse Gamma-Rays from Mid-Latitude Regions

16:30 – 18:00

- M. Revnivsev Galactic ridge/bulge emission  
 K. Ebisaawa Suzaku Observation of Galactic Ridge and Bulge  
 Y. Tanaka Remarkable Spectral Differences in the Galactic Ridge X-ray Emission  
 N. Yamasaki Galactic soft X-ray halo revealed with Suzaku

**7月2日(木)**

8:30 – 10:15

- T. Tanaka X-ray Study of Gamma-ray Binaries with Suzaku  
 E. de Ona Wilhelmi Status of the VHE astronomy with Cherenkov telescopes  
 A. Bamba Suzaku observations of Galactic TeV unID sources  
 Y. Uchiyama Fermi-LAT Discoveries of Gamma-ray Emission from the Directions of Supernova Remnants  
 F. Bocchino Suzaku and XMM-Newton observations of the Pulsar Wind Nebula of G54.1+0.3

10:45 – 12:25

- K. Ioka Cosmic-Ray Positrons from Astrophysical Sources: GRBs, Pulsars, and SNRs  
 S. Sugita Timing properties of Bright Hard GRBs observed by Suzaku/WAM  
 T. Kamae Highlights from the Fermi Space Gamma-Ray Telescope  
 J. Kataoka Suzaku/Fermi Challenges to Relativistic Jets in Active Galaxy  
 R. Corbet The Fermi LAT View of Compact Objects in the Galaxy

14:30 – 16:20

- S. Ueno The MAXI experiment  
 T. Takahashi From Suzaku to ASTRO-H  
 C. Hailey The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR)  
 N. White The International X-ray Observatory  
 F. Fiore Simbol-X: focusing on the hard X-ray Universe

## 2.4 ビッグバン宇宙国際研究センター第四回公開講演会：「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」

日時：2009年8月6日(木)

場所：東京大学本郷キャンパス 理学部1号館西棟2階207号室

### プログラム

10:30 - 15:00

- 須藤 靖 宇宙は何かからできている？
- 茂山 俊和 元素はどこで出来たのか
- 横山 順一 宇宙をあやつる暗黒エネルギー
- 牧島 一夫 科学衛星でブラックホールを探る

## 2.5 第9回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会：“Dark Energy in the Universe” サマースクール

日時：2009年8月30日(日)–9月2日(水)

場所：沖縄県宜野湾市「健康文化村 カルチャーリゾート・フェストーン」

<http://festone.jp/>

### プログラム

8月30日(日)

19:00 - 21:00 プロジェクト成果報告 I (座長: 伊藤裕貴)

- 牧島 一夫 センター長挨拶・連絡事項
- 山本 智 サブミリ波プロジェクト成果報告
- 山本 明 BESS-Polar 実験と観測結果解析の現状
- 坪野 公夫 重力波プロジェクト成果報告
- 横山 順一 原始ブラックホールの質量スペクトル

8月31日(月)

9:00 - 12:15 プロジェクト成果報告 II (座長: 河原創)、一般講演 I (座長: 高水裕一)

- 牧島 一夫 宇宙X線/ガンマ線観測のハイライト
- 嶋作 一大 銀河と宇宙構造プロジェクト成果報告
- 井上 慶純 アクシオンヘリオスコープ実験
- 鎌田 耕平 Searching signatures of baryogenesis
- 高橋 走 地上重力波検出器の現状と展望
- 諏訪 雄大 超新星はついに爆発したか？
- 中村 航 Ib/c 型超新星爆発にともなう軽元素合成
- 伊藤 裕貴 活動銀河核ジェットが駆動するシェルからの非熱的放射
- 河原 創 Inhomogeneity and anisotropy of galaxy clusters
- ポスター講演 各2分

14:00 – 18:05 Summer School I (Chair: Y. Suto)、一般講演 II (Chair: Y. Suto)

Yasushi Suto	Opening Address
Alexei Starobinsky	Reconstruction of dark energy properties from observational data
Will Percival	Dark Energy and Observational Methods (1/3)
Michael Seiffert	Cosmology with galaxy surveys - an instrument perspective (1/4)
Takahiro Nishimichi	The Effect of Primordial Non-Gaussianity on the Galaxy Bispectrum
Toyokazu Sekiguchi	Reconstruction of CMB lens potential with Markov chain Monte Carlo

9月1日(火)

9:00 – 12:30 Summer School II (Chair: A. Taruya)

Michael Seiffert	Cosmology with galaxy surveys - an instrument perspective (2/4)
Michael Seiffert	Cosmology with galaxy surveys - an instrument perspective (3/4)
Will Percival	Measuring Galaxy Clustering and Making Predictions (2/3)

15:30 – 18:00 Summer School III (Chair: J. Yokoyama)、一般講演 III (Chair: J. Yokoyama)

Alexei Starobinsky	Overview of dark energy models
Atushi Taruya	Modeling non-linear clustering in redshift space
Takashi Hiramatsu	Non-linear evolution of matter power
Shun Saito	Constraint on cosmological parameters from SDSS power spectrum

9月2日(水)

9:00 – 12:15 一般講演 IV (Chair: S. Mizuno)、Summer School IV

Atsushi Nishizawa	Impact of photometric redshift error on the measurement of dark energy
Yuichi Takamizu	Non-Gaussianity beyond $\delta$ -N
Kazuhiro Yamamoto	Uniform approximation and primordial power spectrum
Will Percival	Current Galaxy Clustering Measurements and Cosmological Constraints (3/3)
Michael Seiffert	Cosmology with galaxy surveys - an instrument perspective (4/4)

## 2.6 JSPS Workshop: “Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe”

日時：2009年11月9日(月)–11月11日(水)

場所：Princeton Center, Princeton University

### プログラム

11月9日(月)

9:00 – 12:00

Michael Strauss	Welcome
Yasushi Suto	Ups and Downs of the SUMIRE project
Satoshi Miyazaki	Hyper Suprime-Cam project status and its uniqueness
Takashi Hamana	Prospects and issues of weak lensing surveys
Kazu Shimasaku	HSC science: high-redshift galaxies
Charlie Conroy	Evolving Galaxies Through Time

14:00 – 17:20

Masamune Oguri	Cluster strong lensing
Yen-Ting Lin	My Dream Cluster Survey
Keiichi Umetsu	Cluster Lensing Science with HSC: Distortion, Depletion, and Dilution
Rachel Mandelbaum	Robust cluster masses and cosmological constraints from galaxy-galaxy lensing and galaxy clustering
Nikhil Padmanabhan	Calibrating and Reconstructing the Acoustic Feature in Matter and Halos
Atsushi Taruya	Modeling Baryon Acoustic Oscillations in 2D

**11月10日(火)**

9:00 – 12:20

Daniel Eisenstein	Baryon Oscillation Sky Survey
David Schlegel	Design of BigBOSS
Gary Hill	Wide-Field Surveys with VIRUS on the Hobby-Eberly Telescope
Masayuki Akiyama	Overview of the Fiber Multi-Object NIR Spectrograph (FMOS) for Subaru
David Spergel	Combining Wide-Field Imaging and Spectroscopy with CMB Surveys
Eiichi Egami	Strategy for a Coordinated Spitzer Warm Mission Wide-Field Survey

14:00 – 17:20

Michael Seiffert	Design of WFMOS and Suggestions for SUMIRE
Jim Gunn	Wide-Field Spectrograph Design
Kazuhiro Yamamoto	Testing gravity on the scales of cosmology
Rachel Somerville	Constraints on the formation of Galaxies and Supermassive Black Holes with Wide-Field Surveys
Tohru Nagao	SWANS: Subaru Wide-Field AGN Survey
Jenny Greene	(Active) Galaxy Studies with SUMIRE

**11月11日(水)**

9:00 – 12:00

Masahiro Takada	Prospects for constraining neutrino masses with SUMIRE
Masami Ouchi	Galaxy Formation and Reionization studied with HSC and PFS
John Peacock	Redshift-space distortions, $\gamma$ and GAMA
Richard Ellis, Jim Gunn, Satoshi Miyazaki, Yasushi Suto	panel discussion

## 2.7 DECIGO Path Finder (DPF) サイエンス検討会

日時：2009年11月24日(火)

場所：東京大学 理学部 4号館 1320号室

### プログラム

10:10 – 12:00

- 横山 順一 はじめに
- 安東 正樹 DPF 概要と検討会の主旨
- 八木 絢外 天文学的な重力波源
- 斉藤 遼 宇宙論的な重力波源
- 沼田 健司 宇宙での精密計測
- 長野 重夫 宇宙実験における安定化レーザーの現状と可能性

13:00 – 18:00

- 古在 由秀 特別講演：人工衛星軌道と地球重力場
- 福田 洋一 衛星による重力場測定概観
- 山本 圭香 GRACE 衛星重力データによる氷床、陸水変動の研究
- 菅野 貴之 衛星重力データの解析と重力場の復元
- 松本 晃治 月重力場
- 坪野 公夫 衛星搭載型重力勾配計
- 新谷 昌人 議論：DPF による観測
- 森脇 成典 ドラッグフリーの可能性
- 坂井 真一郎 大気球を用いた実証試験
- 河野 功 フォーメーションフライト
- 川村 静児 まとめ

## 2.8 ビッグバン宇宙国際研究センター第五回公開講演会：「ビッグバンセンタークリスマス講演会」

日時：2009年12月25日(金)

場所：東京大学本郷キャンパス理学部 1号館 2階小柴ホール

### プログラム

14:00 – 16:30

- 横山順一 ビッグバンは見えてきたか
- 坂井 南美 星の誕生と化学進化
- 須藤 靖 太陽系外惑星から宇宙生物学へ

### 3 プレプリント・リスト

RESCEU-90/09

**Discovery of the Second Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS15398-3359 in Lupus N.** Sakai, T. Sakai, T. Hirota, M. Burton, and S. Yamamoto ApJ, 697, 769

RESCEU-89/09

**Development of THzWaveguide NbTiN HEB Mixers** L. Jiang, S. Shiba, K. Shimbo, N. Sakai, T. Yamakura, M. Sugimura, P.G. Ananthasubramanian, H. Maezawa, Y. Irimajiri, and S. Yamamoto IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 301

RESCEU-88/09

**Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case** N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto ApJ, 697, 769

RESCEU-75/09

**Suzaku Observations of SGR1900+14 and SGR1806-20** Nakagawa, Y. E., Mihara, T., Yoshida, A., Yamaoka, K., Sugita, S., Murakami, T., Yonetoku, D., Suzuki, M., Nakajima, M., Tashiro, M. S., and Nakazawa, K. PASJ, 61, 387

RESCEU-74/09

**Constraint of Non-Thermal X-Ray Emission from the On-Going Merger Cluster Abell 3376 with Suzaku** Kawano, N., Fukazawa, Y., Nishino, S., Nakazawa, K., Kitaguchi, T., Makishima, K., Takahashi, T., Kokubun, M., Ota, N., Ohashi, T., Isobe, N., Henry, J. P., and Hornschemeier, A. PASJ, 61, 377

RESCEU-73/09

**Spectral Transitions of an Ultraluminous X-Ray Source, NGC 2403 Source 3** Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Mizuno, T., Miyawaki, R., Gandhi, P., Kawaharada, M., Senda, A., Yoshida, T., Kubota, A., and Kobori, H. PASJ, 61, 279

RESCEU-72/09

**Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum** Miyawaki, R., Makishima, K., Yamada, S., Gandhi, P., Mizuno, T., Kubota, A., Tsuru, T. G., and Matsumoto, H. PASJ, 61, 263

RESCEU-71/09

**Suzaku Observations of Tycho's Supernova Remnant** Tamagawa, T., Hayato, A., Nakamura, S., Terada, Y., (17coauthors), Makishima, K. PASJ, 61, 167

RESCEU-70/09

**Broad-Band Spectrum of the Black Hole Candidate IGRJ17497-2821 Studied with Suzaku** Paizis, A., Ebisawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Kohmura, T., Kokubun, M., Rodriguez, J., Ueda, Y., Walter, R., Yamada, S., Yamaoka, K., and Yuasa, T. PASJ, 61, 107

RESCEU-69/09

**Timing and Spectral Study of AXJ1745.6-2901 with Suzaku** Hyodo, Y., Ueda, Y., Yuasa, T., Maeda, Y., Makishima, K., and Koyama, K. PASJ, 61, 99

RESCEU-68/09

**Design and In-Orbit Performance of the Suzaku Wide-Band All-Sky Monitor** Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., Fukazawa, Y., Hara, R., Hanabata, Y., Hong, S., Kamae, T., Kira, C., Kodaka, N., Kokubun, M., Maeno, S., Makishima, K., Miyawaki, R., Morigami, K., Murakami, T., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., and 23 coauthors PASJ, 61, 35

RESCEU-67/09

**Modeling Reproducibility of Suzaku HXD PIN/GSO Background** *Fukazawa, Y., Mizuno, T., Watanabe, S., Kokubun, M., (13 coauthors) Enoto, T., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uehara, Y., Yamada, S., Yuasa, T. and 6 coauthors* PASJ, 61, 17

RESCEU-66/09

**Suzaku Observation of the New Soft Gamma Repeater SGR 0501+4516 in Outburst** *Enoto, T., Nakagawa, Y. E., Rea, N., Esposito, P., Gotz, D., Hurley, K., Israel, G. L., Kokubun, M., Makishima, K., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Sakamoto, T., Stella, L., Tiengo, A. Turolla, R., Yamada, S., Yamaoka, K., Yoshida, A., and Zane, S.* ApJ, 693, L122

RESCEU-65/09

**Doppler-Broadened Iron X-Ray Lines From Tycho's Supernova Remnant** *Furuzawa, A., Ueno, D., Hayato, A., Ozawa, M., Tamagawa, T., Bamba, A., Hughes, J., Kunieda, H., Makishima, K., Holt, S. S., Hwang, U., Kinugasa, K., Petre, R., Tamura, K., Tsunemi, H., and Yamauchi, S.* ApJ, 693, L61

RESCEU-64/09

**A Galaxy Merger Scenario for the NGC 1550 Galaxy from Metal Distributions in the X-Ray Emitting Plasma** *Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Nakazawa, K., Matsushita, K., and Fukazawa, Y.* ApJ, 691, 971

RESCEU-63/09

**Suzaku Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258** *Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T., and Makishima K.* PASJ, 61, 941

RESCEU-62/09

**Suzaku Results on the Obscured Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258** *Yamada, S., Itoh T., Makishima K., and Nakazawa K.* PASJ, 61, 309

RESCEU-61/09

**Hard X-ray Properties of the Merging Cluster Abell 3667 as Observed with Suzaku** *Nakazawa, K., Sarazin, C. L., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Makishima, K., K., Kawano, N., Fukazawa, Y., Inoue, S., Takizawa, M., Wik, D. R., Finoguenov, A., and Clarke, T. E.* PASJ, 61 339

RESCEU-60/09

**Suzaku and Multi-Wavelength Observations of OJ 287 during the Periodic Optical Outburst in 200** *H. Seta, N. Isobe, M.S. Tashiro, Y. Yaji, A. Arai, M. Fukuhara, K. Kohno, and 148 coauthors* PASJ, 61, 1011

RESCEU-59/09

**ASTE CO (3-2) Mapping Toward the Whole Optical Disk of M 83: Properties of Inter-arm Giant Molecular-Cloud Associations** *K. Muraoka, K. Kohno, T. Tosaki, N. Kuno, K. Nakanishi, K. Sorai, T. Sawada, K. Tanaka, T. Handa, M. Fukuhara, H. Ezawa, and R. Kawabe* ApJ, 706, 1213

RESCEU-58/09

**Determining Star Formation Timescale and Pattern Speed in Nearby Spiral Galaxies** *F. Egusa, K. Kohno, Y. Sofue, H. Nakanishi, S. Komugi* ApJ, 697, 1870

RESCEU-57/09

**Spatial correlation between submillimetre and Lyman-alpha galaxies in the SSA22 protocluster** *Y. Tamura, K. Kohno, K. Nakanishi, B. Hatsukade, D. Iono, G.W. Wilson, M.S. Yun, T. Takata, Y. Matsuda, T. Tosaki, H. Ezawa, T.A. Perera, K.S. Scott, J.E. Austermann, D.H. Hughes, I. Aretxaga, A. Chung, T. Oshima, N. Yamaguchi, K. Tanaka, and R. Kawabe* Nature, 459, 61

RESCEU-56/09

**A Search for Molecular Gas toward a BzK-Selected Star-Forming Galaxy at  $z = 2.044$**  *B. Hatsukade, D. Iono, K. Motohara, K. Nakanishi, M. Hayashi, K. Shimasaku, T. Nagao, Y. Tamura, M. A. Malkan, C. Ly, and K. Kohno* PASJ, 61, 487

RESCEU-55/09

**Scale Dependence of Halo Bispectrum from Non-Gaussian Initial Conditions in Cosmological N-body Simulations** *T. Nishimichi, A. Taruya, K. Koyama and C. Sabiu* submitted to JCAP [astro-ph/0911.4768]

RESCEU-54/09

**Systematic Survey of the Correlation between Northern HECR Events and SDSS Galaxies** *H. Takami, T. Nishimichi and K. Sato* [astro-ph/0910.2765]

RESCEU-53/09

**Confronting the damping of the baryon acoustic oscillations with observation** *H. Nomura, K. Yamamoto, G. Huetsi and T. Nishimichi* PRD, 79, 063512

RESCEU-52/09

**Cross-Correlation between UHECR Arrival Distribution and Large-Scale Structure** *H. Takami, T. Nishimichi, K. Yahata and K. Sato* JCAP, 06, 031

RESCEU-51/09

**Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models** *T. Nishimichi, A. Shirata, A. Taruya, K. Yahata, S. Saito, Y. Suto, R. Takahashi, N. Yoshida, T. Matsubara, N. Sugiyama, I. Kayo, Y. P. Jing and K. Yoshikawa* PASJ, 61, 321

RESCEU-50/09

**DECIGO pathfinder** *Masaki Ando, et al.* Class. Quantum Grav., 26, 9, 184013

RESCEU-49/09

**Analytic solution for matter density fluctuations in  $f(R)$  models of cosmic acceleration** *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky and Jun'ichi Yokoyama* Proceedings for ICGA9

RESCEU-48/09

**Prospects of Search for Solar Axions with Mass over 1 eV and Hidden Sector Photons** *R. Ohta, M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, T. Mizumoto, A. Yamamoto* [astro-ph/0911.0738]

RESCEU-47/09

**Photometric H alpha and [O II] Luminosity Function of SDF and SXDF Galaxies: Implications for Future Baryon Oscillation Surveys** *Sumiyoshi, M., Totani, T., Oshige, S., Glazebrook, K., Akiyama, M., Morokuma, T., Motohara, K., Shimasaku, K., Hayashi, M., Yoshida, M., and 2 coauthors* [astro-ph/0902.2064]

RESCEU-46/09

**Panoramic H-alpha and mid-infrared mapping of star formation in a  $z=0.8$  cluster** *Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Hayashi, M., Okamura, S., Tanaka, I., Tokoku, C.* [astro-ph/0912.2786]

RESCEU-45/09

**Environmental dependence of 8um luminosity functions of galaxies at  $z=0.8$ : Comparison between RXJ1716.4+6708 and the AKARI NEP deep field** *Goto, T., Koyama, Y., Wada, T., Pearson, C., Matsuhara, H., Takagi, T., Shim, H., Im, M., Lee, M. G., Inami, H., and 13 coauthors including Okamura, S.* [astro-ph/1001.0005]

RESCEU-44/09

**Stellar populations of LyB&A emitters at  $z=3-4$  based on deep large area surveys in the Subaru-SXDS/UKIDSS-UDS Field** *Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Dunlop, J., Farrah, D., Lee, Janice C., McLure, R., Okamura, S., Yoshida, M.* MNRAS, 402, 158

RESCEU-43/09

**Large Area Survey for  $z=7$  Galaxies in SDF and GOODS-N: Implications for Galaxy Formation and Cosmic Reionization** *Ouchi, M., Mobasher, B., Shimasaku, K., Ferguson, Henry C., Fall, S. Michael., Ono, Y., Kashikawa, N., Morokuma, T., Nakajima, K., Okamura, S., and 3 coauthors* ApJ, 706, 1136

RESCEU-42/09

**Properties of Disks and Bulges of Spiral and Lenticular Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey** *Oohama, N., Okamura, S., Fukugita, M., Yasuda, N., Nakamura, O.* ApJ, 705, 245

RESCEU-41/09

**Intracluster light in the Virgo cluster: large scale distribution** *Castro-Rodriguez, N., Arnaboldi, M., Aguerri, J. A. L., Gerhard, O., Okamura, S., Yasuda, N., Freeman, K. C.* A&A, 507, 621

RESCEU-40/09

**The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey** *Abazajian, Kevork N., Adelman-McCarthy, Jennifer K., Agueros, Marcel A., Allam, Sahar S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, Kurt S. J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., and 194 coauthors including Okamura, S.* ApJS, 182, 543

RESCEU-39/09

**A conservative scheme for the relativistic Vlasov-Maxwell system** *A. Suzuki and T. Shigeyama* Journal of Computational Physics, 229, 1643-1660

RESCEU-38/09

**Detailed Analysis of Filamentary Structure in the Weibel Instability** *A. Suzuki and T. Shigeyama* ApJ, 695, 1550

RESCEU-37/09

**First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b** *N.Narita, B.Sato, T.Hirano, and M.Tamura* PASJ, 61, L35

RESCEU-36/09

**Improved Measurement of the Rossiter-McLaughlin Effect in the Exoplanetary System HD 17156** *N.Narita, T.Hirano, B.Sato, J.N.Winn, Y.Suto, E.L.Turner, W.Aoki, M.Tamura, T.Yamada* PASJ, 61, 991

RESCEU-35/09

**Improved Measurement of the Rossiter-McLaughlin Effect in the Exoplanetary System HD 17156** *N.Narita, T.Hirano, B.Sato, J.N.Winn, Y.Suto, E.L.Turner, W.Aoki, M.Tamura, T.Yamada* PASJ, 61, 991

RESCEU-34/09

**Simulations of Baryon Acoustic Oscillations II: Covariance matrix of the matter power spectrum** *Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Takahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Atsushi J. Nishizawa, Takahiro Nishimichi, Shun Saito, and Atsushi Taruya* ApJ, 700, 479

RESCEU-33/09

**Simulations of Baryon Acoustic Oscillations III: Likelihood analysis of the matter power spectrum** *Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Takahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, Shun Saito, and Atsushi Taruya* ApJ, 700, 479

RESCEU-32/09

**Gravitational-Wave Constraints on the Abundance of Primordial Black Holes** *Ryo Saito, Jun'ichi Yokoyama* [astro-ph/0912.5317]

RESCEU-31/09

**New cosmological constraints on primordial black holes** *Bernard Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti Sendouda, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-30/09

**Gravitational Waves from Q-ball Formation** *Takeshi Chiba, Kohei Kamada and Masahide Yamaguchi*

RESCEU-29/09

**Cosmic Discordance: Detection of a modulation in the primordial fluctuation spectrum** *Kiyotomo Ichiki, Ryo Nagata, Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-28/09

**Testing (In)homogeneity with Galaxy Number Counts** *A.E. Romano*

RESCEU-27/09

**Cosmological test of gravity with polarizations of stochastic gravitational waves around 0.1?1 Hz** *A.Nishizawa, A.Taruya and S.Kawamura* PRD, 81, 104043

RESCEU-26/09

**Gravitational Wave Background and Non-Gaussianity as a Probe of the Curvaton Scenario** *Kazunori Nakayama and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-25/09

**Constraining the time variation of the coupling constants from cosmic microwave background: effect of  $\Lambda_{\text{QCD}}$**  *Masahiro Nakashima, Kazuhide Ichikawa, Ryo Nagata, Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-24/09

**Nonlinear power spectrum in the presence of massive neutrinos: perturbation theory approach, galaxy bias and parameter forecasts** *Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya* [astro-ph/0907.2922]

RESCEU-23/09

**Analytic solution for matter density perturbations in a class of viable cosmological  $f(R)$  models** *Motohashi, H., Starobinsky, A. A., Yokoyama, J.* [astro-ph/0905.0730]

RESCEU-22/09

**Photometric H alpha and [O II] Luminosity Function of SDF and SXDF Galaxies: Implications for Future Baryon Oscillation Surveys** *Sumiyoshi, M., Totani, T., Oshige, S., Glazebrook, K., Akiyama, M., Morokuma, T., Motohara, K., Shimasaku, K., Hayashi, M., Yoshida, M., and 2 coauthors* PASJ, submitted [astro-ph/0902.2064]

RESCEU-21/09

**Discovery of a Giant Ly $\alpha$  Emitter Near the Reionization Epoch** *Ouchi, M., Ono, Y., Egami, E., Saito, T., Oguri, M., McCarthy, Patrick J., Farrah, D., Kashikawa, N., Momcheva, I., Shimasaku, K., and 17 coauthors including Okamura, S.* ApJ, 696, 1164

RESCEU-20/09

**Overdensity of  $i'$ -Dropout Galaxies in the Subaru Deep Field: A Candidate Protocluster at  $z \approx 6$**  *Ota, K., Kashikawa, N., Malkan, Matthew A., Iye, M., Nakajima, T., Nagao, T., Shimasaku, K., Gandhi, P.* ApJ, submitted

RESCEU-19/09

**Lyman Break Galaxies at  $z_{\text{sim}} 1.8 - 2.8$ : GALEX/NUV Imaging of the Subaru Deep Field** *Ly, C., Malkan, Matthew A., Treu, T., Woo, Jong-Hak, Currie, T., Hayashi, M., Kashikawa, N., Motohara, K., Shimasaku, K., Yoshida, M.* ApJ, 697, 1410

RESCEU-18/09

**A Search for Molecular Gas toward a BzK-selected Star-forming Galaxy at  $z = 2.044$**  *Hatsukade, B., Iono, D., Motohara, K., Nakanishi, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Nagao, T., Tamura, Y., Malkan, Matthew A, Ly, C., Kohno, K.* PASJ, 61, 487

RESCEU-17/09

**Proper Motions with Subaru I. Methods and a First Sample in the Subaru Deep Field** *Richmond, M. W., Morokuma, T., Doi, M., Komiyama, Y., Yasuda, N., Okamura, S., Gal-Yam, A.* PASJ, 61, 97

RESCEU-16/09

**Star Formation Rates and Metallicities of K-Selected Star-Forming Galaxies at  $z \approx 2$**  *Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, Y. Katsuno, Kashikawa, N., Yoshida, M., Okamura, S., Ly, C., Malkan, Matthew A.* ApJ, 691, 140

RESCEU-15/09

**On the realization of the MSSM inflation** *Kohei Kamada and J. Yokoyama*

RESCEU-14/09

**Brute Force Reconstruction of the Primordial Fluctuation Spectrum from Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations** *Kiyotomo Ichiki and Ryo Nagata* PRD, 80, 083002

RESCEU-13/09

**Non-linear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations from Improved Perturbation Theory in Real and Redshift Spaces** *Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi, Shun Saito, and Takashi Hiramatsu* PRD, 80, 123503

RESCEU-12/09

**Curvatons in Warped Throats** *Takeshi Kobayashi and Shinji Mukohyama* JCAP, 07, 032

RESCEU-11/09

**Constraints on moduli cosmology from production of dark matter and baryon isocurvature fluctuations** *Martin Lemoine, Jerome Martin, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-10/09

**The moduli problem at the perturbative level** *Martin Lemoine, Jerome Martin, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-9/09

**Asymptotic freedom in inflationary cosmology with a non-minimally coupled Higgs field** *A. O. Barvinsky, A. Yu. Kamenshchik, C. Kiefer, A. A. Starobinsky and C. Steinwachs*

RESCEU-8/09

**Is cosmic acceleration slowing down?** *Arman Shafieloo, Varun Sahni and Alexei A. Starobinsky*

RESCEU-7/09

**Thermodynamic and dynamical stability of Freund-Rubin compactification** *Shunichiro Kinoshita and Shinji Mukohyama*

RESCEU-6/09

**Special Relativistic Simulations of Magnetically Dominated Jets in Collapsing Massive Stars** *T. Takiwaki, K. Kotake and K. Sato* ApJ, 691, 1360

RESCEU-5/09

**Once again on thin-shell wormholes in scalar-tensor gravity** *Kirill A. Bronnikov and Alexei A. Starobinsky*

RESCEU-4/09

**Probing non-tensorial polarizations of stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers** *Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya, Kazuhiro Hayama, Seiji Kawamura, and Masa-aki Sakagami* PRD, 79, 082002

RESCEU-3/09

**Chasing the non-linear evolution of matter power spectrum with numerical resummation method: solution of closure equations** *Takashi Hiramatsu and Atsushi Taruya* PRD, 79, 103526

RESCEU-2/09

**Codimension-3 Singularities and Yukawa Couplings in F-theory** *H.Hayashi, T.Kawano, R.Tatar and T.Watari* [hep-th/0901.4941]

RESCEU-1/09

**Non-linear Evolution of Matter Power Spectrum in Modified Theory of Gravity** *Kazuya Koyama, Atsushi Taruya and Takashi Hiramatsu* PRD, 79, 123512



## II

# 2009年度 プロジェクト別 研究活動報告



# 1 初期宇宙進化論

——基本法則に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (横山・須藤・樽家)

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。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまる研究を本プロジェクトでは遂行している。

## 初期宇宙 相対論

われわれの住むこの宇宙は、今から 137 億年の昔、インフレーションという急速な膨張期を経験したことによって古典的な時空構造として生まれ、そのエネルギーが解放されることによって灼熱の状態となり、フリードマン的な膨張を開始した。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され、豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいつか始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980 年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。具体的には、現実的な素粒子理論に基づいたインフレーションモデルの構築、密度揺らぎの生成機構の解明、揺らぎの進化や非線形性の理解、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と太陽系外惑星を二つの大きなテーマとして研究に取り組んでいる。すなわち、すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、同時に太陽系外惑星探査の新たな地平を

切り開く研究を展開している。具体的には、ダークエネルギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の重力進化と銀河のクラスタリング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマーカーの検出、などである。さらに既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検証など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

## 天体物理

質量の大きい星は進化の最終段階で超新星爆発を起こし、中心にブラックホールもしくは中性子星を形成する。超新星爆発の物理を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいかに合体しながら核物質へ移行するのか、という基礎過程の研究とともに、それらの効果を取り込んだ一般相対論的な流体力学計算によって爆発のシミュレーションを行わなければならない。従来中性子星形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが、実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしていると考えられ、われわれのグループでは爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の 2 次元 3 次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。また近年、重力崩壊型超新星爆発とガンマ線バーストが相関していることが観測的に確立したが、これは、全ての超新星に相対論的ジェットが存在するのかという疑問を投げかけている。光では見えない隠されたジェットのプローブとして、高エネルギーニュートリノや重力波を中心とした研究も行っている。

## 1.1 初期宇宙・相対論

### MSSM インフレーション

MSSM インフレーションは最小超対称標準模型 (MSSM) の平坦方向をインフラトンとしてインフレーションを起こすモデルである。このモデルは、加速器実験とインフレーションを結びつき得るという点で魅力的なモデルであるが、初期条件の微調整がこのモデルの実現に必要であることが問題であった。そこでわれわれは MSSM インフレーション前にインフラトンに大きな摩擦項を与えることによって初期条件の微調整が達成し得るかを調べた。大きな摩擦項の起源として、他の場との相互作用による散逸効果と MSSM インフレーション前におこる別のインフレーションによって生じるハップル摩擦が挙げられる。しかし、どちらも大きな摩擦項を与え得るが MSSM インフレーションを起こすためにはかなり特殊なシナリオを想定しなければならないことがわかった [2, 146]。

### モジュライ場に対する摂動論的宇宙論による制限

素粒子の統一理論である超重力理論や超弦理論には、他の場と重力の強さでしか相互作用しないモジュライ場が存在し、その質量によっては、宇宙のエネルギー密度に対して過剰な寄与をしたり、元素合成後に崩壊して軽元素を破壊するなどの悪影響を及ぼすことが知られている。本研究では、インフレーション中にこの場の質量がハッブルパラメータより十分軽い場合について、この場の持つ揺らぎが宇宙の進化に与える影響を、モジュライからコールドダークマターが生成する場合も含めて、さまざまな場合について考察した。それによって、モジュライが元素合成前に崩壊する場合であっても、密度ゆらぎの観測から強い制限が課されることを示した [3, 4]。

### カーバトンと重力波背景放射

宇宙の構造形成の種になった密度ゆらぎのカーバトンシナリオでは、カーバトンの崩壊時にそのエネルギー密度が宇宙の全エネルギー密度に対して大きな寄与をしていない場合には、ゆらぎのスペクトルに非ガウス性がみられることになる。一方全エネルギー密度に対して支配的な寄与をしてから崩壊する場合には、それによるエントロピー生成が無視できないことになる。後者は重力波背景放射のスペクトルへの変形を引き起こすことになるので、非ガウス性と重力波背景放射の双方を観測すれば、相補的にカーバトンの物理を観測的に検証できることを示した [5]。

### グラビティーノダークマターと非ガウス性

グラビティーノがダークマターである場合、その存在量はインフレーション後の再加熱温度によって決定される。大きな非ガウス性を簡単に生成する機構として知られる modulated reheating シナリオでは、グラビティーノダークマターは等曲率ゆらぎを持ってしまいうため、観測に矛盾することを示した。非ガウス性を生成するもう一つのシナリオであるカーバトン機構でも同様にグラビティーノダークマターは大きな等曲率ゆらぎを伴うことになるので、結論として、局所的な非ガウス性が観測で見つかった場合には、グラビティーノがダークマターである可能性は極めて厳しくなる [6]。

### Q ボール生成と重力波

Affleck-Dine 機構とそれに伴う Q ボール生成は現在の宇宙の物質反物質非対称の起源として有望なシナリオのひとつである。近年 Q ボール生成の際に発生する重力波が次世代重力波検出器によって検出できる可能性があることが指摘されている。もしこれが検出され、他の起源と区別することができれば、物質反物質非対称生成機構へ大きな示唆を与え得る。

そこでわれわれは知られているほぼすべての Affleck-Dine 機構のシナリオで重力波がどのような振幅と波長を示すかを詳細に調べた。その結果、次世代重力波検出器によって Q ボール由来の重力波が検出されるのは非常に限られたパラメータのときのみであることが示された [7, 53, 54, 93, 116, 147]。

### インフレーション中の音速変化と揺らぎのスペクトル

現在宇宙に存在する揺らぎはすべてインフレーション中に生成されたと考えられている。インフレーションを引き起こすスカラー場はインフラトンと呼ばれるが、インフラトンの運動項が canonical な場合、その揺らぎの伝搬する速度（音速）は一定で光速に等しい。ところが近年活発に議論されている超弦理論に基づくインフレーションモデルでは、しばしば non-canonical な運動項を持ったインフラトンが登場する。この場合、音速は光速とは異なる値を取り、さらに一般の場合には音速が一定ではなく、何らかの場の運動に応じて時間変化する可能性が生じる。われわれは、音速が変化する場合の揺らぎの発展を詳細に調べた。その結果、音速の変化が簡単な関数形で書ける場合には、生成される揺らぎの発展方程式を解析的に解くことができ、そのパワースペクトルに従来のものとは異なる振動が現れることを明らかにした [118]。

### 原始ブラックホールに対する宇宙論的制限

宇宙初期にあるスケールに大きな密度ゆらぎが生成していたとすると、そのスケールが地平線に入ってきたときに原始ブラックホールが形成される。質量  $10^{14.5} \text{g}$  以下の原始ブラックホールは今日までに蒸発して消えてしまっているが、このようなブラックホールからのホーキング放射は、初期宇宙の元素合成に影響を与えたり、ガンマ線背景放射に寄与したりすることからその存在量は制限を受ける。一方、それより重いブラックホールはその周りへの物質降着や重力レンズ効果などによって存在量が制限される。本研究では、これらすべての質量域に及び原始ブラックホールの存在量について、あらゆる観点から今日的制限を課した。これは日英協力事業「ブラックホール等で探る加速膨張宇宙の物理」(日本側代表：横山順一、英国側代表：B.J.Carr) によって完成した、5年越しの研究成果である [8, 81]。

### 重力波観測による原始ブラックホール生成の検出可能性

原始ブラックホールは宇宙初期にインフレーションなどの機構によって生み出された初期密度揺らぎが重力崩壊を起こすことによって形成される。原始ブラックホールは形成時期によって幅広い範囲の質量を持つことが可能であり、いまだその起源のわかっていない中間質量ブラックホールや暗黒物質の起源であると

されている。原始ブラックホールの生成量に対しては様々な制限が知られているものの、現在、原始ブラックホールが前記の天体の起源であることを否定するまでには至っていない。われわれは原始ブラックホールに伴う重力波を用いることで原始ブラックホールの生成を検出可能であることを示し、重力波観測が暗黒物質などの宇宙論における未解決の問題に迫る有用な手段となり得ることを明らかにした。特に中間質量ブラックホールと暗黒物質に対応する原始ブラックホールの生成は、それぞれ、パルサーと宇宙重力波干渉計を用いた重力波観測によって検証できることを示し、これらの観測が中間質量ブラックホール・暗黒物質の起源を探る上で重要な意義を持つことを明らかにした [10, 11, 32, 55, 94, 117, 104, 137, 138, 148, 160]。

### CMB を用いた微細構造定数の時間変化の制限

近年、素粒子統一理論は急速に進展しつつあり、その中の多くのモデルが物理定数の時間変化を预言する。また、クエーサーの吸収線の観測から、過去の微細構造定数の値が現在のそれと異なっていたとする結果が示唆されており、他の独立な観測によって微細構造定数の時間変化を検証する試みは大変意義深い。われわれは、公開されたばかりの最新の CMB 温度揺らぎの観測結果 (WMAP5 年目のデータ) を用いて再結合期の微細構造定数の値に制限を与えた。特に、微細構造定数だけでなく電子質量や陽子質量も同時に時間変化する、より現実的な統一理論に基づいたモデルを採用することで、微細構造定数の時間変化の制限が従来より厳しくなることを明らかにした。また、陽子質量の時間変化とバリオン密度の間にはパラメータの強い縮退が生じるが、この縮退は、より小さいスケールの CMB 温度揺らぎを観測することで解消されることを、特異値分解の手法を利用して定量的に議論した [12, 56, 57, 95]。

### $f(R)$ 重力モデルにおける密度ゆらぎの成長

標準宇宙論では現在の宇宙の加速膨張を担うダークエネルギーは宇宙定数によって説明されるが、そのエネルギー密度は理論的に予測される値と観測により制限される値の間に  $10^{120}$  もの隔りがある。近年、この宇宙定数問題を回避するために修正重力理論によって宇宙の加速膨張を説明する研究が活発化している。われわれは  $f(R)$  修正重力理論と呼ばれるモデルにおいて宇宙の大規模構造のタネとなる物質密度揺らぎの発展方程式における解析解を導出した [13]。

また、このモデルにおける一様等方時空と線型摂動の時間発展を併せて数値的に解き、ダークエネルギーに相当する部分の実効的な状態方程式が、いわゆるファントムクロッシングを起こすこと、またゆらぎの成長べき指数が一時的に負になる場合があることを示した [14]。

### $\delta N$ -formalism を超えた三点相関計算の新たな定式化

インフラトンの正体を探る上で揺らぎの非ガウス性 (非線形性) を多くのインフレーションモデルに関して詳細に計算することが急務であり、これには非線形な宇宙論的摂動論が鍵となる。現在多くの研究者がこの量に注目し、多くのインフレーションモデルに関して  $\delta N$ -formalism と呼ばれる長波長展開の最低次の手法を用いて非ガウス性を定量化している。しかし、一般にインフレーション中に slow-roll 条件が破れる段階があると、長波長展開の次のオーダーで結果は劇的に変化する。そこでこの効果まできちんと取り入れた長波長高次展開の非線形宇宙論的摂動論としてわれわれは、beyond- $\delta N$  手法という新たな定式化を完成させた。この手法が強力な点は従来扱うことができなかった揺らぎの減衰モードをきちんと取り入れたことである。これによって、インフラトンの新たな情報としてポテンシャルのとびや、slow-roll 条件の破れといった物理を観測的に明らかにできる可能性が期待される [61, 62, 63, 149, 64, 97, 120]。

## 1.2 観測的宇宙論

初期ゆらぎのパワースペクトルの宇宙背景放射に基づく推定

WMAP の温度揺らぎと偏光のデータの双方を使用し、マルコフチェーンモンテカルロ法によって初期ゆらぎのスペクトルに単純なべき乗則からの有意なズレがあるかどうかを検討した。その結果、700Mpc に対応するスケールに大きなズレが存在することを確認した。その統計的有意性を初めて正確に求め、 $4\sigma$  以上の大きな有意性を持っていることを明らかにした。これがこの波長に偶然現れる確率は一万分の一以下、波長に寄らず起こる確率も千分の一以下である。また、このような細かなフィーチャーが宇宙論的パラメータの推定に無視できない影響を及ぼすことを示した [9]。

バリオン音響振動における赤方偏移歪みの効果と高精度テンプレート

銀河分布のパワースペクトルに現れるバリオン音響振動は、その特徴的な振動周期を「宇宙標準ものさし」として用いることで、銀河分布の赤方偏移・距離関係を決定できる。近年、このバリオン音響振動を精密観測することで、宇宙の加速膨張・ダークエネルギーの正体が探れると注目が集まり、バリオン音響振動は次世代分光サーベイの重要な観測ターゲットになっている。一昨年よりわれわれは、バリオン音響振動を用いた観測手段の有効性を探るため、N 体シミュレーションと摂動論にもとづく解析的手法をもとに、バリオン音響振動に現れる様々な観測的影響 (非線形重力進化、赤方偏移歪み、銀河バイア

ス)に関する理論的研究を進めている。これまでの研究で、非線形重力進化を従来の摂動論より高精度かつ広範囲で記述できる解析計算手法の開発に成功した [28]。本研究では、この計算手法をもとにさらに研究を一步進め、赤方偏歪みの影響を取り入れたバリオン音響振動の高精度理論テンプレートの構築を行った。赤方偏歪み空間におけるパワースペクトルの厳密な表式を出発点に、赤方偏歪みに対する新しい解析表式を得ることに成功し、従来用いられてきた現象論的な表式には新たな補正項が必要ながわかった。さらに、 $N$  体シミュレーションとの詳細な比較を行い、新たな解析表式は高精度テンプレートとして十分妥当であることを検証した。赤方偏歪みの効果を積極的に用いることで、距離指標だけでなく密度ゆらぎの成長率の情報も引き出せることが知られているが、そのためには赤方偏歪みの精密なモデル化が本質的である。バリオン音響振動の精密観測から新たな宇宙論的情報を引き出す上で、本研究で得られた新たな表式はきわめて重要な役割を果たすことが期待される [89, 98, 108, 126, 126]。

#### X 線輝度による銀河団の形状分布と宇宙論

銀河団の形状は銀河団の力学進化を考える上で重要である。XMM-Newton による 60 個ほどのデータ解析を行い、X 線輝度分布を通して銀河団の投影軸比分布関数を測定した。そしてこれを  $N$  体シミュレーションから得られている暗黒物質の軸比分布に静水圧平衡等の単純な仮定を課したモデルで説明することに成功した [121]。

#### 銀河分布を用いた中高温銀河間物質の X 線観測提案

中高温銀河間物質 (WHIM) はミッシングバリオン問題を解く鍵として注目されているが、その存在の決定的な証拠がまだ見つかっていない。WHIM のあるとされるフィラメント構造は銀河によってトレースされているので、SDSS 銀河サンプルの系統的な解析により、X 線衛星すざくによる観測に最適な場所を同定し提案を行った。この提案は採択され、2010 年度中に観測される見通しである。

#### スニャーエフ・ゼルドビッチ効果によるハッブル定数の系統誤差

スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いたハッブル定数推定の観測値は、観測によって 15% ほどの違いがある。今回その一方の結果である Bonamente et al. (2006) の解析の X 線温度決定について再解析を行った結果、Chandra キャリブレーションの配布時期に依存し、推定値にして 15% 以上の違いがでてしまうことを発見した。すなわち、この方法論は X 線衛星のキャリブレーションを高精度化が、推定値のバイアスを抑えるために必要であることを示している [67, 109]。

#### 銀河団ガスのゆらぎが宇宙論に及ぼす影響

銀河団は宇宙論プローブとしてよく利用されてきたが、宇宙論の精密化とともに系統誤差の理解が重要となってきた。われわれは銀河団ガスのゆらぎが温度推定バイアス、ハッブル定数推定に大きな系統誤差を生み出していることを見いだしてきた。またゆらぎの観測的制限を行う方法論の開発と実際の解析を行った [41, 84]。

#### 原始揺らぎの非ガウス性の銀河空間分布への影響

標準的な宇宙モデルでは、宇宙の構造の種はインフレーション中に形成されたものと考えられている。この原始揺らぎは、ほぼガウス統計に従うが、これまでの大規模構造及び宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測結果は確かにガウス統計と矛盾がない。今後の観測では、期待されるガウス統計からの僅かな差異を検出する可能性がある。そして、この大きさが測定されれば、インフレーションモデルの詳細に対して強く制限を課することができる。

われわれは、宇宙論的な  $N$  体シミュレーションを用いて、銀河をホストする暗黒物質ハローの空間分布の持つ統計的性質が、局所型と呼ばれる種類の原始非ガウス性の存在下でどのように変更を受けるか調査した。その結果、これまでの研究で明らかにされてきたハローのパワースペクトルのみならず、高次の統計量である、パワースペクトルも大スケールで大きく影響を受けることを発見した。一方で、この影響は宇宙の物質全体 (= バリオンと暗黒物質) の空間分布には見られなかった。故に、われわれはハローの形成される場所が物質全体の分布を非線形にバイアスしていることに起因すると結論づけた。また、われわれはこの新しい効果のために、将来観測からの原始非ガウス性の検出が容易になることを示した [72, 73, 101, 110, 128, 129]。

#### 有質量ニュートリノの重力非線形進化への影響

ニュートリノが有限の質量をもつことは素粒子標準模型の限界を示す最初の実験的な証拠であり、ニュートリノがどの程度の質量を持つかという問いに答えることは重要な問題である。非常に興味深いのは、ニュートリノ振動実験で測定できるのは質量固有値の自乗差のみであるのに対して、宇宙論的観測からは重力を通してニュートリノ質量の絶対値の総和を制限できることである。さらに重要な事実、ベータ崩壊から得られる電子ニュートリノ質量の制限と振動実験で得られた結果を組み合わせる事によって得られる制限よりも、宇宙論的観測から得られている  $\sum m_\nu < 0.2 - 1.0 \text{eV}$  (95% C.L.) という制限の方が厳しいということである。

宇宙論的観測からニュートリノの質量を制限できる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュートリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的な

スケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在できず、重力を弱めるからである。

将来の大規模構造観測を念頭に置くと、重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこでわれわれは、摂動論に基づき、有質量ニュートリノの効果を非線形パワースペクトルの計算に組み込むこと手法を確立した。さらに、ニュートリノが成長を均す効果は重力の非線形進化により増幅され、この効果によりニュートリノ質量の制限が非常に強くなりうることを示した [21, 44, 68, 69, 153, 154]。

さらに摂動論的手法により銀河バイアスの効果も考慮することによって、現存する銀河パワースペクトルのデータである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の Data-Release 7 (DR7) における銀河カタログのデータにわれわれの確立した手法を適用して、ニュートリノ質量に関するロバストな制限を得る試みを行った。WMAP5 と組み合わせることによって、 $\sum m_\nu < 0.67\text{eV}$  (95% C.L.) という WMAP5 のみに比べて 2.3 倍厳しい制限を得た [44, 70, 71, 99, 107, 111, 130, 154]。この制限は有質量ニュートリノの効果を正確に取り扱った上で得られた初めての制限である。

### CMB レンズングと銀河の弱重力レンズを用いた宇宙論パラメータの決定精度

Ia 型超新星、CMB、宇宙大規模構造の観測によって標準宇宙モデルが確立してきたが、このモデルにはいくつかの課題が残されている。そのうちの一つは、物理的起源の不明なダークエネルギーが宇宙のエネルギー密度の 70% 以上を占めていることである。また、素粒子実験からニュートリノの質量はゼロでないことがわかっているが、標準宇宙論ではゼロとして扱われている。ダークエネルギーやニュートリノ質量は宇宙の構造形成に影響を与えるため、密度揺らぎの情報をもつ観測を用い、これらの課題にアプローチできる。

本研究では、その方法として特に銀河の弱重力レンズと CMB レンズングに着目し、次世代サーベイにおけるこれらの測定・検証可能性について見積もりを行った。特に次世代の CMB 観測として Planck、ACTPol、次世代の銀河の測光サーベイとして HSC を想定した。その結果、今回用いた弱重力レンズ効果は、DETF で見積もられている Stage-III クラスの他の観測からの制限と同程度であることがわかった。また、CMB レンズングと銀河の弱重力レンズが宇宙論パラメータの決定精度に与える影響を比較し、ダークエネルギー・ニュートリノ質量の決定精度が何で決まっているのか調べた。その結果、銀河のシェアを用いた場合には、重力の非線形性でダークエネルギーの状態方程式とエネルギー密度の縮退が解け、ダークエネルギーに対する制限が改善していることがわかった。一方、ニュートリノ質量の制限においては縮退が完全に解けず、制限があまり改善していないこともわかった。本研究より、ダークエネルギー・ニュートリノ質量の制限において、重力の非線形進化を正しく扱うことで、弱重力レンズ

サーベイは極めて有効な手段であるということがわかった [45, 75, 113, 134, 122]。

### SDSS 銀河分光サーベイを用いた密度揺らぎの確率分布関数

宇宙の大規模構造を記述する最も基本的な統計量の一つが密度揺らぎの確率分布関数 (PDF) である。現在の宇宙の構造の起源である原始揺らぎはインフレーション時に形成されたものと考えられており、多くのモデルはほぼガウス統計に従う密度揺らぎを予言する。その後、重力の非線形進化により PDF は大きく変形を受ける。結果、現在の PDF は対数正規分布でよく記述できることが数値計算によって示されている。一方、観測的に PDF を測定しようとする試みがなされてきたがそれらは必ずしも精度が十分とは言えないままであった。

そこで、われわれは大規模な赤方偏移サーベイである SDSS の最新データである DR7 (Data Release 7) を用いて、銀河分布の PDF を様々なスケールにわたり定量的に測定した。その結果、大スケールでは正規分布に近いといえる PDF が、非線形性の強い小スケールでは分布が歪み、対数正規分布に近づいていくことがわかった。これらの観測結果とわれわれの数値シミュレーション結果と比較することで、赤方偏移歪みが PDF にどのように影響するかを示した。さらに、PDF が銀河の性質 (光度、色、形態) にどのように依存するのかを調べ、考察した [76, 125]。

## 1.3 天体物理

### ガンマ線バースト中心エンジンからの重力波

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象である。2004 年に打ち上げられた Swift 衛星をはじめ、非常に多くの観測があるものの、その中心メカニズムはいまだ明らかになっていない。ガンマ線バーストを起こすには非常に小さい角度に絞られた超相対論的なジェットが必要と考えられているが、その発生メカニズムは明らかになっていない。中心エンジンの候補として有力なのは、コアブサーと呼ばれるブラックホールと降着円盤の系である。しかし具体的にどういったメカニズムで GRB に不可欠なジェットを生成するのか、というのは光学的に厚いため光子での観測では制限を加えることができない。そのような中、本研究ではガンマ線バーストの中心エンジンから放出される重力波の強度を見積もった。その結果 LISA や DECIGO といった将来観測器を用いることで中心エンジンに制限を加えることができることを示した [20, 42, 74, 151, 155, 156, 157]。

## コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノとガンマ線バースト中心エンジン

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象の一つであり、小さな角度に絞られている相対論的なジェットから放出されていることが観測からわかってきている。ジェットはブラックホールと降着円盤のシステムから駆動されていると考えられているが、その生成機構は明らかになっていない。有力な候補として、降着円盤から放出されるニュートリノの対消滅によるエネルギー供給が提唱されている。ニュートリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーをつくるには、大きなニュートリノ光度が必要である。これはニュートリノ反応の断面積の小ささ ( $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$ ) と幾何学的な構造から、実際にジェットに行くエネルギーは全エネルギーの1%程度であるためである。しかし、近年のニュートリノの光学的厚みを考慮した計算は、十分な大きさのニュートリノ光度が達成できないためニュートリノ対消滅ではガンマ線バーストを起こすのは困難だということを示唆している。そのような背景の中、本研究ではニュートリノ輸送方程式を用いて、降着円盤の動径方向の運動によって非熱的ニュートリノが生成されることを示した。これまでニュートリノ輸送は簡略化して扱われてきたのでこのような効果は考えられておらず、ニュートリノはすべて熱的分布を持っていると仮定されていた。ニュートリノ対消滅の効率はニュートリノエネルギーに大きく依存するため、この非熱的成分によってジェット生成効率は大きく変化する。今回は、非熱的成分によってどれだけ効率が変化し、それによって、ニュートリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーを生成できるのかどうかを議論した [106, 151, 155, 156, 157]。

## 二次元軸対称計算によるニュートリノ駆動型超新星爆発シミュレーション

重力崩壊型超新星爆発は大質量星がその末期に起こす大爆発であると考えられている。この天体現象は古来より数多の観測がなされているものの、その爆発メカニズムは完全には明らかになっていない。その標準的なシナリオとして、“遅延爆発モデル”がある。これは、重力崩壊の結果として星の中心部に形成された原始中性子星から放射される莫大な量のニュートリノの一部が外部の物質と相互作用する（ニュートリノ加熱と呼ばれる）ことで、星の中心部で解放された重力エネルギーを外部で爆発エネルギーとして転換することが肝となっている。このメカニズムで実際に爆発が起こることが出来るのかを検討するには、流体の動きをニュートリノ輻射輸送とともに解く必要がある。そのような計算はこれまで球対称の仮定のもとでは様々なグループにより計算されてきた。しかし、球対称の仮定の元では、ニュートリノ加熱を用いても爆発を起こせない、ということが長年大きな問題になっていた。しかし近年、多次元の流体現象（対流など）によってニュートリノ加熱の効

率が著しく上がり、遅延爆発シナリオによって超新星爆発が起こせる可能性があることが明らかになってきた。今回、われわれも2次元軸対称流体計算と共にニュートリノ輻射輸送を計算できるコードを開発し、いくつかのモデルで計算を行った。その結果、球対称計算では先行研究同様爆発は起こらなかったが、2次元計算では爆発の予兆を見せるモデルがあることを明らかにした。また、回転が衝撃波の進化に対してどのような影響を及ぼすのか、についても明らかにした [42, 90, 100, 112, 131, 132, 145, 151]。

## 1.4 太陽系外惑星

### 反射光トモグラフィによる地球型系外惑星の世界地図作製と赤道傾斜角推定

地球型惑星の直接撮像によって得られる反射光から惑星表面の組成についての情報が得られる。惑星の公転自転によって変化する反射光の強度変化に着目し、これを用いて惑星表面の陸地/海分布を推定する方法論を開発した。また、この方法を用いることで惑星の赤道傾斜角を推定できることを見いだした。この方法は現在、計画されている衛星計画によって実現可能であることを示した。

### 反射光による地球外系外惑星の表層環境の探査

現在、目覚ましい速度で次々に系外惑星が発見されており、地球質量程度の惑星、さらにはハビタブルゾーン（水が惑星表面に液体として存在できる軌道の範囲）内の惑星の存在も今後数年で明らかになってくると考えられる。そこに生命の存在を探ることは、ほとんど必然的に今後の大きな目標となるだろう。系外惑星の環境の詳細を観測的に知るための鍵として、系外惑星からくる反射光が注目されている。海や土壌、雪などの表面はそれぞれに固有の反射特性を示すが、特に植物の反射特性にはレッドエッジと呼ばれる著しい特徴があり、生命の存在を示す指標ともなりうる。これらをふまえて、私達は、反射光の多バンド測光観測から逆問題的に惑星表面を再構築する方法を開拓している。今年度は、実際の地球観測衛星のデータをもとに10pc彼方から見た地球（雲が無い場合）を模擬観測し、その結果をモデルでフィットすることで、海や陸、さらには植物の割合や分布が推定できることを示した [47, 103, 115, 158]。また、現在提案されている観測計画に合わせたシミュレーションを行った [78]。

### トランジット惑星系のロシター効果に対する解析手法の改良

系外惑星の発見には惑星の重力による主星のふらつきを捉えるドップラー法が多くて用いられているが、一方で主星の前を惑星が通過して食を起こ

すトランジット惑星系も多く見つかっている。トランジット惑星系ではドップラー法だけでは得られない多くの情報を引き出すことが可能である。ロシター効果と呼ばれるトランジット中の星の視線速度の特徴的な変化がその1つで、それにより主星の自転速度と、主星の自転軸の向きと惑星の軌道公転軸の向きの天球面への射影角を推定することができる。

われわれは、ロシター効果に対してこれまで用いられてきた摂動公式 (Ohta et al. 2005) が、実際のすばるの視線速度解析で得られる結果と系統的にずれる原因について指摘した。Ohta et al. (2005) による摂動公式では星の視線速度の見積りに吸収線のモーメント (重心) を用いるのに対し、実際のデータの視線速度解析では吸収線の位置の見積りにはトランジット中のスペクトルとトランジット外のテンプレートとの相関を取り最もフィットする位置を求めているということがこのずれの原因になっている事を示した。

われわれはさらに、星の自転の影響や星の圧力などによるスペクトルの吸収線に対する影響を考慮し、実際の視線速度解析と同じように相関を取る手法によってロシター効果に対する解析公式を導出した。これにより、吸収線の広がりに応じてどのように視線速度が変化するかを定量的に議論した [18, 79, 80, 46, 102, 114]。

#### 星の自転軸と惑星公転軸のなす角度の3次元再構築

ロシター効果がこれまで観測された系は20個近くに上っており、徐々に $\lambda$ を統計的に議論する段階に来ている。しかしながら、観測される $\lambda$ は天球面上で2つの回転軸がなす角度であり、実際の3次元の角度を求めるには主星の自転軸が観測者に対してどの程度傾いているかという情報が必要となる。この傾斜角は、主星のスペクトル型に対する代表的な自転速度と観測される射影された主星の自転速度を比較する事である程度推定することが可能である。われわれは、主星の自転軸傾斜角に対する観測的制限を考慮する事により、Fabrycky & Winn (2009) によって導入されたロシター効果に対する統計解析を拡張した。またその統計手法を最新のものを含むこれまでの観測結果に適用した。結果、惑星の軌道公転軸と主星の自転軸が天球面上ではそろっていても3次元的にはずれているのではずれているのではないかと示唆される系がいくつか見つかった [123]。

< 受賞 >

- [1] 平野照幸、平成 21 年度 理学系研究科研究奨励賞、2010 年 3 月 24 日

< 報文 >

(原著論文)

- [2] Kohei Kamada and Jun'ichi Yokoyama, "On the Realization of MSSM Inflation," *Prog. Theor. Phys.* **122** (2009) 969.

- [3] M. Lemoine, J. Martin and J. Yokoyama, "Constraints on moduli cosmology from the production of dark matter and baryon isocurvature fluctuations," *Phys. Rev. D* **80** (2009) 123514.
- [4] M. Lemoine, J. Martin and J. Yokoyama, "The moduli problem at the perturbative level," *Europhys. Lett.* **89** (2010) 29001.
- [5] K. Nakayama and J. Yokoyama, "Gravitational Wave Background and Non-Gaussianity as a Probe of the Curvaton Scenario," *JCAP* **1001** (2010) 010.
- [6] T. Takahashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama and S. Yokoyama, "Gravitino Dark Matter and Non-Gaussianity," *Phys. Lett. B* **678** (2009) 15.
- [7] Takeshi Chiba, Kohei Kamada and Masahide Yamaguchi, "Gravitational Waves from Q-ball Formation" *Phys. Rev. D* **81** (2010) 083503.
- [8] B. J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda and J. Yokoyama, "New cosmological constraints on primordial black holes," *Phys. Rev. D* **81** (2010) 104019.
- [9] K. Ichiki, R. Nagata and J. Yokoyama, "Cosmic Discordance: Detection of a modulation in the primordial fluctuation spectrum," *Phys. Rev. D* **81** (2010) 083010.
- [10] R. Saito and J. Yokoyama, "Gravitational-Wave Background as a Probe of the Primordial Black-Hole Abundance", *Phys. Rev. Lett.* **102**, (2009) 161101.
- [11] R. Saito and J. Yokoyama, "Gravitational-Wave Constraints on the Abundance of Primordial Black Holes", *Progress of Theoretical Physics*, **123**, 5 (2010) 867-886.
- [12] M. Nakashima, K. Ichikawa, R. Nagata and J. Yokoyama, "Constraining the time variation of the coupling constants from cosmic microwave background: effect of  $\Lambda_{QCD}$ ," *JCAP* **1001**, 030 (2010)
- [13] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Analytic solution for matter density perturbations in a class of viable cosmological  $f(R)$  models," *Int. J. Mod. Phys. D* **18** (2009) 1731.
- [14] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Phantom boundary crossing and anomalous growth index of fluctuations in viable  $f(R)$  models of cosmic acceleration," *Prog. Theor. Phys.* **123** (2010) 903.
- [15] Kevork N. Abazajian et al., "The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey," *The Astrophysical Journal Supplement* **182**(2009) 543-558 (arXiv:0812.0649)
- [16] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Daniel Fabrycky, Andrew W. Howard, Geoffrey W. Marcy, Norio Narita, Ian J. Crossfield, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Gil Esquerdo and Matthew J. Holman, "On the Spin-Orbit Misalignment of the XO-3 Exoplanetary System," *The Astrophysical Journal* **700**(2009) 302-308 (arXiv:0902.3461)

- [17] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Bun'ei Sato, Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Motohide Tamura and Toru Yamada, "Improved Measurement of the Rossiter-McLaughlin Effect in the Exoplanetary System HD 17156," *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61**(2009) 991–997 (arXiv:0905.4727)
- [18] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun'ei Sato, John Asher Johnson and Joshua N. Winn, "Analytic Description of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets: Cross-Correlation Method and Comparison with Simulated Data," *The Astrophysical Journal* **709** (2010) 458–469 (arXiv:0910.2365)
- [19] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima and Edwin L. Turner, "Colors of a Second Earth: Estimating the fractional area of ocean, land and vegetation of Earth-like exoplanets," *The Astrophysical Journal* (2010) in press (astro-ph/0911.5621)
- [20] Yudai Suwa and Kohta Murase, "Probing the central engine of long gamma-ray bursts and hypernovae with gravitational waves and neutrinos," *Phys. Rev. D* **80**, 123008 (2009)
- [21] Shun Saito, Masahiro Takada and Atsushi Taruya, "Nonlinear power spectrum in the presence of massive neutrinos: perturbation theory approach, galaxy bias, parameter forecasts," *Phys.Rev.D* **80**, 083528 (2009).
- [22] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata and Katsuhiko Sato, "Cross-correlation between UHECR arrival distribution and large-scale structure," *JCAP* **06** (2009) 031
- [23] Norio Narita, Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano and Motohide Tamura, "First Evidence of a Retrograde Orbit of Transiting Exoplanet HAT-P-7b," *Publications of the Astronomical Society of Japan*; **61** (2009) L35
- [24] Norio Narita, Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn and Motohide Tamura, "Spin-Orbit Alignment of the TrES-4 Transiting Planetary System and Possible Additional Radial Velocity Variation," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press, (2010) (arXiv:1003.2268)
- [25] Takashi Hiramatsu and Atsushi Taruya, "Chasing the nonlinear evolution of matter power spectrum with a numerical resummation method: Solution of closure equations," *Physical Review D* **79** (2009) 103526
- [26] Kazuya Koyama, Atsushi Taruya and Takashi Hiramatsu, "Nonlinear evolution of the matter power spectrum in modified theories of gravity," *Physical Review D* **79** (2009) 123512
- [27] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Takahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Atsushi J. Nishizawa, Takahiro Nishimichi, Shun Saito and Atsushi Taruya, "Simulations of Baryon Acoustic Oscillations. II. Covariance Matrix of the Matter Power Spectrum," *The Astrophysical Journal*, **700** (2009) 479
- [28] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi, Shun Saito and Takashi Hiramatsu, "Nonlinear evolution of baryon acoustic oscillations from improved perturbation theory in real and redshift spaces," *Physical Reiview D* **80** (2009) 123503
- (会議集録)
- [29] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Analytic solution for matter density fluctuations in  $f(R)$  models of cosmic acceleration," in *Proceedings of The Ninth Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics*
- [30] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Phantom behaviour and growth index anomalous evolution in viable  $f(R)$  gravity models," in *Proceedings of The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- (国内雑誌)
- [31] 鎌田 耕平, 横山 順一: "別の宇宙にも生命は存在する!?" (A. ジェンキンス, G. ペレスによる原題 "Looking for Life in the Multiverse" の翻訳) *日経サイエンス* (2010) 4月号, pp.20
- [32] 横山 順一, 齊藤 遼: "ビッグバン直後にできたブラックホールは重力波で観測できる", *東京大学 理学系研究科・理学部ニュース* (2009年7月号, 41巻2号)
- [33] 須藤 靖: "科学の面白さを伝えているか?", *バリティ* **24**(2009) 4月号, p.47
- [34] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その七: ニュートン算の功罪", *東京大学出版会 UP* **439**(2009)5月号, pp.15 – 23
- [35] 西道 啓博・須藤 靖: "暗黒エネルギーは幻か?" (共訳), (T.Clifton and P.G.Ferreira "Does Dark Energy Really Exist?", *Scientific American*, April 2009) *日経サイエンス* (2009) 7月号, pp.22–30
- [36] 須藤 靖: "高校物理の教科書は面白いのか?", *バリティ* **24**(2009) 7月号, pp.45 – 47
- [37] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その八: 目に見えないからこそ大切", *東京大学出版会 UP* **442**(2009)8月号, pp.48 – 53
- [38] 須藤 靖: "ガリレオが見た宇宙、見なかった宇宙 ～世界天文年・七夕講演会～", *東京大学理学系研究科・理学部ニュース* 2009年9月号 41巻3号, p.6
- [39] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その九: オフリミット", *東京大学出版会 UP* **445**(2009)11月号, pp.44 – 50
- [40] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その十: サクサクでバリバリ", *東京大学出版会 UP* **448**(2010)2月号, pp.46 – 52
- [41] 河原 創: "ゆらく銀河団ガスと宇宙論", *天文月報* Vol.102, No.10 (十月号), pp546-555,2009

## (学位論文)

- [42] Yudai Suwa: “The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions” (博士論文)
- [43] Takahiro Nishimichi: “Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity” (博士論文)
- [44] Shun Saito: “Toward a precise measurement of neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum based on perturbation theory” (博士論文)
- [45] 並河 俊弥: “CMB レンズと銀河の弱重力レンズを用いた宇宙論パラメータの決定精度” (修士論文)
- [46] Teruyuki Hirano: “Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems” (修士論文)
- [47] Yuka Fujii: “Toward Remote Sensing of Extrasolar Earth-like Planets” (修士論文)
- [48] 本橋 隼人: “修正重力理論によるダークエネルギー問題へのアプローチ” (修士論文)

## (著書)

- [49] 横山順一: “電磁気学” (講談社 278 ページ、2009 年 9 月)
- [50] 須藤 靖: “人生一般二相対論” 東京大学出版会 (2010 年 4 月刊行)
- [51] 自然科学研究機構シンポジウム収録集 6 “宇宙究極の謎” クバプロ (2009 年 9 月刊行、pp.189 – 209、立花隆・観山正見・須藤靖 パネルディスカッション)
- [52] 東京大学理学系研究科・理学部 編 “東大式 現代科学用語ナビ” 化学同人 (2009 年 9 月刊行、pp.8 – 9、宇宙マイクロ波背景放射の項 執筆)

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [53] Takeshi Chiba, Kohei Kamada and Masahide Yamaguchi: “Can we detect gravitational waves from Q-ball formation?” (poster); Second Texas Cosmology Network Meeting (October, 2009, Austin, TX, USA)
- [54] Takeshi Chiba, Kohei Kamada and Masahide Yamaguchi: “Gravitational waves and Q-ball formation”; The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (November 30 - December 4, 2009, Rikkyo University, Tokyo)
- [55] R. Saito and J. Yokoyama: “Probing the abundance of primordial black holes with gravitational wave observations”; The annual Cosmo International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO09) (September, 2009, Geneve)

- [56] M. Nakashima, K. Ichikawa, R. Nagata and J. Yokoyama: “New constraint on the varying fine structure constant”; Invisible Universe (June 29 - July 3, 2009, Paris, France)
- [57] M. Nakashima, K. Ichikawa, R. Nagata and J. Yokoyama: “New constraint on the varying fine structure constant”; Cosmology on the Beach (January, 2010, Cancun, Mexico)
- [58] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Analytic solution for matter density perturbations in a class of viable cosmological  $f(R)$  models”; The Ninth Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics (June 28 - July 2, 2009, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China)
- [59] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama: “Evolution of density fluctuation in  $f(R)$  gravity”; IPMU international conference “Dark Energy: lighting up the darkness!”, (June 22 - 26, 2009, IPMU, Kashiwa, Japan)
- [60] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama: “Evolution of density fluctuation in  $f(R)$  gravity”; The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (November 30 - December 4, 2009, Rikkyo University, Tokyo)
- [61] Y. Takamizu and S. Mukohyama: “Non-Gaussianity beyond  $\delta N$ ”; Non-Gaussianities in the sky (April 8, 2009, IPMU, Kashiwa, Japan)
- [62] Y. Takamizu and S. Mukohyama: “Non-Gaussianity beyond  $\delta N$ ”; The annual Cosmo International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO09) (September, 2009, Geneve)
- [63] Y. Takamizu and S. Mukohyama: “Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations: Beyond  $\delta N$ -formalism”; Particle Cosmology (September, 2009, CERN, Switzerland)
- [64] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki, and Y. Tanaka: “Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations: Beyond  $\delta N$ -formalism”; The non-Gaussian universe (March 25, 2010, YITP, Kyoto)
- [65] Atsushi Taruya: “Looking up the sky”; DENET workshop on Dark Universe: from cosmology to planets (October 14-16, 2009, Goura)
- [66] Atsushi Taruya: “Non-linear evolution of matter power spectrum in modified theory of gravity”; IPMU international conference “Dark Energy: lighting up the darkness!”, (June 22 - 26, 2009, IPMU, Kashiwa, Japan)
- [67] Hajime Kawahara, Erik Reese, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki and Yasushi Suto: “Revisiting the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel’dovich Effect”; (November 11, 2009, Princeton University)

- [68] Shun Saito, Masahiro Takada and Atsushi Taruya: “Probing neutrino masses with WFMOS using nonlinear galaxy power spectrum in redshift space”; Joint Subaru/Gemini Science Conference (May, 2009, Kyoto University)
- [69] Shun Saito, Masahiro Takada and Atsushi Taruya: “How can we determine both neutrino masses and dark energy parameter through nonlinear galaxy power spectrum”; IPMU international conference “Dark Energy: lighting up the darkness!”, (June 22 - 26, 2009, IPMU, Kashiwa, Japan)
- [70] Shun Saito, Masahiro Takada and Atsushi Taruya: “Constraint on neutrino mass with galaxy power spectrum based on perturbation theory”; SDSS-III collaboration meeting 2009 (July, 2009, Princeton University, U.S.)
- [71] Shun Saito, Masahiro Takada and Atsushi Taruya: “Constraint on neutrino mass from SDSS power spectrum with perturbation theory approach”; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (Princeton University, U.S. November 2009).
- [72] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama and Cristiano Sabiu: “Bispectrum and nonlinear biasing in primordially non-Gaussian universe”; Focus week on non-Gaussianities in the sky (April 6-10, 2009, IPMU, the University of Tokyo)
- [73] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama and Cristiano Sabiu: “Cosmological N-body Simulations with Non-Gaussian Initial Conditions”; The Non-Gaussian Universe (March 24-26, 2010, YITP, Kyoto University)
- [74] Yudai Suwa: “Probing the central engine of long gamma-ray bursts and hypernovae with gravitational waves”; KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop on High Energy Astrophysics 2009 (November, 2009, KEK, Tsukuba, Japan)
- [75] Toshiya Namikawa, Shun Saito, Atsushi Taruya and Kiyotomo Ichiki: “Cross correlation study for HSC and CMB experiment: CMB lensing”; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (November 9-11, 2009, Princeton University)
- [76] Kensuke Fukunaga and Takahiro Nishimichi: “Testing the density Probability Distribution Function of the SDSS galaxies”; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (November 9-11, 2009, Princeton University)
- [77] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima and Edwin L. Turner: “Color of the second Earth: Estimating the area fraction of ocean and vegetation of the Earth-like exoplanets from multi-band photometry”; DENET workshop on “From Cosmology to Planets” (October, 2009, Goura)
- [78] N. Jeremy Kasdin, David N. Spergel, P. Doug Lisman, Stuart B., Shaklan, Dmitry Savransky, Eric Cady, Edwin L. Turner, Robert Vanderbei, Mark W. Thomson, Stefan R. Martin, K. Balasubramanian, Steven H. Pravdo, Yuka Fujii and Yasushi Suto: “O3 : The Occulting Ozone Observatory”; the 215th AAS meeting (January, 2010, Washington D.C.)
- [79] Teruyuki Hirano: “The Rossiter Effect of Transiting Planets”; DENET workshop on “dark universe: From Cosmology to Planets” (October, 2009, Goura)
- [80] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun’ei Sato, John Asher Johnson and Joshua N. Winn: “Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems”; 第6回太陽系外惑星大研究会 (国立天文台三鷹, 2010年1月)
- 招待講演**
- [81] J. Yokoyama: “Gravitational Waves and the Early Universe,”; PASCOS2009 (July, 2009, DESY, Hamburg, Germany).
- [82] J. Yokoyama: “Gravitational Waves and the Early Universe,”; Summer Institute 2009 (August, 2009, Fuji Yoshida, Japan).
- [83] J. Yokoyama: “Cosmology with stochastic gravitational waves,”; CosPA 2009 (November, 2009, Melbourne University, Melbourne, Australia).
- [84] Yasushi Suto: “Inhomogeneities in galaxy clusters”; Large-scale structure and galaxy formation with LAMOST (Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics at Peking University, Beijing, China, April 16, 2009)
- [85] Yasushi Suto: “Concluding Remark”; Joint Subaru/Gemini Science Conference (May 21, 2009, Kyoto University, Kyoto)
- [86] Yasushi Suto: “Ups and Downs of the SUMIRE Project”; Princeton-DENET conference, Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe (November 9, 2009, Princeton University, Princeton, U.S.)
- [87] Yasushi Suto: “Unveiling orbits of transiting exoplanets with the Rossiter-McLaughlin effect”; planet/exoplanet group discussion (November 30, 2009, Princeton University, Princeton, U.S.)
- [88] Yasushi Suto: “HSC: Subaru collaboration with Taiwan and Princeton”; Subaru User’s Meeting (January 14, 2010, NAOJ, Tokyo)
- [89] Atsushi Taruya: “Modeling baryon acoustic oscillations in 2D”; Science Opportunities with Wide-field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe (November 9-11, 2009, Princeton)
- [90] Yudai Suwa: “Axisymmetric Simulation of Core-Collapse Supernovae”; New Frontiers in QCD 2010 (February, 2010, YITP, Kyoto, Japan)

- [91] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima and Edwin L. Turner: “Colors of Earth-like planets”; 第6回太陽系外惑星大研究会 (国立天文台三鷹, 2010年1月)
- (国内会議)
- 一般講演
- ・第9回宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会 “Dark Energy in the Universe” サマースクール (沖縄県宜野湾市「カルチャーリゾート フェストーネ」, 2009年8月30日-9月2日)
- [92] 横山 順一: “原始ブラックホールの質量スペクトル”
- [93] 千葉 剛、鎌田 耕平、山口昌英: “Searching for signature of baryogenesis”
- [94] 齊藤 遼、横山 順一: “重力波観測を用いた原始ブラックホール生成量への制限”
- [95] 中島 正裕、市川 和秀、永田 竜、横山 順一: “New Constraint on the time variation of the fine structure constant”
- [96] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama: “Evolution of density fluctuation in  $f(R)$  gravity”
- [97] 高水裕一、向山信治: “Non-Gaussianity beyond  $N$ ”
- [98] Atsushi Taruya: “Modeling non-linear clustering in redshift space”
- [99] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: “Constraint on cosmological parameters from SDSS power spectrum with perturbation theory”
- [100] 諏訪 雄大: “超新星はついに爆発したか?”
- [101] 西道 啓博、樽家 篤史、小山 和哉、Cristiano Sabiu: “The effect of primordial non-Gaussianity on the galaxy bispectrum”
- [102] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun’ei Sato, John Asher Johnson and Joshua N. Winn: “Analytic Expressions for the Rossiter-McLaughlin Effect of Transiting Exoplanets”
- [103] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “Estimating planetary surface from its light curves”
- ・日本物理学会 2009 年秋季大会 (甲南大学、2009 年 9 月)
- [104] 横山順一ほか DECIGO チーム: “スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (21) サイエンス 1”
- [105] 本橋 隼人, A. A. Starobinsky, 横山 順一: “ $f(R)$  重力理論における密度揺らぎの時間発展”
- [106] 諏訪 雄大: “コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノ生成とガンマ線バースト中心エンジン”
- [107] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: “銀河のパワースペクトルを用いた摂動論的アプローチに基づくニュートリノ質量の制限”
- ・日本天文学会 2009 年秋季大会 (山口大学、2009 年 9 月)
- [108] 樽家 篤史、斎藤 俊、西道 啓博: “赤方偏移歪みとバリオン音響振動”
- [109] 河原 創、Erik Reese、北山 哲、太田 直美、佐々木 伸、須藤 靖: “SZ 効果から導かれるハッブル定数の系統誤差の発見:Chandra の再解析”
- [110] 西道 啓博、樽家 篤史、小山 和哉、Cristiano Sabiu: “銀河分布のバイスペクトルを用いた原始揺らぎの非ガウス性の研究”
- [111] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: “宇宙大規模構造の観測によるニュートリノ質量の決定”
- [112] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦、M. Liebig, S. Whitehouse: “定在降着衝撃波によって引き起こすニュートリノ駆動型超新星爆発”
- [113] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市来 浄與: “CMB レンズ効果と銀河の弱重力レンズの相関を用いた宇宙論パラメータの制限”
- [114] 平野 照幸、須藤 靖、樽家 篤史、成田 憲保、佐藤 文衛、Joshua N. Winn and John Asher Johnson: “ロシター効果に対する摂動公式の改良: 吸収線の形状の効果”
- [115] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “測光観測による地球型系外惑星の表面組成の推定法”
- ・日本物理学会第 65 回年次大会 (岡山大学、2010 年 3 月)
- [116] 千葉 剛、鎌田 耕平、山口 昌英: “Q ボール形成時に生成される重力波の観測可能性”
- [117] 齊藤 遼、横山 順一: “原始ブラックホールに伴う密度揺らぎ起源の重力波”
- [118] 中島 正裕、齊藤 遼、高水 裕一、横山 順一: “インフレーション中の音速変化と揺らぎのスペクトル”
- [119] 本橋 隼人, A. A. Starobinsky, 横山 順一: “ $f(R)$  重力理論における密度揺らぎの時間発展”
- [120] 高水 裕一、向山 信治、佐々木 節、田中 義晴: “ $\delta N$ -formalism を超えた長波長曲率揺らぎの非ガウス統計性”
- ・日本天文学会 2010 年春季年会 (広島大学、2010 年 3 月)
- [121] 河原 創: “銀河団の軸比分布:XMM-Newton 銀河団カタログの解析”
- [122] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市来 浄與: “宇宙論パラメータの決定における CMB レンズ効果の有効性”
- [123] 平野 照幸、須藤 靖、樽家 篤史: “ベイズ統計を用いた星の自転軸と惑星軌道公転軸のなす角度の 3 次元再構築”
- [124] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “反射光による地球型系外惑星の特徴付け”

- [125] 福永 健介、西道 啓博、柏木 俊哉、河原 創、樽家 篤史、須藤 靖: “SDSS 銀河分光サーベイを用いた密度揺らぎの確率分布関数”
- ・その他
- [126] 樽家 篤史: “東大活動報告”; HSC 研究会 (弘前, 2010 年 3 月 15-17 日)
- [127] 樽家 篤史、西道 啓博、斎藤 俊: “赤方偏移歪みとバリオン音響振動”; HSC 研究会 (弘前, 2010 年 3 月 15-17 日)
- [128] 西道 啓博、樽家 篤史、小山 和哉、Cristiano Sabiu: “銀河分布のバイスペクトルを用いた原始揺らぎの非ガウス性の研究”; 第 22 回理論懇シンポジウム (名古屋大学, 2009 年 12 月 20-22 日)
- [129] 西道 啓博、樽家 篤史、小山 和哉、Cristiano Sabiu: “銀河バイスペクトルを用いた原始非ガウス性の研究”; 第 4 回 HSC 研究会 (弘前, 2010 年 3 月 15-17 日)
- [130] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: “銀河の非線形パワースペクトルを用いたニュートリノ質量の制限”; 第 22 回理論懇シンポジウム「2010 年代の理論天文学」(名古屋大学, 2010 年 12 月).
- [131] 諏訪 雄大: “ニュートリノ駆動型超新星の 2 次元軸対称シミュレーション”; 第 2 回理論懇シンポジウム「2010 年代の理論天文学」(名古屋大学, 2009 年 12 月)
- [132] 諏訪 雄大: “2 次元軸対称計算によるニュートリノ駆動型超新星爆発シミュレーション”; 超新星の爆発機構とガンマ線バースト源エンジンの統一的理解 (国立天文台, 2010 年 1 月 6 日)
- [133] 諏訪 雄大: “物質降着によるブラックホールスピンの上限値は?”; 宇宙ジェットのエンジンとしてのブラックホールとその進化 (京都大学, 2010 年 2 月 26 日)
- [134] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市来 浄与: “CMB レンズングと銀河の弱重力レンズを用いた宇宙論パラメータの決定精度”; HSC 研究会 (弘前, 2010 年 3 月 15-17 日)
- 招待講演
- [135] 横山 順一: “インフレーション宇宙を測る”; 宇宙創生の物理立ち上げシンポジウム (東京ステーションコンファレンス, 2009 年 10 月 7 日)
- [136] 横山 順一: “インフレーションと重力波” (日本物理学会第 65 回年次大会シンポジウム、岡山県岡山市、2010 年 3 月 22 日)
- [137] 齊藤 遼: “宇宙論的な重力波源”; DPF サイエンス検討会 (東京, 2009 年 11 月)
- [138] 齊藤 遼: “重力波で探る暗黒物質の起源”, 重力波研究交流会 (東京, 2009 年 12 月)
- [139] 須藤 靖: “系外惑星探査: その次”; 南半球宇宙地球観測シンポジウム (名古屋大学, 2009 年 6 月 25 日)
- [140] 須藤 靖: “宇宙生物学研究の推進: 東大の場合”; 国際高等研究所 研究プロジェクト「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」第 1 回 (国際高等研究所, 2009 年 7 月 18 日)
- [141] 須藤 靖: “太陽系外惑星: 影から光へ”; すばる望遠鏡 10 周年記念シンポジウム (一橋記念講堂, 2009 年 10 月 5 日)
- [142] 須藤 靖: “SUMIRE プロジェクトの現状” 光赤天連シンポジウム (国立天文台, 2009 年 10 月 22 日)
- [143] 須藤 靖: “第二の地球の色: 測光観測による海、陸、植生の推定”; 国際高等研究所 研究プロジェクト「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」第 2 回 (国際高等研究所, 京都, 2009 年 12 月 18 日)
- [144] 樽家篤史: “Standard cosmological model and dark energy”; 第 2 回 GCOE 若手リトリート (タナベ名古屋研修センター, 2009 年 10 月 31 日-11 月 1 日)
- [145] 諏訪雄大: “超新星爆発におけるニュートリノ輻射輸送”; 宇宙磁気流体力学のフロンティア (京都大学, 2009 年 11 月 18 日)
- (セミナー)
- [146] 鎌田 耕平: “超対称標準模型に基づくインフレーション理論の可能性”; 名古屋大学 GCOE セミナー (2009 年 7 月 15 日)
- [147] 鎌田 耕平: “Detectability of gravitational waves from Q-ball formation” 北海道大学 astro-ph セミナー (2010 年 1 月 12 日)
- [148] 齊藤 遼: “2 次重力波を用いた原始ブラックホールへの制限”; 名古屋大学 AT 研セミナー (名古屋, 2010 年 2 月)
- [149] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki and Y. Tanaka “Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations: Beyond  $\delta N$ -formalism”; Institut d’Astrophysique de Paris (March 17, 2010, France)
- [150] Atsushi Taruya: “Scale dependence of halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions”; Institut de Physique Theorique, CEA Saclay (December 15, 2009)
- [151] Yudai Suwa: “The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae”; Max-Planck Institute for Astrophysics (April, 2009, Garching, Germany)
- [152] 西道啓博: “Recent Interests in the Large-Scale Structure of the Universe”; 早稲田大学 (2009 年 5 月 29 日)
- [153] 斎藤 俊: “次世代の大規模構造観測で探る素粒子標準模型を超える物理の兆候: ダークエネルギーとニュートリノ質量”; 高エネルギーセミナー (国立天文台, 2009 年 7 月)
- [154] Shun Saito: “Constraint on Neutrino Mass with Galaxy Surveys”; Research Progress Meeting (December, 2009, Laurence Berkeley National Laboratory)
- [155] 諏訪 雄大: “Neutrino and the central engine of gamma-ray bursts”; 国立天文台 (2009 年 10 月 15 日)
- [156] 諏訪 雄大: “Neutrino and Gravitational Wave Emission from the Central Engine of Gamma-Ray Bursts”; 高エネルギー加速器研究機構 (2009 年 11 月 5 日)

- [157] Yudai Suwa: “Memory effect of gravitational wave”; 15th Joint Seminars on Cosmology and Gravitation (February, 2010, KEK, Tsukuba, Japan)
- [158] Yuka Fujii: “Colors of a second Earth”; Princeton University (2009.11)
- (集中講義)
- [159] 須藤 靖: “暗黒宇宙の組成”; 金沢大学理学部物理学教室集中講義 (金沢大学、2009年8月26-28日)
- [174] 須藤 靖: “見えない宇宙の彼方を探る ~ ダークマター・ダークエネルギー ~” 現代天文学の最前線「シリーズ現代の天文学」刊行記念シンポジウム (東大小柴ホール、2009年12月20日)
- [175] 須藤 靖: “太陽系外惑星から宇宙生物学へ” ビッグバン宇宙国際研究センター クリスマス講演会 (東大小柴ホール、2009年12月25日)
- [176] 須藤 靖: “我々は何も知らなかった” 渋谷教育学園進路講演会 (渋谷学園渋谷中学高等学校、2010年2月19日)

<プレスリリース>

- [160] 横山 順一, 齊藤 遼: “ビッグバン直後にできたブラックホールは重力波で観測できる”, 東京大学理学部プレスリリース (2009年4月24日)

アウトリーチ活動

- [161] 横山順一: “宇宙をあやつる暗黒エネルギー” ビッグバン宇宙国際研究センター 第4回公開講演会「暗黒エネルギーと宇宙の未来」(東京大学オープンキャンパス、2009年8月6日)
- [162] 横山順一: “宇宙のはじまり” (日比谷高校見学会、2009年9月25日)
- [163] 横山順一: “ビッグバンは見えてきたか?” ビッグバン宇宙国際研究センター クリスマス講演会 (東大小柴ホール、2009年12月25日)
- [164] 横山順一: “元素の起源” (日比谷高校 SSH 講演会、2010年3月5日)
- [165] 須藤 靖: “これからの宇宙物理学” 川越高校 SSH 特別講義「ミクロな世界からマクロな世界へ」(川越高校、2009年6月20日)
- [166] 須藤 靖: “21世紀宇宙物理学の課題” 高知工科大学サイエンスカフェ(高知工科大学、2009年7月3日)
- [167] 須藤 靖: “大切なものは目に見えない” 高知工科大学平成21年度連続講演第二回(高知工科大学、2009年7月3日)
- [168] 須藤 靖: “ガリレオが見た宇宙、見なかった宇宙” 日本天文学会世界天文年企画「全国同時七夕講演会」(東京大学小柴ホール、2009年7月7日)
- [169] 須藤 靖: “宇宙は何からできている?” ビッグバン宇宙国際研究センター 第4回公開講演会「暗黒エネルギーと宇宙の未来」(東京大学オープンキャンパス、2009年8月6日)
- [170] 須藤 靖: “第2の地球の色” 金沢大学物理学科宇宙物理学研究室セミナー (金沢大学、2009年8月27日)
- [171] 須藤 靖: “夜空のムコウを探る” 金沢大学 物理学教室セミナー (金沢大学、2009年8月28日)
- [172] 須藤 靖: “宇宙の始まり、そして未来” つくばエキスポセンター秋季講演会 (つくばエキスポセンター、2009年10月3日)
- [173] Yasushi Suto: “Different cultures, same science”; Public lecture at Princeton University (November 24, 2009, Princeton University, Princeton, U.S.)

## 2 銀河進化理論

——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）

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

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

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

近傍の古い星のスペクトルにも重元素によって作られる吸収線が検出されている。これらの星の中には太陽に比べて400,000分の1以下の量の重元素しか持っていない星も存在している。このことは、おそらく我々の銀河で最初に生まれた星が超新星爆発をした時の状況さえ推測できる手がかりを含んでいることを示唆している。

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

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

### 2.1 銀河系

球状星団における多重主系列の起源

球状星団は銀河系の階層的構造形成において何らかの役割を果たしたと考えられ、銀河初期の重要な情報を握っている可能性がある。その中で特異な性質を持つ $\omega$  Centauriは、近年Hubble宇宙望遠鏡によって2つの主系列を持つことがわかった。さらに、NGC 2808では主系列が3つに分かれていることが発見された。それぞれの主系列にある星はそれぞれ異なるヘリウムの組成比を持ったガスからできた星であると解釈されている。我々は、ヘリウムの合成量を増やす可能性として初期宇宙での非一様なバリオン合成が引き起こす、元素合成に着目した。ビッグバン元素合成の数値計算を行うことで、主系列が分かれる程のヘリウムを合成するためにはバリオン数と光子数の比 $\eta$ を $10^{-4}$ ほどにする必要があることを示した。このような極端な $\eta$ の値を持ったガスが $10^6 M_{\odot}$ ほどのスケールにわたって存在する必要がある。さらに、このようなガスのその後の進化を考察し、多重主系列が見られる球状星団へ進化する道筋を提案した。[2, 15, 19]

銀河初期における軽元素の起源

Ic型に分類される超新星の外層は炭素と酸素からできていて爆発直後に相対論的な速度までに加速され、星間物質中の水素やヘリウムと破碎反応を起こし、Li、Be、Bを生成する。最近、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ といった低金属量の星に ${}^6\text{Li}$ が検出され、その量はビッグバン元素合成で予想されるよりも何桁も多かった。そこで、その起源としてIc型超新星での ${}^6\text{Li}$ 合成を考えた。重元素をほとんど持たない高速で自転している大質量星の進化に関する最近の理論計算によると、自転に伴う物質混合の影響で外層が炭素過剰になり質量放出が激しく起こることが示唆されている。超新星爆発直前にはHe層をもほとんど失いIc型超新星として爆発すると期待される。また、このような星の外層では酸素や炭素の他に窒素も過剰に存在する。すると、星の周りには大量のHeが存在するので、N+HeやC+He、O+Heの破碎反応の他にHe+Heの核融合反応も起きLi、Beを合成すると

考えられる。そのような過程を計算した結果、観測された  ${}^6\text{Li}/\text{O}$ ,  $\text{Be}/\text{O}$  を再現できることがわかった。[4, 7, 17]

## 2.2 超新星

### 無衝突衝撃波の研究

相対論的な Vlasov-Maxwell 方程式系を mesh 法で一般的に数値計算する方法は今まで提案されていなかったが、我々は保存形式の方程式系のモーメントを取する方法で計算するコードを開発したので、Journal of Computational Physics に発表した。[1, 3, 9, 13, 20]

### 衝撃波面でのコンプトン散乱による非熱的放射形成

超新星爆発時に内部で発生した衝撃波が星の表面を通過する直前にコンプトン散乱によって熱的放射の光の一部がエネルギーを与えられることで、スペクトルが黒体放射からずれ、高エネルギー側にテールが形成される。爆発時の流体力学的なモデルに自己相似解を用い、輻射輸送をモンテカルロ法で扱うことで、この現象を数値計算した。最近、たまたまこの現象が XRF 080109/SN 2008D で観測された。観測されたスペクトルを再現するには衝撃波が光球を通過したときその速度が光速の 40%ほどに達していたことが分かった。The Astrophysical Journal に発表。[5, 12, 16]

### Ia 型超新星の多様性の起源の研究

Ia 型超新星は明るい標準光源として宇宙論的な研究にも利用されている。しかし、その明るさの変化には多様性も見られる。他方、Ia 型超新星を起こす白色矮星では近年、強い磁場 (表面で  $\sim 10^9$  G) が見つかってきた。この様々な強さの磁場を持つ白色矮星を多様性の起源のひとつと考えられないか調べることにした。Ia 型超新星爆発を起こすより重くコンパクトな白色矮星の中心付近ではより強い磁場をもったものもあることが期待される。そこで、白色矮星の中心付近で燃え始める核燃焼波の伝播に強い磁場がどのような影響を与えるかを研究し始めた。磁場の影響を考慮した電子の熱伝導率を用い、単純化した燃焼反応のもと定常燃焼波の構造を数値計算し伝播速度をその固有値として求めた結果、爆発直前の白色矮星の中心の密度では  $10^{12}$  G 以上の磁場があると磁場に垂直な方向には燃焼波が伝播しにくくなることがわかった。[8]

### 非球対称超新星での爆発的元素合成と矮小銀河の化学進化

近傍の矮小銀河にある星の分光観測からその組成が銀河系の星とは異なる特徴を持つことが分かってきた。一方、ガンマ線バーストは銀河系より 6 桁近く暗い銀河でもその出現頻度がそんなに下がらない傾向を示すので、それに付随する超新星での元素合成が矮小銀河の元素組成に大きな影響を与えた可能性がある。ガンマ線バーストは非球対称な超新星爆発を伴い起こると言う仮説に基づき、非球対称爆発した超新星での爆発的元素合成とその後の星間物質との混合過程を数値計算して、次世代の星に受け継がれる元素組成を観測と比較しつつ、ガンマ線バーストと矮小銀河の関係及び矮小銀河での化学進化モデルの構築を目指す。非球対称爆発での中性子捕獲元素の合成も合わせて調べる。[10, 11, 14]

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

超新星爆発の流体力学数値計算により、超新星として光り始めた直後の明るさの時間変化のしかたと爆発の非球対称性や視線方向の関係を経験式により結びつけた研究。The Astrophysical Journal に発表。[6]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "A conservative scheme for the relativistic Vlasov-Maxwell system", 2010, Journal of Computational Physics, 229, 1643-1660
- [2] Moriya, T., & Shigeyama, T. "Multiple main sequence of globular clusters as a result of inhomogeneous big bang nucleosynthesis", 2010, Physical Review D, vol. 81, Issue 4, id. 043004
- [3] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Detailed Analysis of Filamentary Structure in the Weibel Instability", 2009, The Astrophysical Journal, 695, Issue 2, 1550-1558
- [4] Nakamura, K., Yoshida, T., Shigeyama, T., & Kajino, T. "Boron Synthesis in Type Ic Supernovae", 2010, The Astrophysical Journal, 718, L137-L140
- [5] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Non-thermal Photon Production via Bulk Comptonization at Supernova Shock Breakout", to appear in The Astrophysical Journal
- [6] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Probing Explosion Geometry of Core-Collapse Supernovae with Light Curves of the Shock Breakout", 2010, The Astrophysical Journal, 717, L154-L158

(会議抄録)

- [7] Nakamura, K., Yoshida, T., Shigeyama, T., & Kajino, T. "Lithium, beryllium, and boron production in core-collapse supernovae", Light Elements in the Universe, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 268, p. 463-468

(学位論文)

修士

- [8] 朽名正道: Ia 型超新星において、強い恒星磁場が核燃焼波の伝搬に与える影響

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [9] Suzuki, A. "Vlasov simulation of plasma processes in collisionless shock", The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H, June 29- July 2, 2009, Hokkaido, Japan
- [10] Shigeyama, T., Nakamura, K., Tsujimoto, T., & Moriya, T. "GRB nucleosynthesis in dwarf galaxies", The Milky Way and the Local Group -Now and in the Gaia Era, August 31 to September 4, 2009, Heidelberg, Germany
- [11] Shigeyama, T., Nakamura, K., Tsujimoto, T., & Moriya, T. "GRB nucleosynthesis in dwarf galaxies", Deciphering the Ancient Universe with Gama-Ray Bursts, April. 19-23, 2010, Kyoto, Japan
- [12] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Bulk Comptonization at the emergence of shock waves from stellar atmospheres" Deciphering the Ancient Universe with Gama-Ray Bursts, April. 19-23, 2010, Kyoto, Japan
- [13] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Vlasov simulation of the wakefield acceleration", 8th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, March 15-18, 2010, California, U.S.A.

(国内会議)

一般講演

- [14] 茂山俊和: 「非球対称超新星における爆発的元素合成と矮小銀河の星の元素組成」、特定領域研究「ガンマ線パーストで読み解く太古の宇宙」第三回領域シンポジウム、2009/9/24-26
- [15] 茂山俊和: 「球状星団の多重主系列星の起源について」、研究会「新世紀における銀河宇宙観測の方向」、2009/12/16-18

日本天文学会 2010 年春季年会、広島大学 2010/3/24-28

- [16] 鈴木昭宏、茂山俊和: 重力崩壊型超新星の shock breakout での bulk comptonization の影響、K04a

- [17] 中村航、吉田敬、茂山俊和、梶野敏貴: Ib/c 型超新星爆発におけるニュートリノ過程と軽元素合成、N15a

日本天文学会 2009 年秋季年会、岡山理科大学  
2008/9/14-16

- [18] 伊藤 裕貴、紀 基樹、川勝 望、山田 章一: AGN ジェットが駆動するシェルからの非熱的放射、S22a

(セミナー)

- [19] 茂山俊和: 「恒星の元素組成から迫る元素の起源」、青山学院大学物理・数理コロキウム、2009/6/3
- [20] 鈴木昭宏: 「無衝突衝撃波でのプラズマ過程のブラソフシミュレーション」、国立天文台プラズマセミナー、2009/7/10

## 3 銀河と宇宙構造の進化

——可視光と赤外線による観測的宇宙論——  
— (岡村・嶋作)

### 3.1 宇宙及び系外銀河

$z \sim 7$  の銀河探査と宇宙再電離

大内正己 (OCIW), Bahram Mobasher (California 大) らとの共同研究. Subaru Deep Field と GOODS-N field において Suprime-Cam の  $z'$  バンドと  $y$  バンドの深撮像を行ない, 既存のデータと組み合わせ  $z \sim 7$  の紫外連続光銀河 ( $z'$ -dropout galaxies) を 22 個発見した. 得られた主な結果は以下の通り.  $z \sim 7$  の光度関数を求め, 明るい銀河が  $z \sim 6$  より減少していることを見いだした. 同様に, 宇宙の星形成率密度は  $z \sim 2-3$  から 1 桁以上低下していることがわかった.  $z \sim 7$  の宇宙は少なくともかなり電離していると考えられるので, 銀河が電離源となるには, 電離紫外線の脱出率が高いなど, 低赤方偏移銀河との性質の違いが要求される. [5, 6]

$z = 5.7$  と  $6.6$  のライマン・アルファ輝線銀河 (LAEs) の星の種族の研究

大内正己 (OCIW), James Dunlop (University of British Columbia), Duncan Farrah (Cornell University), Ross McLure (University of Edinburgh) らとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった  $z = 5.7$  と  $6.6$  の LAEs の星の種族を調べた. SXDS による可視 ( $R, i', z'$ ), UKIDSS の Ultra Deep Survey (UDS) による近赤外 ( $J, H, K$ ), Spitzer public legacy survey of the UKIDSS/UDS (SpUDS) による中間赤外 ( $3.6, 4.5, 5.8, 8.0\mu\text{m}$ ) の撮像データをもとに世界で初めて  $z \sim 6-7$  にある LAEs の典型的なスペクトルエネルギー分布 (SEDs) を取得した. 銀河のモデル SEDs との比較から, 典型的な LAEs は星質量が  $(3-10) \times 10^7 M_{\odot}$  程度と軽く, 年齢は  $\sim 1-3$  Myr と極めて若く, ダスト吸収はほとんど受けていないことがわかった. このことから,  $z \sim 6-7$  にある典型的な LAEs は, より低赤方偏移にある一般的な銀河の部品 (building blocks) になったのではないかと推測される. さらに, 観測された SEDs を再現するのに必要な nebular emission の寄与をパラメータとして SED fit を行ない, LAEs からの電離光子離脱率の上限値を評価した.

$z = 3.1$  と  $3.7$  の LAEs の星の種族の研究

大内正己 (OCIW), 秋山正幸 (東北大学), James Dunlop (University of British Columbia), Duncan Farrah (Cornell University), Janice C. Lee (OCIW), Ross McLure (University of Edinburgh) らとの共同研究. SXDS Field で見つかった  $z = 3.1$  と  $3.7$  の LAEs の星の種族を調べた. SXDS による可視 ( $R, i', z'$ ), UKIDSS/UDS による近赤外 ( $J, H, K$ ), SpUDS による中間赤外 ( $3.6, 4.5, 5.8, 8.0\mu\text{m}$ ) の撮像データをもとに SEDs を取得し, モデルスペクトルとの比較から星の種族 (星質量, 年齢, ダスト量) を求めた. その結果, 典型的な LAEs は星質量が  $10^8 - 10^{8.5} M_{\odot}$  程度と小さく, 年齢は極めて若く, ダスト量は LBGs と同程度であるが, 中には, 星質量が  $10^{10} M_{\odot}$  を越えており, 年齢が高く, 極めてダスト吸収の大きい銀河も存在していることがわかった. 同程度の赤方偏移で見ついている他の遠方銀河種族と比べると, 典型的な LAEs はもっとも星質量が軽く, 固有星形成率が大きいことがわかった. 一方で, 極めてダスト吸収の大きい LAEs は, 固有星形成率も極めて大きく, その SED は近傍の爆発的星形成銀河 Arp220 のものによく似ていることがわかった. [15]

可視分光観測による  $z \sim 2-7$  の LAEs の性質の解明

大内正己 (OCIW), 秋山正幸 (東北大学), Janice C. Lee (OCIW) らとの共同研究. LAEs は, 典型的には遠方銀河の中で最も星質量が小さく, 星形成活動の活発な銀河種族である. これらは, 現在の典型的な銀河の部品 (building blocks) となった可能性があり, 銀河形成を理解する上で重要な鍵を握ると考えられている. しかし, LAEs の多くは暗いため, その性質はまだあまりわかっていない. そこで我々は, ユニークなすばる広領域画像から見つけた多数の LAEs 候補を, 広視野可視分光装置 (Magellan/IMACS, Keck/DEIMOS など) で観測してきた. 現在は取得したデータを解析中であるが, 解析して得られたスペクトルからわかる LAEs の Ly $\alpha$  輝線プロファイルや, HeII, CIV などといった輝線強度比などの情報をもとに, LAEs からの強い Ly $\alpha$  放射の起源の理解が飛躍的に進むと期待される.

$z = 2.2$  のライマン・アルファ輝線銀河 (LAEs) の選択

大内正己, Janice Lee (OCIW) らとの共同研究. 2009 年 12 月, Subaru/Suprime-Cam に NB387 という狭帯域フィルターを装着して 5 天域で撮像観測を行った. このフィルターは  $z = 2.2$  の LAEs を捕えるようにデザインされている.  $z = 2.2$  という赤方偏移の注目すべき点は, [OII] 輝線と H $\alpha$  輝線が近赤外の夜光の谷間に来るため, これらの輝線の強度を狭帯域フィルターを用いて深くまで測れる点である. 本

研究は、 $z = 2.2$  の LAE サンプルに、既存の近赤外のデータなどを組み合わせて LAEs の性質や進化を調べることが目標とする。今年度は候補天体選びを行なった。U バンドでの明るさに比べて NB387 で有意に明るい天体を候補天体のサンプルとした。ただし、このサンプルには近傍の [OII] 輝線銀河や CIV 輝線を強く放射する AGN などが含まれている可能性があるため、[OII] 輝線銀河に対しては GALEX の紫外線のデータ、AGN に対しては X 線と電波のデータを用いることでこれらを極力取り除いた。5 天域のうち、SXDS 天域について、LAE の選択が完了している。今後は、LAEs の星形成率を  $Ly\alpha$  に加えて [OII] と  $H\alpha$  線でも求め、それらの整合性を探るとともに、 $Ly\alpha$  輝線がどの程度銀河から抜け出ているのかなども調べる予定である。あわせて、光度関数やクラスターリング、ライマン・アルファ・ブロップの探査なども行ないたい。

#### $z \sim 5$ の中性水素密度超過領域における銀河探査

松田有一 (Durham 大)、柏川伸成 (国立天文台) らとの共同研究。Abell 1689 銀河団の背後に  $z = 4.86$  の銀河の大規模構造を発見した。過去の観測でこの領域には 80 Mpc におよぶ銀河間物質の密度超過が示唆されていた。この領域で銀河も密度超過しているかどうかを調べるために、我々は狭帯域撮像を行なって輝線銀河を探査した。その結果、銀河間物質の密度超過領域の近くに 20 Mpc  $\times$  60 Mpc の銀河の大規模構造を見つけた。これは、銀河間物質の密度超過領域の少なくとも一部では銀河形成が始まっていることを示唆する。これまで行なわれている遠方の大規模構造探査は銀河の分布のみに注目しているが、本研究は、銀河間物質の密度超過領域に着目して、銀河が宇宙のどのような場所で生まれるかを調べた点が目新しい。[14]

#### UKIRT/WFCAM による「すばるディープフィールド」の近赤外線撮像観測

本原顕太郎 (天文学教育研究センター)、柏川伸成、児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究。我々は、UKIRT/WFCAM を用いて、すばるディープフィールドの広視野近赤外線撮像観測を進めている。近赤外線のデータは  $z \sim 2$  の銀河を研究する上で不可欠である。 $z \sim 2$  の銀河では、スペクトルの大きな特徴である  $4000\text{\AA}$  ブレイクが近赤外線領域に赤方偏移するため、測光的赤方偏移の手法や、モデルの SED をフィットすることによる銀河の性質の推定には、近赤外線のデータの有無がその精度に大きく影響する。2009 年 3 月に約 450 平方分の領域の H バンドの撮像観測を行い、限界等級が約 24.2 等 (AB 等級,  $S/N = 3$ ,  $2''$  アパーチャー) のデータを取得した。さらに 2010 年 3 月に同じ領域の J バンド撮像観測を行った。しかし、天候に恵まれず、予定の半分程度しかデータが取得できなかった。2010 年 4 月にも観測時間が割り当てられているので、さらなる J バンド

データの取得をめざす。この観測が完了すれば、深い近赤外線の J, H, K バンド撮像データが揃うことになり、 $z \sim 2$  の銀河の性質をより詳細に調べることが可能になる。[2]

#### 1.6 $\mu\text{m}$ bump を用いた $z \sim 1$ の銀河選択

林将央、本原顕太郎、五十嵐創 (東京大学)、柏川伸成、古澤順子 (国立天文台)、C. Ly, M. A. Malkan (UCLA) らとの共同研究。本研究では銀河のスペクトルの静止系  $1.6\mu\text{m}$  に現れる「出っ張り」( $1.6\mu\text{m}$  bump) に注目し、Subaru Deep Field (SDF) において  $z \sim 1$  の銀河サンプルを作り、その性質を調べた。 $1.6\mu\text{m}$  bump は、ほとんどの銀河に普遍的に見られ、星形成史やダスト吸収の影響が少ないことから、無バイアスなサンプルを作るのに適している。選択には、 $z - K$  対  $K - ch1$  の 2 色図を用いる。分光赤方偏移との比較の結果、コンプリートネスが 80%、コンタミネーションが 20%程度と、比較的高い信頼性で銀河を選択できることが分かった。また、この方法がダスト吸収の影響をあまり受けないことを利用し、 $z \sim 1$  の赤い銀河の探査を行った。MIPS の  $24\mu\text{m}$  のデータを利用した結果、近傍の ULIRGs よりもずっと赤い銀河が多数見つかった。これらは、 $z \sim 2$  で見つかっている DOGs と呼ばれる非常に赤い銀河と何かしらの関連があるのかもしれない。

#### XCS2215 銀河団 ( $z = 1.46$ ) における [OII] 輝線銀河探査

児玉忠恭、田中壺 (国立天文台) らとの共同研究。近傍の宇宙では高密度領域にある銀河ほど星形成活動が弱いことが知られている。一方、最近の研究から、 $z = 0.8 - 1.0$  の遠方宇宙では高・中密度領域で銀河の星形成活動が高まっているという結果が報告されて始めている。しかし、 $z > 1$  の高密度領域における星形成活動はまだ明らかにされていない。そこで、我々は、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) と多天体近赤外線撮像分光装置 (MOIRCS) を用いて  $z = 1.46$  にある XCS2215 銀河団の星形成活動探査を行った。この銀河団は X 線で検出されている現在最も遠方の銀河団の一つである。NB912 狭帯域フィルター撮像により、この銀河団メンバーからの [OII] 輝線をほぼ完璧に捕らえられた。銀河団中心領域 (約  $7.5 \times 7.5$  平方 Mpc (comoving)) において、 $2.6M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  より大きな星形成率を持つ 44 個の [OII] 輝線銀河を選び出した。その結果、銀河団中心にも [OII] 輝線銀河は多く存在していることがわかった。 $z = 1.46$  の銀河団中心部では、低赤方偏移の銀河団中心部とは異なり、依然として星形成活動が活発であると言える。さらに、XCS2215 銀河団では、より近傍の銀河団と異なり、星質量の小さな赤い銀河の数が少ないことがわかった。これらの結果は、時間とともに活発な星形成活動がより低密度領域へ、そして、より低質量銀河へと移っていくことを示唆する。[12]

### XCS2215 銀河団における [OII] 輝線銀河の近赤外線分光観測

児玉忠恭 (国立天文台) との共同研究. 我々は、すばる望遠鏡の Suprime-Cam を用いた NB912 狭帯域フィルター撮像によって、 $z = 1.46$  の XCS2215 銀河団中に 44 個の [OII] 輝線銀河を発見した. これらの輝線銀河の性質をさらに詳細に調べるため、すばる望遠鏡の MOIRCS を用いて多天体近赤外線分光観測を行い、34 個の [OII] 輝線銀河のスペクトルを取得した. 現在データ解析を進めているところである. 簡易解析の結果ではあるが、[OIII] 輝線などが検出され、狭帯域フィルターによる撮像データから正しく銀河団に属する [OII] 輝線銀河を選出できていることを確認した. 今後はさらに解析を進め、検出できた輝線を使って活動銀河核の寄与やダスト吸収量、星間ガスの金属量を明らかにすることを目指す.

### すばる望遠鏡 MOIRCS による RXJ1716 銀河団 (赤方偏移 0.81) の H $\alpha$ 輝線サーベイ

児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. 我々はすばる望遠鏡の MOIRCS の狭帯域フィルター NB119 (1.19 $\mu$ m) を用いて、赤方偏移 0.81 の銀河団とその周辺領域をカバーする広視野 H $\alpha$  輝線銀河探査に成功した. 解析の結果、H $\alpha$  輝線銀河は、銀河団の中心部を避けるように分布していることが分かった. これは、昨年度に我々が行なったあかり衛星を用いた中間赤外線による研究ともよく似た結果である. H $\alpha$  輝線は優良な指標であるが、なかには例外的にダスト吸収の強い銀河も存在し、それらは H $\alpha$  輝線を使っても 20 倍程度も星形成率を過小評価してしまうことが示された. しかもそのような銀河は、銀河の急速な性質進化が起こるとされる銀河団の周辺部に集中的に存在しており、銀河団銀河の進化プロセスと今回我々が見つけたような隠された活動性の関連が期待される. [13]

### 「あかり」による遠方銀河団の赤外線サーベイ

児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸 (ESO), 高木俊暢 (ISAS/JAXA), 和田武彦 (ISAS/JAXA) らとの共同研究. 我々は、あかり衛星によって赤方偏移 0.5 – 1.5 の銀河団の赤外線データを蓄積し、その解析を進めている. 昨年までに、我々は赤方偏移 0.8 の RXJ1716 銀河団について、赤外線銀河が銀河団コアを避けてその周辺部に多く存在することを示したが、赤方偏移 0.5 の CL0016 銀河団について見てみると、今度は赤外線銀河が銀河団周囲の銀河群も避けて分布していることが分かってきた. これは、活動性の高い銀河の引き起こされている場所が、銀河団の周辺部へと時間とともに広がっていくシナリオを支持するものである. 今後さらに多くの銀河団サンプルを用いて検証していく必要がある.

### GOODS-North フィールドにおける赤方偏移 2.2 の H $\alpha$ 輝線探査

但木謙一 (国立天文台), 児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. 我々はすばる望遠鏡 MOIRCS の狭帯域フィルター NB209 (2.09 $\mu$ m) を用いて、GOODS-North フィールドにおいて赤方偏移 2.2 の時代の H $\alpha$  輝線銀河探査を進めている. 我々は、すでに狭帯域撮像データから見つかった輝線銀河を、同じくすばる望遠鏡の MOIRCS を用いて分光追観測も行っており、現在その解析を進めている.

### CL0016 銀河団 (赤方偏移 0.55) 周囲に広がる巨大構造の発見

田中賢幸 (ESO) らとの共同研究. 我々は、すばる望遠鏡の Suprime-Cam を用いて赤方偏移 0.55 の巨大銀河団 CL0016 の周囲を広く観測し、およそ 80Mpc にも広がる大規模構造が存在する可能性を示した. そして、その構造が本当に中心の銀河団に付随した構造であることをすばる望遠鏡の FOCAS および VLT の VIMOS を用いた分光観測によって確認した. 本研究によって明らかになった大規模構造は、遠方宇宙で知られている大規模構造としてはもっとも巨大な構造であり、遠方宇宙の銀河団や銀河群環境での銀河の進化過程を解き明かすうえで貴重な「実験室」となることが期待される. [7]

### 赤方偏移 0.8 の宇宙の赤外線光度関数の環境依存性

後藤友嗣 (ハワイ大学), あかり系外銀河探査チームとの共同研究. 我々はあかり衛星が重点的に観測を行なった北黄極サーベイのデータと、同じく北黄極に近く良質なデータの揃う RXJ1716 銀河団 (赤方偏移 0.81) の赤外線光度関数の詳細な比較を行なった. その結果、銀河団のほうフィールドより明るい赤外線銀河が相対的に少ないこと、また密度の高い環境ほど暗い赤外線銀河が相対的に多く見られることが分かった. 本研究の結果から、高密度な環境では明るい銀河から順に星形成活動をやめていくというシナリオが見えてくる. ただし、特に銀河団については、その個性も注意しなくてはいけないため、今後さらにサンプルを増やしていくことが必須である. [17]

### 赤方偏移 1 を超える遠方銀河団の Spitzer データの解析

児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸 (IPMU), 仲田史明 (国立天文台) との共同研究. 我々は赤方偏移 1 を超える銀河団環境下の隠された星形成活動を明らかにするため、RDCSJ0910 銀河団 (赤方偏移 1.11) および RXJ0848 銀河団 (赤方偏移 1.27) の領域について、Spitzer 宇宙望遠鏡の MIPS (24 $\mu$ m 帯) のデータを解析した. その結果、赤方偏移 1 以下の銀河団と同

様に、銀河団コアには隠された星形成活動は存在しないのに対し、その周辺に多くの赤外線銀河候補が見つかった。ただし、これらの多くは分光観測によって確認された銀河団メンバーではないため、今後きちんと分光追観測を行なって、赤外線の活動性が本当に銀河団周囲で引き起こされているかどうかを確認する必要がある。また同時に本研究の結果は、銀河団コアの形成時期がさらに過去であることも示唆しており、今後さらに遠方宇宙へと遡って調査を行なっていく必要がある。

#### すばる主焦点全面分光による輝線銀河の探査

土居 守(天文教育研究センター)、八木雅文、小宮山裕、古澤久徳(国立天文台)、谷口義明(愛媛大)、山室智康(オプトクラフト)との共同研究。従来、輝線銀河の探査はターゲットとする赤方偏移の絞った狭帯域フィルターを用いて行われてきた。今回我々は、我々はすばる主焦点カメラ Suprime-Cam のほぼ全視野をカバーする低分散グリズムを2種(短波長用と長波長用)製作し、スリットレス分光によって一度に広い赤方偏移の範囲をカバーする輝線銀河探査を試みた。2007年3月に完成した長波長用グリズム(6250-8250Å)の性能評価を行い、データ解析ソフトを開発した。SXDFの観測データを解析して、53個の輝線銀河候補を見つけた。グリズムで検出された輝線の等価幅は大きく、平均332Åであった。等価幅の最小値は60Åで、十分高いS/Nで観測すれば、このぐらいの強さの輝線までターゲットになり得ることが解った。グリズムから求めた赤方偏移と他の分光データの赤方偏移を比較した結果、赤方偏移の誤差の絶対値は最大でも0.059、赤方偏移の誤差から計算した波長の相対誤差は2.5%未満であった。[20]

#### おとめ座銀河団中の銀河間光の大局分布

Castro Rodorigez(カナリー天体物理研究所)、Magda Arnaboldi(ESO)、Ortwin Gerhard(マックスプランク研究所)、安田直樹(宇宙線研究所)、Ken Freeman(Mount Stromlo Obs.)らとの共同研究。おとめ座銀河団中心から外側まで11領域(総計3.3平方度)で、淡い銀河間光(Intracluster light: ICL)を、銀河に属さない惑星状星雲をプローブとして探査した研究の総まとめを行った。ICLは銀河団中に様に分布するのではなく、大部分が中心からの距離80分以内のコア領域に集中している。ここではICLは銀河の光の総計の7%を占める。半径80分より外側では、ICLは100kpc程度の大きさの領域に閉じこめられており、そのような領域が点在する。銀河同士の潮汐相互作用に起因する現象と推測される。[9]

#### かみのけ座銀河団の Intracluster Diffuse Light の観測

征矢野隆夫、猿楽祐樹、中田好一(木曾観測所)、伊藤信成(三重大学)、西浦慎悟(東京学芸大学)らとの共同研究。銀河団中の銀河間空間にはかなりの量の星があることが観測的に示されており、それらは淡く広がった銀河間光や惑星状星雲、赤色巨星として観測されている。我々はかみのけ座銀河団の淡い銀河間光の検出を試みた。観測には木曾観測所のシュミット望遠鏡と2kCCDカメラを用いた。VバンドとRバンドでどちらも11時間積分に相当する画像が得られた。それぞれの限界等級は28.5, 27.8 mag arcsec<sup>-2</sup> (1σ)であり、従来の観測よりも1.5等近く深い。かみのけ座銀河団の中心領域にはいくつかの明るい星が存在し、淡い構造を隠してしまっていたので、本研究ではその影響を慎重に評価し、画像から差し引くことで真の銀河間光の分布を描き出すことに成功した。その結果、銀河間光は東西方向に有意に伸びた分布をしていることが判明し、また、そのV-Rの色は銀河団の中心に存在するcD銀河の色に近いことから、銀河間光を担っている星は元々は中心のcD銀河の外縁部に属し、銀河団形成の過程でそれらの銀河からはぎ取られた、というシナリオと矛盾しない。[27]

#### 円盤銀河のバルジとディスクの性質

大濱伸之(日立ソフト)、福来正孝、安田直樹(宇宙線研究所)、中村 理(早稲田大学)との共同研究。スローン・デジタル・スカイサーベイで得られた、形態分類をされている737個の円盤銀河のサンプルに対して、バルジ成分とディスク成分の構造パラメータを抽出した。その結果、バルジの性質(有効半径、有効表面輝度、絶対等級)は、早期型から晩期型になるにつれて系統的に変化するが、ディスクの性質はS0からSc型まであまり変化しないことがわかった。すなわち、早期型から晩期型に行くほど小さくなるバルジ-全光度比(B/T ratio)は、ディスクではなくバルジの振る舞いで決まっている。この結果は、ディスクの形成には多種多様なものができにくい何らかの自己規律が働いていることを想定させる。[8]

#### スローン・デジタル・スカイサーベイのデータ公開

SDSS Collaborationとの共同研究。スローン・デジタル・スカイサーベイの第7次データ公開を行った。これはSDSS-IIと呼ぶサーベイが完了したことに伴い、当初のSDSSの達成目標が完全に達成されたことを実証するデータ公開である。5バンドの撮像データは11,663平方度をカバーし、カタログには3億5千7百万天体が含まれている。分光は北銀極領域9380平方度をカバーし、カタログには93万個の銀河、12万個のクエーサー、46万個の星を含む160万以上のスペクトルがある。[10]

## 3.2 銀河系および星間物質

### すばる望遠鏡による固有運動の大きな天体の探査

Richmond(ロチェスター工科大学), 諸隈智貴, 土居守(天文学教育研究センター)らとの共同研究すばる望遠鏡による深探査領域(SDFとSXDF)は, 数年間に渡って何度も撮像が行われている。この特性を利用して, 視野内で, 星の固有運動を検出することを試みた。その結果SDFとSXDFでそれぞれ, 99個と69個の星の固有運動を有意なレベルで検出した。これらは金属量の少ないハローの星と推定される。そのうちSDFでは9星, SXDFでは14星が白色矮星である可能性が高い。[11, 16]

## 3.3 太陽及び太陽系

### スリットレス分光による小惑星の分類

吉田二美, 八木雅文, 小宮山裕, 仲田史明, 古澤久徳(国立天文台), 中村士(帝京平成大学)との共同研究。すばる望遠鏡の主焦点カメラSuprime-Cam用のグリズムが作られたのを機に新しいアイデアが生まれ, その実現可能性を調べる観測を行った。それは, 暗黒星雲を, 背景の星と銀河を遮る遮光カーテンとして使い, グリズムによる撮像データから, 太陽系小天体(主に小惑星と太陽系外縁天体)のスペクトル分類を行うものである。1晩の試験観測で,  $R < 23 \text{ mag}$  の約50天体のスペクトルが得られ, 実行可能であることがわかった。[18]

## 3.4 機器・ソフトウェア開発

### すばる主焦点グリズムデータ解析ソフトの開発

八木雅文, 古澤久徳(国立天文台), 山室智康(オブトクラフト)らとの共同研究。すばる主焦点にグリズムをつけて撮像した多数枚の撮像データから, 二次元のスペクトル画像と一次元のスペクトルをほぼ自動的に抽出するパイプラインソフトを開発した。スリットレス分光特有の困難であるスペクトルの重なりの影響をできるだけ軽減するため, 分散方向を直交させた2種類のデータを組み合わせ, 汚染されていない波長範囲をつなぎ合わせて良質の一次元スペクトルを抽出する手法も組み込まれている。[20]

(原著論文)

- [1] Hatsukade, B., Iono, D., Motohara, K., Nakanishi, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Nagao, T., Tamura, Y., Malkan, Matthew A., Ly, C., and Kohno, K. 2009, “A Search for Molecular Gas toward a BzK-selected Star-forming Galaxy at  $z = 2.044$ ”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **61**, 487-491.
- [2] Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, Y. K., Kashikawa, N., Yoshida, M., Okamura, S., Ly, C., and Malkan, Matthew A. 2009, “Star Formation Rates and Metallicities of K-Selected Star-Forming Galaxies at  $z \sim 2$ ”, *Astrophys. J.*, **691**, 140-151.
- [3] Koyama, Y. & Kodama, T. 2009, “Wide-Field Study of Distant Clusters of Galaxies with SPICA”, Proceedings of SPICA joint European/Japanese Workshop, EDP Sciences, 2009, p.04013.
- [4] Ly, C., Malkan, Matthew A., Treu, T., Woo, Jong-Hak, Currie, T., Hayashi, M., Kashikawa, N., Motohara, K., Shimasaku, K., and Yoshida, M. 2009, “Lyman Break Galaxies at  $z \sim 1.8 - 2.8$ : GALEX/NUV Imaging of the Subaru Deep Field”, *Astrophys. J.*, **697**, 1410-1432.
- [5] Ouchi, M., Ono, Y., Egami, E., Saito, T., Oguri, M., McCarthy, Patrick J., Farrah, D., Kashikawa, N., Momcheva, I., Shimasaku, K., and 17 coauthors including Okamura, S. and Hayashi, M. 2009, “Discovery of a Giant Ly $\alpha$  Emitter Near the Reionization Epoch”, *Astrophys. J.*, **696**, 1164-1175.
- [6] Ouchi, M., Mobasher, B., Shimasaku, K., Ferguson, H. C., Fall, S. M., Ono, Y., Kashikawa, N., Morokuma, T., Nakajima, K., Okamura, S., Dickinson, M., Giavalisco, M., and Ohta, K. 2009, “Large Area Survey for  $z = 7$  Galaxies in SDF and GOODS-N: Implications for Galaxy Formation and Cosmic Reionization”, *Astrophys. J.*, **706**, 1136-1151.
- [7] Tanaka, M., Finoguenov, A., Kodama, T., Koyama, Y., Maughan, B. and Nakata, F. 2009, “The spectroscopically confirmed huge cosmic structure at  $z = 0.55$ ”, *Astron. Astrophys.*, 505, 9.
- [8] Oohama, N., Okamura, S., Fukugita, M., Yasuda, N., Nakamura, O. 2009, “Properties of Disks and Bulges of Spiral and Lenticular Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey”, *Astrophys. J.*, **705**, 245-254.
- [9] Castro-Rodriguez, N., Arnaboldi, M., Aguerri, J.A.L., Gerhard, O., Okamura, S., Yasuda, N., Freeman, K. C. 2009, “Intracluster light in the Virgo cluster: large scale distribution”, *Astron. Astrophys.*, **507**, 621-634.
- [10] Abazajian, K.N. et al. (SDSS Collaboration: 203 coauthors including Okamura, S., and Shimasaku, K.) 2009, “The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey”, *Astrophys. J. Suppl.*, **182**, 543-558.
- [11] Richmond, M., Morokuma, T., Doi, M., Komiyama, Y., Yasuda, N., Okamura, S., Gal-Yam, A. 2009, “Proper Motions with Subaru I. Methods and a First Sample in the Subaru Deep Field”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **61**, 97-107.

- [12] Hayashi, M., Kodama, T., Koyama, Y., Tanaka, I., Shimasaku, K., Okamura, S. 2010, “High star formation activity in the central region of a distant cluster at  $z = 1.46$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1980-1990.
- [13] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Hayashi, M., Okamura, S., Tanaka, I. and Tokoku, C. 2010, “Panoramic H $\alpha$  and mid-infrared mapping of star formation in a  $z = 0.8$  cluster”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **403**, 1611-1624.
- [14] Matsuda, Y., Richard, J., Smail, I., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Frye, B. L., Yamada, T., Nakamura, Y., Hayashino, T., Fujii, T. 2010, “A search for galaxies in and around an HI overdense region at  $z = 5$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **403**, L54-L58.
- [15] Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Dunlop, J., Farrah, D., Lee, J. C., McLure, R., Okamura, S., Yoshida, M. 2010, “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at  $z = 3 - 4$  Based on Deep Large Area Surveys in the Subaru-SXDS/UKIDSS-UDS Field”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1580-1598.
- [16] Richmond, M., Morokuma, T., Doi, M., Komiyama, Y., Yasuda, N., Okamura, S. 2010, “Proper Motions with Subaru II. A Sample in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, 91-99.
- [17] Goto, T., Koyama, Y., Wada, T., Pearson, C., Matsuhara, H., Takagi, T., Shim, H., Im, M., Lee, M. G., Inami, H., Malkan, M., Okamura, S., Takeuchi, T. T., Serjeant, S., Kodama, T., Nakagawa, T., Oyabu, S., Ohyama, Y., Lee, H. M., Hwang, N., Hanami, H., Imai, K. and Ishigaki, T. 2010, “Environmental dependence of  $8\mu\text{m}$  luminosity functions of galaxies at  $z \sim 0.8$ : Comparison between RXJ1716.4+6708 and the AKARI NEP deep field”, *Astron. Astrophys.*, in press.
- (会議集録)
- [18] Yoshida, F.; Yagi, M.; Komiyama, Y.; Nakata, F.; Furusawa, H.; Ohno, T.; Okamura, S.; Nakamura, T. “Slitless Spectroscopy of Small Solar System Bodies on a Dark Cloud Curtain” 41st Lunar and Planetary Science Conference, LPI Contribution No. 1533, p.1290
- (国内雑誌)
- [19] 小山佑世, 後藤友嗣: “「あかり」で切り開く遠方銀河団フロンティア”, 「ISAS ニュース」, No.337 (2009年4月号), p22
- (学位論文)
- [20] 大野 貴博 “すばるの主焦点全面分光による輝線銀河の探査” (修士論文)
- [21] 林 将央 “Properties of Galaxies in the Era of Strong Evolution: The Dependence on Mass and Environment” (博士論文)
- (著書)
- [22] 「理科年表 2010(天文部)」, 岡村定矩 (分担執筆).
- [23] 「見えない宇宙を観る」, Lars Christensen 他著, 岡村定矩訳, 丸善.
- [24] 「東大式 現代科学用語ナビ」, 岡村定矩, 嶋作一大 (分担執筆), 化学同人.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] Okamura, S., “Observation of Diffuse Intracluster Light”, *DENET Workshop - From Cosmology to Planets*, Hakone, 2009/10/14-16.
- [26] Yoshida, F., Yagi, M, Komiyama, Y., Nakata, F., Furusawa, H., Ohno, T., Okamura, S., Nakamura, T.: “Slitless Spectroscopy of Small Solar System Bodies on a Dark Cloud Curtain”, *41th Lunar and Planetary Science Conference*, The Woodlands, Texas, 2010/3/1-5.
- [27] Okamura, S., Nakajima, K., Soyano, T., Sarugaku, Y., Nakada, Y.: “Observation of Diffuse Intracluster Light in the Coma Cluster”, Joint Discussion (JD2), IAU XXVII General Assembly, Rio de Janeiro, 2010/8/3-14.
- [28] Shimasaku, K.: “Exploring Deep for What Ionized Neutral Hydrogen”, *DENET Workshop - From Cosmology to Planets*, Hakone, 2009/10/14-16.
- [29] Shimasaku, K.: “HSC science: high-redshift galaxies”, *Princeton-JSPS DENET workshop - Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe*, Princeton, USA, 2009/11/8-11.
- [30] Shimasaku, K.: “High-Redshift Galaxies and Cosmic Reionization”, *Japan-Korea Seminar 2009: Galaxy Build-up Across Cosmic Ages and Environments*, Hiraizumi, Japan, 2009/11/25-28.
- [31] Hayashi, M., Kodama, T., Koyama, Y., Tanaka, I., Okamura, S., & Shimasaku K.: “High star formation activity in the most distant X-ray cluster at  $z = 1.46$ ”, *Joint Subaru/Gemini Science Conference*, Kyoto, Japan, 2009/5/18-21.
- [32] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Okamura, S. & Tanaka, M.: “Galaxy Evolution in the Cluster Outskirts at  $z \sim 0.8$ ”, *Galaxy Evolution and Environment*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009/3/30-4/3.
- [33] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Hayashi, M., Okamura, S., Tanaka M., Tokoku, C., Tanaka, I., PISCES team & AKARI CLEVL team: “Panoramic View of Cluster Evolution with Subaru”, *Joint Subaru/Gemini Science Conference*, Kyoto University, Japan, 2009/5/18-21.

- [34] Koyama, Y. & Kodama, T.: “Wide-field study of distant clusters of galaxies with SPICA”, *A Joint European/Japanese Workshop on the SPICA Mission*, Oxford University, U.K., 2009/7/6-8.
- [35] Koyama, Y.: “A Subaru/AKARI Joint Survey for Intermediate Redshift Clusters”, *Japan-Korea Seminar 2009: Galaxy Build-up Across Cosmic Ages and Environments*, Hiraizumi, Japan, 2009/11/25-28.
- [36] Koyama, Y, Kodama, T & Takagi, T.: “CLEVL medium-z and high-z”, *AKARI extragalactic science workshop*, Seoul national University, Korea, 2010/2/1-2/2.
- [37] Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Dunlop, J., Farrah, D., Lee, J. C., McLure, R., Okamura, S., & Yoshida, M.: “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at  $z = 3 - 4$  investigated by the Deep Large Area Surveys in the Subaru-SXDS/UKIDSS-UDS Field”, *The Lyman Alpha Universe*, Paris, France, 2009/7/5-12.
- [38] Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Dunlop, J., Farrah, D., Lee, J. C., McLure, R., Okamura, S., & Yoshida, M.: “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at  $z = 3 - 4$ ”, *Galaxy Build-Up Across Cosmic Ages and Environments*, Iwate, Japan, 2009/11/24-28.
- [39] Nakajima, K., Shimasaku, K., Hayashi, M., Motohara, K., Ikarashi, S., Okamura, S., Kashikawa, N., Furusawa, J., Ly, C., & Malkan, M. A.: “Selection of Galaxies at  $z \sim 1$  with the 1.6 $\mu$ m Feature in the SDF”, *Japan-Korea Science Seminar 2009*, Iwate, Japan, 2009/11/24-28.
- (国内会議)
- 一般講演
- [40] 中島王彦, 岡村定矩, 征矢野隆夫, 猿楽祐樹, 中田好一: “かみのけ座銀河団の Diffuse Intracluster Light (ICL) の観測”, 木曾シュミットシンポジウム, 2009/7/9-10
- [41] 嶋作一大: “WISH で探る再電離時代の  $Ly\alpha$  銀河”, WISH サイエンスミーティング 2010, 国立天文台三鷹, 2010/3/10.
- [42] 林将央: “High star formation activity in the central region of a distant cluster at  $z = 1.46$ ”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台三鷹, 2010/1/14.
- [43] 小山佑世: “WISH で探る遠方銀河団”, 第1回 WISH サイエンスワークショップ, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2009/4/8.
- [44] 小山佑世: “SPICA で究める遠方銀河団と銀河環境学”, SPICA サイエンスワークショップ 2009, 東京大学, 東京都文京区, 2009/6/1.
- [45] 小山佑世: “TAO 近赤外観測装置による遠方銀河団・銀河群の大規模探査”, TAO NIR-CAM ワークショップ, 東大天文センター, 東京都三鷹市, 2009/9/11.
- [46] 小山佑世: “MOIRCS Narrow-Band Survey: Panoramic H-alpha mapping of a  $z = 0.8$  cluster”, Subaru Users’ meeting 2009, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2010/1/14-15.
- [47] 小野宜昭: “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at  $z = 6 - 7$ ”, GCOE 「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」 第3回 RA キャンプ, ヤマハリゾートつま恋, 静岡県掛川市, 2010/2/18-20.
- [48] 中島王彦: “静止系近赤外測光データを用いた銀河の選択に関する考察”, 2009 年度天文天体物理若手の会夏の学校, ホテル櫻井, 群馬県草津温泉, 2009/7/27-30.
- [49] 中島王彦: “2kCCD を用いたかみのけ座銀河団 ICL の観測”, 2kCCD 解析合宿, 木曾観測所, 長野県木曾郡, 2009/11/5-6.
- (学会発表)
- 日本天文学会 2009 年秋季年会, 山口大学 (2009/09/14-16)
- [50] 小山佑世, 児玉忠恭 (国立天文台), 嶋作一大, 林将央, 岡村定矩, 田中壱 (国立天文台), 東谷千比呂 (東北大学): 近赤外線狭帯域撮像による RXJ1716 銀河団 ( $z = 0.81$ ) の  $H\alpha$  輝線サーベイ - II, X04b.
- [51] 中島王彦, 嶋作一大, 林将央, 本原頭太郎, 五十嵐創: Subaru Deep Field における 1.6 $\mu$ m bump を用いた銀河選択, X05b.
- 日本天文学会 2010 年春季年会, 広島大学 (2010/03/24-27)
- [52] 大野貴博, 岡村定矩, 嶋作一大, 小山佑世, 小野宜昭: すばるの主焦点全面分光のデータ解析ソフトウェアの開発, V81a.
- [53] 中島王彦, 岡村定矩, 嶋作一大: かみのけ座銀河団の Diffuse Intracluster Light の観測, T11a.
- (その他)
- 一般講演
- [54] 岡村定矩: 「馬頭星雲と玄界灘の夕陽」, 駒場進学情報センターシンポジウム「私はどのようにして専門分野を決めたか」, 2009/4/27.
- [55] 岡村定矩: 「宇宙の姿と物質の起源」, 東大エグゼクティブ・マネージメント・プログラム講義, 2009/5/15, 11/7.
- [56] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 東海高校・中学サタデープログラム, 名古屋市, 2009/6/27.
- [57] 岡村定矩: 「最新の天文学」, 国立天文台科学文化形成ユニット講義, 2009/10/23.
- [58] 岡村定矩: 「天文学の発展と情報技術」, 情報処理学会北陸支部主催研究講演会, 金沢市, 金沢工業大学, 2009/11/28.
- [59] 岡村定矩: 「事業報告」, 日本天文学会創立 100 周年記念出版事業完成記念シンポジウム, 小柴ホール, 東京大学, 2009/12/20.
- [60] 岡村定矩: 「銀河の成り立ちと物質の起源」, 戸田市民大学, 埼玉県戸田市, 生涯学習センター, 2009/12/26.

- [61] 岡村定矩: 「宇宙はどこまでわかったか-天文学の最前線-」, 東芝経営幹部セミナー, 東芝研修センター, 横浜市, 2010/1/16.
- [62] 嶋作一大: 「銀河はこう進化した」, 講座「137 億光年宇宙紀行」, 朝日カルチャーセンター, 2009/8/22.
- [63] 嶋作一大: 「遠方銀河の星種族と空間分布」, 第 5 回最新の天文学の普及をめざすワークショップ, 岡山県鴨方町, 2009/10/11.

#### 新聞記者発表

- [64] 古代宇宙で巨大天体を発見 - 謎のガス雲ヒミコ -  
[http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2009/04/22/j\\_index.html](http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2009/04/22/j_index.html)  
<http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2009/04/22/>
- [65] すばる望遠鏡、多数の超遠方銀河を発見  
[http://subarutelescope.org/Pressrelease/2009/11/06/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2009/11/06/j_index.html)  
“ Dropouts ” pinpoint earliest galaxies  
[http://www.ciw.edu/news/dropouts\\_pinpoint\\_earliest\\_galaxies](http://www.ciw.edu/news/dropouts_pinpoint_earliest_galaxies)

## 4 サブミリ波観測

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

### 4.1 山本研究室

【星・惑星系形成】 恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観測的にも理論的にも活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結する重要なテーマでもある。本研究室では、星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測（主にミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波）により研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成される。星間ガスの集まり（星間雲）の中で最も密度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系が形成される直接の現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在している。これらの組成は、星間分子雲の物理進化の歴史を克明に記憶している。即ち、微量分子の組成を調べることで、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような独創的視点を含む多面的手法により、星・惑星系形成過程の総合的理解を目指している。

【なぜ電波を観測するのか】 星間分子雲の温度はおおよそ 10 K 程度と低い。この「宇宙の中でも最も低温の天体」を観測するには、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」が有効である。電波は光などに比べて星間物質による吸収散乱を受けにくく、透過力が高い。厚い星間物質に包まれた星形成の核心部分を、電波では容易に見通すことができる。また、電波領域には原子・分子のスペクトル線が多数存在する。それらの観測により、星・惑星系形成過程のみならず、そこでの物質進化も捉えることができる。

【ALMA（アルマ）に向けて】 近年、ミリ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低雑音ヘテロダイン受信機の実現がその背景にある。我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開している。しかし、星形成から惑星系形成への進化を追う場合、感度、分解能の点でまだまだ不十分である。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA は、南米チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波望遠鏡（電波干涉計）で、日本、北米、欧州による共同建設が進んでいる。2011 年から部分運用を、2013 年から本格運用を予定している。ALMA は既存装置よりも 1-2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を一挙に進展させるであろう。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】 テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには  $C^+$ 、 $N^+$  などの原子スペクトル線の他、 $CH$ 、 $H_2D^+$ 、 $HD_2^+$  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、上で述べた星・惑星系形成における物質進化の根源を把握できると期待される。世界的には 2009 年 5 月に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測のフロンティアが開かれつつある。本研究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指している。本研究室は、1998 年から 2005 年までの間、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ天文学の創生に寄与したいと考えている。

#### 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は、惑星環境の多様性や生命の起源などと関連する重要なテーマである。その研究は、近年大きな進歩を遂げつつある。第 1 は、 $HCOOCH_3$  などの大型飽和有機分子が原始星近傍の数 100 AU 以内の領域（ホットコリノ）で発見されたことである。この成果は、隕石に含まれる先太陽系有機分子との関係で注目された。第 2 は、我々自身によるもので、炭素鎖分子が異常に豊富な低質量星形成領域（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359）の発見である。これらの天体では、原始星近傍で  $CH_4$  が星間塵から蒸発し、それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成されると見られる（Warm Carbon-Chain Chemistry: WCCC）。一方で、ホットコリノ天体とは対照的に、WCCC 天体では大型飽和有機分子は検出されない。このように、物理的に同じように見える星形成領域でも分子組成が大きく異なることが明らかになり、その原因の探究と惑星系への進化が新たなテーマとして提起されつつある。本研究室では、低質量星の形成過程およびそこでの物質進化の理解を中心に、それに関連するテーマについて幅広く研究を進めている。

#### L1527 における炭素鎖分子の高分解能観測

フランスにある IRAM のミリ波干涉計 (Plateau de Bure Interferometer: PdBI) を用いて、低質量星形成領域 L1527 における炭素鎖分子  $CCH$ 、 $C_4H$ 、 $HC_5N$  とその関連分子  $c-C_3H_2$  の高分解能観測を行い、WCCC メカニズムの検証を行った。その結果、予想通り、それらの分子が原始星近傍の半径 1000 AU 程度内にコンパクトに分布していることがわかった (図 1 a)。また、青方偏移・赤方偏移した成分がそれぞれ原始星の北側・南側の 500 AU 程度以内に分布していることもわかり、炭素鎖分子が原始星に向かって回転しながら落ち込んで行くガスの中にも存在していることが確立した。

炭素鎖分子の輝線強度は原始星から半径 500–1000 AU 程度で急激に強くなる (図 1(a, d, e))。その原因を究明するため、L1527 の温度、密度分布を取り入れた統計平衡励起計算を行って励起温度と分布数を場所ごとに求め、それをもとに輻射輸送を数値的に解いて輝線強度分布をシミュレーションした。その結果、この急激な強度上昇は励起条件では説明できず、存在量の大幅な増加 (10 倍程度) を反映していることがわかった (図 1(b, c))。また、増加がおこっている領域の温度が 20–30 K であることも示された。CH<sub>4</sub> は星間塵から約 25 K で蒸発するので、この結果は、CH<sub>4</sub> の蒸発によって炭素鎖分子が再生成される WCCC のメカニズムと矛盾しない。

一方で、炭素鎖分子の存在量は、原始星から 300–600 AU 程度より内側の領域では上記の増加領域より少なくなっていることもわかった。今回の観測の分解能では定量的議論はできなかったが、原始星円盤の形成や星間塵への再吸着の効果などが減少の原因と考えられる。ホットコリノ天体との比較や原始惑星系円盤への物質進化の理解の観点から、ALMA などを用いたより高分解能の観測が求められる。

#### 炭素鎖分子が豊富な星なしコア Lupus 1A の発見

WCCC の原因として、分子雲コアの比較的速い収縮が考えられている。もしそうなら、WCCC 天体の近くには化学的に若いコアが取り残されている可能性がある。実際、おうし座にある WCCC 天体 L1527 の近くには、有名な星なしコア TMC-1 がある。同様にもう 1 つの WCCC 天体、おおかみ座の IRAS 15398–3359 の周辺にも同様の星なしコアが存在する可能性がある。そこで、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、IRAS15398–3359 周辺で炭素鎖分子のマッピング観測を行った。その結果、IRAS 15398–3359 の北西約 3' の位置に新しい星なしコアを発見し、Lupus 1A と名付けた。このコアでは C<sub>4</sub>H、HC<sub>3</sub>N、HC<sub>5</sub>N、CH<sub>3</sub>CCH、c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>、などの炭素鎖分子が高強度で受信された。特に C<sub>4</sub>H などの強度は TMC-1 のそれを上回り、柱密度も TMC-1 を凌駕する。TMC-1 は炭素鎖分子が異常に豊富な天体として知られ、それを超える天体はこれまで見つかっていなかった。Lupus 1A の発見はそれを覆すものとして意義が大きい。

#### Lupus 1A における負イオンの検出

星間分子雲は、電離度 10<sup>-8</sup> 程度の弱電離プラズマであり、これまで H<sub>3</sub><sup>+</sup> や HCO<sup>+</sup> など 10 種以上の正イオンが検出されてきた。一方、負イオンについては、2006 年 12 月に C<sub>6</sub>H<sup>-</sup> が TMC-1 で初めて同定され、分子形成や電離度などへの影響に注目が集まりつつある。上で述べた Lupus 1A では炭素鎖分子が豊富なため、アメリカ国立電波天文台の GBT 100 m 望遠鏡を用いて負イオンの探査を行った。

観測の結果、C<sub>6</sub>H<sup>-</sup> および C<sub>8</sub>H<sup>-</sup> のスペクトル線を検出した (図 2)。対応する中性分子 C<sub>6</sub>H および C<sub>8</sub>H

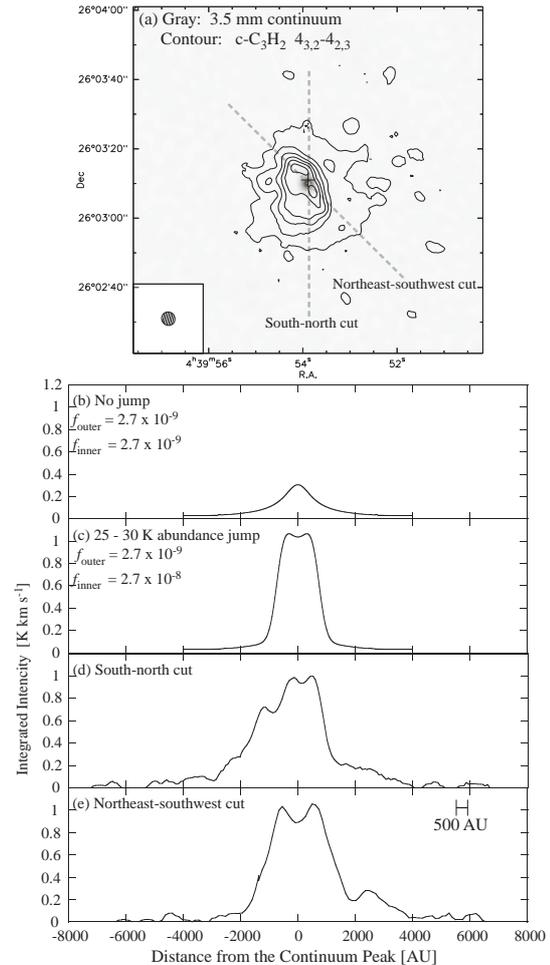


図 4.1: (a) Integrated intensity of the c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> line. (b-c) Calculated intensity profiles along the south-north cut indicated by the dashed line in (a). (d-e) Observed intensity profiles along the dashed lines in (a)

のピーク強度は、これまで最強と思われていた TMC-1 よりも 2–3 倍も強かった。また、C<sub>6</sub>H<sup>-</sup>、C<sub>8</sub>H<sup>-</sup> も同様に非常に強い。一方、中性分子に対する負イオンの存在量比は C<sub>6</sub>H<sup>-</sup>、C<sub>8</sub>H<sup>-</sup> についてそれぞれ 2.1 %、4.8 %と、TMC-1 での値とほぼ同じであった。炭素鎖分子は、一般に電子親和力が大きく負イオンになりやすい。今後、この天体で、より長い炭素鎖分子の負イオンや、C<sub>3</sub>N<sup>-</sup> や C<sub>5</sub>N<sup>-</sup> などの分子雲で未検出の負イオンの検出が期待される。

#### HCL2 における CH と OH の分布

希薄な星間雲から星間分子雲コアが形成される過程において、炭素の主要な形態は C<sup>+</sup> イオンから C 原子、CO 分子へと変化する。その典型例はおうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域である。C 原子は HCL2 の南側 (CI ピーク) で非常に強く、一方で C<sup>18</sup>O は北側で強く観測される。このことから、北から南に分

子雲コア形成が進んでいると考えられている。その過程をより詳細に調べるため、昨年度、CHのスペクトル線(3.3 GHz)のマッピング観測をMPIFRの100 m望遠鏡で行った。CHはCやC<sup>+</sup>から最初に作られる分子で、COへの中間体とも言える。今年度は、CHの観測を完結するとともに、酸素を含む最も簡単な分子OHについても観測を行った。

その結果、CHとOHの分布は、いずれもC<sup>18</sup>Oの分布と炭素原子の分布をつなぐ構造をしていることがわかった。CHのスペクトル線はCIピーク周辺ではややブロード(3 km s<sup>-1</sup>程度)であるのに対し、C<sup>18</sup>Oが強い北側の領域ではブロード成分に細い(0.5 km s<sup>-1</sup>)成分が重畳した形をしており、分子雲コア方向では細い成分が卓越していた。このように、分子雲コア形成に伴ってスペクトル線の形が系統的に変化していることがわかった。一方、OHでは、その分布と線幅に大きな偏りはなかった。しかし、場所によって10 km s<sup>-1</sup>の高速度成分が検出され、特にHCL2の北側の領域で顕著であった。この結果は、HCL2領域が北側から何らかの圧力を受けている可能性を示しており、この領域での北から南への分子雲コア形成とよく対応している。

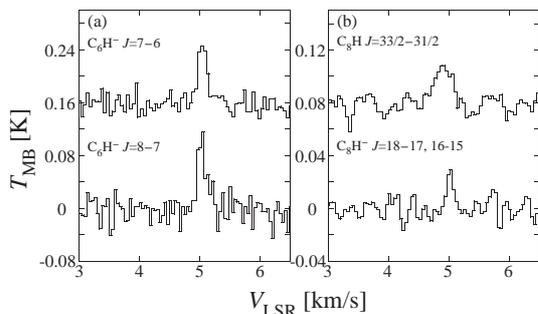


図 4.2: Spectral line profiles of C<sub>6</sub>H<sup>-</sup>, C<sub>8</sub>H, and C<sub>8</sub>H<sup>+</sup> toward Lupus 1A

### <sup>13</sup>C 同位体の希釈

星間分子雲において、分子の<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C比は、原子と同様に60程度の値をとると考えられてきた。しかし、CCHの<sup>13</sup>C同位体種の観測を代表的星なしコアTMC-1および星形成領域L1527に対して行ったところ、TMC-1では[CCH]/[<sup>13</sup>CCH]=250、[CCH]/[C<sup>13</sup>CH]=170であり、L1527でもそれぞれ80と135となった。このことは、CCHにおいて<sup>13</sup>C同位体が希釈していることを意味する。分子雲における<sup>13</sup>C同位体種の希釈は、Langerらによって1984年に予想されていたが、これまで全く注目されてこなかった。今回、非常に明らかな希釈が見られたことで、その重要性が改めて認識された。

星間分子雲中の炭素の主要な存在形態はCOである。従って、CCHのような様々な炭素を含む分子種は、COとHe<sup>+</sup>の反応で生じるC<sup>+</sup>から生成されている。<sup>13</sup>C<sup>+</sup>も<sup>13</sup>COから作られるが、<sup>13</sup>C<sup>+</sup> + <sup>12</sup>CO → <sup>13</sup>CO + <sup>12</sup>C<sup>+</sup> + 35 Kという交換反応によって再

度COに取り込まれてしまう。冷たい分子雲中ではこの逆反応は起こらないため、<sup>12</sup>C<sup>+</sup>/<sup>13</sup>C<sup>+</sup>比が上がり、その結果、他の分子種における<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C比も上がるというわけである。CCHの結果を踏まえ、改めて、TMC-1における<sup>13</sup>C同位体の存在量比をまとめたところ、ほとんどの分子で存在量比は70-80程度、もしくはそれ以上の値であることが確認された。今後、<sup>13</sup>C同位体比の希釈の程度は、星間雲の進化段階や分子の生成メカニズムについて新しい情報源になると期待される。

### 大質量原始星候補天体 NGC2264 CMM3 における第2の双極分子流

NGC2264-C領域は太陽系近傍にある大質量星形成領域であり、その中で最も強いミリ波源がCMM3である。CMM3には非常に若い大質量星が含まれていると考えられている。以前、CMM3に対してサブミリ波干渉計(SMA)を用いてCO(J=2-1)輝線の高分解能観測を行ったところ、明らかにCMM3を駆動源とする10"スケールのコンパクトな双極分子流を検出し、CMM3の内部に若い原始星があることを示した。本研究ではSMAでは捉えられなかった数10"スケールの構造を調べるため、NMA(野辺山ミリ波干渉計)を用いてHCO<sup>+</sup>(J=1-0)輝線の観測を行った。その低速度成分に注目すると、SMAで検出されたものに対応する南北に伸びる双極分子流が検出された。一方、高速度成分に注目すると北西から南東に伸びる構造が検出された。この構造の赤方・青方偏移成分の分布は、これまで知られていた双極分子流のものとは明らかに異なり、第2の双極分子流と言える。このことは、CMM3に2つ以上の原始星が生まれていることを意味している。

### 4.1.2 スペクトル線サーベイ

我々は国立天文台野辺山観測所のレガシープロジェクトの一つとして、衝撃波領域L1157と低質量星形成領域L1527(WCCC天体)におけるスペクトル線サーベイ観測を推進している。ある周波数範囲のスペクトル線をくまなく観測することで、それぞれの化学組成の特徴を先入観なく把握し、衝撃波化学とWCCCの理解を格段に深めることを目標としている。

#### L1157の衝撃波領域

昨年度に引き続き、低質量原始星L1157-mm近傍の衝撃波領域L1157 B1においてラインサーベイ観測を行った。この領域では、衝撃波により星間塵マントルから蒸発したと考えられるCH<sub>3</sub>OHやHCOOCH<sub>3</sub>などの有機分子をはじめ、高温高密度下での多様な化学現象が観測されており、それらの理解を通して衝撃波化学の新たな局面を切り開きつつある。本年度は新たに10GHzに及ぶ周波数帯域を観測し、いて座やオリオン座の大質量星形成領域など高温高密度

環境下で特有の、 $\text{NH}_2\text{CHO}$  や  $\text{PN}$  といった分子を、この領域で初めて検出した。特に  $\text{PN}$  は、これまで気相反応で生成するのか、星間塵マントルで生成したものが衝撃波で気相に放出されたのか、議論がなされてきたが、原始星から L1157B1 方向に吹き出す分子流の時間規模では、気相反応で生成するのは困難であるため、星間塵マントルからの放出を観測している可能性が高いことがわかった。

#### 低質量原始星 L1527

本年度は、昨年度の 85-92 GHz, 109 GHz 帯に加え、83-85 GHz の 2 GHz について高感度観測を行った。これにより、今期までではほぼ 10 GHz の帯域をカバーすることができた。 $\text{rms}(T_{mb})$  は昨年度同様 5 mK から 9 mK を達成した。 $\text{HC}^{18}\text{O}^+(J=1-0)$  や  $c\text{-C}_3\text{H}_2(2_{1,2}-1_{0,1})$  などの比較的簡単な分子をはじめとして、 $\text{HNC}_3$  や  $1\text{-C}_3\text{H}_2$ 、 $\text{DC}_3\text{N}$  などの炭素鎖分子輝線が強く検出された。さらに、 $\text{C}_5\text{H}$  の高励起輝線も 100 mK 以上の強度で検出された。また、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  については、 $^{13}\text{C}$  同位体種の輝線を複数検出できた。特に、 $^{13}\text{C}$  同位体種の高励起遷移が見えてきたことで、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比を正確に求めることが可能になり、 $^{13}\text{C}$  同位体の希釈問題や、分子生成過程を探る上で重要な手掛かりが得られた。

#### 重水素濃縮度の観測を目指した 70 GHz 帯新受信機の開発

重水素を含む分子のノーマル種に対する存在比は D と H の原子存在比よりも高くなる。これを重水素濃縮という。重水素濃縮は、分子雲の進化段階、分子のダストへの吸着度、分子雲の温度を鋭敏に反映するため、星形成領域の化学診断に非常に有効な指標である。 $\text{HCN}$  や  $\text{CCH}$  などの重元素 2 個からなる分子の重水素化物は、70 GHz 帯に  $J=1-0$  の基本遷移を持つ。本研究室では、この帯域を高感度観測するために、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載する 69-85 GHz 帯の新受信機を天文学教育研究センター・国立天文台などの研究者と共同で開発している。サイドバンド分離型 SIS ミキサを 2 個搭載し、2 偏波を同時受信できる設計になっている。本年度は、冷却デューワーの製作など、性能評価の準備を進めた。

#### 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(ヘテロダインミキサ)の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS (Superconductor Insulator Superconductor) ミキサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb (ニオブ) を超伝導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音限界に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz

以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による損失が増大するため、急激に性能が低下する。

そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ (HEB) ミキサ素子に注目している。HEB ミキサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」中間周波信号に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法(拡散冷却)と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法(格子冷却)の 2 つがある。我々は、主に NbTiN や NbN を用いた格子冷却型 HEB ミキサ素子の開発研究を進めている。

#### AlN 緩衝層を用いた $T_c$ の改善 II

本研究室で主に開発している NbTiN HEB ミキサは格子冷却型なので、超伝導薄膜の膜厚を数 nm 程度まで薄くすることで性能向上を図ることができる。しかし、スパッタ法で成膜した場合、膜厚を薄くすると膜の不均一性のために超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が急激に低下する。そこで、膜の均一性を高めるため、基板と超伝導薄膜の間に緩衝層を導入した。NbTiN に対しては AlN 緩衝層が有効であることがすでに報告されている。本研究室の NbTiN においても AlN 緩衝層は有効で、6 nm の膜厚で  $T_c$  が 6 K から 10 K へ大幅に上昇した。また、NbTiN と同じ結晶構造の NbN についても AlN 緩衝層を導入したところ、NbTiN と同等の改善が見られることがわかった。立方晶系の NbTiN/NbN に対して六方晶系の AlN は、緩衝層として一般的な組合せではない。しかし、NbTiN/NbN の 111 面に AlN の 001 面が 1% 以下の範囲で非常に良く整合するため、この改善が起こるのではないかと考えた。この点を確認するために、X 線解析を行った結果、AlN 緩衝層の存在で NbN の 111 面が卓越して成膜されることが確認できた。また、AlN 緩衝層を(多結晶) (001 面配向) と変化させた時、 $T_c$  の上昇幅、常温抵抗率の低減幅が相転移のように変化の様子が観察された(図 3)。

#### 加熱成膜装置の導入とテスト

薄膜の高品質化のためには、緩衝層導入の他に製膜時の基板加熱が有効である。これはスパッタ中に基板の温度を数 100 °C まで上げて成膜することで均一な膜を得る方法である。今年度、本研究室の複合成膜装置の NbTi ターゲットに赤外線基板加熱装置を導入し、初期テストを行った。装置としては 800 °C 程度まで加熱できる能力があるが、まず比較的低い 400 °C で動作確認を行った。すると、NbTiN 15 nm の厚みで  $T_c = 11\text{K}$  となり、若干の改善が見られることがわかった。今後、最適化を進め、HEB ミキサの製作プロセスに組み込む予定である。

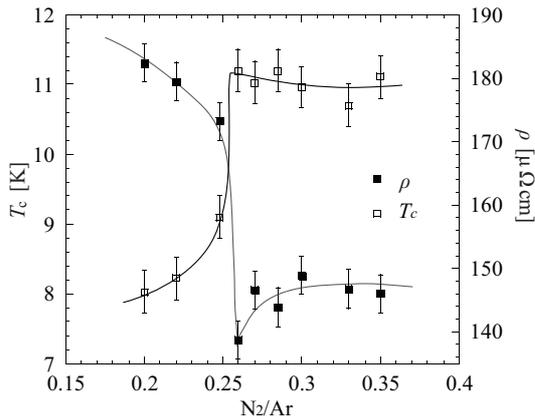


図 4.3: Variation of  $T_c$  and  $\rho$  as a function of the  $N_2/Ar$  flow ratio that is related to the degree of the (111) orientation of the AlN buffer layer

#### NbN/AlN 膜を用いた HEB ミクサの開発

現在、世界的に見て HEB ミクサに用いられる超伝導素材は NbN と NbTiN である。天文観測に適した導波管型の HEB ミクサでは、基板に誘電率の小さい石英を用いる必要がある。NbTiN は石英上でも比較的良い膜が成膜できるが、NbN では難しいことが知られている。そのため、本研究室ではこれまで NbTiN を用いて HEB ミクサを製作してきた。しかし、AlN 緩衝層が NbN に有効であることがわかったので、この方法を用いて NbN を使った導波管型 HEB ミクサを製作し、性能評価を行った。製作した 54 個の素子すべてで良好な  $I$ - $V$  曲線が得られたが、臨界電流密度がやや低い傾向にあった。それでも、800 GHz 帯での測定で、受信機雑音温度 2400 K (DSB) を得ることができた。この結果はまだ満足できる値ではないが、NbN を使った導波管型 HEB ミクサを実現できたことは大きな意義がある。

#### NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

導波管型ミクサでは周波数が高くなるにつれ導波管部の製作が困難となる。そこで、より高周波数化を目指し、準光学型のミクサ素子の開発を進めている。本研究では振動の少ないパルス管冷凍機を導入して HEB ミクサの測定系を構築し、評価実験をおこなった。その結果、受信機雑音温度として 3400 K、安定時間として約 10 秒の結果を得た。これまで HEB ミクサでは受信機雑音性能と安定性を両立させることは難しく、安定性を高めるためには雑音性能を犠牲にするなどの方法がとられてきた。本研究では、IF 出力が HEB ミクサに流れる電流量 (バイアス電流) に強く依存していることに注目し、バイアス電流を調整することで受信機雑音性能と安定性が両立し得ることを見出した。今後、光学系の改善で、受信機雑音を 1600 K まで低減できると見込まれる。この研究は、名古屋大学 STE 研究所および筑波大学の研究者との共同研究である。

#### テラヘルツ帯量子カスケードレーザーの開発

ヘテロダイン受信機では周波数純度の高い ( $\sim 10$  kHz) 局発振器が必要である。しかし、2 THz 以上の周波数では満足できる発振器が確立していない。そこで、量子カスケードレーザ (QCL) に着目し、情報通信研究機構 (NICT) との共同で開発を進めている。QCL の製作は NICT で行っている。GaAs/AlGaAs を用いた共鳴 LO フォノン引き抜き型の QC 構造で、3-4 THz での発振に成功している。現在はパルス駆動であるが、発振のしきい値電流を低減することで消費電力を抑えて連続発振を実現すべく、製作プロセスの開拓を含めた実験を進めている。また、QCL の発振出力を HEB ミクサに導入して検出する実験も進めている。QCL と HEB をそれぞれ別の液体 He デュワーに組み込んで冷却し、QCL の出力を HEB ミクサの  $I$ - $V$  特性の変化として検出することに成功した。本研究で用いた HEB ミクサは QCL の発振周波数 (3.9 THz) に最適化したものではなく、また、QCL の出力はデューティ比が 5 % のパルス発振である。それにもかかわらず、QCL の光を HEB で受信できたことは大きな前進と言える。

<受賞>

- [1] 坂井南美、井上研究奨励賞、井上科学財団、2010 年 2 月 4 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M., and Yamamoto, S., "Discovery of the Second Warm Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS 15398-3359 in Lupus", *ApJ*, 697, 769-786 (2009).
- [3] Hirota, T., Ohishi, N., and Yamamoto, S., "A Search for Carbon-Chain-Rich Cores in Dark Clouds", *ApJ*, 699, 585-602 (2009).
- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case", *ApJ*, 702, 1025-1035 (2009).
- [5] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., "Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer", *Supercond. Sci. Technol.* 23, 045004 (2010).
- [6] Sakai, N., Saruwatari, O., Sakai, T., Takano, S., and Yamamoto, S., "Abundance anomaly of the  $^{13}C$  species of CCH", *Astron. Astrophys.*, in press.
- [7] Jiang, L., Shiba, S., Shiino, T., Shimbo, K., Sakai, N., Yamakura, T., Irimajiri, Y., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., and Yamamoto, S., "Development of 1.5 THz Waveguide NbTiN Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers", *Supercond. Sci. Technol.* in press.

- [8] Sakai, T., Sakai, N., Hirota, T., and Yamamoto, S., "A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation", ApJ, in press.
- (学位論文)
- [9] 椎野竜哉、「AlN 緩衝層を用いた NbN/NbTiN 超伝導テラヘルツ HEB ミクサ素子の開発」、修士論文、2010年3月
- [10] 猿渡修、「大質量原始星候補天体 NGC2264 CMM3 の高分解能観測」、修士論文、2009年3月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [11] Shiino, T., Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. "Discovery of Carbon-Chain Rich Core in Lupus", Advancing Chemical Understanding through Astronomical Observations, Virginia, U.S.A, May 27-29, 2009
- [12] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M., and Yamamoto, S. "Chemical Variation in Low-Mass Star Forming Regions", Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolution, Taipei, Taiwan, June 8-12, 2009
- [13] Shiino, T., Todoroki, K., Minh. N. D., Jiang, L., Shiba, S., Uzawa, Y., Maezawa, H., Sakai, N., and Yamamoto, S. "Improvement of Critical Temperature of Superconducting NbN and NbTiN Thin Films Using an AlN Buffer Layer", 12th International Superconductive Electronics Conference, Fukuoka, June 16-19, 2009
- [14] Saruwatari, O., Sakai, N., Sakai, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Yamamoto, S., "SMA Observation of NGC2264 MMS3, a Candidate for 'High-Mass Class 0' Protostar", Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolution, Taiwan, June 8-12, 2009
- 招待講演
- [15] Sakai, N. "Chemical Composition of Low-Mass Star-Forming Regions", Advancing Chemical Understanding through Astronomical Observations, Robert C. Byrd Green Bank Telescope, WV, US, May 26-29, 2009
- [16] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Distribution of Carbon-Chain Molecules around Low-Mass Protostars", Submillimeter and THz Astrochemistry, Tokyo, Japan, March 17-18, 2010
- [17] Yamamoto, S. and Sakai, N., "<sup>13</sup>C Isotope Fractionation in Cold Clouds", Data Needs for ALMA, Cologne, Germany, October 5-7, 2009
- [18] Yamamoto, S. "Molecules with ALMA", ALMA-J User Meeting 2009, Tokyo, December 22-23, 2009
- (国内会議)
- 一般講演
- [19] 芝 祥一、入交 芳久、山倉 鉄矢、前澤 裕之、関根 徳彦、竇迫 巖、山本 智、「HEB ミクサを用いた THz-QCL の周波数安定化」、第 70 回応用物理学学会学術講演会 9a-M-11、富山大、2009年9月8-11日
- [20] 山口貴弘、酒井剛、梅本智文、高野秀路、杉村美佳、坂井南美、山本智、他 NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー「L1157 の衝撃波領域におけるラインサーベイ」、日本天文学会秋季年会 Q43a、山口大学、2009年9月14-16日
- [21] 猿渡修、榊原祐介、古屋隆太、坂井南美、酒井剛、Sheng-Yuan Liu、Yu-Nung Su、山本智、「大質量 'Class 0' 候補天体 NGC2264MMS3 の双極分子流」、日本天文学会秋季年会 P25a、(同上)
- [22] 坂井 南美、酒井 剛、廣田朋也、山本 智: 「Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry」、日本天文学会秋季年会 P24a、(同上)
- [23] 椎野竜哉、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「おおかみ座における炭素鎖分子の豊富な星なしコアの発見」、日本天文学会秋期年会 P26a、(同上)
- [24] 椎野竜哉、Jiang Ling、芝祥一、鶴澤佳徳、山倉鉄矢、前澤裕之、坂井南美、山本智、「AlN 緩衝層を用いた NbN, NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の改善」、日本天文学会秋期年会 V75b、(同上)
- [25] 芝 祥一、入交 芳久、小山 知記、山倉 鉄矢、前澤 裕之、関根 徳彦、竇迫 巖、山本 智、「HEB ミクサを用いた THz-QCL の周波数安定化」、研究討論会「テラヘルツ電子デバイスの新展開」、秋保リゾート・ホテルクレセント 仙台、2010年2月25-26日
- [26] 椎野竜哉、山倉鉄矢、芝祥一、Jiang Ling、鶴澤佳徳、前澤裕之、坂井南美、山本智、「NbN/AlN 薄膜を用いた THz 帯超伝導 HEB ミクサの開発」、第 57 回応用物理学関係連合講演会 19p-V-5、東海大学、2010年3月17-20日
- [27] 芝 祥一、入交 芳久、小山 知記、山倉 鉄矢、前澤 裕之、関根 徳彦、竇迫 巖、山本 智、「HEB ミクサを用いた THz-QCL の周波数安定化 (II)」、第 57 回応用物理学関係連合講演会 18a-M-6、(同上)
- [28] 坂井 南美、酒井 剛、廣田朋也、山本 智: 「Abundance Anomaly of the <sup>13</sup>C Species of CCH」、日本天文学会春季年会 Q46a、広島大学、2010年3月24-27日
- 招待講演
- [29] 坂井 南美: Chemical Variation in Low-Mass Star-Forming Regions、第 9 回分子分光研究会、富山大、2009年5月15-16日
- (セミナー他)
- [30] Yamamoto, S., "Chemical Evolution of Molecular Clouds", Department of Physics, University of Stockholm, May 11, 2009
- [31] 坂井 南美: 「星と惑星ができるまで」、サイエンスカフェ本郷、東京大学、2009年6月14日
- [32] 坂井 南美: 「星の誕生と化学進化」、ビッグバンセンタークリスマス講演会、東京大学、2009年12月25日

## 4.2 河野研究室

### 4.2.1 高赤方偏移銀河の観測研究

#### AzTEC/ASTE 観測による原始銀河団 SSA22 領域でのサブミリ波銀河集団の発見

初期宇宙においては、すばる望遠鏡等の大型光赤外線望遠鏡の活躍により、多種多様な、形成途上の若い銀河が発見されている。一方、サブミリ波で検出される星形成銀河(サブミリ波銀河)は、非常に多量のダストを持ち、かつ、非常に激しい、極限的な星形成(星形成率 SFR  $\sim$  数 100 - 数 1000  $M_{\odot}$ )を起こしていることが示唆されており、初期宇宙で観測される若い銀河の中でも、特に質量の大きい星形成銀河種族ではないかと考えられている。現時点での標準的な構造形成・銀河形成モデルによれば、このような大質量星形成銀河は、質量の大きい暗黒物質ハローの中で形成されると期待されるが、サブミリ波銀河が、他の観測手段により推定される大規模構造(暗黒物質の集中構造)に、実際に付随しているのかどうかは、未だ観測的に調べられていない。これは、これまでのサブミリ波サーベイ装置では、大規模構造を捉えるだけの広さを確保した、深い観測を行うことが難しいためである。

我々は、南米チリに設置した大口径(10m)サブミリ波望遠鏡 ASTE に、144 画素ボロメーターカメラ AzTEC(UMASS, INAOE 等により開発されたカメラ。Wilson et al. 2008 参照)を搭載し、原始銀河団領域 SSA22 の中心領域において、広く( $\sim 390$  arcmin<sup>2</sup>)深い( $1\sigma \sim 0.7 - 1$  mJy)波長 1100 $\mu$ m 帯での撮像観測を行った。その結果、SSA22 領域で発見されている、 $z = 3.1$  付近の Lyman  $\alpha$  輝線銀河(LAEs)の集中領域において、明るいサブミリ波銀河が多数密集して検出されていることがわかった。さらに、この2つの異なる銀河種族でみられる密集度の高まりを、定量的に検証するため、LAEs との2体相互相関関数を調べたところ、小さい角度スケール(数分角以下)で、有意なシグナルが検出された。一般に、サブミリ波銀河の redshift を求めるのは容易ではないが、本研究では、redshift が既知の天体との相互相関を調べるというアイデアにより、多くのサブミリ波銀河が、 $z \sim 3.1$  付近に密集していることを示すことに成功した。このような、サブミリ波銀河の集団が発見されたことは初めてであり、かつ、それが、LAEs でトレースされる、暗黒物質分布の集中部に対応していることが示されたのは、サブミリ波銀河と大規模構造の関係を初めて観測的に明らかにしたものとして、非常に重要である。

この成果は、Nature 誌に掲載された。また、国立天文台と理学系研究科が共同して実施した記者発表も行われ、全国紙・地方紙あわせて10件以上掲載されたほか、テレビ・ラジオでも取り上げられるなど、大きな反響があった。[1][15][16]

#### サブミリ波銀河 SXDF850.6 のサブミリ波干渉計による観測的研究

ミリ波・サブミリ波で明るい銀河(サブミリ波銀河)は、ダストに厚く覆われ、大規模な星形成活動(星形成率  $\sim 100 - 1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )を行う高赤方偏移( $z \sim 1 - 4$ )大質量銀河である。宇宙の星形成史、銀河の形成・進化、赤外線背景放射の起源を探る上でサブミリ波銀河の性質解明は不可欠である。サブミリ波銀河は可視・近赤外で非常に暗く、またサブミリ波望遠鏡のビームサイズが大きいという問題があり、対応天体同定が難しく、多波長での詳細な研究は進んでいない。

我々は、サブミリ波干渉計 SMA の高分解能観測(ビームサイズ  $2.32'' \times 2.19''$ )により、SCUBA および AzTEC/ASTE などの観測で検出されたサブミリ波銀河 SXDF850.6 の詳細な位置を決定した。近赤外から電波に至る波長( $J, H, K, 3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24 \mu\text{m}, 850, 880, 1100 \mu\text{m}, 21 \text{cm}$ )で対応天体を同定し、紫外から可視( $u, B, V, R, i', z'$ )のフラックスにも強い制限を与えた。紫外から電波までの SED から求めた赤方偏移は  $z \simeq 2.2 \pm 0.3$  であった。紫外・可視・近赤外側の SED フィットでは、星質量  $2.5_{-0.3}^{+2.2} \times 10^{11} M_{\odot}$ ,  $A_V = 3.0_{-1.0}^{+0.3}$  mag, 年齢  $720_{-210}^{+1880}$  Myr と求まり、古い星が卓越した大質量銀河という結果を得た。一方、遠赤外・サブミリ波・電波側の SED フィットでは、遠赤外光度  $(7-26) \times 10^{12} L_{\odot}$ , 星形成率  $1300 - 4500 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  と、大規模な星形成を示す。推定される分子ガス質量は  $(2-5) \times 10^{10} M_{\odot}$  であり、このような激しい星形成を数十 Myr 維持できる量である。これらを合せると、SXDF850.6 はある程度星形成の進んだ大質量銀河が、衝突・合体を起こし、現在激しい星形成活動が誘発されているという描像が推測される。[9]

#### サブミリ波広視野観測に基づく高赤方偏移星形成銀河の進化の研究

南米チリ共和国のアタカマ砂漠に設置された ASTE 望遠鏡を用い、サブミリ波広視野探査を行ってきた。過去2年間の観測で、2平方度を超える領域を、深さ  $\sigma \sim 0.5$  mJy という感度で観測し、1000個を超えるサブミリ波銀河を新たに発見することに成功した。これは、広さ・深さ・検出銀河数とともに既存のサーベイを凌駕する結果である。これらの大規模サンプルを用い、サブミリ波銀河の統計的性質を調べるとともに、多波長データを用いた詳細な研究を行っている。

得られたサンプルから、既存のサブミリ波サーベイにおいて最も深くかつ信頼性のあるナンバーカウントを作成した。二体相関関数の解析では強いクラスタリングの兆候が得られ、 $\sim 10^{13-14} M_{\odot}$  という大質量のダークハローに付随するという結果を得た。これは、近傍宇宙の大質量楕円銀河や銀河団スケールのダークハロー質量に相当する。サブミリ波銀河が、銀河団中心に付随するような大質量楕円銀河(cD銀河)の祖先であることを示唆する。このように、銀河の形成・進化の解明や、宇宙の構造形成とも結びつく重要な成果が得られている。[11][16]

## AzTEC/ASTE で SXDF 領域に発見した超高光度サブミリ波銀河

サブミリ波連続波で明るい銀河、いわゆるサブミリ波銀河 (SMG) は、遠方/初期宇宙において星形成率 = a few  $100 \sim 1000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  という大規模な星形成を行う形成途上の大質量銀河であると考えられている。

我々は、南米アタカマ砂漠に設置されたサブミリ波望遠鏡 ASTE および AzTEC カメラ (1.1 mm 帯連続波) を用いて、Subaru XMM-Newton Deep Field (SXDF), SSA22, Subaru Deep Field (SDF), Aakari Deep Field South (ADF-S) などサブミリ波銀河探索を行った。1000 個を超えるサブミリ波銀河を検出したなかで、1.1 mm で  $33.9 \pm 0.78 \text{ mJy}$  と明るいサブミリ波銀河 (SXDF1100.001) を SXDF で検出した。検出したサブミリ波銀河のほとんどが 10 mJy 以下であり、大半は 3-4 mJy であることを考えると抜群に明るい SMG である。我々は CARMA ミリ波干渉計による 1.3 mm、SMA サブミリ波干渉計による 880  $\mu\text{m}$  での高分解観測により、位置を高い精度で決定すると共に、可視光・近・中間赤外での対応天体を特定した。すばる望遠鏡の可視光、UKIRT 赤外望遠鏡の近赤外、Spitzer 宇宙望遠鏡の近・中間赤外、VLA の電波の深いイメージのすべてで対応天体を検出している。すばるの画像から少なくとも重力レンズによる強い増光はなく、この SMG は本質的に非常に明るい爆発的星形成銀河であると考えられる。SED フィットで求めた赤方偏移は  $z \sim 1.4$  である。想定されるダストの温度範囲 (20-40 K) に依るが、推定される赤外光度は  $L_{\text{FIR}} \sim 10^{12.8} - 10^{13.8} L_{\odot}$ 、星形成率は  $1000 \sim 10000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  である。サブミリ波、電波のピークと可視光・近赤外のピークが空間的にオフセットがあることも見えてきている。また、SMA, CARMA のサブミリ波帯での高解像度観測により、他の SMG には見られていないサブミリ波で明るい  $\sim 32 \text{ kpc}$  ほどに広がった構造を持つことが分かった。今後は、分光観測や ALMA や SMA などのサブミリ波帯干渉計のより高分解能観測を行い、この構造を明らかにし、このような非常に明るいサブミリ波銀河は、銀河形成史の中でどのような位置にあるのかを調べていく予定である。[16][18]

### 4.2.2 ミリ波サブミリ波観測装置の開発

サブミリ波銀河の発見に加え、サブミリ波銀河の赤方偏移の推定や、星形成領域におけるダストの物理量 (温度や  $\beta$  指数) に制限をつける上で、複数の波長における flux 測定は極めて重要である。単色での連続波カメラ AzTEC (波長 1.1mm) による大規模な掃天観測の成功を踏まえ、その次のステップとして、波長 1.1mm, 0.87mm, および 0.46mm 帯での観測を実現するミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。センサーとしては、近年技術的な成熟度が急速に高まった TES ボロメーター (超伝導遷移端における、フォトン入射に対する急峻な抵抗値の変化を読み出す超伝導熱検出器) のアレイを採用する。複数の

波長での同時観測は、ミリ波サブミリ波帯のダイクロミック素子を用いて実現する。読み出しは周波数分割方式を採用することでシンプルなシステムを目指している。今年度は、(1) 光学系の設計 (2) TES ボロメーターアレイの設計 (3) 冷却系の導入と組み上げ、およびその評価、などが進んだ。まずは、1.1mm および 0.87mm 帯の 2 色における同時観測を実現するシステムとし、2 色合計素子数 450 画素を実現することがわかった。(2) においては、スパイダーウェブと呼ばれる吸収体構造の最適化に焦点を当てている。これまでもスパイダーウェブを用いたボロメーターカメラの先行研究はあるが、設計パラメータ同士が複雑に絡み合うために局所的な最適化に留まっておき、経験則による設計も多い。それらの設計パラメータが我々の観測周波数帯でも最適値となるかは不明瞭なところが多く、今回、3 次元電磁界解析を用いて、スパイダーウェブの設計パラメータの最適化を行った。具体的には、bling による吸収効率への影響を評価した上で、最適化が可能なスパイダーウェブのギャップサイズ、吸収体の直径、Au メッシュのシートインピーダンスという設計パラメータが吸収効率に及ぼす影響を解明し、我々の周波数帯で吸収効率が最大となるような最適スパイダーウェブ構造の設計に成功した。具体的には、bling による影響はよりシビアな条件の 350GHz で  $\sim 10\%$  となり、設計パラメータに関しては、吸収体の直径が  $1.2-1.7 \lambda$  の範囲で、ギャップサイズが  $0.2\lambda$ 、シートインピーダンスが  $> 400 \Omega \text{sq}^{-1}$  という条件で、吸収効率が  $> 60\%$  という結果を得た。スパイダーウェブに関する全ての設計パラメータの最適化を行ったのは初めての成果である。(3) については、パルスチューブ型機械式冷凍機および He10 吸着型冷凍機を組み合わせたデュワーの試験運転を行い、冷却パラメーターの改善を行うことで、長時間の安定した 0.3K 運転が実現できていることが実際に検証できた。このほか、周波数分割の多重読み出し回路の試験や、制御および解析ソフトウェアの検討も進められている。[12][19]

### 超伝導トンネル接合素子を用いたマイクロ波帯雑音源の開発

冷却増幅器は電波天文学で用いられる分光観測用受信機の初段、または二段目に位置する主要な構成要素である。その性能を表わす最も重要な指標である雑音温度は Y-factor 法によって測定されるが、既存の雑音源 (半導体ダイオード+冷却アッテネータ) では測定誤差が (十数%) と大きい。そこで、超伝導トンネル接合 (以下 SIS 接合) を利用した雑音源の開発に取り組んでいる。2008 年度に試作した雑音源は SIS 接合自身の幾何学的容量などのリアクタンス分に起因する反射係数の悪化のために、高周波側で理想的な振る舞いから大きく外れることが明らかになった。このことをふまえ、本年度は SIS 接合、電極及び筐体の再設計を行い、4-8 GHz 帯で反射係数を 0.1 (電力にして 1%) 以下に抑えた雑音源を制作した。制作した雑音源を用いて冷却増幅器の利得と雑音温度の測定を行い、既存の方法による測定結果と比較すると、利得は誤差範囲内で一致したにも関わらず、雑

音温度は SIS 接合雑音源の方が 1-2 K 程度高くなることが分かった。これは既存の方法で用いる外部導体と内部導体の温度差が原因であると考えられる。今後は、さらに精度の高い詳細な比較、及び雑音源の高周波化を進めていく予定である。[17][22][24]

#### ASTE 350 GHz 帯受信機の性能向上

ASTE 望遠鏡用 350 GHz 帯受信機 (CATS345) の性能向上を行った。これまでに用いていた SIS デバイスは、共振周波数が低周波側にずれており、帯域内 (330-360 GHz) で受信機雑音温度に明らかな傾斜が見られていた。そこで、SIS デバイスの接合サイズ、臨界電流密度、インピーダンス整合回路のマイクロストリップラインの幅などのパラメータについて見直しを行い、共振周波数を 345 GHz 付近に設定した新たな SIS デバイスの設計・製作を行った。その結果、従来の SIS 素子を用いた受信機に比べ大きく雑音温度を下げることに成功し、かつ帯域内で比較的フラットな性能を得た。SSB 受信機雑音温度は 89 K (RF 354 GHz) を実現している。[25]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tamura, Y., Kohno, K., Nakanishi, K., Hatsukade, B., Iono, D., Wilson, G. W., Yun, M. S., Takata, T., Matsuda, Y., Tosaki, T., Ezawa, H., Perera, T. A., Scott, K. S., Austermann, J. E., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Chung, A., Oshima, T., Yamaguchi, N., Tanaka, K., and Kawabe, R., “Spatial correlation between submillimetre and Lyman-galaxies in the SSA22 protocluster”, *Nature*, 459, 61-63 (2009).
  - [2] Hatsukade, B., Iono, D., Motohara, K., Nakanishi, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Nagao, T., Tamura, Y., Malkan, M. A., Ly, C., and Kohno, K., “A Search for Molecular Gas toward a BzK-Selected Star-Forming Galaxy at  $z = 2.044$ ”, *PASJ*, 61, 487-491 (2009).
  - [3] Egusa, F., Kohno, K., Sofue, Y., Nakanishi, H., and Komugi, S., “Determining Star Formation Timescale and Pattern Speed in Nearby Spiral Galaxies”, *ApJ*, 697, 1870-1891 (2009).
  - [4] Seta, H., Isobe, N., Tashiro, M.S., Yaji, Y., Arai, A., Fukuhara, M., Kohno, K., Nakanishi, K., Sasada, M., Shimajiri, Y., (and 146 coauthors), “Suzaku and Multi-Wavelength Observations of OJ 287 during the Periodic Optical Outburst in 2007”, *PASJ*, 61, 1011-1022 (2009).
  - [5] Muraoka, K., Kohno, K., Tosaki, T., Kuno, N., Nakanishi, K., Sorai, K., Sawada, T., Tanaka, K., Handa, T., Fukuhara, M., Ezawa, H., and Kawabe, R., “ASTE CO (3-2) Mapping Toward the Whole Optical Disk of M 83: Properties of Inter-arm Giant Molecular-Cloud Associations”, *ApJ*, 706, 1213-1225 (2009).
  - [6] Mizuno, Y., Kawamura, A., Onishi, T., Minamidani, T., Muller, E., Yamamoto, H., Hayakawa, T., Mizuno, N., Mizuno, A., Stutzki, J., Pineda, J. L., Klein, U., Bertoldi, F., Koo, B.C., Rubio, M., Burton, M., Benz, A., Ezawa, H., Yamaguchi, N., Kohno, K., Hasegawa, T., Tatematsu, K., Ikeda, m., Ott, J., Wong, T., Hughes, A., Meixner, M., Indebetouw, R., Gordon, K. D., Whitney, B., Bernard, J. P., and Fukui, Y., “Warm and Dense Molecular Gas in the N 159 Region:  $^{12}\text{CO}$  J = 4-3 and  $^{13}\text{CO}$  J = 3-2 Observations with NANTEN2 and ASTE”, *PASJ*, 62, 51-67 (2010).
  - [7] Imanishi, M., Nakanishi, K., Yamada, M., Tamura, Y., and Kohno, K., “ASTE Simultaneous HCN (4-3) and HCO+(4-3) Observations of the Two Luminous Infrared Galaxies NGC 4418 and Arp 220”, *PASJ*, 62, 201-209 (2010).
  - [8] Liu, G., Calzetti, D., Yun, M.S., Wilson, G., Draine, B., Scott, K., Austermann, J., Perera, T., Hughes, D., Aretxaga, I., Kohno, K., Kawabe, R., and Ezawa, H., “An Investigation of the Dust Content in the Galaxy Pair NGC 1512/1510 from Near-Infrared to Millimeter Wavelengths”, *AJ*, 139, 1190-1198 (2010).
  - [9] Hatsukade, B., Iono, D., Akiyama, T., Yoshikawa, M., Dunlop, J. S., Ivison, R. J., Peck, A. B., Ikarashi, S., Biggs, A., Ezawa, H., Hanami, H., Ho, P., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kohno, K., Matsushita, S., Nakanishi, K., Padilla, N., Petitpas, G., Tamura, Y., Wagg, J., Wilner, D. J., Wilson, G. W., Yamada, T., and Yun, M. S., “Unveiling the Nature of Submillimeter Galaxy SXDF 850.6”, *ApJ*, 711, 974-979 (2010).
- (会議抄録)
- [10] Hatsukade, B., Kohno, K., Tamura, Y., Nakanishi, K., Iono, D., Wilson, G. W., Yun, M. S., Hughes, D. H., Matsuura, S., Shirahata, M., Takeuchi, T. T., Scott, K. S., Austermann, J. E., Perera, T., Aretxaga, I., Tanaka, K., Tosaki, T., Matsuo, H., Ezawa, H., Kawabe, R., and The ADF-S Team, “AzTEC/ASTE 1.1-mm Survey of the AKARI Deep Field-South”, AKARI, a Light to Illuminate the Misty Universe, *ASP Conf. Ser.*, 418, 307.
- (学位論文)
- [11] 廿日出文洋, “A Study of the Evolution of Massive Galaxies Based on Deep Wide-field Submillimeter Surveys” 博士論文, 2010年3月
  - [12] 川村雅之, 「ASTE 搭載用ミリ波サブミリ波多色 TES ボロメーターカメラの開発」, 修士論文, 2010年3月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演

- [13] K. Kohno, “Dense interstellar medium and activities in nearby galaxies”, Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolution, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, June 8-12, 2009.
- [14] K. Kohno, “Formation and evolution of galaxies Investigated with ALMA”, ALMA-J User’s Meeting, Mitaka, Japan, December 21-23, 2009.

## 一般講演

- [15] K. Kohno, “AzTEC/ASTE 1.1mm survey of submillimeter galaxies: optical/infrared properties of dusty extreme starburst populations in the early universe”, Joint Subaru-Gemini Science Conference, Kyoto University, Japan, May 18-21, 2009
- [16] K. Kohno, “AzTEC-on-ASTE survey of dusty extreme starburst galaxies”, Assembly, Gas Content and Star Formation History of Galaxies, Charlottesville, USA, September 21-24, 2009
- [17] Inoue H., Noguchi T., Kohno K., “SIS junction using as a microwave noise source”, 9th European Conference on Applied Superconductivity, Auditorium Centre of the University of Technology Dresden, Dresden, Germany, September 13-17, 2009

## (セミナー)

- [18] Ikarashi, S., Kohno, K., “An AzTEC on ASTE detection of an ultra bright Submillimeter galaxy in Subaru/XMM-Newton Deep Field and follow up observations using SMA and CARMA”, ASIAA, Taiwan, Feb. 26, 2010.
- [19] 川村雅之, 「ASTE 搭載用ミリ波サブミリ波多色 TES ボロメーターカメラの開発」, 国立天文台野辺山談話会、国立天文台野辺山宇宙電波観測所、2010年2月2日

## (国内会議)

## 一般講演

- [20] 河野孝太郎, 「Quest for galaxies in the early universe」, 石黒正人教授退職記念ワークショップ「野辺山の四半世紀と電波天文学の将来」, 国立天文台三鷹、2009年7月3日-4日
- [21] 河野孝太郎, 「TAO 中間赤外線観測と ASTE/ALMA との連携」, TAO 中間赤外線装置ワークショップ、東京大学天文学教育研究センター、2009年7月24日
- [22] 井上 裕文、河野 孝太郎、野口 卓, 「超伝導トンネル接合を用いた雑音源の開発」, 平成 21 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会 8p-RI-5、富山大学、2009年9月8-11日
- [23] 河野孝太郎, 「ALMA deep survey へ向けたこれまでの検討状況のまとめ」, ALMA 銀河 subWG ワークショップ、東京大学天文学教育研究センター/国立天文台三鷹、2009年12月18日-19日
- [24] 井上 裕文, 「超伝導トンネル接合を用いた雑音源の開発」, 第 10 回 ミリ波サブミリ波ワークショップ、東京大学天文学教育センター、2010年3月5-6日

- [25] 酒井剛, 「ASTE: ヘテロダイン受信機について」, 第 10 回 ミリ波サブミリ波ワークショップ、東京大学天文学教育センター、2010年3月5-6日

- [26] 河野孝太郎ほか, 「超広帯域ミリ波サブミリ波観測に基づく大規模構造の進化の研究: 進捗状況」, 平成 21 年度日本天文学会春季年会、X30a、広島大学、2010年3月25日

- [27] 河野孝太郎, 「ALMA 共同利用開始への期待: 系外銀河分野から」, 平成 21 年度日本天文学会春季年会、ALMA 特別セッション、広島大学、2010年3月25日

## (その他講演)

- [28] 河野孝太郎, 「南米アタカマ砂漠から描く新しい宇宙像」, 世界天文年全国同時七夕講演会、東京大学天文学教育研究センター、2009年7月7日

- [29] 河野孝太郎, 「南米アタカマ砂漠から探る見えない銀河の誕生」, 第 16 回理学部公開講演会、東京大学安田講堂、2009年11月8日

## (プレスリリース)

- [30] 田村陽一、河野孝太郎、川邊良平, 「115 億光年彼方に爆発的星形成銀河の集団を発見」, 2009年5月7日、<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2009-10.html>

## 5 重力波探査

——重力波によるビッグバン宇宙の探索——  
—（坪野）

重力波は光速度で伝搬する時空のひずみであり、超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激しい天体現象にともなって発生する。また宇宙のごく初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的には重力波によって、電磁波では決して見ることができない宇宙の姿をとらえるようになることが期待される。これらの重力波観測によって、新しい分野「重力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、TAMA300による重力波探査と、次世代レーザー干渉計 LCGT の開発が2つの主軸となっていた。最近これにくわえて、宇宙空間を利用した重力波検出計画が構想されるようになった。地上に干渉計を作る限り、基線長の制限や地面振動といった障害は避けることができない。しかし自由な宇宙空間ではこれらの制限が取り払われ、理想的な環境が期待できる。特に、地上では不可能な低周波の重力波検出が可能となることが大きな魅力である。われわれは、日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。[42, 52, 55, 57, 58]

### 5.1 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

#### 5.1.1 DECIGO

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) は、日本のグループが中心となり、2027 年ごろの打ち上げを目指して検討が進められている宇宙空間重力波望遠鏡計画である。DECIGO は、互いに 1000 km 離れた 3 台のスペースクラフト内に収められた鏡の間の距離をレーザー干渉計を用いて精密に測定することで重力波を観測する装置である。DECIGO は、連星中性子星や連星ブラックホールの合体現象に関してはほぼ宇宙全体を観測範囲に持ち、また、初期宇宙で発生した重力波を直接捕らえることができるだけの感度を持つ、非常に強力な観測装置になるはずである。

DECIGO は、2027 年ごろの観測を目指して、検討が進められている。[1, 9, 12, 24, 25, 22, 23, 27, 45, 56]

#### 5.1.2 DECIGO パスファインダー

DECIGO 計画では、その前に 2 つの前哨衛星を打ち上げ、技術成熟度を段階的に向上させていくロードマップが立てられている。DECIGO パスファインダー (DPF) はその最初の前哨衛星であり、高度 500 km の地球周回軌道に投入される 350 kg 級の小型衛星として設計が進められている。衛星内にはミッション機器として、ドラッグフリー制御によって衛星内に非接触保持された 2 つの試験質量 (鏡) と安定化レーザー光源、小型・低雑音スラスタを搭載する。これらの鏡で構成された基線長 30 cm のファブリ・ペロー干渉計の基線長変化を、安定化 Nd:YAG レーザー光源を用いて測定することで、0.1-1 Hz 付近での重力波観測を行う。DPF では、中間質量ブラックホール合体からの重力波をターゲットとしており、我々の銀河内のイベントを観測できるだけの感度を持っている。また、地球重力場観測や、宇宙空間での精密計測のための先進科学技術の実現など幅広い成果が期待できる。

DPF は、JAXA が進めている小型科学衛星シリーズの候補の 1 つになっており、衛星システム検討と基本サブシステムの試作と性能評価が進められている。[6, 11, 26, 28, 40, 47, 53]

#### 5.1.3 DPF レーザーセンサー

DPF のミッションには重力波の測定だけでなく、地球の微細な重力場構造を示すジオイド高を測定するという計画もある。このジオイド高は主に、地球の水分量が変化する事に伴う地球の質量密度分布の変化に影響されるため、重力場を長期間にわたり観測すれば地球上の水の貯蓄量、流れ、質などを見積もることができる。これにより、近年増加する人口の増加に伴い増え続ける水の需要への対策などといった社会的貢献が期待されている。

マスを加速度計として用いる方法では、衛星中に非接触に置いたマスを衛星に追従するように制御を行う。この時、衛星にかかる力は重力場と太陽風などによる外乱となり、マスにかかる力は重力場と制御信号となるため、制御信号から外乱を見積もる事ができ、GPS による衛星の位置情報と合わせれば重力場が測定できるという仕組みになっている。

制御の際には、レーザーセンサーによってマスの位置を感知して行う。レーザーセンサーは、波長 1550nm の光を用いた差動マイケルソン干渉計型のものである。まず制御を行うための地上実験として、懸架したマス (アルミ製、約 700g) をレーザーセンサーのフリンジが飛ばない範囲にまで振動を抑える制御実験を行った。この際、xPC target という MATLAB 上で起動できるデジタル信号処理システムを用いてデジタル制御フィルターを用いた。これにより、マスの振動をおよそ  $1\mu\text{m}$  程度にまで抑えることに成功し、レーザーセンサーでの制御が可能である事を実証した。また、重力場の観測精度がレーザーセンサーだけで決定されると仮定すれば、ジオイド高を  $0.1\mu\text{m}$  の精度で決定できる事が明らかになったが、実際は

GPS などの他の機器の精度で制限されてしまう可能性が高く、現在検討中である。[29, 46]

#### 5.1.4 DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験

DPF には鏡をとりつけた 2 つの試験質量からなる Fabry-Perot 共振器、ガラス板の上に光学素子をシリケートボンディングして作られるモノリシックな入射光学系、そして全体を囲う熱シールドからなる干渉計モジュールが搭載される。DPF では Fabry-Perot 共振器の共振器長を Pound-Drever-Hall(PDH) 法を用いて、試験質量の周りに取り付けられた静電アクチュエータによって制御することで重力波の観測を行う。ここで PDH 法とは共振器に入射するレーザー光に位相変調をかけることで、反射光から共振器長変動に比例した信号を取り出す手法である。

坪野研究室ではこの干渉計モジュールの Bread Board Model(BBM) を開発し、地上における動作確認や性能評価を行っている。

2009 年度はこの BBM に向けた準備として、試験質量の懸架系を製作し、光学定盤上にバラック組みした入射光学系を用いて Fabry-Perot 共振器の共振器長制御実験を行った。アクチュエータとしてはコイルマグネット型のものを用いており、現在までに SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>  の気球実験で用いられた FPGA を使ったデジタル制御を成功させている。

今後は入射光学系としてモノリシック光学系を導入し、共振器長制御に加えて Wave Front Sensing を用いた鏡のアライメント制御を行うなど、引き続き干渉計モジュールの BBM 開発を進めていく予定である。[31]

#### 5.1.5 DPF を利用した地球重力場観測

DPF では、2 つのテストマスに取り付けられたミラーが Fabry - Perot 共振器をつくる。この 2 つのテストマスは潮汐力によって距離が伸縮するので、これを利用すると高感度な重力勾配計として機能させることが可能である。計算によると短波長の重力変動に対しては、これまでの GRACE や GOCE などの重力探査衛星を凌ぐような高感度が実現可能である。このような超高感度な重力勾配計は、海洋探査、気候変動、地殻変動などの研究分野で求められているものであり、DPF が達成するサイエンスのひとつとして重要である。[30, 41]

#### 5.1.6 SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持った汎用小型演算処理・制御システムである。JAXA(宇宙航空研究開発機構)が開発した小型実証

衛星 (SDS-1) に搭載され、2009 年 1 月 23 日に打ち上げ・軌道投入が成功裏に行われた。

この SWIM の超小型宇宙実験プラットフォーム開発の一環として、我々は超小型重力波検出器 (SWIM <sub>$\mu\nu$</sub> ) を開発し、その運用を現在まで順調に行っている。この超小型重力波検出器は、小型であるために、地上の大型重力波検出器に匹敵する感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な宇宙空間重力波検出器のための実証試験をする最初のステップとなる。また、DECIGO Pathfinder で適用されるものとほぼ同等の機能部品を用いているため、それらによって構築されたシステムの宇宙実証を行う、という重要な役目も担っている。

2009 年 2 月から 1 年以上にわたって行われている SWIM 運用により、SpaceCube2 の宇宙における動作実証、SpaceWire/RMAP を用いた信号処理システムの実証を達成した。SpaceWire/RMAP 通信はすでに累積 100 万回以上のアクセスをエラーなく実施できている。さらに、SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>  を運用しデータを回収することで、その正常動作を確認し、重力波検出器としての性能評価を進めてきた。具体的には、2009 年 5 月に SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>  が内部で保持する「試験マス」の完全非接触な支持に成功したことを確認した。さらに 2009 年後半に SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>  試験マス制御の伝達関数の測定を、少ないデータ量の制限を克服しつつ完了した。2010 年 1 月以降は、SDS-1 衛星が 3 軸姿勢制御に移行した状態において SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>  のノイズレベルを測定し、定常時のスピン安定状態のそれに比べて悪化しないことを確認した。これは、観測時にセンサを天球上の一定の方向に向けて行うことができるという良好な結果を意味するものである。[10, 21, 39, 48, 54]

## 5.2 磁気浮上型重力波検出器の開発

### 5.2.1 超伝導磁気浮上型重力波検出器による観測

低周波重力波にはブラックホール合体や初期宇宙に天文学的-宇宙論的に非常に興味深い重力波源がある。しかし、現在の地上レーザー干渉計型重力波検出器は懸架系の共振周波数とその観測帯域の下限を制限する。そこで、我々は 0.1-1Hz 帯域の低周波で重力波を探索するために、磁気浮上を利用した新しい検出器を提案している。

本年度は、観測とデータ解析まで含むプロトタイプ実験を行った。プロトタイプ検出器は、超伝導磁気浮上で非接触支持された棒状の試験質量 (質量 133g、長さ 20cm) と重力波による試験質量の回転変動を読み取るための Michelson 干渉計からなっている。超伝導磁気浮上は、試験質量上部に取り付けたネオジウム磁石 (  $\phi 22\text{mm}$ ,  $t10\text{mm}$ ) とその上部に置かれた第 2 種超伝導体とのピン止め効果で実現されている。我々は、各種雑音対策の結果、地面振動と磁場雑音で決まるデザイン雑音レベルでプロトタイプ検出器

を動作させることに成功した。

また、2009年夏に一晚の簡易観測を行い、0.1-1Hz帯域ではじめて、宇宙論的な背景重力波に対する制限と最長の電波パルサー (PSR J2144-3933) に対する上限値を求めた。0.2Hzの帯域10mHzで宇宙の臨界密度で規格化された背景重力波の上限値は、 $8.1 \times 10^{17}$ であった。また、パルサー起源の重力波振幅に対してはベイズ的な上限値  $8.4 \times 10^{-10}$  を得た。それぞれ95%の信頼度である。

これにより、我々の提案する新しい検出器の原理的な動作と将来の可能性に対する指針を得た。[5, 8, 14, 18, 19, 20, 35, 43]

### 5.2.2 超伝導磁気浮上重力波検出器における磁場雑音の研究

超伝導磁気浮上型重力波検出器においては外部磁場が重力波に対する検出器の雑音となる。これは重力波の潮汐力を受けるねじれ振り子に浮上磁石が取り付けられており、これが外部磁場により外力を受けるためである。大型のコイルと磁場センサーを用いてこの外部磁場による雑音の推定を行ったところ、およそ0.1 Hz以下において検出器の雑音と一致しており、重力波に対する感度を制限していることがわかった。また、磁場センサーにより外部磁場の測定を行ったところ夜の1時半から4時半の時間帯に低減しているということが観測され、検出器の雑音もこの時間帯に下がっている。現在、この磁場の発生源は特定できていないが、磁気シールドによる対策を考えている。外部磁場を十分に遮蔽するには装置全体を覆う大掛かりな磁気シールドを構築する必要があり、その前段階として有限要素法による磁場シミュレーションを行う予定である。[15, 33, 44]

## 5.3 非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化

### 5.3.1 スクイズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

現在、レーザー干渉計型重力波検出器の高周波帯における感度はレーザーパワーの量子論的揺らぎ(散射雑音)によって制限されている。散射雑音は、準古典的にはレーザー光源から発せられる光子数の統計的な揺らぎとも解釈できるため、レーザーの強度を大きくし、光子数を増やすことで低減することができる。従来、散射雑音はこのようなレーザーの大出力化によって低減してきたのであるが、近年の量子光学の発達により、量子揺らぎそのものを低減することが可能になった。大出力のレーザー開発やそれに耐えうる光学素子の研究が成熟しつつある中で、この新しい手法による散射雑音の低減は大きな注目を集めている。

具体的な手法としては、非線形光学結晶を用いる。これによって相関を持った2つの光子による対を作成し、量子雑音を低減することができる。この際、低減した雑音の共役な物理量は反対に増大してしまうので、増大した物理量の影響が干渉計に現れないよう適切なコントロールを行う必要がある。

坪野研究室ではこのようなスクイズド光(実際には、強度を持たないスクイズド真空場)を用いた干渉計の散射雑音低減実験を行っている。2009年度はスクイズド光生成に必要な非線形光学結晶を購入し、その特性評価やスクイズド光生成光学系(スクイザー)の設計を行った。また、干渉計部分の構成や、スクイズド光導入の実装などのデザイン検討を行っている。[37, 38, 50]

### 5.3.2 スクイズド光の発生

スクイズド光とは、共役な物理量の揺らぎが等しくない状態であり、かつその一方は対称的な量子限界よりも小さくなっている。我々の実験では、直交位相振幅の揺らぎの一方を小さくした直交位相振幅スクイズド光を生成する。このような光を発生させるには光子間に相関をもたせる必要があり、そのために非線形光学効果を用いる。具体的には、2次の非線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振器の中で行うOPO(Optical Parametric Oscillator)を作成し、スクイズド光を生成する。また、この際必要になる第二次高調波を生成するために、SHG(Second-Harmonic Generator)も作成する。

重力波検出への応用では、その検出帯域である10 Hz ~ 10 kHzにおいて、量子限界を基準として-10 dB程度揺らぎを小さくしたスクイズド光の生成が目指している。2009年度には、そのための目標値として実験系のロスや、サーボ系の安定度などの上限値を見積り、そして実験環境の整備を行った。[34, 53]

## 5.4 超高安定レーザー光源の開発

### 5.4.1 低温サファイア光共振器を用いた超高安定光源

現在、光格子時計に代表される原子分光型周波数標準の性能は、分光に用いるプローブレーザーの周波数安定度によって制限されている。そこで坪野研では今年度から光格子時計への応用を念頭に置いた超高安定レーザーの開発に着手した。

周波数安定化には、長さを安定化した光共振器にレーザー光をロックするのが標準的な手法であるが、この場合の安定度は光共振器の熱雑音で制限されていることが知られている。そこで我々は、サファイア製の共振器を低温にすることで熱雑音の低減を図る。低温サファイアは高いヤング率や高熱伝導率、低熱膨張率等、共振器材料として良好な性質を示す。ま

た、この実験では、低温における高反射率コーティングの熱雑音を直接測定することも可能であると見積もられている。これは、LCGTのような低温重力波検出器にとって非常に有用な情報である。

本年度は低温サファイア共振器製作の可能性について、その概念設計と理論計算によるノイズ見積り等を行った。その結果、原理的には従来の安定度を二桁ほど向上可能であることが示された。[36]

#### 5.4.2 光共振器の支持法の研究

周波数基準として用いる光共振器に地面からの振動が伝わると、弾性変形を通じて共振器の長さが変動してしまう。この変動量は共振器の形状及び支持方法の対称性によって大きく変わる。この変動を最小化するような方法が既にいくつか提案されているが、そのどれもが等方材料を用いたものである。サファイアのような異方性結晶の場合については、有限要素解析によって最適形状、支持方法を決定する必要がある。我々は、有限要素解析パッケージCOMSOLを用いて共振器の変形をシミュレーションを行っている。今年度は基礎的な形状についてシミュレーションを行える所まで進んだ。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, *DECIGO and DECIGO Pathfinder*, *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 084010.
  - [2] Y. Aso, E. Goetz, P. Kalmus, L. Matone, S. Márka, B. O'Reilly, J. Myers, R. Savage, P. Schwinberg, X. Siemens, D. Sigg, N. Smith, Accurate measurement of the time delay in the response of the LIGO gravitational wave detectors, *Class. Quantum Grav.* **26** 055010, 2009.
  - [3] B. Abbott, et al., Search for gravitational-wave bursts in the first year of the fifth LIGO science run, *Phys. Rev. D*, **80** 102001, 2009.
  - [4] B. Abbott, et al., Search for high frequency gravitational-wave bursts in the first calendar year of LIGO's fifth science run, *Phys. Rev. D*, **80** 102002, 2009.
  - [5] Akiteru Takamori, Akito Araya, Yuji Otake, Koji Ishidoshiro, Masaki Ando: R&D Status of a New Rotational Seismometer Utilizing the Flux Pinning Effect of a Superconductor *Bull. Seism. Soc. America*, **99** (2009) 1174.
  - [6] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, *DECIGO Pathfinder*, *Class. Quantum Grav.* **26** (2009) 094019.
  - [7] K Arai, R Takahashi, D Tatsumi, K Izumi, Y Wakabayashi, H Ishizaki, M Fukushima, T Yamazaki, M-K Fujimoto, A Takamori, K Tsubono, R DeSalvo, A Bertolini, S Marka, V Sannibale (for the TAMA Collaboration), T Uchiyama, O Miyakawa, S Miyoki, K Agatsuma, T Saito, M Ohashi, K Kuroda, I Nakatani, S Telada, K Yamamoto, T Tomaru, T Suzuki, T Haruyama, N Sato, A Yamamoto and T Shintomi (for the CLIO Collaboration) and (The LCGT Collaboration), Status of Japanese gravitational wave detectors, *Class. Quantum Grav.* **26-20** (2009) 204020.
  - [8] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono: Gravitational wave detector realized a superconductor, *Physica C*, (in press).
- (会議抄録)
- [9] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Akito Araya, Ikkoh Funaki, Kunihito Ioka, Nobuyuki Kanda, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Kazuhiro Nakazawa, Kenji Numata, Shin-ichiro Sakai, Naoki Seto, Takeshi Takashima, Takahiro Tanaka, and the DECIGO working group, *DECIGO: the Japanese Space Gravitational Wave Antenna*, The ISTS Special Issue of Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 2009-o-4-11v.
- (会議抄録)
- [10] 安東正樹, 穀山渉, 石徹白晃治, 森脇成典, 新谷昌人, 高橋走, 麻生洋一, 湯浅孝行, 中澤知洋, 高島健, 高橋忠幸: SWIM に搭載した大学発の宇宙実験モジュール (SWIM <sub>$\mu\nu$</sub> ) 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス 109(101), 59-64, 20090618.
  - [11] 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 他, 小型重力波観測衛星 DPF, 宇宙科学シンポジウム 集録 (2008年1月9日, 宇宙科学研本部).
  - [12] 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 他, 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO, 第52回宇宙科学技術連合講演会 集録 (2008年11月07日 淡路夢舞台国際会議場, 兵庫).
- (国内雑誌)
- [13] 安東正樹, レーザー干渉計重力波検出器による精密計測技術, レーザー研究 第37巻 (2009) pp.101-106.
- (学位論文)
- [14] 石徹白晃治: Search for low-frequency gravitational waves using a superconducting magnetically-levitated torsion antenna, 博士論文, 2010年.
  - [15] 岡田健志: 低周波重力波探査のための超伝導磁気浮上型ねじれ振り子の研究, 修士論文, 2010年.
- < 学術講演 >
- (国際会議)

## 一般講演

- [16] Y. Aso, Remedies for low frequency vibration problems: SPI and other alternatives, 2009 Fujihara Seminar, Shonan Village Center, May 2009.
- [17] Y. Aso, R. Adhikari, S. Ballmer, A. Brooks, J. Betzwieser, J. Driggers, P. Kalmus, J. Miller, A. Stochino, R. Taylor, S. Vass, R. Ward, A. Weinstein, D. Yeaton-Massey, Testing Advanced LIGO length sensing and control scheme at the Caltech 40m interferometer, 8th Amaldi Conference on Gravitational Waves, Columbia University, NY, June 2009.
- [18] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Hirotaka Takahashi, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Yoichi Aso, Nobuyuki Kanda, Kimio Tsubono, Search for continuous gravitational waves from PSR J2144-3933 using a magnetically-levitated torsion antenna, 14th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (Jan. 26-29, 2010, Rome, Italy).
- [19] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono, Gravitational wave detector realized by a superconductor magnet, 22nd International Symposium on Superconductivity (Nov. 02 - 04, 2009, Epochal Tsukuba, Japan).
- [20] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono, Development of a low-frequency gravitational-wave detector using magnetically-levitated torsion antenna, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 21 - 06, 2009, Columbia University, New York, USA).
- [21] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Shigenori Moriwaki, Koji Ishidoshiro, Kakeru Takahashi, Akito Araya, Yoichi Aso, Takeshi Takashima, Kazuhiro Nakazawa, Tadayuki Takahashi, Motohide Kokubun, Tetsuo Yoshimitsu, Hirokazu Odaka, Takayuki Yuasa, Takehiko Ishikawa, Teruaki Enoto, Keiko Kokeyama, Shin-ichiro Sakai, Shuichi Sato, Akiteru Takamori, Kimio Tsubono, Tomoaki Toda, Tatusaki Hashimoto, Ayako Matsuoka: In-Orbit Operation of a Compact Gravitational Wave Detector on a Small Satellite, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 24, 2009, Columbia University).
- [22] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, and the DECIGO working group, *DECIGO: the Japanese Space Gravitational Wave Antenna*, 27th International Symposium on Space Technology and Science (July 9, 2009, Tsukuba, Ibaraki).
- [23] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO and Pathfinder Missions, KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop (November 11, 2009, Tsukuba, Ibaraki).

## 招待講演

- [24] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO and Pathfinder Missions, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 24, 2009, New York, USA).
- [25] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO, the 58th Fujihara Seminar (May 29, 2009, Shonan Village Center, Kanagawa).

## (国内会議)

## 一般講演

- [26] 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 新谷昌人, 他, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (15) バスファインダー, 日本天文学会 2010 年春季年会 (2010 年 3 月 27 日, 広島大学).
- [27] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 高島健, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 田中貴浩, 井岡邦仁, 青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 蒼山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中村真大, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和夫, 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, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 蓑泰志, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 柳哲文, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (24): 設計・計画, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [28] 佐藤修一, 鳥居泰男, 若林野花, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 上田暁俊, 川村静児, 新谷昌人, 安東正樹, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 麻生洋一, 穀山涉, DECIGO pathfinder のための試験マシンの開発 (4), 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [29] 正田亜八香, 道村唯太, 穀山涉, 麻生洋一, 坪野公夫, 安東正樹, 新谷昌人, 佐藤修一, DECIGO Pathfinder 用レーザーセンサーの性能評価, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).

- [30] 坪野公夫, 正田亜八香, 道村唯太, 穀山涉, 麻生洋一, 佐藤修一, 川村静児, 安東正樹, DECIGO pathfinder の FP 共振器を用いた高感度重力勾配計, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [31] 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 佐藤修一, 安東正樹, 川村静児, 坪野公夫, DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [32] 梶田隆章, 黒田和明, 中谷一郎, 大橋正健, 藤本真克, 川村静児, 斎藤芳男, 鈴木敏一, 坪野公夫, 三尾典克, 神田展行, 中村卓史, LCGT Collaboration, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XII, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [33] 岡田健志, 石徹白晃治, 高橋走, 坪野公夫, 安東正樹, 麻生洋一, 重力波検出器に用いる超伝導磁気浮上型ねじれ振り子の基礎特性研究 II, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [34] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 II, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [35] 石徹白晃治, 安東正樹, 高森昭光, 岡田健志, 高橋弘毅, 麻生洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナによる PSR J2144-3933 起源の重力波探索, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [36] 穀山涉, 麻生洋一, 坪野公夫, 高本将男, 香取秀俊, 低温ファイア共振器を用いた超高安定レーザーの開発, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [37] 高橋走, 松本伸之, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 子光学的手法を用いた重力波検出器の感度向上実験 II, 日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学, 岡山).
- [38] 高橋走, squeezed 光を用いた重力波検出器の感度向上実験, GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 3 回 RA キャンプ (2010 年 2 月, ヤマハリゾートつま恋).
- [39] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 若林野花 SWIM 搭載超小型重力波検出器の開発・運用第 10 回宇宙科学シンポジウム (2010 年 1 月 8 日, JAXA/ISAS).
- [40] 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 新谷昌人, 他, 小型重力波観測衛星 DPF と DECIGO, 第 10 回 宇宙科学シンポジウム (2010 年 1 月, 宇宙科学研究本部).
- [41] 坪野公夫, 衛星搭載型重力勾配計, DPF サイエンス検討会 (2009 年 11 月, 東京大学, 本郷).
- [42] 坪野公夫, 重力波プロジェクト成果報告, RESCUE 夏の学校 (2009 年 9 月, カルチャーリゾート・フェストナー, 沖繩).
- [43] 石徹白晃治, 安東正樹, 高森昭光, 岡田健志, 松本伸之, 坪野公夫, 磁気浮上を利用した低周波重力波検出器の開発 V, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [44] 岡田健志, 石徹白晃治, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫, 重力波検出器に用いる超伝導磁気浮上型ねじれ振り子の基礎特性研究, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [45] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 田中貴浩, 井岡邦仁, 高島健, 青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 市来浄與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田則夫, 小野里光司, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤 遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和太, 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, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 養泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 柳哲文, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (20): 設計・計画, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [46] 正田亜八香, 道村唯太, 穀山涉, 麻生洋一, 坪野公夫, 安東正樹, 新谷昌人, 佐藤修一, DECIGO pathfinder における試験マスモジュールの制御実験, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [47] 佐藤修一, 鳥居泰男, 若林野花, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 上田暁俊, 川村静児, 新谷昌人, 安東正樹, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 麻生洋一, 穀山涉, DECIGO pathfinder のための試験マスモジュールの開発 (3), 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [48] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 若林野花, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 VIII (軌道上運用), 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).

- [49] 黒田和明, 中谷一郎, 大橋正健, 藤本真克, 川村静児, 斎藤芳男, 鈴木敏一, 坪野公夫, 三尾典克, 神田展行, 中村卓史, LCGT Collaboration, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XI, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [50] 高橋走, 松本伸之, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 量子光学的手法を用いた重力波検出器の感度向上実験, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [51] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [52] 麻生洋一, Robert Ward, Rana Adhikari, Peter Kalmus, Lock Acquisition of a Dual Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer with DC Readout, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [53] 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 新谷昌人, 他, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (23) DECIGO パスファインダー, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 甲南大学, 兵庫).
- [54] 安東正樹, 穀山渉, 石徹白晃治, 森脇成典, 新谷昌人, 高橋走, 麻生洋一, 湯浅孝行, 中澤知洋, 高島健, 高橋忠幸: SWIM に搭載した大学発の宇宙実験モジュール (SWIM <sub>$\mu\nu$</sub> ) 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (2009 年 5 月 29 日, JAXA 筑波宇宙センター)

## 招待講演

- [55] 坪野公夫, 重力波を求めて, 「天地人 - 三才の世界」第 3 回研究会 (2009 年 8 月, 国際高等研, 京都).
- [56] 安東 正樹 他 DECIGO グループ, 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO と DPF, UNISEC 講演会 (2009 年 7 月, 東京大学).

## (セミナー)

- [57] Wataru Kokuyama and Kenji Numata: Iodine Wavemeter for LISA, LISA Frequency Control Working Group Meeting (Dec.8, 2009, California Institute of Technology).
- [58] 安東 正樹, 重力逆二乗則の検証実験, KEK 宇宙物理理論・実験合同セミナー (2009 年 5 月, 高エネルギー加速器研究機構).

## 6 暗黒物質・太陽アクシオン直接検出

——神岡鉱山における暗黒物質探索——  
( 菘輪・井上 )

### 6.1 菘輪 研究室

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

#### 6.1.1 原子炉ニュートリノモニター

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

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

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

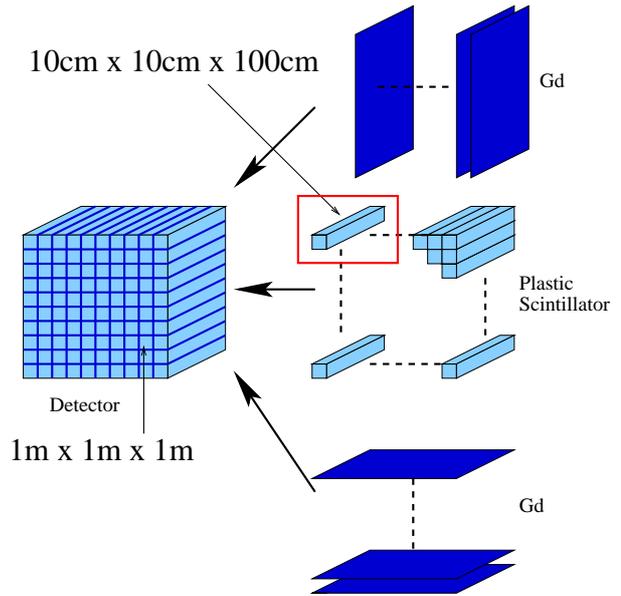


図 6.1: 検出器のおおまかな構造

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

検出器は、図 6.1 に示すように、100 本の  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 100\text{cm}$  の大きさの棒状プラスチックシンチレータの間にガドリニウムを含有する膜を挟むという構造を計画している。その重さは約 1 トンと比較的軽量であり、また有機液体シンチレータよりも燃えにくいプラスチックシンチレータを用いるという特徴により、原子力発電所敷地内に持ち込むための障害が少ないと考えられる。

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



図 6.2: 小型反電子ニュートリノ検出器の試作器

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

年度後半については、予備実験用の試作器としてプラスチックシンチレータ 16 本を用いた検出器 (図 6.2) を作成し、実験室環境におけるバックグラウンド測定を行った。これにより、適当なイベントセレクションをオフラインで適用することにより大型の商業用原子炉の近傍で測定を行うと予備実験用の試作機を用いて、原子炉のオンオフに伴うニュートリノの有無が測定できるという見積もりを立てた。

### 6.1.2 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験

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

我々は太陽由来のアクシオンを捉えるために、高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角  $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。Sumico と名づけられたこの装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆ブリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン

由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクシオンの質量として  $m_a < 0.27$  eV、 $0.84$  eV  $< m_a < 1.00$  eV という範囲でアクシオンと光子の結合定数に対して  $g_{a\gamma\gamma} < 5.6\text{--}13.4 \times 10^{-10}$  GeV $^{-1}$  という上限値を得ることに成功している (図 6.3)。

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

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

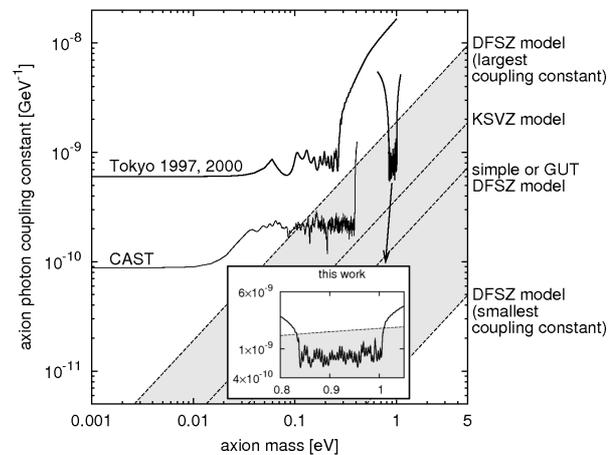


図 6.3: 太陽アクシオンに対する制限

### 6.1.3 太陽 Hidden photon 探索実験

Hidden Photon は素粒子物理学の諸問題を解決するための標準模型の拡張において存在が予言されている粒子である。Hidden Photon は物質とは直接相互作用しないが、真空領域の長さ ( $l$ )、Hidden Photon の質量 ( $m_{\gamma'}$ )、Hidden Photon と光子の混合角 ( $\chi$ )、エネルギー ( $\omega$ ) に依存したある確率で光子に転換さ

れる性質を持つ。Hidden Photon は存在すればクーロン力の逆二乗則、星の進化、初期宇宙モデル等に対して修正が加えられることになるが、観測結果と矛盾しないことを要請することにより  $\chi$ - $m_{\gamma'}$  plot に対して制限がつけられてきた。また、光子が Hidden Photon に転換し、壁を通過した後光子に再転換されるイベントを探索する実験、CERN の CAST (CERN Axion Solar Telescope) グループによる太陽由来のエネルギー keV 領域の Hidden Photon 探索実験等により、 $\chi$ - $m_{\gamma'}$  plot に対して制限がつけられてきた (図 6.4 参照)。

Hidden Photon はまだ実験的に存在が確認されおらず、我々は Hidden Photon を実験的に探索すること、特に太陽で生成され地球に降り注ぐ Hidden Photon を地上で直接検出することを研究テーマの一つとしている。

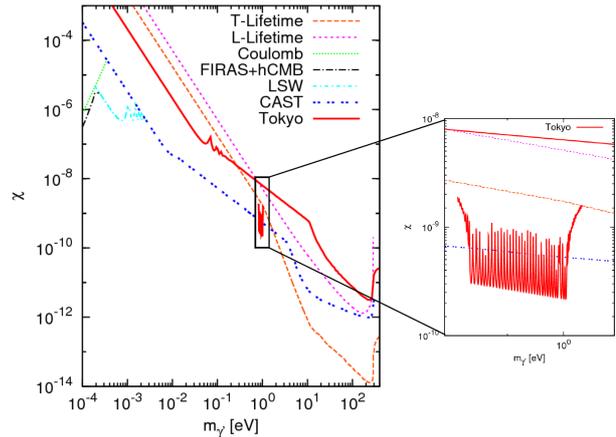


図 6.4: Exclusion Plot の見積り結果 (実線)

### 太陽アクシオン探索実験結果から Hidden Photon の性質につけられる limit の考察

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

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

結果は図 6.4 の実線のとおりである。各線はさまざまな実験、理論的考察によりつけられた上限値を表す。図のとおり、質量 0.841~1.004eV においてもっとも厳しい制限をつけられたという結論が得られた。今回の解析は簡易的なものであり厳密な解析結果ではないが、今後、より高質量の太陽アクシオンの探索実験を行っていく際に既存の実験結果と合わせて Hidden Photon 向けのより厳密な解析を行っていく予定である。

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

太陽 Hidden Photon は keV 領域のエネルギーだけでなく、eV 領域のエネルギーのものも大量に生成され、地上に降り注いでいると考えられる。そこで我々は、太陽由来のエネルギー数 eV の Hidden Photon の探索実験を新たに行うことを検討し、測定のための準備を行ってきた。測定を行うには太陽を追尾する必要があるが、その手法として Sumico に新たに開発する Hidden Photon 探索用装置を搭載して測定することを考えている。Hidden Photon 探索用装置は、Hidden Photon から光子への転換領域となる真空容器 (直径 567mm、長さ 1200mm)、転換光子を集光する放物面鏡 (焦点距離 1007mm、直径 490mm)、集光された光を検出する光電子増倍管 (R3550P, Hamamatsu) 等の部品から成る。これらの各構成要素の仕様は、実験結果の見積りを元に決定した。そして実際に各部品の製作、組立てを行い実験装置本体を製作した (図 6.5 参照)。今後、本実験装置を Sumico に設置し、 $10^6$ s 程度の太陽追尾測定を行う予定である。本実験により Hidden Photon 質量  $\mathcal{O}(\text{meV})$  において世界でもっとも感度の高い測定結果を目指している。

#### 6.1.4 暗黒物質探索検出器の開発

##### CaF<sub>2</sub>(Eu) による暗黒物質探索検出器の開発

以前我々は、CaF<sub>2</sub>(Eu) シンチレータを用いたニュートラリーノ探索実験を行った。このシンチレータは、ニュートラリーノと相互作用する核子として <sup>19</sup>F を含んでおり、スピンの依存した (SD, spin dependent) 相互作用に大きな感度を持つ。我々が 2005 年に出した散乱断面積に対する制限は、当時世界最高水準にあり、今後の性能向上の結果次第で、さらに高感度を狙える可能性を持っている。



図 6.5: Hidden Photon 探索実験装置の写真

現在研究しているのは、入射粒子の識別によるバックグラウンド除去である。ニュートラリーノ由来のシグナルの見えない現状では、バックグラウンドを下げる以外に暗黒物質を発見することはできない。我々は、2005年の実験のバックグラウンドは、検出器内外からの $\gamma$ 線であると推測し、 $\gamma$ 線による電子反跳イベントと、ニュートラリーノなどによる原子核反跳イベントを識別する方法を、模索している。

識別手法の一つとして、波形識別を試みた。波形識別はシンチレーション光の減衰時定数を用いて識別する方法であり、他のグループでも、さかんに行われている手法である。CaF<sub>2</sub>(Eu)の波形識別の研究は1998年にすでに行われており、低エネルギー領域( $\sim 30\text{keVee}$ )では、原子核反跳と電子反跳の差異はほとんど無いとの結果が出ている。しかし、より厳密に測定、統計的処理を行った結果、我々は原子核反跳と電子反跳での減衰時定数の差異を発見した。ただその差異は、暗黒物質探索に十分使えるほど大きいものではなかった。

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

#### 液体シンチレータによる暗黒物質探索検出時の開発

CaF<sub>2</sub>(Eu)シンチレータと並行して、液体シンチレータによる暗黒物質探索についても模索している。液体シンチレータは、測定中の純化(放射性同位体の除去)が可能であり、また大型化も容易に行えるため、暗黒物質探索では非常に有利である。暗黒物質を直接捉えるターゲットは、CaF<sub>2</sub>(Eu)と同じくフッ

素原子核である。現在、フッ素原子核を含む発光量の多い液体シンチレータを開発している。

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

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

< 報文 >

(原著論文)

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

(会議抄録)

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

(国内雑誌)

- [7] 秋本祐希、蓑輪 眞: 太陽アクシオンの探索, 日本物理学会誌, Vol. 65, 2010 年 1 月号 25 – 29.
- (学位論文)
- [8] 黒田康浩: 原子炉モニタリングを目的とした小型反電子ニュートリノ検出器の開発、平成 22 年 3 月修士(理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [9] Ryosuke Ohta: Prospects of search for solar axions with mass over 1eV and hidden sector photons, 5th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, University of Durham, England, 13–17 July 2009.
- 招待講演
- [10] Makoto Minowa: Tokyo Axion Helioscope, Axions 2010, Gainesville, Florida January 14 – 17, 2010.
- (国内会議)
- 一般講演
- [11] 蓑輪 眞: 暗黒物質の探索、多摩泌尿器科医会第 100 回記念大会、京王プラザホテル、2009 年 7 月 4 日 .
- [12] 井上慶純: アクシオンヘリオスコープ実験、RESCEU・DENET 共催夏の研究会・サマースクール、「第 9 回宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会・‘Dark Energy in the Universe’ サマースクール、沖縄県宜野湾市 カルチャーリゾート・フェストーネ、2009 年 8 月 31 日 .
- [13] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクシオン探索、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [14] 水本哲矢: 太陽アクシオン探索実験結果を用いた Hidden Photon 探索の考察、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [15] 小栗秀悟: フッ素入り液体シンチレータによる素粒子放射線検出器の開発、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [16] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器のための予備実験用測定器について、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学 2009 年 9 月 13 日.
- [17] 小栗秀悟: 暗黒物質探索のためのフッ素入り液体シンチレータの研究、研究会「電離及びシンチレーション検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用」、早稲田大学 2009 年 9 月 18 日.
- [18] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器“PANDA”の開発、第 16 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2010 年 2 月 15 日.
- [19] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon 探索実験の現状報告、GCOE「未来を拓く物理学 結集教育研究拠点」第 3 回 RA キャンプ、静岡県掛川市ヤマハリゾートつま恋 2010 年 2 月 20 日.
- [20] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクシオン探索、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 23 日.
- [21] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索実験、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 23 日.
- [22] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) のための予備実験 (1)、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 20 日.
- [23] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) のための予備実験 (2)、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 20 日.

## 7 飛翔体を用いた宇宙観測

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

### 7.1 衛星によるX線・線観測

#### 7.1.1 科学衛星の運用と稼働状況

##### ○ 宇宙X線衛星「すざく」

2005年7月10日に打ち上げられた宇宙X線衛星「すざく」は、観測の4年目に入り、搭載されたX線CCDカメラ(XIS; X-ray Imaging Spectrometer)と硬X線検出器(HXD; Hard X-ray Detector)は、順調に稼働を続けている。我々は本年度も、ビッグバン宇宙国際研究センターおよび物理学教室において、衛星および硬X線検出器(HXD)の運用を支援するとともに、HXDの軌道上較正をさらに進めた。山田、鳥井らは、HXDの高エネルギー部を受け持つGSOシンチレータのエネルギー較正を改良し、全世界の「すざく」ユーザー向けに情報を公開した。

図7.1は、「すざく」で観測された、さまざまな種類の宇宙X線源のスペクトルを、 $\nu F\nu$ 形式で示したものである。このように2.5桁に及ぶ「すざく」の広い帯域は、X線源の示す多彩な物理学を理解する上で、かつてない優れた手段を提供してくれる。

我々は2009年6月29日~7月2日、北海道小樽市において、「すざく」の成果を次期衛星ASTRO-Hに繋げるべく、第3回「すざく」国際会議“The Energetic Cosmos: from *Suzaku* to *ASTRO-H*”を開催した。これは物理学教室、ビッグバン宇宙国際研究センター、理研基幹研究所など共催で、牧島は組織委員長、中澤は開催地委員長を務めた。図7.2に示すように、外国人およそ90名を含め、全体で260名を超える参加者があり、日本の宇宙X線研究の国際的な求心力の高さを示すことができた。詳細は、<http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/SuzakuConference2009/>を参照して欲しい。

HXDの外周シールド部(HXD-WAM)は、ガンマ線バーストや太陽フレアの検出器となる。2009年7月9日に受けたガンマ線バーストGRB090709Aでは、信号に周期8.06秒の周期性が見られ、釜江名誉教授、埼玉大、青学大などと協力して、その有意性の解析を進めた[146]。

##### ○ フェルミガンマ線宇宙望遠鏡

米日伊などの共同で開発され、2008年6月11日に打ち上げられた、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡は、20 MeV-300 GeV帯で高感度の全天サーベイを続

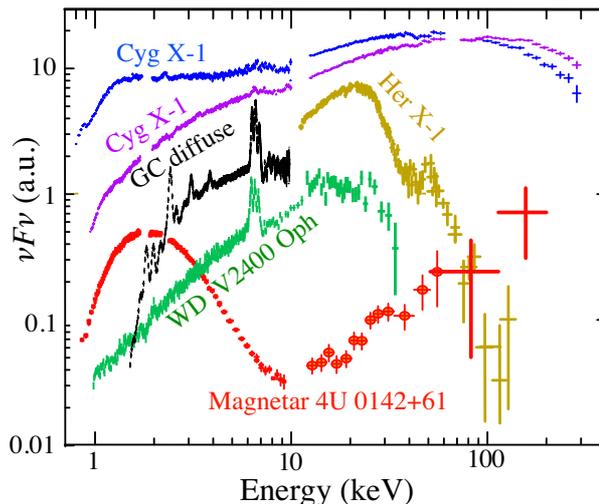


図 7.1: Broad-band  $\nu F\nu$  spectra of some cosmic X-ray sources obtained with *Suzaku*. Cyg X-1 is a prototypical black-hole binary with a Comptonized hard continuum, Her X-1 is a binary X-ray pulsar exhibiting an electron cyclotron absorption at  $\sim 40$  keV, V2400 Oph is an accreting magnetized white dwarf, and 4U 0142+61 is a magnetar having a magnetic field of  $\sim 10^{14}$  G. The Galactic-Center diffuse emission exhibit emission lines from highly ionized heavy elements.

け、多彩な成果を導出している。なかでも、オリオン分子雲 (§7.1.4)をはじめとする分子雲や星間ガス[14, 18, 24, 118]、地球大気[25]、さらにはW51CやCas Aなどの超新星残骸[16, 17]などから、 $\pi^0$ 崩壊ガンマ線を検出しつつある。これは宇宙線ハドロン成分の貴重な情報源であり、宇宙線物理学に画期的な進展がもたらされつつある。

##### ○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image; 全天X線監視装置)は、理研、JAXA、東工大、青学大、日大などにより開発されたX線観測装置で、2009年7月16日、スペースシャトルにより打ち上げられ、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の



図 7.2: A get-together photo of the 3rd *Suzaku* conference held at Otaru, on 2009 June 29 - July 2.

曝露部に搭載された。MAXIは、12台の大型比例計数管や、単一光子モードの国産X線CCDを搭載し、宇宙ステーションの地球周回を利用して、2–30 keVのエネルギー範囲で全天のスカンを行なう。我々はMAXIプロジェクトに直接には関与していないが、MAXIがX線新星の出現や既知X線源の増光を検知した場合、その天体を「すざく」により速やかに緊急観測できるよう、連携を推進している。

### 7.1.2 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、静止質量エネルギーの $\sim 10\%$ が外界に放射される。そのため降着物質は、 $\sim 0.01$  keV から $\sim 100$  MeVまで、広範囲なエネルギーをもつことができ、その放射は光子エネルギーにして5桁以上にもわたる。図7.1のCyg X-1に見られるように、「すざく」の広帯域は、これらの天体の研究に圧倒的な強みを発揮する。

#### ○ 恒星質量ブラックホール

我々は質量降着する恒星質量BHを広範囲に研究している[46, 89, 113]。鳥井、山田らは、「すざく」で16回にわたり観測されたCyg X-1の広帯域スペクトル(図7.1参照)や短時間(0.01~10秒)の変動を統一的に解析した結果、Low/Hard状態の中でも質量降着率が増加するにつれ、(i)硬X線スペクトルを熱的Compton放射で記述する $y$ -パラメータが減少し、(ii)反射体の立体角が増加し、(iii)短時間変動の相対振幅が減り、かつ(iv)変動の特徴的な周波数が高くなることを見出した[112, 134]。これは降着率の増大にともない、Comptonコロナがより小さくなるとともに、光学的に厚い降着円盤がその中に、より深く侵入する結果と解釈でき、画期的な成果である。

スペクトルの6–7 keVに見られる鉄 $K_{\alpha}$ 線は、しばしば広がっており、BH直近での、特殊相対論および一般相対論の効果と解釈できる。諸外国の一部の理論家は、この相対論的效果がきわめて大きく、降着円盤は非回転BHまわりの最終安定軌道 $3R_S$ ( $R_S$ はSchwarzschild半径)より内側まで存在しており、よって多くのBHは極端KerrBHであると論じている。しかし我々は「すざく」データを注意深く再解析し、こうした結論は連続成分の選び方に強く依存するものとして、世界的に注意を喚起している[15, 51, 78, 46, 73, 113]。

山田らは、ソフト状態で観測される光学的に厚い降着円盤からの放射を、改良された理論モデルと詳細に比較している[113, 143]。理研のGandhiらとの共同研究では、GX 339–4からの速い( $< 0.1$ 秒)可視光の変動を、昨年度に引き続き解析した[47]。

#### ○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大BHにガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。一部のセイファート銀河では、鉄の $K_{\alpha}$ 線が異常に幅広く、恒星質量BHの場合と同様、それらは極端KerrBHであると論じられてきた。しかし現状では、観測データからこの解釈が一意的に導かれるとは言い難い。そこで野田ら

は、昨年度の上原らに引き続き、「すざく」で得たセイファート銀河MCG–6–30–15のデータをさらに解析した。その結果、スペクトルの20–40 keV付近に、連続成分と独立に強度変動する成分があること、それは光学的厚みの大( $\sim 10$ )な熱的Compton放射と考えられること、この成分の存在を考えると、時間平均スペクトルに寄与する冷たい物質での反射は弱くなり、かつ鉄輝線の広がりも減少することを示した[52, 79, 89, 46, 114, 132]。よって、このAGNをKerr BHと断じる証拠は、不十分と結論される。

#### ○ ULX天体

近傍銀河に見られるULX天体(Ultra-Luminous X-ray Sources)は、恒星質量BHと巨大BHの間を結ぶ、「中質量BH」の候補として注目されている。我々は京大の磯部らと協力し、「すざく」によりULX天体を観測し、ULXと恒星質量BHの類似性を強化した[48, 115]。カリフォルニア大学バークレイ校から、学振Pre-Docとして来日したDiane Wongが、可視光によるULXの研究を行なった。NGC 6946にあるULXをハッブル宇宙望遠鏡で観測した結果、紫外線光度もひじょうに高く、この天体の放射は強い異方性をもたないことが判明した[21, 50, 76]。

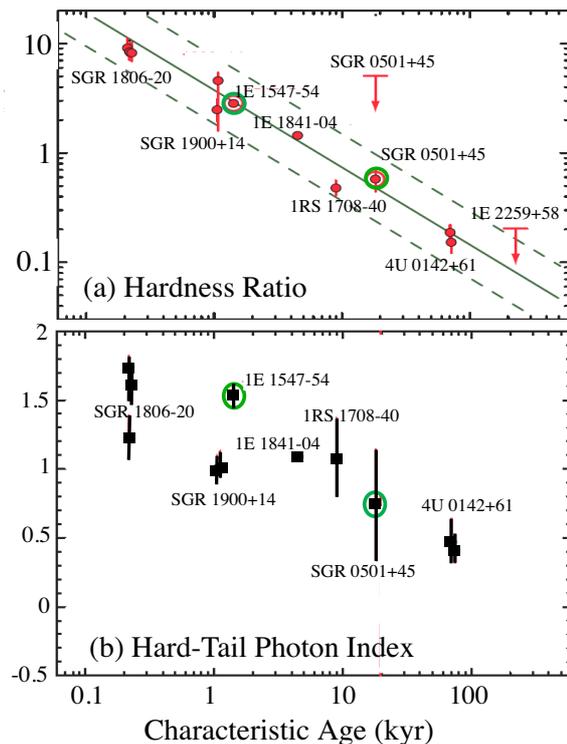


図 7.3: Strong dependences of wide-band spectral properties of magnetars on their characteristic age, revealed with *Suzaku* observations [72]. Two objects with green circles were observed in their activity, while the others in their quiescence. (a) Hardness ratio, defined as the 1–60 keV flux of the hard component divided by the 1–20 keV flux of the soft component. (b) The photon index of the hard component.

### 7.1.3 強磁場コンパクト天体の研究

#### ○ マグネター天体

銀河系内にあるX線パルサーのうち15個ほどは、 $10^{14-15}$  Gの超強磁場をもつ特殊な中性子星「マグネター」で、磁気エネルギーを消費してX線を放射していると考えられる。榎戸、牧島、理研の中川らは、*INTEGRAL*衛星の先駆的な成果に触発され、「すざく」によるマグネターの広帯域観測を進めている。

2008年8月22日に出現した新マグネターSGR 0501+4516からは、昨年度の第一報に続き、活動期の定常放射にも顕著なハード成分を検出することに成功した[20]。同様なハード成分は、弱いバーストを重ね合わせたスペクトルにも存在する[103, 145]。これらと酷似した結果は、2009年1月に活動期に入ったマグネター1E1547.0-5408からも得られた[8, 116, 133]。「すざく」第4期公募観測(2009年度)には、キープロジェクトの1つとして「マグネター大研究」が採択され、470 ksecの観測が行なわれた。

こうした新しい観測結果をまとめると、マグネターに関して以下の新しい描像が明らかになった[45, 117, 154, 133, 144, 155, 157]。

1. 図7.1の4U 0142+61に代表されるように、マグネターは普遍的に、ソフト成分とハード成分からなるスペクトルを示す。
2. この2成分特性は、バースト放射にも見られる。
3. バースト活動期には、両成分がほぼ足並みを揃えて光度増加を示す。
4. 図7.3aに示すように、ハード成分とソフト成分のフラックス比は、特性年齢と強く相関し、年齢とともにハード成分が弱くなる。
5. 定常放射のハード成分は異常に硬い光子指数をもち、しかも加齢につれ硬くなる(図7.3a)。

これらのうち、定常放射に関する部分は、榎戸輝博の博士学位論文となった[72, 41, 75, 91, 92, 144, 156]。奇妙なハード成分は、電子陽電子対消滅線が、強い磁場中で「光子分裂」した結果かもしれない。

#### ○ 降着型X線パルサー

降着型パルサーは、中性子星に相手の星からガスが降着することでX線を放射し、それらのX線スペクトル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、中性子星の磁場計測の切り札となる。牧島らは、理研、埼玉大などと協力し、その研究を続行した[19, 40]。再帰型Beトランジェント天体X0331+53が明るくなったことを、MAXIが捕えたので、2010年2月16日に「すざく」による緊急観測を実施した。牧島は、中性子星の磁場が、中性子の核磁気モーメント整列による強磁性の発現である可能性を論じている[140]。中澤らは引き続き、連星パルサーHer X-1からの不規則なdip現象の研究を進め、成果を発表した[45, 74]。

#### ○ 強磁場の白色わい星と広がった銀河系X線放射

白色わい星の一部は、 $10^{6-7}$  Gの強磁場をもつ。我々はこれまで埼玉大などと協力し、高速自転する強磁場白色わい星AE Aqrを「すざく」で観測し、粒子加速の徴候を発見した。今年度は埼玉大などと協

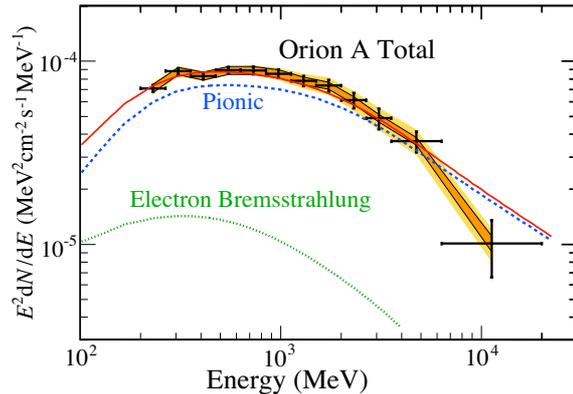


図7.4: A spectrum (multiplied by the energy squared) of diffuse gamma-ray emission associated with the Orion A molecular cloud, observed with the LAT instrument onboard the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope. The dashed blue line shows a prediction for a  $\pi^0$  decay component, assuming a cosmic-ray spectrum close to that in the Solar vicinity, and the Orion A mass estimated using radio observations [71]. The dotted green line is an estimated electron Bremsstrahlung contribution, while the red one is the predicted total emission.

力し、「すざく」で、この種の天体のプロトタイプと考えられるAM Herを観測した結果、やはり非熱的な放射の徴候をえることができた[42, 42, 110, 138]

### 7.1.4 星間空間における高エネルギー現象

#### ○ 星間分子雲からのGeVガンマ線

宇宙では、加速された陽子が標的陽子に衝突するさい $\pi^0$ 粒子が作られ、その崩壊でエネルギー70 MeV以上のガンマ線が生成する。それを検出することは、宇宙線ハドロン成分の分布や生成を光子により知る、ほとんど唯一の方法で、フェルミ衛星の大きな目的の1つでもある。奥村、釜江名誉教授らはフェルミの初期データを用い、オリオン分子雲からの広がったガンマ線を解析した。その結果この放射は、図7.4に示すように、宇宙線が分子雲と衝突して作られる $\pi^0$ 粒子が崩壊したものとして説明できること、また電波観測から推定した分子雲の質量を仮定すると、オリオン領域での宇宙線強度は、太陽系近傍のものと $\sim 20\%$ 以内で一致することが、明らかになった。太陽系近傍から隔たった場所で、宇宙線強度が測定されたのは、初めてである。逆に、宇宙線強度を仮定して良い場合は、ガンマ線強度から、標的分子雲の質量を推定できることになる。これらの成果は奥村暁の博士学位論文となった[71, 66, 104, 148, 159]。

#### ○ 強磁場の白色わい星と広がった銀河系X線放射

湯浅らは、質量降着する強磁場白色わい星を研究している。これらの天体では、降着物質が白色わい星の磁極に降着するさい衝撃波加熱され、図7.1のように、高温の熱的制動放射と3本の鉄輝線が放射される。そこで硬X線連続成分の折れ曲がり、鉄ラ

イン強度比を同時に評価することで、衝撃波の温度が精度よく決定でき、そこから個々の白色わい星の質量と半径の比を決定できる。これを白色わい星の理論的な質量-半径関係と組み合わせることで、個々の白色わい星の質量が推定可能となる。「すざく」で得た17個の激変星の広帯域スペクトルを解析した結果、それらの質量は  $0.4 \sim 1.3 M_{\odot}$  に分布し、平均値は  $0.88 M_{\odot}$  と求められた [43, 77, 111, 147]。

このテーマは、我々の銀河面、バルジ、銀河中心などを満たす、広がったX線放射にも、深く関係する。これら広がった放射のスペクトルは、Si や S の電離輝線を伴う低温の熱的放射、強い3本の鉄輝線を伴う高温熱的放射、および光子指数  $2 \sim 3$  の硬い連続成分から成る。これが星間空間での真にディフューズな放射なのか [2, 3]、多数の点源の集まりなのか、熱い議論が続いている。点源の候補として最有力なのが、上述の白色わい星である。今後、「すざく」で得た白色わい星の平均スペクトルが、広がったX線放射の硬Xスペクトルや表面輝度をどこまで説明できるか、見極めてゆきたい。

#### ○ 超新星残骸の観測

理研の玉川、早藤、山口、平賀らと協力し、超新星残骸の研究を継続した。チコ・ブラーエの残骸では、非熱的な硬X線放射に加え、弱電離したCrとMnの特性X線を検出することに成功した。また膨張のドップラー効果に起因すると思われる鉄輝線の広がりを検出し、Feに比べSiやSが外側に分布する「玉ねぎ構造」の徴候を得た [32]。

#### ○ 渦巻き銀河の星間ガスの化学組成比

理研の小波らと協力し、「すざく」で観測した渦巻き銀河 NGC 4258、NGC 1316、NGC 3079 などのデータを解析し、O、Mg、Ne、Si、S、Feなどの電離輝線の強度から、高温星間ガスの化学組成の推定を行なった。その結果、渦巻き銀河 NGC 4258 だけでなく、S0 銀河 NGC 1316 でも、化学組成比率は我々の銀河系でのものに近いことがわかった [1, 39]。

### 7.1.5 銀河団および銀河群の研究

#### ○ 非熱的硬X線と超高温成分

昨年度の Abell 3667 に続き、かみのけ座銀河団の「すざく」データを、米国バージニア大学、山形大学などと協力して解析し、非熱的な硬X線放射に厳しい上限をつけることができた [11, 33]。同様に Abell 2199 では、理研との協力により、低エネルギーと高エネルギーでの非熱的な超過成分が、どちらも存在しないことを確認した [7]。これらの結果により、銀河団からの非熱的放射の有無に関しては、従来から論争となっていた強度レベルでは、存在しないことが明らかとなって来た。「いくつかの銀河団では、シンクロトロン電波に比べコンプトン硬X線が異常に強く、平均磁場は  $0.1 \mu\text{G}$  となる」という結果はほぼ否定され、電波の偏光面の観測から推定される  $\sim \mu\text{G}$  レベルの磁場と矛盾のない描像が確立しつつある。

中澤らは昨年度、衝突銀河団 Abell 3667 銀河団から、予期しない超高温の熱的成分を発見した [33]。そこで中島らは「すざく」で得た、みなみのさんかく座銀河団のスペクトルを解析した。形状が対称でなく、高温で質量も大きいため、多くの衝突を経験しているはずであるが、銀河団プラズマは  $\sim 9.5 \text{ keV}$  とほぼ等温であり、超高温成分の担う光度は、全体の7%以下であることがわかった [121]。これは、銀河団どうしの合体で生成された超高温成分が、どのような時間スケールで冷却・散逸するかを教えてくれる結果である。山形大と協力して観測して、別の近傍の高温銀河団 Abell 2319 でも同様の結果を得ており、超高温成分は衝突の途中のごく短時間に現れるものであるというシミュレーションの結果と、定性的に一致している [5, 36]。

#### ○ 銀河団の周辺の研究

理研の川原田らと協力し、Abell 1689 銀河団 ( $z = 0.183$ ) の「すざく」データを解析した。X線放射は、ピリアル半径付近まで検出され、大規模構造のフィラメントに接する方向では、プラズマ温度が高く、ポイドに接する部分では、温度が低いことを発見した [37, 120]。これは大規模構造の中で、銀河団の成長してきた痕跡と解釈され、注目される。

山形大と協力して、弱重力レンズ効果で発見された銀河団のX線対観測も実施し、ZwCl0823.2+0425 領域の4つのダークマターハロー候補のうち、3つから銀河団X線で検出した。鉄輝線からこの領域に  $z=0.22$  と  $0.47$  の2つの大規模構造フィラメントがあることを確認した [53]。

#### ○ 磁気流体的な描像

牧島らは10年来のX線観測にもとづき、銀河団の磁気流体的な描像を追求している。今年度は、XMM-Newton 衛星で観測した、ケンタウルス座銀河団に関する結果を、理研の川原田らの協力により出版することができた [12]。すなわちこの銀河団の中心付近では、高温 ( $\sim 3.8 \text{ keV}$ ) と低温 ( $\sim 1.9 \text{ keV}$ ) のプラズマが共存していることが、観測から明らかになった。これは中心銀河の磁気圏に低温プラズマが閉じ込められているという、牧島の提唱する「中心銀河コロナ」の描像を支持するものである。低温領域は、細い磁気ループに閉じ込められていることから、太陽コロナで知られた Rosner-Tucker-Viana 機構により、熱的に安定化されていると想像される [12]。

我々の磁気流体的な描像によれば、銀河団のメンバー銀河が高温プラズマ中を運動するさい、銀河は抵抗を受けて中心に落下し、プラズマは加熱されると考えられる。この落下の証拠を探るため今年度は、理研の稲田、小波、川原田らと協力し、近傍から遠方までの銀河団に対し、可視光で決めた銀河団のメンバー銀河の空間分布と、X線で求めた高温プラズマの空間分布を比較し、その相対関係がどう進化するか研究を進めた [54]。

7.1.6 雷活動に伴う静電加速現象の研究

我々は 2006 年度より、宇宙での電場加速の手掛かりを得るため、榎戸、湯浅、山田、鳥井らを中心に理研の土屋らと協力し、新潟県柏崎刈羽原子力発電所にて、冬期雷雲からのガンマ線を探査する GROWTH (Gamma-Ray Observations of Winter THunder clouds) 実験を行なっている [88, 102]。今年度の冬には、新たに 2 例が検出され、まとめると表 7.1 a によるになる。ここには 2008 年夏に、乗鞍山山頂で行なった実験の結果も含めた [23]。

このように雷活動に付随する放射線の発生には、大別すると、短い (< 1 秒) イベントと長い (1-2 分) ものがあり、前者のみが落雷に同期する。ガンマ線のスペクトルはどの例でも、~ 10 MeV まで延びるので、電子が 20 MeV 程度まで加速されていることは疑いない。ガンマ線に加え電子も検出される場合があり、その場合は発生源の距離が、20 MeV 電子の飛程 (大気中では ~ 100 m) より近いと考えられる。

長いイベントは、雷雲そのものに付随すると考えられる。雷雲内部で、鉛直方向に強い静電場が発達すると、宇宙線などで高エネルギーの種電子が作られた場合、それらはイオン化でエネルギーを損失より早く電場により加速されうる (逃走電子加速)。電子は制動放射を出し、それは相対論的效果により、前方に鋭くビームする。このビームが検出器を掃くとき、ガンマ線が検出されると考えられる。

表 7.1 a: List of radiation bursts from thunderclouds.

場所	日時 (JST)	継続 (秒)	線	電子 *
柏崎	07/01/07 06:43	40	あり	なし
柏崎	07/12/14 01:59	110	あり	なし
乗鞍	08/09/21 00:45	90	あり	あり
乗鞍	08/09/21 11:01	< 1	—	—
乗鞍	08/09/21 23:15	< 1	—	—
乗鞍	08/09/21 23:20	< 1	—	—
柏崎	08/12/23 14:48	0.2-0.4	あり	あり
柏崎	08/12/25 18:29	110	あり	なし
柏崎	09/01/13 05:30	< 1	あり	あり
柏崎	09/01/25 22:32	137	あり	なし
柏崎	09/02/11 19:40	12	あり	なし
柏崎	10/01/08 07:02	90	あり	不明
柏崎	10/01/08 16:53	60	あり	不明

\* もしくは高エネルギーのガンマ線

7.1.7 ASTRO-H 衛星計画

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は 2014 年の打ち上げを目指して開発の進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、長さ 14 m、重さ 2.5 t と日本最大の科学衛星である。この衛星は、X 線マイクロカロリメータを搭載して、6 keV の X 線に対して、4-7 eV という世界最高精度の分光能力を持ち、多数の天体のドップラー速度を測定できると同時に、5-80 keV で分角の撮像分

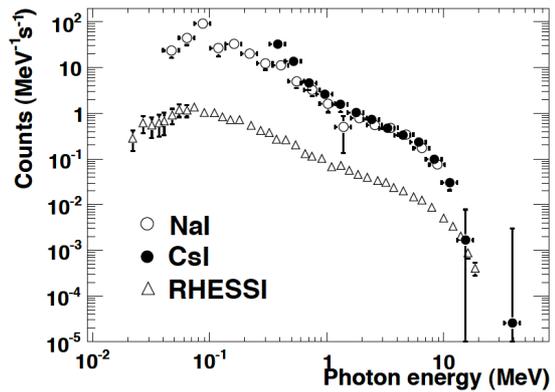


図 7.5: Spectra of gamma-ray bursts from winter thunder clouds (open and filled circles), summed over three events detected with the GROWTH experiment. Open triangles show an average spectrum of Terrestrial Gamma-Ray Flashes, detected with the solar satellite RHESSI.

光を行う硬 X 線イメージャ (HXI) を 2 台搭載し、厚いガスに隠された天体に高い感度を持つ。この他に、広視野 X 線 CCD カメラ 1 台と、60-600 keV で最高感度の観測を行う軟ガンマ線検出器 SGD が 2 台搭載される。このように広帯域、高感度、高精度での分光観測を得意とし、天体における高エネルギー物理現象の理解を大きく進めるツールである。本センターでは、JAXA 等と共同で HXI と SGD の開発を進めており、また平賀らが CCD カメラの開発を担当している。アメリカ、フランスとも協力している。

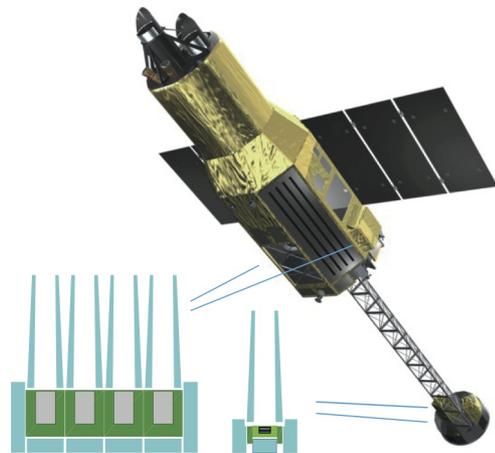


図 7.6: Drawing of the ASTRO-H satellite, to be launched into orbit on 2014. Overall length is 14 m, weight is 2.5 t. Also plotted to the left are the cross section view of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Pairs of each detector are mounted.

○ HXI 装置と SGD 装置

HXI は、硬 X 線望遠鏡 (HXT) の焦点面検出器であり、5-70 keV の帯域を 9 分角の視野、1.7 分角の分解能で撮像し、1.5 keV の精度で分光する。HXT

は名古屋大学が中心となって開発している、新しい多層膜スーパーミラー技術を用いている。集光撮像により、既存の検出器と比較して、2桁の感度向上が見込まれる。星間物質により強い吸収を受けた天体など、現在は見ることのできない、新しい天体現象に迫る。HXIは、井戸型に組み上げたBGOシンチレータを用い、反同時計数により低バックグラウンド環境を実現し、4段の両面シリコンストリップ検出器と1段の両面CdTeストリップ検出器を重ねたイメージャーを用いる。BGOは、約4 cm厚で9ユニットに分割される(図7.6)。

SGDは、それ自体が数度の角度分解能を持つ半導体コンプトンカメラを、10度以下まで視野を絞った井戸型のBGOシンチレータの内側に置く。金属製のファインコリメータにより、150 keV以下では視野を1度以下に絞っている。反同時計数に加え、2種の角度制限の一致という、2重のバックグラウンド除去を行い、60–600 keVまでの感度をこれまでより一桁上げ、巨大ブラックホールや、衝突銀河団からの硬X線信号を100 keVより上でとらえることができる。半導体コンプトンカメラは、32層のシリコンパッド検出器と、8層のCdTeパッド検出器、および側面を囲む2層のCdTeパッド検出器で構成される。BGOは、約3 cm厚で、30ユニットに分割される(図7.6)。

#### ○ 2009年度の全体計画の進捗

2014年の打ち上げへ向けて、装置開発は佳境にさしかかっている。2009年度は、個々の要素技術の実験、および熱、構造、電気的な検討を進めて、検出器の具体的な設計を行い、Preliminary Design Review (PDR: 2009年2月~4月)でその妥当性を確認している。世界の代表的な硬X線、ガンマ線の専門家の意見もおおげ、設計上の課題を特定し、対応策を決定した。PDRが2009年4月末に無事終了すれば、2010年度は、衛星搭載品と基本的に同じ設計の試作機の製造へ移行する。2010年度末に予定される、Critical Design Review (CDR)で、衛星搭載品の最終製造図面が確定する。

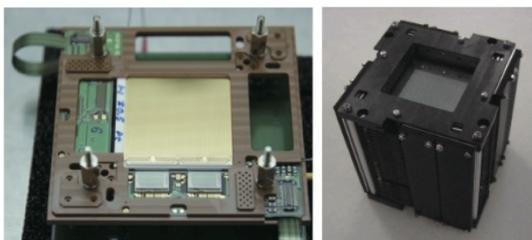


図 7.7: (left) HXI CdTe imager bread-board model, and (right) SGD Si-CdTe Compton Camera mechanical model.

#### ○ HXI用の軌道上ゲイン較正システムの基礎試験

HXI イメージャ部の各読み出しチャンネルの軌道上でのゲインのモニターは、原則として電気的なテストパルスに依存するが、ガンマ線信号を用いたEnd-to-Endのゲインモニターの必要性がレビューで指摘された。HXIは焦点面検出器であり、そのバックグ

ラウンドは低い場合、放射化などに伴う輝線がほとんど利用できない。これを受けて、湯浅らは、他の硬X線検出器で採用されているシステムを参考に、 $^{241}\text{Am}$ 線源とプラスチックシンチレータをAPDで読み出すことで、 $\alpha$ 崩壊と同時計数を取り、18–60 keVまでの較正輝線を得るシステムを実証した(図7.8)。BGOの読み出し用に用いているAPDの回路の予備ラインを用いることで、実現できる。今後、最終的な構造や、線源の強度などの詳細を詰めて行く。

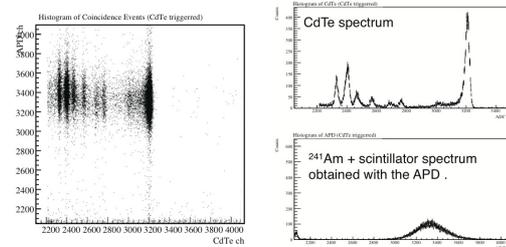


図 7.8:  $^{241}\text{Am}$  timing-tagged source experiment.  $\alpha$  particle deposit its energy into the plastic scintillator molded within (left panel, vertical axis), and simultaneously emits gamma-rays, which is then detected by a CdTe (and Si) sensors (left panel, horizontal axis). When no signal is detected in the plastic, there is no gamma-rays in CdTe.

#### ○ BGO結晶シンチレータの支持構造の開発

中島、中澤らは、HXI/SGD双方の感度向上の鍵を握るBGOシールドの構造開発を進めた。HXIやSGDでは、内部の主検出器が大きく、「すざく」で用いられたように結晶を少数のユニットに接着して支持する技法が困難である。そこで、CFRPとネジを使った全く新しい概念の固定方法を開発している。BaSO<sub>4</sub>粉の反射材の接着強度を、工学部の引っぱり試験器をお借りして測定し、その強度が過去の簡単な測定から推定していた値と10%の精度であることを確認した。再現性の高さも確認できたことは、今後の製造手順を考える上で重要である。H-IIロケットでの打ち上げを考慮した振動試験(図7.9)を実施し、破壊が全く生じない事を確認した[136]。また、より細かいBGOユニットの支持構造の検討を開始した。なお、本開発に伴い、関連特許[160]を得ている。この開発を受けて、三菱重工とともにHXIおよびSGDの全体構造(ハウジング構造他)の構造検討を進めている。

#### ○ 結晶シンチレータの集光効率の研究

西岡、奥村らは、光学シミュレーションを導入して、BGO等の結晶シンチレータにおいて、光検出素子へいかに効率よく集光するかを評価している。BGO結晶は屈折率が2.15と最も高く、シンチレーション光をいかに読み出しのAvalanche Photo Diode (APD)へ導くかが大きな課題である。実験により、ゴアテックやESR、BaSO<sub>4</sub>粉の反射材の特性、および光学研磨面と曇りガラス面の反射特性の評価に成功した。一面をBaSO<sub>4</sub>粉の反射材にして接着強度を

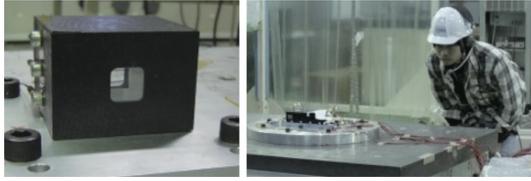


図 7.9: (left) A HXI-BGO module mechanical model. (right) Vibration test following the H-IIA rocket standard of a BGO crystal for SGD. Performed at ISAS/JAXA on 30 Nov.–1 Dec. 2009.

稼ぎ、残った面は ESR とゴアテックを組み合わせた反射材とすることで、SGD および HXI を構成する、ほとんどの BGO 結晶について、 $\sim 100$  keV 以上の信号が入った時にそれを検知できるだけの光収集効率を実現できる目処が立ちつつある [141]。今後は、収集率を一段と改善することに加え、衛星搭載品の具体的な反射材設計に入る。

#### ○ 半導体コンプトンカメラの構造開発

中澤らは、Stanford 大、ISAS/JAXA、三菱重工業とともに、SGD の根幹部である半導体コンプトンカメラの構造開発を進めている。この検出器は、40 層もの半導体を重ねるもので、製造に伴う様々な誤差などを吸収しきれぬ柔軟で、かつ部品点数の少ないデザインが必要である。また、アナログ LSI の実装密度が高いため、廃熱の工夫も重要である。野田は、Stanford 大の田島博士らとともに熱計算を行い、半導体の乗っているトレーの素材を変えるなどの対応の必要性を確認した。

#### ○ スペースワイヤ (SpaceWire) 通信技術の開発

SpaceWire は、次世代のシリアル通信規格であり、通信速度が可変、ロジックがコンパクトで、リモートノードのバスに直接アクセスする機能 (RMAP 機能) が実装されており、次世代の衛星内の通信規格として事実上の標準の一つとなっている。湯浅らは、このデジタル技術の開発を中心となって進めてきた。2009 年度は、これまでの開発をもとに、データ転送速度の向上、ロジックの最適化などを進めた。また、埼玉大と共同で、時刻付け機能の評価を行っている [153]。

### 7.1.8 将来の衛星計画 (ASTRO-H 以外)

#### ○ 小型ガンマ線衛星 CAST 計画

中澤をワーキンググループ主査として、次世代の MeV ガンマ線全天観測のために、半導体コンプトンカメラに基づく小型衛星、CAST (Compton All Sky Telescope) 計画の検討を、ISAS/JAXA、Stanford 他とともに進めている。本計画は、ASTRO-H SGD で用いられる半導体コンプトンカメラを改良し、数度の撮像能力で、全天をマップするアイデアである。特に、SGD では 600 keV までだった帯域を、2 MeV 以上にまで広げ、一光子当たりの角度分解能が  $1\text{--}2^\circ$

での観測を目指す。エネルギー帯域を広げるために、Si および CdTe 半導体の体積の増大が求められる。現在、SGD の開発の進捗に合わせて、検出器の基本構成の設計を進めている。フランスの技術であるガンマ線ミラーとの組み合わせも模索している。

#### ○ 大型国際 X 線天文台 (International X-ray Observatory) 計画

International X-ray Observatory (IXO) 計画は、2020 年代を想定し、2 keV で  $2\text{ m}^2$  以上の有効面積をもち、5 秒角の精度で X 線を撮像する。ASTRO-H のものを発展させた大型の X 線カロリメータを搭載し、高精度で X 線輝線、吸収線を分光する。これにより、 $z > 6$  の宇宙で活発に行われていると考えられる、銀河およびその中心ブラックホールの形成などに迫る大型計画で、2020 年代の打ち上げを目的として、日米欧の大きな国際協力で検討、開発を進めている。中澤らは、検出器の帯域を 40 keV にまで拡大する Hard X-ray Imager の設計を担当している。X 線帯域を観測する、Wide Field Imager の下部に Hard X-ray Imager を固定し、宇宙を同時に観測することで、初期宇宙で多く存在するはずの強く吸収された天体を、他の天体と区別することができる。2009 年度は、三菱重工業および、Olivier Limousin 博士らフランス Saclay 研究所の共同研究者とともに、Phase-A スタディーの一環で、検出器の基本構成、重量、消費電力などを確定した。これにより現在、欧米の衛星メーカーが衛星全体の基礎設計を進めている。2010 年の夏には、基本仕様の確定を行い、次の審査に臨むことになっている。

## 7.2 気球による反物質探査

### 7.2.1 はじめに

BESS 気球実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) は、東京大学、KEK、ISAS/JAXA、NASA、メリーランド大、デンバー大による日米国際協力実験である。その目的は、大気球飛翔実験のために開発された大立体角・高精度超伝導マグネットスペクトロメータにより、反粒子・反物質の探索を行い、それを通して初期宇宙における素粒子像を探ること、また太陽活動の変化による変調効果に着目しつつ、一次宇宙線、大気宇宙線などの精密観測を継続的に推進することである。

太陽活動極小期にあたる 2006 年度に、BESS-Polar II 実験として、南極周回気球による長時間の宇宙線観測実験 (2 回目) を実施し、高度 34 ~ 38 km の南極周回軌道において、24.5 日間にわたる宇宙線観測に成功した。BESS-Polar II 実験のまとめを表 7.2 b に示す。南極周回軌道の一週半にわたり観測が行なわれた後、装置は南極点から約 1,000 km 離れた高地雪原に着地し、観測データが回収された。以後、2 年以上にわたりデータ解析が進められている。

2009 年度は引き続き、BESS-Polar II 実験のデータ解析を進めている。前回の太陽活動極小期 (1995 ~ 1997 年) に、低エネルギー領域 ( $< 1$  GeV) に

において観測された、2次起源反陽子の理論予測より平坦なスペクトルが、今回の太陽活動極小期に高い統計精度で再現されるか大きな焦点であり、慎重なデータ解析が進められている。

### 7.2.2 南極からのBESS-Polar II スペクトロメータの回収

南極点の近くに着地した BESS-Polar II スペクトロメータは、気象条件や、南極全体での研究活動の優先度の状況のため、現地に残置されていた。その回収活動が、2年後となる2009年度に、NSF および NASA の強力な支援を得て実施された。日本からは、吉村、榎田の2名が回収作業に参加し、ほぼ一ヶ月に及ぶ南極でのスペクトロメータ分解・回収活動を経て、ひじょうに良好な形でスペクトロメータ各要素が回収された(図 7.10)。今回は、回収飛行機が一回り大型化されたことで、要素の分解を最小限にとどめることができた。各要素について健全性のチェック作業が実施され、実験データ解析に、フィードバックされる。



図 7.10: 南極にて、2年ぶりに回収作業に成功し、分解されて積み込みを待つ BESS-Polar II スペクトロメータ(2010年1月)。

### 7.2.3 BESS-Polar II のデータ解析

BESS-Polar II 実験では、観測時間は前回の約3倍に達し、観測データサイズでは6倍以上の13.5TB、宇宙線観測事象では5倍以上に相当する約47億事象の観測に成功した。この間に超伝導スペクトロメータは、粒子検出器の一部に高電圧電源の不安定性が発生したものの、基本性能を保持し、観測立体角を維持して、連続観測に成功した。2007年度には、測定器としての基本解析およびキャリブレーションに成功したのに続き、2008-2009年度を通してデータ解析が進み、観測器全体のキャリブレーションの精度が向上するとともに、反陽子粒子束の決定にむけた解析の詰め作業が進んでいる。これまでに同定されている低エネルギー反陽子数は、~8,600イ

ベントに達している。これまでの BESS 実験における反陽子検出の進展を表 7.2 c にまとめ、粒子束を決定するプロセスにおける最新の粒子識別特性を図 7.11 に示す。

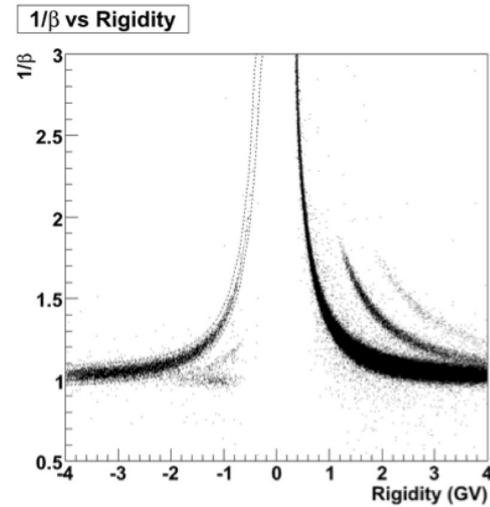


図 7.11: BESS-Polar II 実験における粒子識別特性と、8,600 イベントの反陽子を示す粒子識別バンド(負の Rigidity 領域)。

表 7.2 b: BESS-Polar II 気球飛翔実験のまとめ

	Polar I	Polar II
観測時間(日)	8.5	24.5
飛翔高度(km)	37 39	34 38
残留大気(g/cm <sup>2</sup> )	4 5	4.5 8
データサイズ(TB)	2.1	13.5
観測事象数(10E9)	0.9	4.7
トリガー頻度(kHz)	1.4	3.4
Live-Time Fraction	0.8	0.77

### 7.2.4 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力実験として1993年に第一回観測を実現して以来、15年の間に、南極での観測2回を含み、合計11回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。これらの実験を通じ、宇宙起源の反粒子の探索、宇宙線の絶対流束の精密観測データの提供、太陽活動による宇宙線強度の変調などを観測し続けてきた。2007年度の第二回南極周回気球実験では、高度34~38kmの南極周回軌道において、24.5日間にわたる観測を実現した。宇宙線の観測総数は47億イベントに達し、低エネルギー反陽子の検出は、約8,600イベントに達している。太陽活動極小期における反陽子スペクトルの決定に向け、データ解析が詰めの段階を迎えている。

表 7.2 c: BESS 実験における低エネルギー反陽子検出数の進展

実験名	エネルギー範囲 (GeV)	反陽子 観測数
BESS-93	0.18 – 0.5	6
BESS-94	0.18 – 0.5	2
BESS-95*	0.18 – 1.5	43
BESS-97*	0.18 – 3.6	415
BESS-98	0.18 – 4.2	384
BESS-99	0.18 – 4.2	668
BESS-00	0.18 – 4.2	558
BESS-02 (TeV)	0.18 – 4.2	166
BESS-04 (Polar-I)	0.10 – 4.2	1,520
BESS-07/08*(Polar-II)	0.10 – 4.2	~ 8,600

\* Observation at solar minimum

&lt; 【報文】 &gt;

(原著論文)

- [1] Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T. & Makishima, K.: “Suzaku Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 941–948 (2009)
- [2] Dogiel, V.A., Chernyshov, D., Yuasa, T., Cheng, K.-S., Bamba, A., Inoue, H., Ko, C.-M., Kokubun, M., Maeda, Y., Mitsuda, K., Nakazawa, K. & Yamasaki, N.Y.: “Particle Propagation in the Galactic Center and Spatial Distribution of Non-Thermal X-Rays”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1093–1098 (2009)
- [3] Dogiel, V.A., Chernyshov, D., Yuasa, T., Prokhorov, D., Cheng, K.-S., Bamba, A., Inoue, H., Ko, C.-M., Kokubun, M., Maeda, Y., Mitsuda, K., Nakazawa, K. & Yamasaki, N.Y.: “Origin of Thermal and Non-Thermal Hard X-Ray Emission from the Galactic Center”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1099–1105 (2009)
- [4] Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “The Origin of an Extended X-Ray Emission Apparently Associated with the Globular Cluster 47 Tucanae”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1107–1115 (2009)
- [5] Sugawara, C., Takizawa, M. & Nakazawa, K.: “Suzaku Observation of the Radio Halo Cluster Abell 2319: Gas Dynamics and Hard X-Ray Properties”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1293–1303 (2009)
- [6] Nishino, S., Fukazawa, Y., Hayashi, K., Nakazawa, K. & Tanaka, T.: “Study of the Large-Scale Temperature Structure of the Perseus Cluster with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **62**, 9–18 (2010)
- [7] Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Nakazawa, K. & Fukazawa, Y.: “Suzaku Constraints on Soft and Hard Excess Emissions from Abell 2199”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **62**, 115–129 (2010)
- [8] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: “Suzaku Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0-5408 during its 2009 Activity”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, in press (2010)
- [9] Kubota, K., Ueda, Y., Kawai, N., Kotani, T., Namiki, M., Kinugasa, K., Ozaki, S., Iijima, T., Fabrika, S., Yuasa, T., Yamada, S. & Makishima, K.: “Suzaku and Optical Spectroscopic Observations of SS 433 in the 2006 April Multiwavelength Campaign”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, in press (2010)
- [10] Uchiyama, Y., Tanaka, T., Takahashi, T., Mori, K. & Nakazawa, K.: “Suzaku Observations of PSR B1259-63: A New Manifestation of Relativistic Pulsar Wind”, *Astrophys. J.* **698**, 911–921 (2009)
- [11] Wik, D. R., Sarazin, C. L., Finoguenov, A., Matsushita, K., Nakazawa, K. & Clarke, T. E.: “A Suzaku Search for Nonthermal Emission at Hard X-Ray Energies in the Coma Cluster”, *Astrophys. J.* **696**, 1700–1711 (2009)
- [12] Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., Okuyama, S., Ota, N. & Tamura, T.: “X-ray Diagnostics of Thermal Conditions of the Hot Plasmas in the Centaurus Cluster”, *Astrophys. J.* **701**, 377–395 (2009)
- [13] Abdo, A., (abc 順, 全 183 名), Okumura, A.: “Fermi LAT Observations of LS I +61 °303: First Detection of an Orbital Modulation in GeV Gamma Rays”, *Astrophys. J. Let.* **701**, L123–L128 (2009)
- [14] Abdo, A., (abc 順, 全 177 名), Okumura, A.: “Fermi LAT Observation of Diffuse Gamma Rays Produced Through Interactions Between Local Interstellar Matter and High-energy Cosmic Rays”, *Astrophys. J.* **703**, 1249–1256 (2009)
- [15] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: “Is the Black Hole in GX 339-4 Really Spinning Rapidly?”, *Astrophys. J. Let.* **707**, L109–L103 (2009)
- [16] Abdo, A., (abc 順, 全 177 名), Okumura, A.: “Fermi LAT Discovery of Extended Gamma-Ray Emission

- in the Direction of Supernova Remnant W51C”, *Astrophys. J. Let.* **710**, L1–L6 (2009)
- [17] Abdo, A., (abc 順, 全 174 名), Okumura, A.: “Fermi-Lat Discovery of GeV Gamma-Ray Emission from the Young Supernova Remnant Cassiopeia A”, *Astrophys. J. Let.* **710**, L92–L95 (2009)
- [18] Abdo, A., (abc 順, 全 154 名), Okumura, A.: “Fermi Observations of Cassiopeia and Cepheus: Diffuse Gamma-ray Emission in the Outer Galaxy”, *Astrophys. J.* **710**, 133–149 (2010)
- [19] Nakajima, M., Mihara, T. & Makishima, K.: “Energy-Dependent Harmonic Ratios of the Cyclotron Features of X0331+53 in the 2004-2005 Outburst”, *Astrophys. J.* **710**, 1755–1768 (2010)
- [20] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Sakamoto, T., Esposito, P., Götz, D., Hurley, K., Israel, G. L., Kokubun, M., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Stellar, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., Yamaoka, H., Yoshida, A. & Zane, S.: “Wide-Band *Suzaku* Analysis of the Persistent Emission from SGR?0501+4516 during the 2008 Outburst”, *Astrophys. J.*, in press (2010)
- [21] Kaaret, P., Feng, F., Wong, D. S. & Tao, L.: “Direct Detection of an Ultraluminous Ultraviolet Source”, *Astrophys. J.*, in press (2010)
- [22] The Fermi-Lat Collaboration (全 268 名) including Okumura, A.: “A change in the optical polarization associated with a gamma-ray flare in the blazar 3C279”, *Nature* **463**, 919–923 (2010)
- [23] Tsuchiya, H., Enoto, T., Torii, T., Nakazawa, K., Yuasa, T., Torii, S., Fukuyama, T., Yamaguchi, T., Kato, H., Okano, M., Takita, M. & Makishima, K.: “Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds”, *Phys. Rev. Let.* **102**, id.255003 (2009)
- [24] Abdo, A., (abc 順, 全 178 名), Okumura, A.: “Fermi Large Area Telescope Measurements of the Diffuse Gamma-Ray Emission at Intermediate Galactic Latitudes”, *Phys. Rev. Let.* **103**, id.251101 (2009)
- [25] Abdo, A., (abc 順, 全 155 名), Okumura, A.: “Fermi large area telescope observations of the cosmic-ray induced gamma-ray emission of the Earth’s atmosphere”, *Phys. Rev. D* **80**, id.122004 (2009)
- [26] Tamagawa, T., Hayato, A., Asami, F., Abe, K., Iwamoto, S., Nakamura, S., Harayama, A., Iwahashi, T., Konami, S., Hamagaki, H., Yamaguchi, Y. L., Tawara, H. & Makishima, K.: “Development of thick-foil and fine-pitch GEMs with a laser etching technique”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. A* **608**, 390–396 (2009)
- [27] Watanabe, S., Ishikawa, S., Aono, H., Takeda, S., Odaka, H., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakazawa, K., Tajima, H., Onishi, M. & Kuroda, Y.: “High Energy Resolution Hard X-Ray and Gamma-Ray Imagers Using CdTe Diode Devices”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56**, 777–782 (2009)
- [28] Takeda, S., Aono, H., Okuyama, S., Ishikawa, S., Odaka, H., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakazawa, K., Tajima, H. & Kawachi, N.: “Experimental Results of the Gamma-Ray Imaging Capability With a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56**, 783–790 (2009)
- [29] Ando, M., (全 140 名, 順不同), Nakazawa, K.: “DECIGO and DECIGO pathfinder”, *Class. Quant. Gravity*, **26**, 094019 (2010)
- [30] Ando, M., (全 136 名, 順不同), Nakazawa, K.: “DECIGO and DECIGO pathfinder”, *Class. Quant. Gravity*, **27**, 084010 (2010)
- (和文報告)
- [31] 吉村浩司、他.BESS Collaboration「第2回南極周回飛翔宇宙線観測実験」宇宙航空研究開発機構研究開発報告、宇宙航空開発機構研究開発報告 JAXA-RR-大気球研究報告 (2010)
- (会議収録)
- Proc. The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H*
- [32] Hayto, A., Tamagawa, T., Yamaguchi, H., Furuzawa, A., Ozawa, M., Kunieda, H., Hughes, J. P., Hwang, U., Bamba, A. & Makishima, K.: “The Onion-like Metallicity Structure of Tycho’s Supernova Remnant as Revealed by Doppler Broadened X-ray Emission Lines”, p.58–61
- [33] Sarazin, C. L., Wik, D. R., Nakazawa, K., Finoguenov, A., Clarke, T., Fukazawa, Y., Inoue, S., Kawaharada, M. & Takizawa, M.: “Non-Thermal and Thermal Hard X-ray Emission from Clusters of Galaxies”, p.78–81
- [34] Makiya, R., Totani, T. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Observation of 3EG J1234–1318: -Ray Emission from Forming Galaxy Clusters?”, p.86–87
- [35] Nishino, S., Fukazawa, Y., Hayashi, K., Nakazawa, K. & Tanaka, T.: “Study of the Large-scale Temperature Structure of the Perseus Cluster with *Suzaku*”, p.96–97
- [36] Takizawa, M., Sugawara, C. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Observation of the Radio Halo Cluster Abell 2319”, p.98–99
- [37] Kawaharada, M., Okabe, N., Nakazawa, K., Takizawa, M. & Umetsu, K.: “*Suzaku* Detection of the ICM Emission out to the Virial Radius in Abell 1689”, p.100–101
- [38] Sato, S., Matsushita, K., Ota, N., Nagino, R., Nakazawa, K. & Sarazin, C. L.: “*Suzaku* observations of K lines of iron from intracluster medium of the Coma cluster”, p.102–103
- [39] Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258”. p.110–111

- [40] Iwakiri, W., Terada, Y., Tashiro, M. S., Mihara T., Makishima, K., Enoto, T., Nakajima, M., Yoshida, A. & Angelini, L.: “Possible Detection of Cyclotron Resonance Scattering Emission Features from an Accretion-powered Pulsar 4U 1626 - 67”, p.170–173
- [41] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y., Nakazawa, K., Sakamoto, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of the Extremely Hard Emission Components of Magnetars”, p.186-189
- [42] Terada, Y., Ishida, M., Bamba, A., Mukai, K., Makishima, K., Harayama, A., Hayashi, A., Shionome, T. & Morigami, K.: “Discovery of possible non-thermal emission from AM Hercules in the very low state with *Suzaku*”, p.200–201
- [43] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishim, K., Ebisawa, K., Saitou, K., Ishida, M. & Kokubun, M.: “Constructing an Average Hard X-ray Spectrum of Intermediate Polars”, p.208–209
- [44] Nakajima, M., Mihara, T. & Makishima, K.: “Change of Cyclotron Resonance Energies of Binary X-ray Pulsar”, p.214–215
- [45] Nakagawa, Y. E., Yoshida, A., Hurley, K., Yamaoka, K., Shibazaki, N., Enoto, T., Sakamoto, T. & Makishima, K.: “Uniting Burst and Quiescent Emission Mechanisms of Magnetars”, p.220–221
- [46] Makishima, K.: “Continua and Iron-K lines from Accreting Black Holes”, p.252–255
- [47] Gandhi, P., Makishima, K., Durant, M., Fabian, A., Dhillon, V., Marsh, T., Miller, J., Shahbaz, T. & Spruit, H.: “Rapid timing studies of black hole binaries in Optical and X-rays: correlated and non-linear variability”, p.256–259
- [48] Isobe, N., Ohsuga, K., Makishima, K., Mizuno, T., Kubota, A. & Gandhi, P.: “*Suzaku* detections of luminosity-dependent spectral changes from the two ultraluminous X-ray sources, X1 and X2, in NGC 1313”, p.260–263
- [49] Nakazawa, K., Ueda, T., Enoto, T., Yamada, S., Suzuki, M. & Makishima, K.: “*Suzaku* wide-band observation of anomalous dips in Hercules X-1”, p.264–267
- [50] Wong, Diane S., Kaaret, P. & Feng, H.: “Optical Observations of the ULX in NGC 6946”, p.296–297
- [51] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: “A Truncated Disk of the Black Hole in GX 339–4 Observed with *Suzaku*”, p.292–293
- [52] Noda, H., Uehara, Y., Yamada, S., Makishima, K. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a Hard Component that Varies Independently of the Power-Law in Several Seyfert Galaxies”, p.318–319
- [53] Watanabe, E., Takizawa, M., Nakazawa, K., Okabe, N., Kawaharada, M., Hamana, T. & Miyazaki, S.: “*Suzaku* Observation of Large Scale Structure Filaments around ZwCl0823.2+0425 Found through the Local Cluster Substructure Survey”, p.378–379
- [54] Inada, N., Kawaharada, M., Konami, S., Gandhi, P., Misawa, T., Ota, K., Makishima, K. & Takahashi, R.: “Probing Evolution of Hot Gas and Galaxy Distributions in Galaxy Clusters”, p.380–381
- [55] Murakami, H., Matsushita, K., Komiyama, M., Sato, K., Nagino, R., Ohashi, T., Yamasaki, N., Takei, Y. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* and *XMM-Newton* Observations of the Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the Fornax cluster”, p. 384–385
- [56] Iwahashi, T., Tamagawa, T., Hayato, A., Konami, S., Asami, F., Makishima, K., Swank, J. & Jahoda, K.: “Development of Gas Electron Multipliers for the X-ray Polarimetry Mission GEMS”, p.442–443
- [57] Watanabe, S., Kokubun, M., Sato, R., Takahashi, T., Nakazawa, K., *et al.*: “The Hard X-ray Imager for *ASTRO-H* mission”, p.422–423
- Proc. 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland (2009)
- [58] J. Mitchell and A. Yamamoto for the BESS Collaboration: “The BESS Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter ”
- [59] 2. K. Yoshimura et al.: “The second Antarctic flight of BESS-Polar experiment: Flight summary and Detector performance”
- [60] R. Orito et al.: “Precise measurement of the cosmic-ray proton spectrum and the time variation with BESS-Polar I ”
- [61] A. Horikoshi et al.: “T BESS-Polar II : Fiber read-out Time of Flight system ”
- [62] N. Thakur et al.: “T The Time of Flight System for BESS-Polar II ”
- [63] K. Sakai et al.: “Antiproton identification with BESS Polar-II Aerogel Cherenkov Counter ”
- [64] T. Hams et al.: “Short-term and diurnal proton flux variation during the BESS-Polar I balloon flight ”
- [65] K.C. Kim et al.: “Measurements of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium Isotopes with BESS-Polar I in 2004 ”

## その他の会議収録

- [66] Okumura, A., Kamae, T. & the Fermi LAT Collaboration, “Diffuse Gamma-ray Observations of the Orion Molecular Clouds”, *2009 Fermi Symposium*, eConf Proceedings C091122
- [67] 吉村浩司、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II フライトと測定器性能」、大気球シンポジウム (JAXA 宇宙科学研究本部、2009)
- [68] 堀越篤、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II ファイバー読み出し型 TOF の性能評価」、大気球シンポジウム (JAXA 宇宙科学研究本部、2009)
- [69] 坂井賢一、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II 粒子識別性能と反陽子の同定」、大気球シンポジウム (JAXA 宇宙科学研究本部、2009)
- [70] 長谷川雅也、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II 太陽電池システムのパライトにおける性能評価」、大気球シンポジウム (JAXA 宇宙科学研究本部、2009)

## (学位論文)

- [71] Okumura, Akira: “Gamma-Ray observations of the Orion Molecular Clouds using the *Fermi* Large Area Telescope”, 博士学位論文
- [72] Enoto, Teruaki: “X-ray Studies of Magnetars with *Suzaku*”, 博士学位論文

## (国内雑誌)

< 【学術講演】 >

## (国際会議)

The 3rd *Suzaku* Conference: “The Energetic Cosmos: from *Suzaku* to *ASTRO-H*” (2009 June 29 – July 2; Otaru, Hokkaido)

- [73] Makishima, K.: “Continua and Iron-K lines from Accreting Black Holes” (invited talk)
- [74] Nakazawa, K., Ueda, T., Enoto, T., Yamada, S., Suzuki, M. & Makishima, K.: “*Suzaku* wide-band observation of anomalous dips in Hercules X-1” (contributed talk)
- [75] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., Sakamoto, T., Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of the Extremely Hard Emission Components of Magnetars” (contributed talk)
- [76] Wong, Diane S., Kaaret, P. & Feng, H.: “Optical Observations of the ULX in NGC 6946” (poster)
- [77] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Ebisawa, K., Saitou, K., Ishida, M. & Kokubun, M.: “Constructing an Average Hard X-ray Spectrum of Intermediate Polars” (poster)
- [78] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: “A Truncated Disk of the Black Hole in GX 339-4 Observed with *Suzaku*” (poster)

- [79] Noda, H., Uehara, Y., Yamada, S., Makishima, K. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a Hard Component that Varies Independently of the Power-Law in Several Seyfert Galaxies” (poster)

The 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland (2009)

- [80] 2. K. Yoshimura et al.: “The second Antarctic flight of BESS-Polar experiment: Flight summary and Detector performance”
- [81] R. Orito et al.: “Precise measurement of the cosmic-ray proton spectrum and the time variation with BESS-Polar I ”
- [82] A. Horikoshi et al.: “T BESS-Polar II : Fiber read-out Time of Flight system ”
- [83] N. Thakur et al.: “T The Time of Flight System for BESS-Polar II ”
- [84] K. Sakai et al.: “Antiproton identification with BESS Polar-II Aerogel Cherenkov Counter ”
- [85] T. Hams et al.: “Short-term and diurnal proton flux variation during the BESS-Polar I balloon flight ”
- [86] K.C. Kim et al.: “Measurements of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium Isotopes with BESS-Polar I in 2004 ”

## その他の招待講演

- [87] J. Mitchell and A. Yamamoto for the BESS Collaboration: “The BESS Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter ”, a solicited talk at the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland (2009).

## その他の一般講演

- [88] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yuasa, T., Yamada S., Kato, H., Nakazawa, K., Makishima, K. & GROWTH Collaboration: “Observation of high-energy electrons and gamma rays from winter thunderclouds”, *Japan Geoscience Union Meeting 2009* (2009 May 18; Chiba)
- [89] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H., Takahashi, H., Dotani, T., Kubota, A., Ebisawa, K., Ueda, Y. & Done, C.: “*Suzaku* wide-band observations of black-hole binaries and AGNs: continuum and Fe-K lines ’’, *The X-ray Astronomy 2009* (2009 September 7-11; Bologna, Italy)
- [90] Wong, Diane S.: “Engaging Future Astronautics with Inquiry-Based Activities”, *60th International Astronautical Congress 2009* (2009 October 12 and 16; Daejeon, Republic of Korea)
- [91] Enoto, T., Makishima, K., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., Sakamoto T., Terada, Y. & Ohno M.: “*Suzaku* Results on Extremely Hard X-rays from Magnetars”, *2009 Fermi Symposium* (2009 November 2-5; Washington DC)

- [92] Enoto, T., Makishima, K., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K. & T. Sakamoto: "Wide-band X-ray Studies of Magentars with *Suzaku*", *ICREA Workshop on The High-Energy Emission from Pulsars and their Systems* (2010 April 14; Barcelona, Spain)
- [93] K. Sakai et al.: "Progress in BESS-Polar II experiment and the data analysis ", the 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan (2009)
- (国内会議)
- ビッグバンセンター主催サマースクール (2009年8月30日-9月2日、沖縄県宜野湾市カルチャーリゾート フェストーネ)
- [94] 山本明 : 「BESS-Polar 実験と観測結果解析の現状」
- [95] 牧島 一夫 : 「宇宙 X 線/ガンマ線観測のハイライト」
- 日本物理学会・秋季大会 (2009年9月10~13日、甲南大学)
- [96] 吉村浩司、他 BESS Collaboration : 「BESS 実験による宇宙線反粒子観測とダークマター」(招待講演)、11pSG-3
- [97] 堀越篤、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II 実験: 低エネルギー宇宙線反陽子捕捉の為にファイバ読み出し型 TOF カウンターの性能評価」<sub>J</sub>, 10aSB-10
- [98] 坂井賢一、他 BESS Collaboration : 「BESS-Polar II 実験 反陽子流束解析報告 (3)」<sub>J</sub>, 13pSD-14
- [99] 福山太郎、渡辺伸、小高裕和、石川真之介、杉本宗一郎、斉藤新也、国分紀秀、高橋忠幸、鳥井俊介、山田真也、中澤知洋: 「次世代 X 線天文衛星 『ASTRO-H』 搭載用 CdTe 検出器の基礎特性と性能評価」<sub>J</sub>, 10aSD-5
- [100] 国分紀秀、渡辺伸、佐藤理江、大野雅功、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線イメージャ(HXI) の開発の現状」<sub>J</sub>, 10aSD-10
- [101] 深沢泰司、田島宏康、水野恒史、片桐秀明、高橋弘充、田中孝明、高橋忠幸、国分紀秀、渡辺伸、大野雅功、佐藤理江、牧島一夫、中澤知洋ほか: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ検出器 (SGD) の開発状況」<sub>J</sub>, 10aSD-13
- [102] 土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、国分紀秀、加藤博、岡野真治、牧島一夫: 「2008 年度における冬季雷活動からの高エネルギー放射線の観測」<sub>J</sub>, 10pSD-6
- [103] 中川友進、榎戸輝揚、牧島一夫、吉田篤正、山岡和貴、坂本貴紀、Nanda Rea ほか: 「『すざく』衛星による超強磁場中性子星 SGR 0501+4516 の小バーストの観測」<sub>J</sub>, 10pSD-7
- [104] 奥村曉、牧島一夫、釜江常好、Seth Digel、水野恒史、福井康雄ほか: 「フェルミ望遠鏡によるオリオン分子雲からの広がったガンマ線の観測」<sub>J</sub>, 10pSD-8
- [105] 阿佐美ふみ、玉川徹、早藤麻美、岩橋孝典、小波さおり、俵裕子、浜垣秀樹、山口頼人、牧島一夫: 「GEM の電子増幅度のマッピング調査」<sub>J</sub>, 11aSB-8
- [106] 片桐秀明、西野翔、上原岳志、水野恒史、高橋弘充、深沢泰司、大杉節、山崎了、田島宏康、釜江常好、内山泰伸、田中孝明、福井康雄、河合誠之、浅野勝晃、谷津洋一、片岡淳、尾崎正伸 E、高橋忠 E、牧島一夫ほか: 「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸 W28 の観測」<sub>J</sub>, 11aSE-1
- [107] 川村静児、安東正樹、瀬戸直樹、佐藤修一、中村卓史、坪野公夫、(順不同)、中澤知洋ほか: 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (20): 設計・計画」<sub>J</sub>, 10aSE-4
- [108] 穀山涉、安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、高橋走、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀、吉光徹雄、小高裕和、湯浅孝行、石川毅彦、榎戸輝揚、苔山圭以子、坂井真一郎、佐藤修一、高森昭光、坪野公夫、戸田知朗、橋本樹明、若林野花: 「宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 VIII(軌道上運用)」<sub>J</sub>, 10aSE-13
- [109] 古関優、国分紀秀、高橋忠幸、渡辺伸、勝田隼一郎、小高裕和、石川真之介、佐々木智香子、Peter von Ballmoos、中澤知洋、内山泰伸: 「ガンマ線レンズを用いた新世代ガンマ線検出システムの開発 (II)」<sub>J</sub>, 10pSD-9
- 日本天文学会・秋の年会 (2009年9月14~16日、山口大学)
- [110] 寺田幸功、石田学、馬場彩、原山淳、林多佳由、塩野目雄、向井浩二、牧島一夫: 「『すざく』、第二の白色矮星パルサー発見か?」<sub>J</sub>, J07a
- [111] 湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、石田学、海老沢研、齊藤慧: 「磁場を持つ白色矮星の連星系の質量推定; X 線連続スペクトルの解析から」<sub>J</sub>, J08a
- [112] 鳥井俊輔、牧島一夫、山田真也、中澤知洋: 「『すざく』衛星を用いた CygX-1 の広帯域スペクトルの長期詳細観測」<sub>J</sub>, J34a
- [113] 山田真也、牧島一夫、上原悠一、中澤知洋、高橋弘充、堂谷忠靖、久保田あや、上田佳宏: 「『すざく』が捉えた Very High 状態: GX 339-4 の広帯域 X 線観測 (その2)」<sub>J</sub>, J35a
- [114] 野田博文、山田真也、上原悠一、中澤知洋 (東大理)、牧島一夫: 「『すざく』を用いた MCG-6-30-15 の硬 X 線放射の新解釈」<sub>J</sub>, J36a
- [115] 磯部直樹、大須賀健、水野恒史、久保田あや、牧島一夫、Gandhi Poshak: 「『すざく』による超光度 X 線源 NGC 1313 X1, X2 のスペクトル変動の観測」<sub>J</sub>, K45a
- [116] 榎戸輝揚、牧島一夫、坂本貴紀、中川友進、山岡和貴、大野雅功、高橋忠幸、中澤知洋、高橋弘充、村上敏夫、寺田幸功: 「マグネター天体 1E 1547.0-5408 の『すざく』ToO 観測」<sub>J</sub>, J51a
- [117] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、森井幹雄、坂本貴紀、馬場彩、早藤麻美、平賀純子、中島基樹ほか: 「『すざく』によるマグネターの観測: 現状と見通し」<sub>J</sub>, J52a
- [118] 水野恒史、佐田貴幸、林克洋、高橋弘充、片桐秀明、深沢泰司、大杉節、山崎了、谷津陽一、河合誠之、浅野勝晃、片岡淳、尾崎正伸、高橋忠幸、奥村曉、牧島一夫ほか: 「フェルミ衛星による、拡散 線放射の観測と銀河系宇宙線」<sub>J</sub>, Q29a

- [119] 渡邊瑛里、中澤知洋、浜名崇、宮崎聡、岡部信広、滝沢元和、川原田円：「X線と弱重力レンズによる ZwCl0823.3+0425 銀河団周辺の大規模構造フィラメントの解析」<sub>J</sub>、T04a
- [120] 川原田円、岡部信広、中澤知洋、滝沢元和、梅津敬一：「『すざく』による Abell 1689 銀河団外縁部の高温ガスの研究」<sub>J</sub>、T06a
- [121] 中島健太、中澤知洋、奥山翔、山田真也、牧島一夫：「『すざく』による Triangulum-Australis 銀河団の観測」<sub>J</sub>、T09a
- [122] 玉川徹、早藤麻美、岩橋孝典、阿佐美ふみ、牧島一夫、Jean Swank、Keith Jahoda ほか：「X線偏光観測専用衛星 GEMS」<sub>J</sub>、W43a
- [123] 岩橋孝典、玉川徹、中村聡史、早藤麻美、小波さおり、阿佐美ふみ、牧島一夫：「気球実験に向けた光電子追跡型 X線偏光計の開発」<sub>J</sub>、W48b
- [124] 西岡博之、奥山翔、中澤知洋、山田真也、榎戸輝揚、湯浅孝行（東大理）、牧島一夫：「結晶シンチレータの光量シミュレータの開発」<sub>J</sub>、W62a
- [125] 神頭知美、寺田幸功、田代信、岩瀬かほり、湯浅孝行、能町正治、高橋忠幸、国分紀秀、石崎欣尚ほか：「次期 X線天文衛星 Astro-H における SpaceWire を用いた時刻配信方法の検証」<sub>J</sub>、W64a
- 大気球シンポジウム（2009年10月1~2日、JAXA 宇宙科学研究本部）
- [126] 吉村浩司、他 BESS Collaboration：「BESS-Polar II フライトと測定器性能」<sub>J</sub>
- [127] 堀越篤、他 BESS Collaboration：「BESS-Polar II ファイバー読み出し型 TOF の性能評価」<sub>J</sub>
- [128] 坂井賢一、他 BESS Collaboration：「BESS-Polar II 粒子識別性能と反陽子の同定」<sub>J</sub>
- [129] 長谷川雅也、他 BESS Collaboration：「BESS-Polar II 太陽電池システムのフライトにおける性能評価」<sub>J</sub>
- 日本物理学会・春の年会（2010年3月20~23日、岡山大学）
- [130] 坂井賢一、他 BESS Collaboration：「BESS Polar-II 実験 反陽子流束解析報告(4)?太陽活動極小期における宇宙線反陽子流束?」<sub>J</sub>、22pBW-10
- [131] 堀越篤、他 BESS Collaboration：「BESS-Polar II 実験：低エネルギー宇宙線反陽子捕捉の為にファイバーライトガイド薄型 TOF カウンターの性能評価」<sub>J</sub>、23pBE-8
- [132] 野田博文、山田真也、上原悠一、中澤知洋、牧島一夫：「『すざく』によるセイファート銀河の広がった鉄輝線の新解釈」<sub>J</sub>、20aBP-1
- [133] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、早藤麻美、寺田幸功ほか：「『すざく』による超強磁場中性子星『マグネター』の X線観測」<sub>J</sub>、20aBP-2
- [134] 鳥井俊輔、山田真也、牧島一夫、中澤知洋：「『すざく』を用いた Cyg X-1 の広帯域スペクトルと短時間変動の長期詳細観測」<sub>J</sub>、20aBP-3
- [135] 山岡和貴、杉田聡司、田代信、寺田幸功、恩田香織、遠藤輝、岩切渉、菅佐原たか子、玉川徹、中川友進、洪秀徴、国分紀秀、鈴木素子、大野雅功、高橋忠幸、深沢泰司、高橋拓也、上原岳士、花畑義隆、中澤知洋、榎戸輝揚、牧島一夫、浦田裕次ほか：「すざく衛星搭載硬 X線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (VI)」<sub>J</sub>、20aBP-5
- [136] 中島健太、中澤知洋、上田剛、西岡博之、牧島一夫、花畑義隆、深沢泰司ほか：「ASTRO-H 衛星硬 X線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの開発 (II)：機構開発」<sub>J</sub>、20aBP-10
- [137] 国分紀秀、渡辺伸、太田方之、佐藤理江、大野雅功、田中康之、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X線撮像検出器 (HXI) の開発」<sub>J</sub>、20aBP-12
- [138] 寺田幸功、原山淳、馬場彩、石田学、堂谷忠靖、林多佳由、中村良子、牧島一夫 D ほか：「可視・X線・TeV 多波長同時観測を通じた白色矮星における粒子加速の検証」<sub>J</sub>、20aBP-13
- [139] 玉川徹、太田真秀、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛文、早藤麻美、小波さおり、牧島一夫：「ガス電子増幅フォイルの静電容量と放電の関係」<sub>J</sub>、20aBP-1
- [140] 牧島一夫：「中性子星の X線観測の現状」<sub>J</sub>、22pBX-2
- [141] 西岡博之、奥山翔、湯浅孝行、山田真也、奥村暁、中澤知洋、牧島一夫：「結晶シンチレータの蛍光伝搬シミュレータの開発」<sub>J</sub>、23pBW-10
- 日本天文学会・春の年会（2010年3月24~27日、広島大学）
- [142] 寺田幸功、原山淳、石田学、馬場彩、堂谷忠靖、林多佳由、向井浩二、牧島一夫、新田敦子ほか：「『すざく』、H.E.S.S.、可視光による白色矮星パルサーの多波長同時観測」<sub>J</sub>、J38a
- [143] 山田真也、牧島一夫、中澤知洋、鳥井俊輔：「『すざく』データを用いた降着円盤からの熱的放射モデルの検証」<sub>J</sub>、J49a
- [144] 榎戸輝揚、牧島一夫、中川友進、早藤麻美、寺田幸功、神頭知美、坂本貴紀ほか：「『すざく』の観測によるマグネター硬 X線放射の起源の探究」<sub>J</sub>、J54a
- [145] 中川友進、牧島一夫、榎戸輝揚、山岡和貴、吉田篤正、坂本貴紀、Kevin Hurley、Nanda Rea ほか：「『すざく』衛星による SGR 0501+4516 のバーストに付随する硬 X線放射の検出」<sub>J</sub>、J55a
- [146] 岩切渉、田代信、寺田幸功、遠藤輝、恩田香織、菅佐原たか子、中川友進、大野雅功、山岡和貴、杉田聡司、深沢泰司、山内誠、Nicolas Vasquez、浦田裕次、洪秀徴、榎戸輝揚、牧島一夫、釜江常好：「『すざく』衛星搭載 WAM 検出器による GRB090709A の周期解析」<sub>J</sub>、J61a
- [147] 湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、石田学、海老沢研、齊藤慧：「磁場を持つ激変性の質量推定と、銀河面 X線放射への寄与」<sub>J</sub>、Q18a
- [148] 奥村暁、牧島一夫、釜江常好、Seth Digel、福井康雄ほか：「オリオン分子雲からの広がったガンマ線放射の観測」<sub>J</sub>、Q22a

- [149] 岡部信広、川原田円、梅津敬一、滝沢元和、松下恭子、深沢泰司、浜名崇、宮崎聡、中澤知洋、大橋隆哉:「*Suzaku* Observation of Abell 1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-Scale Structure」, T03a
- [150] 渡邊瑛里、滝沢元和、中澤知洋、岡部信広、川原田円、浜名崇、宮崎聡:「X線と弱重力レンズによる ZwCl0823.2+0425 銀河団周辺の大規模構造フィラメントの解析」, T05a
- [151] 岩橋孝典、玉川徹、早藤麻美、小波さおり、阿佐美ふみ、吉川瑛文、太田真秀、牧島一夫、Jean Swank、Keath Jahoda ほか:「X線偏光観測衛星 GEMS を模擬した X線偏光計のバックグラウンドシミュレーション」, W32a
- [152] 中澤知洋、牧島一夫、国分紀秀、渡辺伸、高橋忠幸、深沢泰司、片岡淳、寺田幸功、山岡和貴、玉川徹、田島宏康ほか:「次期 X線天文衛星 ASTRO-H (ex-NeXT) 搭載硬 X線イメージャ(HXI)の開発の現状(IV)」, W45a
- [153] 神頭知美、寺田幸功、田代信、岩瀬かほり、湯浅孝行、能町正治、高橋忠幸、国分紀秀、尾崎正伸、石崎欣尚ほか:「ASTRO-H 衛星における SpaceWire を用いた時刻配信方法の検証(2)」, W55a

#### その他の学会、セミナー

- [154] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、早藤麻美、寺田幸功、神頭知美ほか:「『すざく』衛星によるマグネター研究の最新成果(1)」, 第10回宇宙科学シンポジウム, 2010年1月7-8日, JAXA 宇宙科学研究本部
- [155] 榎戸輝揚:「宇宙最強の磁石“マグネター”の X線観測」, GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第3回 RA キャンプ, (2010年2月19日, 静岡)
- [156] 榎戸輝揚:「『すざく』衛星によるマグネター天体の X線観測」, 高エネルギー宇宙物理連絡会(高宇連) 第10回博士論文発表会(2010年3月8日, JAXA 宇宙科学研究本部)
- [157] 榎戸輝揚:「『すざく』衛星によるマグネター天体の X線観測」, 分子雲ジェット研究会(2010年3月19日, 名古屋大学 南半球宇宙観測研究センター)
- [158] Yamada, S.: “New observational insights into from Low/Hard to very High state of black hole binaries with *Suzaku* satellite”, High Energy Astrophys. Div. lunchtalk, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA (2010 March 19)
- [159] 奥村暁:「フェルミ望遠鏡で見る宇宙線と星間物質」, 名古屋大学宇宙電波グループ談話会(2010年4月6日)

#### <【特許】>

- [160] 複合繊維化プラスチック及び補強パネル、中澤知洋、上原 聡、特願 2009-101259