

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

Annual Report

2011

平成23年度 年次研究報告



東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター

平成 24 年 7 月 10 日版

Copyright ©ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 2012

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

ご挨拶

日頃より、ビッグバン宇宙国際研究センター（英語名 Research Center for the Early Universe, 略称 RESCEU）の運営にお力添えいただき、厚くお礼を申し上げます。ここに 2011 年度の年次報告をお届けいたします。

本センターは、科研費 COE 形成基礎研究の実行母体「初期宇宙研究センター」を前身として、1999 年度に設置された理学系研究科の附属施設です。ビッグバン宇宙の創生・進化を解明し、その陰の立役者である暗黒エネルギーの本性に迫り、暗黒物質の正体を追いつめ、また宇宙の進化のいろいろな場面でバリオン物質が演じる多彩な振舞いを明らかにすることを、研究目的として掲げています。本センターは、理論的研究を行うセンター固有のメンバーに加え、おもに理学系研究科にて物理学や天文学を専門とする約 10 名の「研究協力者」を配置するという先進的な構造をとることで、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。

申すまでもなく 2011 年度は、東日本大震災により、現代社会における科学と技術のありかた、国費に支えられた研究の進め方などに関して、深く重い課題を背負う年となりました。そんな中であって、研究を停滞させることなく進めることが本センターの使命と認識し、2011 年度も鋭意、研究を進めてまいりました。特記事項としては、プロジェクト 4（サブミリ波観測）が深く関係するアルマ (ALMA) 望遠鏡が、南米の地で稼働を始めたこと、プロジェクト 5（重力波探査）とプロジェクト 1（初期宇宙進化論）に関係の深い大型低温重力波望遠鏡 LCGT が、「かぐら」の愛称のもと着工したこと、プロジェクト 7（飛翔体による宇宙観測）の一翼を担う反物質探査の気球実験 BESS が、19 年にわたる壮大なプロジェクトを完了したことなどが挙げられます。また 2011 年のノーベル物理学賞が、本センターの研究に緊密な関係をもつテーマである、「遠距離の超新星観測を通じた宇宙の膨張加速の発見」により、ソール・パールムッター、ブライアン・シュミット、アダム・リースの三氏に授与されたことも、たいへん嬉しいできごとでした。

センターは 2011 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)」(最終年度) や、理学系研究科の他専攻・施設と協力するなどの形で、多彩な研究・広報活動を行いました。7 月には「全国同時七夕講演会」に参加、またサマースクール（阿蘇高原）を実施し、10 月には理学系研究科など共同して、ノーベル物理学賞の解説を行なう特別講演会を開催しました。11 月には研究協力者が集まり未来へのサイエンスを語りあう「研究交流会」を開き、12 月には駒場で「ノーベル賞解説講演会」を共催するとともに、クリスマス講演会（2 回目）を兼ねて、全学オープンキャンパスに参加しました。センター固有のメンバーとしては、小林洸さんが通年で、また年度前半は安武伸俊さん、後半は筒井亮さんが特任研究員として加わりました。2012 年 4 月には筒井さん（2 年目）に加え、特任助教として伊藤洋介さんが加わっています。

引き続き、本センターにご支援のほどを、よろしく願いいたします。

2012 年 6 月

センター長 牧島一夫

目次

I	2011 年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 全般に関する報告	5
1	受賞	7
2	教員, 職員, および研究員	8
3	日本学術振興会先端研究拠点事業	9
4	シンポジウム・研究会	10
4.1	2011 年第 3 回全国同時七夕講演会	10
4.2	「第 11 回宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	10
4.3	東京大学理学系研究科 特別研究会	13
4.4	The Accelerating Universe	13
4.5	RESCEU 研究交流会	16
4.6	東京大学理学部オープンキャンパス・クリスマス講演会	16
5	プレプリント・リスト	18
II	2011 年度 プロジェクト別 研究活動報告	27
1	初期宇宙進化論	29
1.1	初期宇宙・相対論	29
1.2	観測的宇宙論	31
1.3	太陽系外惑星	33
2	銀河進化理論	40
2.1	超新星	40
2.2	ガンマ線バースト	41
3	銀河と宇宙構造の進化	43
3.1	宇宙及び系外銀河	43
4	サブミリ波観測	48
4.1	星・惑星形成の観測的研究	48
4.1.1	はじめに	48
4.1.2	星形成の観測研究	48
4.1.3	系外銀河の化学組成	50
4.1.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	51
4.2	大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究	54
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	54
4.2.2	活動的な銀河における分子スペクトル線サーベイ	56
4.2.3	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	57
5	重力波探査	61
5.1	大型レーザー干渉計重力波検出器 KAGRA の建設	61
5.2	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	62
5.3	ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA	63
5.4	低温光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発	63
5.5	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化	64
5.6	極小距離領域における重力法則の検証	64

5.7	空間等方性の研究	64
6	暗黒物質・太陽アクシオン直接検出	69
6.1	PANDA – 原子炉ニュートリノモニター	69
6.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験	70
6.3	Hidden photon 探索実験について	70
6.4	安価な食物放射能測定器の開発	71
7	飛翔体を用いた宇宙観測	74
7.1	衛星を用いたX線・ γ 線観測	74
7.1.1	科学衛星の運用と稼働状況	74
7.1.2	質量降着するブラックホール	74
7.1.3	中性子星とその磁場	75
7.1.4	銀河系および銀河団の研究	76
7.1.5	<i>ASTRO-H</i> 衛星計画	78
7.2	BESS 気球実験観測	86
7.2.1	超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測	86
7.2.2	BES-Polar 観測結果	86
7.2.3	まとめ	87

I

2011年度
ビッグバン宇宙国際研究センター
全般に関する報告

1 受賞

理学系研究科研究奨励賞(博士) 鈴木昭宏 東京大学天文学専攻博士課程学生 (受賞当時)

2012年3月、鈴木昭宏氏の博士論文に対して理学系研究科研究奨励賞(博士)が授与された。彼の博士論文は、太陽の数十倍の質量を持つ星が起こす超新星爆発で初期に放射する電磁波に関わる2つの研究をまとめたものである。1つは、爆発に伴う衝撃波が表面を通過する直後の明るさの時間変化が爆発の非球対称性の指標になることを数値計算によって示した研究である。この時間変化を解析的な式で表すことによって観測のfittingにも有用な形で提示した。もう1つはガンマ線バーストからの放射機構を探る研究である。星の内部で相対論的なジェットが発生した後、そのジェットが星の表面を突き抜けて星周物質内を伝わる現象を数日以上長い時間にわたって計算し、Lorentz因子が100を超えるようなジェット内部では先端付近でガスが集中し密度の高い領域を作り、光学的に厚くなることを示した。この部分は数日の間はほぼ自由膨張して断熱的に冷えていき、ここから放射される黒体放射が観測者には数秒の間に届いて Prompt emission として観測されることになる。そのスペクトルを計算すると、観測された数 MeV 以下のベキ関数で表されるスペクトルはこの黒体放射を時間積分したものでよく表されることを示した。以上の業績をまとめた博士論文が天文学専攻で高く評価され、表記の賞を受賞した。

2 教員，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫	(センター長/教授；兼任)
横山 順一	(教授)
茂山 俊和	(准教授)
樽家 篤史	(助教)
坂井 南美	(助教)
平賀 純子	(助教)
Polnarev, Alexander	(外国人客員准教授; 2011 April 18 ~ 2011 June 16)
Turner, Edwin Lewis	(外国人客員教授; 2011 May 27 ~ 2011 June 29)
Starobinsky, Alexei A.	(外国人客員教授; 2012 Feb. 15 ~ 2012 March 30)
小林 洸	(特任研究員)
安武 伸俊	(特任研究員)
筒井 亮	(特任研究員)
須山 輝明	(学振研究員)
Lake, Matthew	(学振研究員)
永野 早百合	(事務補佐員)
南澤 三恵子	(事務補佐員)
仲家 増美	(事務補佐員；岡村研究室)

研究プロジェクトおよび担当者

(無印はセンター固有の教員、上添字付は研究協力者)

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

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

3 日本学術振興会先端研究拠点事業

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 (代表 須藤 靖 教授) に採択され、暗黒エネルギー国際研究ネットワーク (DENET) 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。

この目的のために、通常の研究活動の他、本年度は以下のような活動をおこなった。2011年7月25日～7月29日に熊本で「第11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」を開催し、国内外の講師を招いて観測・理論的側面から見た暗黒エネルギーについて連続講義を行い、若手研究者・大学院生のダークエネルギーについての理解を深めた。また10月には、加速膨張する宇宙を、観測・理論両面から理解するための国際会議を、Institut d'Astrophysique de Paris とパリにおいて主催した。2011年度のノーベル物理学賞は、「遠方の超新星の観測を通じた宇宙の加速膨張の発見」に対して、ソール・パールムター、アダム・リース、ブライアン・シュミットの3氏に与えられた。これを記念して、2011年10月11日に主として理学系研究科の学生・教員・職員を対象として、天文学教育研究センターの土居氏を招いて、「2011年ノーベル物理学賞の意味～遠方超新星の観測が明かした宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー～」と題する特別研究会を、関係機関と協力して共催した。加えて、2011年12月23日に「理学部オープンキャンパス・クリスマス講演会」という一般向け講演会を開催した。

4 シンポジウム・研究会

4.1 2011年第3回全国同時七夕講演会

日時：2011年7月7日(木) 18:00～19:00
 場所：東京大学理学部1号館小柴ホール
 講師：坂井 南美
 講演タイトル：星の誕生 ～太陽系の奇跡～

4.2 「第11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：2011年7月25日(月)～7月29日(金)
 場所：熊本県阿蘇郡三愛高原ホテル

プログラム

7月25日(月)

15:00 – 15:30 registration

RESCEU 研究成果報告会 (in Japanese)

chair: 茂山 俊和

15:30-15:40 (10) 牧島 一夫 “RESCEU 研究成果報告会オープニング”
 15:40-16:10 (25+5) 坪野 公夫 “LCGT, DECIGO, DPF”
 16:10-16:40 (25+5) 嶋作 一大 “プロジェクト報告”

16:40-17:00 break

chair: 安武 伸俊

17:00-17:30 (25+5) 吉村 浩司 “BESS-Polar 実験・成果報告”
 17:30-18:00 (25+5) 牧島 一夫 “「すざく」、MAXI、ASTRO-H”
 18:00-18:30 (25+5) 河野 孝太郎 “サブミリ波 (銀河)”

19:30- dinner

7月26日(火)

RESCEU 研究成果報告会 (in Japanese)

chair: 安武 伸俊

- 9:30-10:00 (25+5) 井上 慶純 “Tokyo axion helioscope”
 10:00-10:20 (15+5) 茂山 俊和 “明るい Ia 型超新星の起源”
 10:20-10:40 (15+5) 横山 順一 “Temporal enhancement and decay of superhorizon curvature fluctuations”

10:40-11:00 break

11th RESCEU/DENET Summer School: Dark Energy in the Universe (in English hereafter)

chair: Yasushi Suto

- 11:00-11:10 (10) Yasushi Suto “Opening Remarks for the 11th RESCEU/DENET Summer School”
 11:10-12:10 (50+10) Shirley Ho “Lecture 1: Large scale structure of the Universe”

12:10-13:30 lunch

chair: Jun' ichi Yokoyama

- 13:30-15:00 (80+10) Alexei Starobinsky “Special Lecture: Recent progress in f(R) gravity”
 15:00-15:15 (10+5) Chung-Chi Lee “Phantom Crossing in Modified Gravity Theories”
 15:15-15:30 (10+5) Ling-Wei Luo “Observational Constraints on Exponential Gravity”

15:30-15:50 break

chair: Takeshi Kobayashi

- 15:50-16:05 (10+5) Matthew Lake “Spinning Cosmic Strings”
 16:05-16:20 (10+5) Daisuke Yamauchi “Weak lensing of CMB from cosmic (super-)strings”
 16:20-16:35 (10+5) Sungwook E. Hong “Anthropic Likelihood for Lambda and Q using History of Milky Way and Local Group”
 16:35-16:50 (10+5) Nobutoshi Yasutake “Matter effects on thermal evolutions of compact stars”
 16:50-17:50 (50+10) Toru Yamada “Lecture 1: Witnessing Galaxy Formation at High-z (ellipticals/disks)”

19:00- dinner

7 月 27 日 (水)

chair: Atsushi Taruya

- 10:00-11:00 (50+10) Toru Yamada “Lecture 2: Observing Galaxies at Reionization Era”
 11:00-12:00 (50+10) Toru Yamada “Lecture 3: Future Projects and Observations of High-z Universe”

13:00- excursion to Mount Aso

7 月 28 日 (水)

chair: Matthew Lake

- 10:00-11:00 (50+10) Roy Maartens “Lecture 1: Theoretical models for the accelerating universe”
 11:00-12:00 (50+10) Shirley Ho “Lecture 2: Large scale structure of the Universe”

12:00-13:30 lunch

chair: Matthew Lake

13:30-14:30 (50+10)	Roy Maartens	“Lecture 2: Theoretical models for the accelerating universe”
14:30-14:45 (10+5)	Tsutomu Kobayashi	“Generalized Galileons and inflation”
14:45-15:00 (10+5)	Vincent Vennin	“Numerical approach to the inflationary Langevin equation”
15:00-15:15 (10+5)	Takeshi Kobayashi	“Non-Gaussianity from Curvatons Revisited”
15:15-15:30 (10+5)	Nikolai Meures	“Light Propagation through exact non-linear inhomogeneities in LCDM cosmology”

15:30-15:50 break

chair: Yasushi Suto

15:50-16:50 (50+10)	Shirley Ho	“Lecture 3: Large scale structure of the Universe”
16:50-17:05 (10+5)	Rampey Kimura	“Large Scale Structures in Kinetic Gravity Braiding Model and Observational Implications”
17:05-17:20 (10+5)	Masanori Sato	“Nonlinear Biasing and Redshift-Space Distortions in Lagrangian Resummation Theory and N-body Simulations”
17:20-17:35 (10+5)	Nicolas Van de Rijt	“Multi-fluid renormalized perturbation theory and massive neutrinos”
17:35-17:50 (10+5)	Takahiro Nishimichi	“accurate modeling of the redshift-space distortions of biased tracers”
17:50-18:05 (10+5)	Atsushi Taruya	“RegPTfast: a fast computation of nonlinear power spectrum from perturbation theory”

19:00- dinner

7月29日(水)

chair: Takeshi Kobayashi

9:30-10:30 (50+10)	Roy Maartens	“Lecture 3: Theoretical models for the accelerating universe”
10:30-10:35 (5)	Yasushi Suto	“Closing Remarks”

10:35 bus leaving to Kumamoto Airport

Posters

Shohei Aoyama	“Decaying dark matter models with finite mass daughter particles”
Takashi Hiramatsu	“A head-on approach to structure formation”
Naoya Kitajima	“Inflation in a supersymmetric axion model”
Sachiko Kuroyanagi	“Higher order corrections to the power-law form of the primordial tensor spectrum”
Jiro Matsumoto	“Necessity of revisions for the cosmological matter perturbations from general relativity”
Koichi Miyamoto	“Cosmological effects of decaying cosmic string loops with TeV scale width”
Hayato Motohashi	“Constructing cosmological $f(R)$ models for inflation and cosmic acceleration”
Masahiro Nakashima	“Sound Velocity and Features in the Primordial Power Spectrum”
Toshiya Namikawa	“Lensing Reconstruction from Cosmic Microwave Background”
Atsushi Nishizawa	“Gravitational-wave standard siren”
Ken'ichi Saikawa	“Axion cosmology and domain walls”
Rio Saitou	“The unification of inflation and late-time acceleration in the frame of k -essence”
Takayuki Suzuki	“N-body Simulation of cosmic structure formation in the Moffat Gravity”
Yuichi Takamizu	“Beyond delta-N formalism for multi-scalar system”

4.3 東京大学理学系研究科 特別研究会 2011年ノーベル物理学賞の意味 ～ 遠方超新星の観測が明かした宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー ～

日時：2011年10月11日(火)

場所：東京大学理学部1号館小柴ホール

主催：東京大学大学院理学系研究科、天文学専攻、物理学専攻、ビッグバン宇宙国際研究センター、天文学教育研究センター

共催：日本学術振興会先端拠点形成プロジェクト「暗黒エネルギー国際研究ネットワーク」

プログラム

司会：横山順一 (ビッグバン宇宙国際研究センター)

16:30-16:35 須藤靖 (物理学専攻) はじめに

16:35-17:35 土居守 (天文学教育研究センター) 講演 「遠方超新星の観測が明かした宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー」

17:35-17:50 質疑応答

4.4 The Accelerating Universe

日時：2011年10月24日(月)～10月26日(水)

場所：Institut d'Astrophysique de Paris, France

主催：日本学術振興会先端拠点形成プロジェクト「暗黒エネルギー国際研究ネットワーク」、Institut d'Astrophysique de Paris

Program

Monday, October 24

- 9:00-9:05 Jerome Martin welcome address
 9:05-9:15 Yasushi Suto DENET, Sumire, and TodayForum

SUMIRE project (chair: Yasushi Suto)

- 9:15-09:50 Hitoshi Murayama Sumire and PFS
 9:50-10:10 Hiroshi Karoji HSC Status Last Steps toward the First light
 10:10-10:45 Masahiro Takada Cosmology with Subaru HSC/PFS Surveys
 —coffee break—
 11:05-11:40 Hajime Sugai Progress in Prime Focus Spectrograph Project
 11:40-12:15 Jenny Greene Galaxy Formation with PFS

—conference photo—

12:30-14:00 : lunch break

Constraints from Milky Way and galaxy surveys (chair: Jim Gunn)

- 14:00-14:35 Masashi Chiba New information from the kinematics and chemical abundances of stars in the Milky Way
 14:35-14:55 Yasushi Suto Galactic extinction map and FIR emission of SDSS galaxies
 14:55-15:15 Christophe Yèche The Lyman-alpha forest in three dimensions with BOSS
 15:15-15:35 James E. Taylor A Weak Lensing Measurement of Dark Energy Using Groups in the COSMOS survey

—coffee break—

Gravitational lensing and future surveys (chair: Masamune Oguri)

- 15:55-16:15 Naoki Yoshida Cosmological simulations for large weak-lensing and galaxy redshift surveys
 16:15-16:35 Eric Jullo Cosmology with Strong Lensing in Galaxy clusters
 16:35-16:55 Marek Biesiada Strong gravitational lenses as standard rulers in cosmology
 16:55-17:15 Jean-Paul Kneib ELG as tracers to measure BAO
 16:15-17:35 Chris Hirata WFIRST design reference mission
 17:35-18:05 discussion on synergies between Euclid and Sumire led by Masahiro Takada
 18:20-19:00 short guided tour of the Observatory of Paris
 19:00-21:00 Welcome cocktail and food

Tuesday, October 25

Dark energy from large scale structure (chair: Naoki Yoshida)

09:00-09:20	Enrique Gaztanaga	Cross-correlations of spectroscopic and photometric galaxy Surveys
09:20-09:40	Adeline Buzzi	Measuring dark energy with pairs of galaxies
09:40-10:00	Christophe Pichon	Probing dark energy via critical sets: Peaks, voids, saddles, genus and skeleton
10:00-10:20	Benjamin D. Wandelt	Precision cosmography with stacked voids

—coffee break—

Dark energy (chair: Thomas Buchert)

10:40-11:20	Alexander Dolgov	Vacuum energy: problems and implications
11:20-12:00	Jerome Martin	Dark energy and particle physics
12:00-12:40	Eugeny Babichev	Chameleon fields

12:40-14:20 lunch break

Modified gravity (chair: Jerome Martin)

14:20-15:00	Cedric Deffayet	Modified gravity
15:00-15:40	Jun'ichi Yokoyama	Issues on $f(R)$ cosmology
15:40-16:00	Jiro Matsumoto	Cosmological perturbations in k-essence model
16:00-16:20	Remo Garattini	Effects of Modified Dispersion Relations on the Cosmological Constant Computation

—coffee break—

Alternatives to dark energy (chair: Jun'ichi Yokoyama)

16:40-17:20	Thomas Buchert	Back reaction
17:20-17:40	Giovanni Marozzi	Light-cone averaging in cosmology: formalism and applications

—move to the conference dinner place—

19:00-22:00 Conference dinner dinner on a boat along the seine river

Wednesday, October 26

BAO (chair: John Peacock)

9:00-9:35	Francis Bernardeau	Precision calculations for large-scale structure surveys
9:35-10:10	Takahiko Matsubara	Integration of nonlocal bias, redshift-space distortions, primordial non-Gaussianity with the nonlinear perturbation theory
10:10-10:30	Takahiro Nishimichi	Baryon Acoustic Oscillations in 2D: the Halo Clustering in Redshift Space

—coffee break—

CMB and lensing (chair: Masahiro Takada)

11:00-11:35	David Spergel	CMB Constraints on Dark Energy
11:35-11:55	Toshiya Namikawa	Probing dark energy and neutrino mass from upcoming lensing experiments of CMB and galaxies
12:55-12:15	Chiaki Hikage	Galaxy-Galaxy Lensing as a Tool to Correct the Finger-of-God

12:15-14:00 lunch break

Gravitational lensing (chair: Hiroshi Karoji)

14:00-14:20	Masamune Oguri	The acceleration of the universe as measured by strong gravitational lensing
14:20-14:40	Toshifumi Futamase	Weak lensing study of DM subhalos in Coma cluster
14:40-15:00	Takashi Hamana	Measurement of the cosmic shear correlation function from Subaru data
15:00-15:20	Ryuichi Takahashi	Probability Distribution Functions of Cosmological Lensing: Convergence, Shear, and Magnification
15:20-15:55	John Peacock	Redshift-space clustering in GAMA & VIPERS
15:55-16:00	Yasushi Suto	Summary

4.5 RESCEU 研究交流会

日時：2011年11月17日(木)13:30～18:30

場所：理学部4号館3階1320号室

プログラム

13:30-13:40	[牧島一夫]	「はじめに」
13:40-14:05	[横山順一]	「初期宇宙の相転移の新しいメカニズムとその宇宙論的帰結」
14:05-14:30	[小林 洸]	「CMB 観測で探る超弦理論」
14:30-14:55	[蓑輪 眞]	「Short baseline reactor anomaly and sterile neutrinos」
14:55-15:10	coffee break 1	
15:10-15:35	[須藤 靖]	「SDSS 銀河カタログを用いた銀河系減光地図の検証」
15:35-16:00	[坂井南美]	「ALMA と原始惑星系円盤の観測的研究」
16:00-16:25	[河野孝太郎]	「サブミリ波と多波長の連携で探る銀河と銀河団」
16:25-16:50	[嶋作一大]	「宇宙再電離と銀河の早期進化」
16:50-17:05	coffee break 2	
17:05-17:35	[牧島一夫 + Gu Liyi]	「Interaction between galaxies and hot plasmas」
17:35-18:05	[茂山俊和 + 筒井 亮]	「Long term evolution of GRB jet: the prompt emission and afterglow」
18:05-18:30	[坪野公夫]	「スタートした LCGT 計画」

4.6 東京大学理学部オープンキャンパス・クリスマス講演会

日時：2011年12月23日(金)

場所：東京大学理学部1号館2階207号室

プログラム

- | | | |
|---------------|-------|------------------------|
| 10:30 - 11:00 | 横山 順一 | 「重力波で探る宇宙の始まり」 |
| 12:50 - 13:30 | 嶋作 一大 | 「銀河宇宙と私たち」 |
| 14:20 - 15:00 | 蓑輪 真 | 「ニュートリノ - さまざまな実験法 - 」 |

5 プレプリント・リスト

RESCEU-101/11

Primordial non-Gaussianities of gravitational waves in the most general singlefield inflation model *X. Gao, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama* [arXiv:1108.3513 (astro-ph)]Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 211301

RESCEU-100/11

Extension of local-type inequality for the higher order correlation functions *T. Suyama and S. Yokoyama* [arXiv:1105.5851 (astro-ph)]JCAP 1107, 033 (2011)

RESCEU-99/11

Stability of Schwarzschild-like solutions in f(R,G) gravity models *A. De Felice, T. Suyama and T. Tanaka* [arXiv:1102.1521 (gr-qc)]Phys. Rev. D 83, 104035 (2011)

RESCEU-98/11

A comparison of spectroscopic methods for detecting starlight scattered by transiting hot Jupiters, with application to Subaru data for HD 209458b and HD 189733b *Sally V. Langford, J. Stuart B. Wyithe, Edwin L. Turner, Edward B. Jenkins, Norio Narita, Xin Liu, Yasushi Suto & Toru Yamada* [arXiv:1006.5492 (astro-ph)]Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415(2011)673

RESCEU-97/11

ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn *den Herder et al.* [arXiv:1104.2048 (astro-ph)]Experimental Astronomy, online only (2011) (arXiv:1104.2048)

RESCEU-96/11

Cosmology with space-based gravitational-wave detectors: Dark energy and primordial gravitational waves *Atsushi Nishizawa, Kent Yagi, Atsushi Taruya & Takahiro Tanaka* [arXiv:1110.2865 (astro-ph)]Physical Review D, 85 (2012) 044047

RESCEU-95/11

Improved Modeling of the Rossiter- McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets *Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, Norio Narita, Simon Albrecht, & Bun'ei Sato* [arXiv:1108.4430 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, 742 (2011) 69

RESCEU-94/11

Further Observations of the Tilted Planet XO-3: A New Determination of Spin-Orbit Misalignment, and Limits on Differential Rotation *Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun'ei Sato, Joshua N. Winn, Wako Aoki, Motohide Tamura, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto*[arXiv:1108.4493 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, 63 (2011) L57

RESCEU-93/11

Colors of a Second Earth. II. Effects of Clouds on Photometric Characterization of Earth-like Exoplanets *Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Timothy A. Livengood, & Edwin L. Turner* [arXiv:1102.3625 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, 738 (2011) 184

RESCEU-92/11

An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE *Y. Watanabe, N. Sakai, J.E. Lindberg, J.K. Jorgensen, S.E. Bisschop, and S. Yamamoto* 10.2226[arXiv:1110.2226 (astro-ph)]Astrophys. J. 745, 126 (23 pp) (2012).

RESCEU-91/11

Detection of Phosphorous Nitride in the Lynds 1157 B1 Shocked Region *T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto* Publ. Astron. Soc. Japan, 63, L37-L41 (2011).

RESCEU-90/11

Detection of Two Carbon-Chain-Rich Cores: CB130-3 and L673-SMM4 *T. Hirota, T. Sakai, N. Sakai, and S. Yamamoto* [arXiv:1105.0081 (astro-ph)]Astrophys. J. 736, 4 (8 pp) (2011).

RESCEU-89/11

Early Results of the 3mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region *M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto* Publ. Astron. Soc. Japan, 63, 459-472 (2011).

RESCEU-88/11

Compact Molecular Outflow from NGC2264 CMM3: A Candidate for Very Young High-Mass Protostar *O. Saruwatari, N. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, T. Sakai, and S. Yamamoto* Astrophys. J., 729, 147 (7 pp) (2011).

RESCEU-87/11

Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars *N. Sakai and S. Yamamoto* The Molecular Universe, J. Cernicharo and R. Bachiller eds., Proceedings IAU Symposium No. 280, 43-52 (2011).

RESCEU-86/11

Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions *N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto* Condition and Impact of Star Formation, M. Rolling, R. Simon, V. Ossenkopf, and J. Stutzki eds., EAS Publication Series, 52, 235-238 (2011).

RESCEU-85/11

Line Survey of L1157 B1 Shocked Region *T. Yamaguchi, M. Sugimura, T. Sakai, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto*, Condition and Impact of Star Formation, M. Rolling, R. Simon, V. Ossenkopf, and J. Stutzki eds., EAS Publication Series, 52, 311-312 (2011).

RESCEU-84/11

Cosmic ray helium isotopes from the BESS Polar I experiment *Picot-Clemente, N., Yamamoto, A., et al.* Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China

RESCEU-83/11

Transient variations in cosmic ray proton fluxes from BESS-Polar I *Thakur, N., Yamamoto, A., et al.* Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China

RESCEU-82/11

BESS-Polar: Search for Antihelium *Sasaki, M., Yamamoto, A., et al.* Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China

RESCEU-81/11

Search for Antideuteron with BESS-Polar *Yoshimura, K., Yamamoto, A., et al.* Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China

RESCEU-80/11

Mesurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with BESS-Polar II *Sakai, K., Yamamoto A., et al.* Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, August 11-18, 2011, Beijing, China

RESCEU-79/11

Cosmic-Ray 2H/1H ratios measured from in 2000 during solar maximum *Kim, K., Abe, K., Fuke, H., Hams, T., Lee, M.L., E.S., Shikaze Y., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Tanaka, K., Yamamoto, A., Yoshida K., , and Yoshimura, K.* Advances in Space Research, in press, 2011

RESCEU-78/11

Measurement of the Cosmic-Ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with a Long-duration Balloon Flight over Antarctica Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Kim, Kusumoto, A., Lee, M.H., Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Mitchell, J.W., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., and Yoshimura, K. [arXiv:1107.6000 (astro-ph)]Phys. Rev. Lett., 108, 051102 (2012).

RESCEU-77/11

Improved Ep - TL - Lp Diagram and a Robust Regression Method R. Tsutsui, T. Nakamura, D. Yonetoku., et al. [arXiv:1106.5373 (astro-ph)]Publications of Astronomical Society Japan 63 (2011) 741 - 753

RESCEU-76/11

Testing Two- Component Jet Models of GRBs with Orphan Afterglows K. Inayoshi and R. Tsutsui PASJ, 63 (2011) 735 - 739

RESCEU-75/11

What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations? K. Makishima Proc. The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), AIP, in press (refereed)

RESCEU-74/11

Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar J. Abadie, et al. Physical Review D, 83 (2011) 042001.

RESCEU-73/11

Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ringdown J. Abadie, et al. Physical Review D, 83 (2011) 122005.

RESCEU-72/11

Optical Configuration and Control of Ultra-sensitive Gravitational Wave Detectors Y. Aso and the LCGT Collaboration Journal of the Vacuum Society of Japan, 54 (2011) 597.

RESCEU-71/11

Length sensing and control strategies for the LCGT interferometer Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa Classical and Quantum Gravity, accepted for publication.

RESCEU-70/11

Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS Yamamoto, A., Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Itazaki, A., Kim, Kumazawa, T., Kusumoto, A., Lee, M.H., Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Matsumoto, K., Mitchell, J.W., Myers, Z., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shikaze, Y., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Takasugi, Y., Takeuchi, K., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yoshida, T., and Yoshimura, K Advances in Space Research, in press, 2011

RESCEU-69/11

Deep 1.1 mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE - II. Redshift distribution and nature of the submillimetre galaxy population M. S. Yun, K. S. Scott, Y. Guo, I. Aretxaga, M. Giavalisco, J. E. Austermann, P. Capak, Y. Chen, H. Ezawa, B. Hatsukade, D. H. Hughes, D. Iono, S. Johnson, R. Kawabe, K. Kohno, J. Lowenthal, N. Miller, G. Morrison, T. Oshima, T. A. Perera, M. Salvato, J. Silverman, Y. Tamura, C. C. Williams, and G. W. Wilson [arXiv:1109.6286 (astro-ph)]MNRAS, 420 (2011) 957-985

RESCEU-68/11

NRO M33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC). I. H I to H2 Transition T. Tosaki, N. Kuno, S. M. Onodera Rie, T. Sawada, K. Muraoka, K. Nakanishi, S. Komugi, H. Nakanishi, H. Kaneko, A. Hirota, K. Kohno, and R. Kawabe [arXiv:1106.4115 (astro-ph)]PASJ, 63 (2011) 1171-1179

RESCEU-67/11

AzTEC 1.1-mm images of 16 radio galaxies at $0.5 < z < 5.2$ and a quasar at $z = 6.3$ *A. Humphrey, M. Zeballos, I. Aretxaga, D. H. Hughes, M. S. Yun, R. Cybulski, G. W. Wilson, J. Austermann, H. Ezawa, R. Kawabe, K. Kohno, T. Perera, K. Scott, D. Sánchez-Arguelles, and R. Gutermuth* [arXiv:1107.3120 (astro-ph)]MNRAS, 418 (2011) 74-89

RESCEU-66/11

Millimeter Radio Continuum Emissions as the Activity of Supermassive Black Holes in Nearby Early-type Galaxies and Low-luminosity Active Galactic Nuclei *A. Doi, K. Nakanishi, H. Nagai, K. Kohno, and S. Kameno* [arXiv:1106.5627 (astro-ph)]AJ, 142 (2011) article id. 167

RESCEU-65/11

Temperature Variations of Cold Dust in the Triangulum Galaxy M 33 *S. Komugi, T. Tosaki, K. Kohno, T. Tsukagoshi, K. Nakanishi, T. Sawada, R. Kawabe, H. Ezawa, N. Kuno, S. Onodera, Y. Tamura, G. W. Wilson, M. S. Yun, K. S. Scott, T. A. Perera, J. E. Austermann, D. H. Hughes, I. Aretxaga, K. Tanaka, K. Muraoka, R. Miura, and F. Egusa* [arXiv:1106.2166 (astro-ph)]PASJ, 63 (2011) 1139-1150

RESCEU-64/11

CO Observations of the Host Galaxy of GRB 000418 at $z = 1.1$ *B. Hatsukade, K. Kohno, A. Endo, K. Nakanishi, and K. Ohta* [arXiv:1106.1939 (astro-ph)]ApJ 738 (2011) article id. 33

RESCEU-63/11

AzTEC millimetre survey of the COSMOS field - III. Source catalogue over 0.72 deg^2 and plausible boosting by large-scale structure *I. Aretxaga, G. W. Wilson, E. Aguilar, S. Alberts, K. S. Scott, N. Scoville, M. S. Yun, J. Austermann, T. P. Downes, H. Ezawa, B. Hatsukade, D. H. Hughes, R. Kawabe, K. Kohno, T. Oshima, T. A. Perera, Y. Tamura, and M. Zeballos* [arXiv:1105.0890 (astro-ph)]MNRAS, 415 (2011) 3081-3096

RESCEU-62/11

Detection of an ultrabright submillimetre galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE *S. Ikarashi, K. Kohno, J. E. Aguirre, I. Aretxaga, V. Arumugam, J. E. Austermann, J. J. Bock, C. M. Bradford, M. Cirasuolo, L. Earle, H. Ezawa, H. Furusawa, J. Furusawa, J. Glenn, B. Hatsukade, D. H. Hughes, D. Iono, R. J. Ivison, S. Johnson, J. Kamenetzky, R. Kawabe, R. Lupu, P. Maloney, H. Matsuhara, P. D. Mauskopf, K. Motohara, E. J. Murphy, K. Nakajima, K. Nakanishi, B. J. Naylor, H. T. Nguyen, T. A. Perera, K. S. Scott, K. Shimasaku, T. Takagi, T. Takata, Y. Tamura, K. Tanaka, T. Tsukagoshi, D. J. Wilner, G. W. Wilson, M. S. Yun, and J. Zmuidzinas* [arXiv:1009.1455 (astro-ph)]MNRAS, 415 (2011) 3081-3096

RESCEU-61/11

Tokyo axion helioscope experiment *Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, T. Horie, A. Yamamoto, M. Minowa* [arXiv:1201.4622 (astro-ph)]Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 670 (2012), 73 - 78

RESCEU-60/11

The Mass-dependent Clustering History of K-selected Galaxies at $z < 4$ in the SXDS/UDS Field *J. Furusawa, K. Sekiguchi, T. Takada, H. Furusawa, K. Shimasaku, C. Simpson, M. Akiyama* [arXiv:1101.1566 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 727, Issue 2, article id. 111 (2011).

RESCEU-59/11

Cryogenic Volume-Phase Holographic Grisms for MOIRCS *N. Ebizuka and 14 coauthors* [arXiv:1105.0996 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP2, pp.605-612 (2011)

RESCEU-58/11

Red Star-forming Galaxies and Their Environment at $z = 0.4$ Revealed by Panoramic $H \alpha$ Imaging *Y. Koyama, T. Kodama, F. Nakata, K. Shimasaku, S. Okamura* [arXiv:1103.2180 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 734, Issue 1, article id. 66 (2011).

RESCEU-57/11

Completing the Census of Ly α Emitters at the Reionization Epoch *N. Kashikawa and 18 coauthors* [arXiv:1104.2330 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 734, Issue 2, article id. 119 (2011).

RESCEU-56/11

A Census of Star-forming Galaxies at $z = 1-3$ in the Subaru Deep Field *C. Ly, M. A. Malkan, M. Hayashi, K. Motohara, N. Kashikawa, K. Shimasaku, T. Nagao, C. Grady* [arXiv:1104.5019 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 735, Issue 2, article id. 91 (2011).

RESCEU-55/11

Keck Spectroscopy of Lyman-break Galaxies and Its Implications for the UV-continuum and Ly α Luminosity Functions at $z \gtrsim 6$ *L. Jiang, E. Egami, N. Kashikawa, G. Walth, Y. Matsuda, K. Shimasaku, T. Nagao, K. Ota, M. Ouchi* [arXiv:1109.0023 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 743, Issue 1, article id. 65 (2011).

RESCEU-54/11

First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna *K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, H. Takahashi, K. Okada, N. Matsumoto, W. Kokuyama, N. Kanda, Y. Aso, and K. Tsubono* [arXiv:1103.0346 (gr-qc)]Physical Review Letters, vol. 106, Issue 16, id. 161101 (2011)

RESCEU-53/11

The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO *S. Kawamura, M. Ando, N. Seto, S. Sato, T. Nakamura, K. Tsubono et al.* Classical and Quantum Gravity, Volume 28, Issue 9, pp. 094011 (2011).

RESCEU-52/11

Improvements in Calibration of GSO Scintillators in the Suzaku Hard X-Ray Detector *Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Watanabe, S., Takahashi, H., Noda, H., Nishioka, H., Hiragi, K., Hayashi, K., Nakajima, K., Tashiro, M., Sasano, M., Nishino, S., Torii, S., Sakurai, S., Takahashi, T., Mizuno, T., Enoto, T., Yuasa, T., Tanaka, T., Kouzu, T., Nakano, T., et al.* [arXiv:1107.4857 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP3, pp.S645-S656 (2011)

RESCEU-51/11

Discovery of a Cyclotron Resonance Feature in the X-ray Spectrum of GX 304-1 with RXTE and Suzaku during Outbursts Detected by MAXI in 2010 *Yamamoto, T., Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., Yamaoka, K., Matsuoka, M., Morii, M., & Makishima, K.* [arXiv:1102.4232 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP3, pp.S751-S757 (2011)

RESCEU-50/11

Spectral and Timing Studies of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku *Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Sakurai, S., Nakazawa, K., Noda, H., Done, C., Takahashi, H. & Gandhi, P.* [arXiv:1107.3590 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP3, pp.S771-S783 (2011)

RESCEU-49/11

The Suzaku Discovery of A Hard Power-Law Component in the Spectra of Short Bursts from SGR 0501+4516 *Nakagawa, Y., Makishima, K., & Enoto, T.* [arXiv:1106.4934 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP3, pp.S813-S820 (2011)

RESCEU-48/11

Suzaku Studies of Wide-Band Spectral Variability of the Bright Type I Seyfert Galaxy Markarian 509 *Noda H., Makishima K., Yamada S., Torii S., Sakurai S., & Nakazawa, K.* [arXiv:1109.0457 (astro-ph)]Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.SP3, pp.S925-S936 (2011)

RESCEU-47/11

Long-duration γ ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms *Tsuchiya, H.; Enoto, T.; Yamada, S.; Yuasa, T.; Nakazawa, K.; Kitaguchi, T.; Kawaharada, M.; Kokubun, M.;*

Kato, H.; Okano, M.; Makishima, K. Journal of Geophysical Research, Volume 116, Issue D9, CiteID D09113 (2011)

RESCEU-46/11

Long-term spectral and timing properties of the soft gamma-ray repeater SGR 1833-0832 and detection of extended X-ray emission around the radio pulsar PSR B1830-08 *Esposito, P., Israel, G. L., Turolla, R., Mattana, F., Tiengo, A., Possenti, A., Zane, S., Rea, N., Burgay, M., G* [arXiv:1105.1323 (astro-ph)] Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 416, Issue 1, pp. 205-215 (2011)

RESCEU-45/11

Soft and Hard X-Ray Emissions from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with Suzaku *Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. & Shibazaki, N.* [arXiv:1102.1213 (astro-ph)] Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.2, pp.387-396 (2011)

RESCEU-44/11

Suzaku Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG-6-30-15 *Noda, H., Makishima, K., Uehara, Y., Yamada, S., Nakazawa, K.* [arXiv:1106.5872 (astro-ph)] Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.2, pp.449-458 (2011)

RESCEU-43/11

Rossi X-ray Timing Explorer Observations of the Low-mass X-ray Binary 4U 1608-522 in the Upper-banana State *Takahashi, H., Sakurai, S. & Makishima, Kazuo* [arXiv:1107.3603 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 738, Issue 1, article id. 62 (2011).

RESCEU-42/11

Two-phase ICM in the central region of the rich cluster of galaxies Abell 1795: A joint Chandra, XMM-Newton, and Suzaku view *Gu, L., Xu, H. & Makishima, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-41/11

Suzaku observations of two ultraluminous X-ray sources in the nearby spiral galaxy IC 342 *Yoshida, T., Isobe, N., Mineshige, S., Kubota, A., Mizuno, T. & Makishima, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-40/11

Broad-band Suzaku spectra of the LMXB Aql X-1 in Soft and Hard States *Sakurai, S., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-39/11

Suzaku observations of X-ray binary pulsar GX 304-1 triggered by MAXI/GSC in 2010 August *Yamamoto, T., Mihara, T., Suguzaki, M., Nakajima, M., Yamamoka, K., Matsuoka, M. & Makishima, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-38/11

Hard X-ray properties of a variable standard candle, Crab, with the Suzaku/HXD *Kouzu, T., Terada, Y., Tashiro, M. S., Yamada, S., Bamba, A., Yuasa, Y., Mori, T., Fukazawa, Y., Enoto, T., Tanaka, T., Shibata, S. & Makishima, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-37/11

The Suzaku view of Cyg X-1 over the two spectral states *Torii, S., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-36/11

Attempts toward understanding the formation of magnetars *Nakano, T., K. Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-35/11

Recent Suzaku studies of the X-ray emission from magnetars *Enoto, T., Nakagawa, Y.E., Nakano, T., Nishioka, H., Yasuda, T., Terada, T. Sakamoto, T., Makishima, K. and Suzaku Magnetar Members* Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe, AIP Conference Proceedings, Volume 1427

RESCEU-34/11

The evolution of FLRW spacetime after the birth of a cosmic string *Matthew Lake and Teruaki Suyama* [arXiv:1112.2478 (gr-qc)]Physical Review D, vol. 85, Issue 8, id. 083521 (2012)

RESCEU-33/11

Dark Radiation from Modulated Reheating *Takeshi Kobayashi, Fuminobu Takahashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi* [arXiv:1111.1336 (astro-ph)]Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 03, pp. 036 (2012)

RESCEU-32/11

Black hole perturbation in non-dynamical and dynamical Chern-Simons gravity *Hayato Motohashi, Teruaki Suyama* [arXiv:1110.6241 (gr-qc)]Phys. Rev. D 85, 044054 (2012)

RESCEU-31/11

Phase transition and monopole production in supergravity inflation *Kohei Kamada, Kazunori Nakayama, and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1110.3904 (hep-ph)]Physical Review D, vol. 85, Issue 4, id. 043503 (2012)

RESCEU-30/11

Full-sky lensing reconstruction of gradient and curl modes from CMB maps *Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and Atsushi Taruya* [arXiv:1110.1718 (astro-ph)]JCAP 01 (2012) 007

RESCEU-29/11

Cooling of Compact Stars with Color Superconducting Phase in Quark Hadron Mixed Phase *Tsuneo Noda, Masa-aki Hashimoto, Yasuhide Matsuo, Nobutoshi Yasutake, Toshiki Maruyama, Toshitaka Tatsumi, Masayuki Fujimoto* [arXiv:1109.1080 (astro-ph)]

RESCEU-28/11

Non-Gaussianity from Curvatons Revisited *Masahiro Kawasaki, Takeshi Kobayashi, and Fuminobu Takahashi* [arXiv:1107.6011 (astro-ph)]Physical Review D 84 (2011) 123506

RESCEU-27/11

Black hole perturbation in parity violating gravitational theories *Hayato Motohashi, Teruaki Suyama* [arXiv:1107.3705 (gr-qc)]Phys. Rev. D 84, 084041 (2011)

RESCEU-26/11

Curvature perturbation from velocity modulation *Kazunori Nakayama and Teruaki Suyama* [arXiv:1107.3003 (astro-ph)]Physical Review D, vol. 84, Issue 6, id. 063520 (2011)

RESCEU-25/11

Mixed phases during the phase transitions *Toshitaka Tatsumi, Nobutoshi Yasutake, Toshiki Maruyama* [arXiv:1107.0804 (astro-ph)]Neutron Stars: the aspects of high density matter, equations of state and related observables (2011)

RESCEU-24/11

Next-to-leading Resummation of Cosmological Perturbations via the Lagrangian Picture: 2-loop Correction in Real and Redshift Spaces *Tomohiro Okamura, Atsushi Taruya, and Takahiko Matsubara* [arXiv:1105.1491 (astro-ph)]Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 08, pp. 012 (2011).

RESCEU-23/11

Forecasting the Cosmological Constraints with Anisotropic Baryon Acoustic Oscillations from Multipole Expansion *Atsushi Taruya, Shun Saito, and Takahiro Nishimichi* [arXiv:1101.4723 (astro-ph)]Physical Review D 83 (2011) 103527

RESCEU-22/11

Baryon Acoustic Oscillations in 2D II: Redshift-space halo clustering in N-body simulations *Takahiro Nishimichi and Atsushi Taruya* [arXiv:1106.4562 (astro-ph)]Physical Review D, vol. 84, Issue 4, id. 043526 (2011)

RESCEU-21/11

Temporal enhancement of super-horizon curvature perturbations from decays of two curvatons and its cosmological consequences *Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1106.5983 (astro-ph)]Physical Review D, vol. 84, Issue 8, id. 083511 (2011)

RESCEU-20/11

Detection of Strong Millimeter Emission from the Circumstellar Dust Disk around V1094 Sco: Cold and Massive Disk around a T Tauri Star in a Quiescent Accretion Phase? *Tsukagoshi, Takashi; Saito, Masao; Kitamura, Yoshimi; Momose, Munetake; Shimajiri, Yoshito; Hiramatsu, Masaaki; Ikeda, Norio; Kamegai, Kazuhisa; Wilson, Grant; Yun, Min S.; Scott, Kimberly; Austermann, Jason; Perera, Thushara; Hughes, David; Aretxaga, Itziar; Mauskopf, Philip; Ezawa, Hajime; Kohno, Kotaro; Kawabe, Ryohei* [arXiv:1011.0102 (astro-ph)]Astrophys. J. 726 (2011) 45

RESCEU-19/11

Detections of C2H, Cyclic-C3H2, and H13CN in NGC 1068 *Nakajima, T.; Takano, S.; Kohno, K.; Inoue, H.* [arXiv:1101.3371 (astro-ph)]Astrophys. J. 728 (2011) L38

RESCEU-18/11

AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of the AKARI Deep Field South: source catalogue and number counts *Hatsukade, B.; Kohno, K.; Aretxaga, I.; Austermann, J. E.; Ezawa, H.; Hughes, D. H.; Ikarashi, S.; Iono, D.; Kawabe, R.; Khan, S.; Matsuo, H.; Matsuura, S.; Nakanishi, K.; Oshima, T.; Perera, T.; Scott, K. S.; Shirahata, M.; Takeuchi, T. T.; Tamura, Y.; Tanaka, K.; Tosaki, T.; Wilson, G. W.; Yun, M. S.* [arXiv:1010.0585 (astro-ph)]MNRAS 411 (2011) 102-116

RESCEU-17/11

New Panoramic View of 12CO and 1.1mm Continuum Emission in the Orion A Giant Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation *Shimajiri, Yoshito; Kawabe, Ryohei; Takakuwa, Shigehisa; Saito, Masao; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake; Ikeda, Norio; Akiyama, Eiji; Austermann, Jason E.; Ezawa, Hajime; Fukue, Kei; Hiramatsu, Masaaki; Hughes, David; Kitamura, Yoshimi; Kohno, Kohtaro; Kurono, Yasutaka; Scott, Kimberly S.; Wilson, Grant W.; Yoshida, Atsumasa; Yun, Min S.* [arXiv:1010.3498 (astro-ph)]PASJ 63 (2011) 105-123

RESCEU-16/11

Deep CO Observations and the CO-to-H2 Conversion Factor in DDO 154, a Low Metallicity Dwarf Irregular Galaxy *Komugi, Shinya; Yasui, Chikako; Kobayashi, Naoto; Hatsukade, Bunyo; Kohno, Kotaro; Sofue, Yoshiaki; Kyu, Shiori* [arXiv:1011.3385 (astro-ph)]PASJ 63 (2011) L1-L5

RESCEU-15/11

Dense Clumps in Giant Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud: Density and Temperature Derived from 13CO(J = 3-2) Observations *Minamidani, Tetsuhiro; Tanaka, Takanori; Mizuno, Yoji; Mizuno, Norikazu; Kawamura, Akiko; Onishi, Toshikazu; Hasegawa, Tetsuo; Tatematsu, Ken'ichi; Takekoshi, Tatsuya; Sorai, Kazuo; Moribe, Nayuta; Torii, Kazufumi; Sakai, Takeshi; Muraoka, Kazuyuki; Tanaka, Kunihiko; Ezawa, Hajime; Kohno, Kotaro; Kim, Sungeun; Rubio, Monica; Fukui, Yasuo* [arXiv:1012.5037 (astro-ph)]Astron. J. 141 (2011) 73

RESCEU-14/11

The Millimeter Sky Transparency Imager (MiSTI) *Tamura, Yoichi; Kawabe, Ryohei; Kohno, Kotaro; Fukuhara, Masayuki; Momose, Munetake; Ezawa, Hajime; Kuboi, Akihito; Sekiguchi, Tomohiko; Kamazaki, Takeshi; Vila-Vilaro, Baltasar; Nakagawa, Yuki; Okada, Norio* [arXiv:1101.0037 (astro-ph)]PASJ 63 (2011) 347-356

RESCEU-13/11

IRAS 15099-5856: Remarkable Mid-infrared Source with Prominent Crystalline Silicate Emission Embedded in the Supernova Remnant MSH15-52 *Koo, Bon-Chul; McKee,*

Christopher F.; Suh, Kyung-Won; Moon, Dae-Sik; Onaka, Takashi; Burton, Michael G.; Hiramatsu, Masaaki; Bessell, Michael S.; Gaensler, B. M.; Kim, Hyun-Jeong; Lee, Jae-Joon; Jeong, Woong-Seob; Lee, Ho-Gyu; Im, Myungshin; Tatematsu, Ken'ichi; Kohno, Kotaro; Kawabe, Ryohei; Ezawa, Hajime; Wilson, Grant; Yun, Min S.; Hughes, David H. [arXiv:1101.4453 (astro-ph)]Astrophys. J. 732 (2011) 6

RESCEU-12/11

On the Clustering of Submillimeter Galaxies *C.C. Williams, M. Giavalisco, C. Porciani, M.S. Yun, Min, A. Pope, K.S. Scott, J.E. Austermann, I. Aretxaga, B. Hatsukade, K.S. Lee, G.W. Wilson, R. Cybulski, D.H. Hughes, R. Kawabe, K. Kohno, T. Perera, F.P. Schloerb* [arXiv:1103.3703 (astro-ph)]Astrophys. J. 733 (2011) 92

RESCEU-11/11

Compton Degradation of Gamma-ray Line Emission from Radioactive Isotopes in the Classical Nova V2491 Cygni *Suzuki, Akihiro; Shigeyama, Toshikazu* [arXiv:1007.4386 (astro-ph)]The Astrophysical Journal Letters, Volume 723, Issue 1, pp. L84-L88 (2010).

RESCEU-10/11

Non-thermal Photon Production via Bulk Comptonization at Supernova Shock Break-out *Suzuki, Akihiro; Shigeyama, Toshikazu* [arXiv:1006.5173 (astro-ph)]The Astrophysical Journal, Volume 719, Issue 1, pp. 881-889 (2010)

RESCEU-9/11

Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations *Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama,* [arXiv:1105.5723 (hep-th)]Progress of Theoretical Physics, Vol. 126, No. 3, pp. 511-529 (2011)

RESCEU-8/11

Inflation and nonminimal scalar-curvature coupling in gravity and supergravity *Sergei V. Ketov and Alexei A. Starobinsky* [arXiv:1203.0805 (hep-th)]

RESCEU-7/11

Asymmetric neutrino emission from magnetized proto-neutron star matter including hyperons in relativistic mean field theory *T.Maruyama, T.Kajino, N.Yasutake, M-K.Cheoun, C-Y.Ryu* Physical Review D, vol. 83, Issue 8, id. 081303 (2011)

RESCEU-6/11

Magnification effect on the detection of primordial non-Gaussianity from photometric surveys *Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura and Atsushi Taruya* [arXiv:1103.1118 (astro-ph)]Physical Review D 83 (2011) 123514

RESCEU-5/11

Inflation in Gauge Mediation and Gravitino Dark Matter *Kohei Kamada, Yuichiro Nakai and Manabu Sakai* [arXiv:1103.5097 (hep-ph)]Progress of Theoretical Physics, Vol. 126, No. 1, pp. 35-56 (2011)

RESCEU-4/11

The Music of the Aetherwave - B-mode Polarization in Einstein-Aether Theory *Masahiro Nakashima and Tsutomu Kobayashi* [arXiv:1103.2197 (astro-ph)]Physical Review D, vol. 84, Issue 8, id. 084051 (2011)

RESCEU-3/11

Primordial non-Gaussianity from G-inflation *Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1103.1740 (hep-th)]Physical Review D, vol. 83, Issue 10, id. 103524 (2011)

RESCEU-2/11

f(R) Gravity and its Cosmological Implications *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1101.0716 (astro-ph)] Int.J.Mod.Phys. D20 (2011) 1347-1355

RESCEU-1/11

Future Oscillations around Phantom Divide in f(R) Gravity *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1101.0744 (astro-ph)]JCAP 1106 (2011) 006

II

2011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。本プロジェクトでは、一般相対性理論、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまる研究を、観測と密接な関わりのもとで遂行している。

初期宇宙・相対論

われわれの住むこの宇宙は、今から 137 億年の昔、インフレーションという急速な膨張期を経験したことによって古典的な時空構造として生まれた。そして、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。その後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。さらにまた、近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎は、この 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいかにか始まったか、という問題である。

「初期宇宙・相対論」は、インフレーション宇宙論に代表される素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている、宇宙の創生・進化の研究を目的としている。具体的には、現実的な素粒子理論に基づいたインフレーションモデルの構築、密度揺らぎの生成機構の解明、揺らぎの進化や非線形性の理解、バリオン・ダークマター・ダークエネルギーという宇宙のエネルギー組成の起源、などを中心に研究を進めている。

観測的宇宙論・太陽系外惑星

宇宙の誕生の瞬間を出発点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、適切な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、ロス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。

1.1 初期宇宙・相対論

Generalized G-inflation モデルの提唱

作用の段階では高階微分を含むが、それを変分して得られる場の方程式は 2 階微分までしか含まないものとも一般的な理論を、一般化したガリレオン理論と呼ぶ。同じ性質を持つ理論として 1970 年代にホルンデスキー理論というものが提案されていた。われわれはまず、これらが数学的に同等であることを示し、それに基づいて最も一般的な単一場インフレーションモデルを提唱した。そしてこれを Generalized G-inflation モデルと名付けた。これは、アインシュタイン重力に基づく全てのインフレーションモデルを包含するのみならず、修正重力理論に基づいたインフレーションモデルも含んでいる一般的なモデルである [1]。

さらに、この理論に基づく密度揺らぎ、テンソル揺らぎのスペクトルやその 3 点関数を計算し、一般相対論に基づいたモデルには見られない、新しい形状の 3 点関数が存在し得ることを示した [2]。この一連の研究によって、さまざまなインフレーションモデルの観測的テストがシームレスにできることになる。

その例として、標準理論のヒッグス場がインフレーションを引き起こす可能性を詳細に検討した。その結果、これまでに知られていた 3 種類のヒッグスインフレーション機構のほか、新たに 2 つの機構が存在することを発見した [3]。

宇宙初期密度揺らぎの生成機構とその観測的帰結

現在の宇宙の様々な構造は、初期宇宙における微小な密度揺らぎを種に成長してきたと考えられる [117]。その初期密度揺らぎの生成に関しては様々なメカニ

ズムが提唱されており、また微小スケールの物理（例えば超弦理論など）とも密接に関わっていると考えられている [61, 95, 116]。我々は密度揺らぎを生成する代表的なメカニズムであるカーバトン機構、及び modulated reheating 機構に着目し、それぞれが現在の宇宙に特徴的な痕跡を残すことを明らかにした。前者においては生成される密度揺らぎスペクトルを一般的な条件の下に解析的に導き、揺らぎの統計性がガウス分布から大いに外れ得ること、更にその非ガウス性が強いスケール依存性を持ち得ることを示した [4, 6, 70, 96]。一方、後者の modulated reheating 機構においては、現在の観測実験によってその存在が示唆されつつある暗黒放射が、密度揺らぎと共に生成されることを示した [5]。

速度揺らぎに起因する曲率揺らぎの生成機構の提唱

宇宙初期において重い粒子が速度の空間的な揺らぎを持っていた場合、その粒子の崩壊率もローレンツ因子を通して空間的に揺らぐことに着目し、曲率揺らぎが作られることを示した。そして、もし親粒子の速度が相対論的であれば、この曲率揺らぎが無視できないほど大きくなることを示し、その揺らぎの統計的性質（非ガウス性）を定量的に評価した [11]。

局所型不等式の高次相関関数への拡張

局所型と呼ばれる宇宙初期曲率揺らぎに対しては、3点相関と4点相関関数の間に、4点相関の下限を3点相関の大きさで与える局所型不等式と呼ばれる不等式があることが知られている。これに似た不等式をより高次の相関関数に対して体系的に導く手法を開発した。さらに、それを応用することで6点相関や8点相関に対して、具体的な局所型不等式を導くことに成功した [13]。

一時的に曲率揺らぎが増大する機構の発見

宇宙初期において小さい質量を持つ場が二つ以上あると、曲率揺らぎの振幅が観測されている値よりも、一時的にはるかに大きい値にまで増大されることを示した。また、その場合の揺らぎの非ガウス性の定量的な評価を行ない、将来の宇宙背景放射の観測からシナリオの検証ができることを示した。また、生成される背景重力波のスペクトルの評価も行ない、将来のスペース重力波干渉計で検出できることを明らかにした [12]。

$f(R)$ 重力理論による加速膨張宇宙モデル

現在、宇宙の膨張速度が時間とともに増加していることが、超新星をはじめとするさまざまな観測によって示されている。しかし、一般相対論に基づく、放射や物質といった通常物質では宇宙の加速

膨張を引き起こすことはできない。そこで、重力理論の修正によって宇宙の加速膨張を説明する、修正重力理論の研究が近年活発化している。本研究では一般相対論の自然な拡張である $f(R)$ 修正重力理論において、実効的ダークエネルギーの状態方程式の時間変化の数値計算を行い、その将来的な振舞いからモデルの分類のための判定条件を導出した [7, 118, 119]。また、 $f(R)$ 重力理論は物質密度揺らぎの成長を促進させる効果を持つ。本研究ではこの効果が質量を持ったニュートリノが物質密度揺らぎに及ぼす抑制効果と相殺することに着目し、 $f(R)$ 重力理論においてはニュートリノ質量の制限が変更を受けることを定量的に示した [87, 72, 118, 119]。とくに最近ステライルニュートリノが存在するという実験的示唆がいくつか出されているが、その場合宇宙論的には、一般相対論に基づく Λ CDM モデルは大規模構造の観測と矛盾するが、 $f(R)$ 重力理論ではよりよくフィットするを見いだした [8]。

さらに、 $f(R)$ 修正重力理論の枠組みの中で、宇宙初期の加速膨張であるインフレーションと現在の加速膨張を記述するダークエネルギーを同時に説明する理論モデルを構築し、数値計算を行った [86, 73, 74, 75, 98, 119, 120, 121, 122, 123]。この結果、従来のインフレーションモデルとは異なる非調和振動が起きることが判明し、その効果がインフレーション時の宇宙膨張や、再加熱時の粒子生成に及ぼす影響を明らかにした。

リッチスカラーとガウス・ボンネ項を含む修正重力理論におけるブラックホール摂動論

リッチスカラーとガウスボンネ項で作用が書かれる重力理論での、静的球対称ブラックホールの線形摂動理論を展開した。摂動変数に対する、ハミルトニアンが下から抑えられていないことを導き、その結果一般にそのような重力理論でのブラックホールは不安定であることを示した。またこの不安定性を回避するための必要十分条件も導いた [14]。

チャー・サイモンズ重力理論におけるブラックホール摂動論

チャー・サイモンズ重力理論はパリティを破る相互作用を与える重力理論として注目されている理論モデルである。一般に重力理論の安定性は、最も基本的な時空である静的球対称ブラックホール計量を背景時空とし、そこからの摂動の安定性解析により判定することができる。しかし、パリティを破る理論においては、通常は分離する奇パリティの摂動変数と偶パリティの摂動変数が相互作用を持ち、摂動方程式系が複雑になる。このため先行研究においては、計量摂動を全て取り入れたブラックホールの安定性解析はなされていない。本研究では、摂動方程式を導出する前の作用に着目することでこの問題を解決した [9, 10, 85, 100]。作用の段階において、部分積分を用いて適切な補助場の導入し、得られた

束縛方程式を解くことで、動的でない摂動変数を減らし、マスター変数を自然に導くことができる。これにより、チャーレン・サイモンズ重力理論において計量摂動を全て取り入れた完全なブラックホールの安定性解析にはじめて成功した。

初期宇宙の相転移の新機構とモノポール生成

超重力理論では、全てのスカラー場が少なくとも重力の強さで相互作用するため、それによってインフレーション中に、ハッブルパラメタ程度の質量を各スカラー場に与えることが可能である。このことは相転移を引き起こすヒッグス場の対称性をインフレーション中に回復することが可能であることを意味し、インフレーション中にハッブルパラメタが徐々に減衰するとその間に相転移を引き起こすことができる。われわれは、このような相転移によってモノポールが生成する場合を考察し、モノポール生成は通常ドメインウォールの生成も同時に起こすので、早期に相転移を起こして十分薄めることが必要だが、ドメインウォールの生成を伴わない場合は、観測可能な程度のモノポールを残すことができることを示した [15]。

重力波観測と矛盾しない宇宙ひもの生成・進化シナリオの研究

宇宙ひもに対して現在最も厳しい制限を与えているのは、ミリ秒パルサーを用いた背景重力波の観測であり、大きな線密度をもつ宇宙ひもは強い重力波源となり得るため、その存在が棄却されてしまう。しかし、インフレーション中に生成された宇宙ひもは、インフレーションが終了するまでに間隔が引き延ばされるため、ひも同士が交叉して重力波源であるループを生成し始めるのが遅れ、パルサー観測からの制限を逃れることができる。このようなシナリオに基づいて、宇宙ひもの放出する重力波を数値計算で定量的に評価した。この結果、現在のミリ秒パルサーの観測に矛盾しないだけでなく、宇宙マイクロ波背景放射に対しては通常の宇宙ひもと同様の寄与をするような宇宙ひもが存在可能であることがわかった。さらに今回、超重力理論に基づいたインフレーションモデルを構築・解析し、モデルパラメータを適当に選ぶことでこのシナリオを実現することが可能であることを示した [16, 47, 97]。

宇宙ひも生成に伴う欠損角を持った時空の出現とその伝搬の解析

FLRW 宇宙の中で、対称性の破れに伴って宇宙ひもが生じると、その時空への影響がどのように伝搬するかを線型摂動論を使って評価した。その結果、光円錐の外側は厳密な FLRW 計量にとどまっている、光円錐に沿って重力波のショック波が走り、光円

錐とサウンドホライズンの間は重力波のみが存在する、サウンドホライズンの内側では重力ポテンシャルや流体の揺らぎが励起されている、宇宙ひもの十分近傍ではよく知られている欠損角のある時空構造に落ち着く、ということを示した [17]。

1.2 観測的宇宙論

バリオン音響振動の2次元モデルとハロークラスタリング

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。さらに、分光観測から得られる赤方偏移ゆがみの影響を利用すると密度ゆらぎの成長率を決定することができ、宇宙論的スケールでの重力理論の検証ができる。しかしながら、赤方偏移ゆがみによって生じる非等方性のせいで銀河のクラスタリングを2次元面上で特徴づける必要がある。これまで我々は重力進化の摂動論にもとづき、バリオン音響振動の精密な2次元モデルを構築、音響振動の非等方性を精密に特徴づける理論テンプレートの開発を行ってきた。本年度は、N体シミュレーションのハローカタログを用いて理論テンプレートの有効性を検討した。ハローカタログから測定したバリオン音響振動には、銀河バイアスと赤方偏移ゆがみの非線形な絡み合いによると考えられる異常な振幅増大が見られたが我々の開発した理論テンプレートはそのふるまいを定量的に説明することに成功し、実用にも十分耐えうるテンプレートであることが示された [21, 68, 127]。

ラグランジェ再和法にもとづく弱非線形パワースペクトルの高次補正

重力進化による宇宙大規模構造のクラスタリングを定量的かつ精密に特徴づけるため、近年、摂動論にもとづいた解析計算手法の改良が進んでいる。従来の摂動展開に何らかの非摂動的効果を取り込むことで展開の収束性を向上させる、というのが基本的アイデアであるが、本研究では、ラグランジェ描像にもとづき摂動展開を部分再和するという「ラグランジェ再和法」に着目、摂動の高次補正を系統的に取り入れるための定式化の拡張を行った。拡張された定式化にもとづき、2ループの高次補正まで入れた計算を行い、N体シミュレーションとの比較から、従来の摂動論に比べて展開の収束性が向上することを見いだした [22]。

弱非線形領域における質量パワースペクトルの高速理論計算

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形重力進化の計算は、近年改良が進んだおかげで、バリオン音響振動などの将来観測に対して高精度の理論テンプレートを提供しうる重要な手法となった。とはいえ、適用範囲を広げ、精度を上げるためには、摂動の高次補正を計算する必要があり、多次元の数値積分の評価に時間がかかることから、パラメーター推定などの用途に使うには未だ問題があった。本研究では、 Γ -展開と呼ばれる新たな摂動展開の定式化にもとづき、劇的な時間短縮を可能とする高速計算手法を開発した。この方法では、予め用意された摂動計算のデータセットと差分を取ることで、必要な計算をただかだか1次元の数値積分に簡約化させる。N体シミュレーションなどとの比較・検証を通して、この摂動計算が従来より広い適用範囲をもつことを確認し、方法論の有効性を確認した。さらに現在、一般公開を目指して、CMB ボルツマンコードに組み込むことで汎用性の高い計算ツールを開発中であり、パラメーター推定にも使える実用的なコードが完成する [76, 69, 102, 103, 129, 130]。

スペース重力波干渉計を用いた宇宙論：ダークエネルギーと原始重力波

現在、地上では次世代型のレーザー干渉計の建設が進み、重力波の直接検出の期待が一層高まっているが、その一方、宇宙にレーザー干渉計を打ち上げて低周波の重力波観測を目指すプロジェクトの模索が進んでいる。こうしたプロジェクトの大きなゴールが、宇宙初期に起こったインフレーションの直接的証拠と考えられる原始重力波の検出である。そのためには、無数の連星中性子星が放射する重力波を取り除く必要があるが、本研究では、これら連星中性子星の重力波を”標準音源”として使うことで、宇宙膨張の精密診断に使える可能性を探った。合体前の連星中性子星から放射される重力波の振幅には宇宙論的距離の情報が含まれ、位相には宇宙膨張による変調が現れる。これらを組み合わせることで、原理的には重力波観測だけから、宇宙膨張の変化が測定可能である。フィッシャー解析にもとづく見積もりから、原始重力波の検出に必要なレーザー干渉計の感度があれば、連星中性子星を用いた宇宙膨張の精密診断が十分可能であることを突き止め、電磁波観測のフォローアップなしにダークエネルギーを探索する新たなプローブとなりうることを明らかにした [20]。

銀河の測光サーベイから探る原始非ガウス性：増光効果の影響

宇宙初期の揺らぎの生成機構を説明するインフレーション理論のうち、最も単純なモデルでは宇宙初期の揺らぎが従う確率分布はほぼガウス分布である。こ

のため、大きな原始非ガウス性の検出によって単純なモデルは棄却される。また、原始非ガウス性を詳細に調べることで、初期宇宙での揺らぎの生成メカニズムに関する新たな知見を得ることができる。宇宙初期に生成された揺らぎの統計的性質は、銀河数密度と物質揺らぎを結び付ける関係、すなわち銀河バイアスに反映されるため、銀河サーベイを行うことで原始非ガウス性の探求を行うことができる。

一方、実際の銀河サーベイから得られた銀河の等級限界サンプルには、大規模構造による弱重力レンズ効果で増光（あるいは減光）された銀河が含まれる。この増光効果によって銀河数密度が変化し、銀河数密度の相関パワースペクトルに新たな寄与が生じる。増光効果の影響は相関パワースペクトルの大角度スケールにおいて顕著に現れるため、原始非ガウス性の検証に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、銀河サーベイにおける観測量として銀河数密度および歪みを考慮し、これらの相関量における増光効果の影響について詳細に調べた。まず、増光効果が角度パワースペクトルに与える影響を調べ、増光効果のない場合には物理的に相関の小さい量は、増光効果によってその振幅が大幅に増幅され、HSCなどの銀河サーベイで検出可能になることが分かった。また、LSSTなどの次世代サーベイを利用した場合、銀河サーベイを用いた原始非ガウス性の推定において増光効果は無視できない系統誤差となることを明らかにした [23]。

CMBの弱い重力レンズ再構築法の導出および宇宙論への応用

観測されるCMBの揺らぎには大規模構造による弱重力レンズ効果の情報が含まれており、光子の軌跡の曲がり角を情報として取り出すことで、密度揺らぎなどの重力場を生じるソースに関して情報を得ることができる。CMBの弱重力レンズ効果は、Okamoto & Hu (2003) (OH03) など示されたアルゴリズムをもとに、CMBの観測データのみから曲がり角の情報を取り出せる。将来的には、PolarBearやACTPolといった角度分解能が高い地上のCMB観測において高精度で曲がり角を再構築できると考えられている [79, 105]。

OH03では、曲がり角がポテンシャルの空間微分(勾配成分)のみで与えられると仮定している。しかし、重力波や宇宙紐などによるレンズ効果では、曲がり角に空間微分以外の項(カール成分)が含まれる。このため、重力レンズ効果を用いて重力波や宇宙紐の検証を行う場合にはOH03の方法を拡張する必要がある。また、観測領域が有限であったり前景放射のマスクが存在するより現実的なマップを用いた場合にもカール成分は生じるため、系統誤差の確認としてカール成分の再構築を行う必要がある。

本研究では、OH03の手法を拡張し、曲がり角を勾配・カール成分に分離・再構築することで、重力波や宇宙紐の検証にも適用可能な曲がり角の再構築の手法を示した。また、Planck、ACTPolおよび検出器ノイズなしを想定し、カール成分の再構築を行

うことで原始重力波、および宇宙紐検証の可能性を見積もり、宇宙紐の検証方法として新たな手法を提案した [24, 77, 78, 106, 107, 131, 132, 133]。

OH03 等の再構築法では理想的な条件（全天の観測領域、マスクなし）を仮定しているが、実際の再構築では観測領域が有限であったり前景輻射のマスクが存在するより現実的なマップから再構築を行う必要があり、このような現実的な条件下での再構築法の開発が不可欠である。そこで本研究は、シミュレーションで作成したレンズマップをもとに、観測領域が有限でありマスクが存在する、より現実的なマップから再構築を行う手法を示した [104, 132, 133]。

SDSS 銀河カタログを用いた SFD 減光マップの検証

あらゆる系外天文観測は、我々の銀河系空間越しになされる。したがって、正確な銀河系ダスト減光マップは本質的である。現在最も広く用いられている減光マップは Schlegel, Finkbeiner, Davis (1988:SFD) によるもので、これは COBE と IRAS の全天赤外天文観測から推定されるダストの赤外「放射量」を用いて構築されている。しかしこれを可視域での「吸収量」に変換するには様々な仮定が必要なため、その信頼性を独立な方法で検証することは重要である。

Yahata et al. (2007) は、SDSS DR4 (Sloan Digital Sky Survey 4th Data Release) 銀河カタログを用いて SFD マップを検証し、減光量が 0.1 等以下の領域において系統誤差が存在することを示した。この系統誤差は、SFD で推定した銀河系内ダストの赤外放射に、系外銀河による赤外放射の寄与が混入したために生じたと結論されている。我々はこの結果を進展させて、SDSS 銀河カタログを用いて SFD マップを補正する可能性を検討している。今年度は、系外銀河の赤外放射による影響を数値的・解析的にモデル化し、これを SDSS DR7 の観測結果と比較することで、SFD マップの系統誤差が Yahata et al. (2007) の仮説によって説明されることを定量的に示した [49, 112, 113]。

1.3 太陽系外惑星

トランジット惑星系を用いた惑星の軌道傾斜角の測定

本研究は、トランジット惑星系の観測によって惑星系の持つ基本的な性質を調べ、惑星形成・進化モデルに観測的な制限を与える事である。2011 年度は主に以下の 2 つに特化して惑星の軌道傾斜角の測定を行った。(1) 過去数年間の研究に引き続きロシター効果の観測を行った。ロシター効果はすでに 40 個以上の惑星系に対して測定されているが、惑星形成・移動理論を絡めた統計的な議論を行うにはまだサンプル数として不十分である。我々は主にすばるなどの大口径望遠鏡の特色を生かした観測を継続しており、2011 年度は XO-3, XO-2, HAT-P-16 という 3 つの天体の観測を行い解析を行った。また、ロシ

ター効果についてはさらに精密な理論モデル化を行い、星の作動回転の影響なども取り入れて議論した [25, 26, 27, 28, 80, 81, 82, 108]。(2) 一方でロシター効果以外の方法論を用いて星の自転軸と惑星の公転軸の関係を調べる研究も試みた。特に我々はケプラー望遠鏡による観測に着目し、アーカイブ・データの解析を行った。ケプラーで取得された星のライトカーブのうち、黒点による明るさの変動を持つものだけを取り出して解析し、その変動周期から星の自転周期を求めた。一方、一般に星を分光観測することにより、吸収線幅から星の射影自転速度（星の赤道面での自転速度のうち、我々の視線方向成分）を求める事が出来る。そこで私は新たにケプラーで検出されたトランジット惑星候補天体のうち黒点による周期変動を示す約 15 天体に対して分光観測を行い、射影自転速度を求めて星の自転周期と比較した。これにより星の自転軸が我々の視線方向に対してどの程度傾いているか（星の自転傾斜角）を推定した。トランジット惑星を持つ系では惑星の軌道公転軸は我々の視線方向に対してほぼ垂直であるため、星の自転傾斜角の測定は惑星の公転軸と中心星の自転軸の関係を表す指標となる。解析の結果、我々はいくつかの系で星の自転軸と惑星の公転軸がずれている証拠を発見した [109]。

地球の多バンド測光観測からの組成同定と経度方向のマッピング

反射光の波長依存性は、系外地球型惑星の表面を知る上で重要な鍵となる。EPOXI mission によって数千地球半径程度の上空から観測された可視～近赤外域の地球の反射光の時系列データを、等方的な散乱・数種類の表面組成という仮定のもとで解析することにより、雲・海・大陸・植生・雪などのスペクトルを用いれば各成分の存在比やその経度方向の分布は正しく再現できることが分かった。また、系外惑星観測で見込まれる大きな観測ノイズが組成推定に与える影響を定量的に調べ、EPOXI と同等の観測から雲や海のような割合の大きな成分を同定するには各バンドで 5 % 程度以下の精度、また植生などそれ以外の成分の寄与を検出するには 1 % 以下の精度が求められることを示した [29]。

惑星の自転・公転を利用した 2 次元マッピング (雲有り)

22 年度は、自転と公転という 2 種類の運動による主星-惑星-観測者の位置関係の変化を注意深く考慮すれば、系外惑星の反射光の年周変動から、表面の 2 次元アルベドマップが再構築できることを、雲のない場合で示した (Spin-Orbit Tomography; SOT)。23 年度はこれを雲のある場合に拡張した。その結果、雲の日変化や季節変化を取り入れたシミュレーションでも同じ手法が適用できることが分かった。この場合、単一バンドのマッピングからは雲と雪の成分の非一様性が抽出でき、雲の平均的なパターン (高緯

度で雲量が多いなど)が再現されることが分かった。また、雲や雪の反射率は波長にあまりよらないことから、2バンドの差をとることで、雲や雪以外の成分(表面)の非一様性が再構築できることが分かった。特に、レッドエッジ(植生に特有の、波長750nm付近で反射率が急激に増大する現象)を挟む2バンドの差をとると、局所的な植生地帯が同定できることが分かった[30]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations,” *Prog. Theor. Phys.* **126** (2011) 511 [arXiv:1105.5723 [hep-th]].
- [2] X. Gao, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Primordial non-Gaussianities of gravitational waves in the most general single-field inflation model,” *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 211301 [arXiv:1108.3513 [astro-ph.CO]].
- [3] K. Kamada, T. Kobayashi, T. Takahashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Generalized Higgs inflation,” arXiv:1203.4059 [hep-ph].
- [4] M. Kawasaki, T. Kobayashi and F. Takahashi, “Non-Gaussianity from Curvatons Revisited,” *Phys. Rev. D* **84**, 123506 (2011) [arXiv:1107.6011 [astro-ph.CO]].
- [5] T. Kobayashi, F. Takahashi, T. Takahashi and M. Yamaguchi, “Dark Radiation from Modulated Reheating,” *JCAP* **1203**, 036 (2012) [arXiv:1111.1336 [astro-ph.CO]].
- [6] T. Kobayashi and T. Takahashi, “Runnings in the Curvaton,” arXiv:1203.3011 [astro-ph.CO].
- [7] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Future Oscillations around Phantom Divide in $f(R)$ Gravity,” *JCAP* **1106**, 006 (2011) [arXiv:1101.0744 [astro-ph.CO]].
- [8] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Cosmology based on $f(R)$ Gravity admits 1 eV Sterile Neutrinos,” arXiv:1203.6828 [astro-ph.CO].
- [9] H. Motohashi and T. Suyama, “Black hole perturbation in parity violating gravitational theories,” *Phys. Rev. D* **84**, 084041 (2011) [arXiv:1107.3705 [gr-qc]].
- [10] H. Motohashi and T. Suyama, “Black hole perturbation in non-dynamical and dynamical Chern-Simons gravity,” *Phys. Rev. D* **85**, 044054 (2012) [arXiv:1110.6241 [gr-qc]].
- [11] K. Nakayama and T. Suyama, “Curvature perturbation from velocity modulation,” *Phys. Rev. D* **84**, 063520 (2011) [arXiv:1107.3003 [astro-ph.CO]].
- [12] T. Suyama and J. Yokoyama, “Temporal enhancement of super-horizon curvature perturbations from decays of two curvatons and its cosmological consequences,” *Phys. Rev. D* **84**, 083511 (2011) [arXiv:1106.5983 [astro-ph.CO]].
- [13] T. Suyama and S. Yokoyama, “Extension of local-type inequality for the higher order correlation functions,” *JCAP* **1107**, 033 (2011) [arXiv:1105.5851 [astro-ph.CO]].
- [14] A. De Felice, T. Suyama and T. Tanaka, “Stability of Schwarzschild-like solutions in $f(R,G)$ gravity models,” *Phys. Rev. D* **83**, 104035 (2011) [arXiv:1102.1521 [gr-qc]].
- [15] K. Kamada, K. Nakayama and J. Yokoyama, “Phase transition and monopole production in supergravity inflation,” *Phys. Rev. D* **85** (2012) 043503 [arXiv:1110.3904 [hep-ph]].
- [16] K. Kamada, Y. Miyamoto and J. Yokoyama, “Evading the pulsar constraints on the cosmic string tension in supergravity inflation,” arXiv:1204.3237 [astro-ph.CO].
- [17] M. Lake and T. Suyama, “Evolution of FLRW spacetime after the birth of a cosmic string,” *Phys. Rev. D* **85**, 083521 (2012) [arXiv:1112.2478 [gr-qc]].
- [18] Sally V. Langford, J. Stuart B. Wyithe, Edwin L. Turner, Edward B. Jenkins, Norio Narita, Xin Liu, Yasushi Suto & Toru Yamada “A comparison of spectroscopic methods for detecting starlight scattered by transiting hot Jupiters, with application to Subaru data for HD 209458b and HD 189733b”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **415**(2011)673
- [19] den Herder et al. “ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn”, *Experimental Astronomy*, online only (2011) (arXiv:1104.2048)
- [20] Atsushi Nishizawa, Kent Yagi, Atsushi Taruya & Takahiro Tanaka: “Cosmology with space-based gravitational-wave detectors: Dark energy and primordial gravitational waves”, *Physical Review D*, **85** (2012) 044047
- [21] Takahiro Nishimichi & Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D. II. Redshift-space halo clustering in N-body simulations”, *Physical Review D*, **84** (2011) 043526
- [22] Tomohiro Okamura, Atsushi Taruya & Takahiko Matsubara: “Next-to-leading resummation of cosmological perturbations via the Lagrangian picture: 2-loop correction in real and redshift spaces”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **08** (2011) 012
- [23] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura and Atsushi Taruya ”Magnification effect on the detection of primordial non-Gaussianity from photometric surveys” *Physical Review D*, **83** (2011) 123514
- [24] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and Atsushi Taruya ”Full-sky lensing reconstruction of gradient and curl modes from CMB maps” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **01** (2012) 007

- [25] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, Norio Narita, Simon Albrecht, & Bun'ei Sato: "Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets", *The Astrophysical Journal*, **742** (2011) 69
- [26] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun'ei Sato, Joshua N. Winn, Wako Aoki, Motohide Tamura, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: "Further Observations of the Tilted Planet XO-3: A New Determination of Spin-Orbit Misalignment, and Limits on Differential Rotation", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) L57
- [27] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Bun'ei Sato, Hiroki Harakawa, Akihiko Fukui, Wako Aoki, & Motohide Tamura: "XO-2b: a Prograde Planet with Negligible Eccentricity and an Additional Radial Velocity Variation", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) L67
- [28] Simon Albrecht, Joshua N. Winn, R. Paul Butler, Jeffrey D. Crane, Stephen A. Shectman, Ian B. Thompson, Teruyuki Hirano, & Robert A. Wittenmyer: "A High Stellar Obliquity in the WASP-7 Exoplanetary System", *The Astrophysical Journal*, **744** (2012) 189
- [29] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Timothy A. Livengood, & Edwin L. Turner: "Colors of a Second Earth. II. Effects of Clouds on Photometric Characterization of Earth-like Exoplanets", *The Astrophysical Journal*, **738** (2011) 184
- [30] Hajime Kawahara, & Yuka Fujii: "Mapping Clouds and Terrain of Earth-like Planets from Photometric Variability: Demonstration with Planets in Face-on Orbits", *The Astrophysical Journal Letters*, **739** (2011) L62
- (国内雑誌)
- [31] 横山順一 "電磁気学" 書評誌「ひろば」東大生協駒場学生委員会 170号 p19
- [32] 須藤 靖 "主役はダーク" 毎日新聞社 本の時間 2011年4月号~2012年3月号
- [33] 須藤 靖 "空想書店" 読売新聞 2011年4月10日朝刊
- [34] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その十五: 指折り数えて", 東京大学出版会 UP **464**(2011)19
- [35] 須藤 靖・河原 創 訳 "銀河はどこへ行った?" (共訳), 日経サイエンス (2011) 8月号, p60
- [36] 須藤 靖 "たかがナカグロ、されどナカグロ - 科学技術か、科学・技術か", 東京大学出版会 UP **466**(2011)18
- [37] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その十六: サイコロを振れ、受験生", 東京大学出版会 UP **468**(2011)25
- [38] 須藤 靖 "世界でいろいろ 指で数える方法", 朝日小学生新聞 2011年11月3日
- [39] 池内了 (編) "道の手帖 寺田寅彦", 河出書房新社 (2011年11月刊行, pp.38-44 執筆)
- [40] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その十七: 宇高連絡船のUDON", 東京大学出版会 UP **470**(2011)42
- [41] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その十八: $P \times I=1$ の法則の発見", 東京大学出版会 UP **473**(2012)13
- [42] 須藤 靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境論説 2011年5月2日、6月1日、6月18日、6月30日、7月14日、7月23日、7月27日、9月1日、9月15日、9月30日、10月6日、11月8日、11月29日、12月10日、12月16日、12月29日、2012年1月10日、1月11日、1月25日、3月6日、3月28日
- [43] 樽家 篤史: "編集後記", 日本物理学会誌 第8号 (2012)
- [44] 平野 照幸: "トランジット惑星を用いた惑星の軌道傾斜角の測定と惑星移動理論", 日本天文学会誌「天文月報」, **105** (2012) 131
- (学位論文)
- [45] 中島正裕: "Probing signatures of new physics in the cosmic microwave background" (博士論文)
- [46] 牧浦頭二郎: "ブラックホールダークマター連星の形成と重力波放出" (修士論文)
- [47] 宮本裕平: "宇宙ひもの重力波問題と超重カインフレーション" (修士論文)
- [48] 藤井頭彦: "高密度惑星環の力学に関する理論的研究" (修士論文)
- [49] Toshiya Kashiwagi "The Implication of the anomaly in the SFD Galactic extinction map on Far-infrared emission of galaxies" (修士論文)
- (著書)
- [50] 横山順一 "知っておきたい物理の疑問 55" 日本物理学会編 講談社ブルーバックス
- [51] 須藤 靖 "三日月とクロワッサン", 毎日新聞社 (2012年2月刊行)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [52] J. Yokoyama, "G-inflation and its non-Gaussianity" Cosmological Nongaussianity Workshop, Michigan State University, Ann Arbor, U.S.A. May 13, 2011
- [53] J. Yokoyama "G-inflation and generalized G-inflation" Solvay/APC/PI conference, Paris, France, June 15, 2011
- [54] J. Yokoyama "Generalized G-inflation" Preplanckian inflation workshop, University of Minnesota, Minneapolis, U.S.A. October, 2011
- [55] J. Yokoyama " w_{eff} and m_ν in f(R) gravity" CosPA 2011, Beijing University, Beijing, China October 1, 2011.

- [56] J. Yokoyama “Primordial Black Holes” Egypt-Japan joint workshop on cosmology (Modern University for technology and information, Egypt, 12/1-12/4, 2011)
- [57] Teruaki Suyama: “Curvature perturbation from velocity modulation”; Egypt-Japan joint workshop on cosmology (Modern University for technology and information, Egypt, 12/1-12/4, 2011)
- [58] J. Yokoyama “Cosmological constraints on primordial black holes” The ECTP international conference on primordial QCD matter in LHC era (Modern University for technology and information, Egypt, 12/4-12/8, 2011)
- [59] Teruaki Suyama: “Curvature perturbation from velocity modulation”; The ECTP international conference on primordial QCD matter in LHC era (Modern University for technology and information, Egypt, 12/4-12/8, 2011)
- [60] J. Yokoyama “Generalized G-inflation” First LeCosPA symposium, National Taiwan University, Taipei, February 6-9, 2012
- [61] T. Kobayashi, “Aspects of D-Brane Inflation in String Cosmology” Summer Institute 2011 (Cosmology & String), Yamanashi, Japan, Aug. 3 - 12, 2011
- [62] Yasushi Suto: “Known unknowns and unknown unknowns: astronomy vs. physics”; invited talk at ISMD2011 (Miyajima, September 26, 2011)
- [63] Yasushi Suto: “DENET, Sumire and TodaiForum”; opening address of IAP/DENET conference “The accelerating universe” (Paris, October 24-26, 2011)
- [64] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD Galaxy extinction map and FIR emission from SDSS galaxies”; IAP/DENET conference “The accelerating universe” (Paris, October 24-26, 2011)
- [65] J. Yokoyama, “Issues on $f(R)$ Cosmology” IAP/DENET conference “The accelerating universe” (Paris, October 24-26, 2011)
- [66] Yasushi Suto: “Unknown knowns and unknown unknowns in the universe”; Workshop on Chemical Evolution of the Universe (Tokyo, October 31, 2011)
- [67] Yasushi Suto: “Hierarchy in the cosmic structures”; Kyoto University GCOE symposium “Link among hierarchies” (Kyoto, February 13, 2012)
- [68] Atsushi Taruya: “Precision cosmology from redshift-space galaxy clustering”; WKYC2011 @ KIAS (Soul, 6/27-7/1, 2011)
- [69] Atsushi Taruya: “RegPTfast: a fast computation of non-linear power spectrum from perturbation theory”; PTchat @ IPHT (Saclay, 9/20-22, 2011)
- [70] T. Kobayashi, “Non-Gaussianity from Curvatures Revisited” 11th RESCEU/DENET Summer School: Dark Energy in the Universe, Kumamoto, Japan, Jul. 25 - 29, 2011
- [71] Teruaki Suyama: “Black hole perturbation in parity violating gravitational theories”; The 21st workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Tohoku University, 9/26-9/29, 2011)
- [72] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Constraints on $f(R)$ gravity and neutrino mass from large scale structure,” 17th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS), The University of Cambridge, UK, Jul. 3 - 8, 2011.
- [73] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “The unification of inflation and dark energy in extended $f(R)$ gravity,” The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Tohoku University, Miyagi, Japan, Sep. 26 - 29, 2011.
- [74] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ models for Primordial and Present Dark Energy,” Cosmology Workshop Montpellier 11, Laboratoire de Physique Theorique et Astroparticules (LPTA), Universite Montpellier, France, Nov.3- 4, 2011.
- [75] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama “Constructing cosmological $f(R)$ models for inflation and cosmic acceleration,” 11th RESCEU-DENET joint meeting & summer school ‘Dark Energy in the Universe’, Kumamoto, Japan, Jul. 25 - 29, 2011.
- [76] Atsushi Taruya: “RegPTfast: a fast computation of non-linear power spectrum from perturbation theory”; RESCEU/DENET summer school (Aso, 7/26-29, 2011)
- [77] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and Atsushi Taruya “An algorithm for reconstructing gradient- and curl-type deflection angle from CMB maps” Berkeley CMB Lensing WS, U.C.Berkeley, April 21-23, 2011
- [78] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and Atsushi Taruya “Lensing reconstruction from the cosmic microwave background” 11-th RESCEU/DENET Summer School: Dark Energy in the Universe, Kumamoto, July 25-29, 2011
- [79] Toshiya Namikawa, Shun Saito and Atsushi Taruya “Probing dark energy and neutrino mass from upcoming lensing experiments of CMB and galaxies” DENET/IAP Conference, IAP, October 24-26, 2011
- [80] Teruyuki Hirano: “Measurements of Stellar Obliquities for Transiting Exoplanets with Subaru/HDS”; Subaru Users Meeting FY2011 (Tokyo, 2/29, 2012)
- [81] Teruyuki Hirano: “The Rossiter-McLaughlin Effect: Improved Model and New Data”; Extreme Solar Systems II (Wyoming, USA, 9/11-17, 2011)

- [82] Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn, Simon Albrecht, Yasushi Suto, Norio Narita, & Ben 'ei Sato: "New Analyzing Tools for the Rossiter-McLaughlin Effect"; The 220th Meeting of the American Astronomical Society (Boston, USA, 5/23, 2011)
- [83] Yuka Fujii, Hajime Kawahara: "Global Mapping of Earth-like Exoplanets from Scattered Light Curves as a Probe of the Habitat"; Extreme Solar Systems II (Jackson, WY, USA, 9/11-9/17, 2011)
- [84] Yuka Fujii, Hajime Kawahara: "Simulation and Inversion of Annual Light Curves of a Second Earth"; Exoclimates 2012 (Aspen, CO, USA, 1/16-1/20, 2012)

会議集録

- [85] H. Motohashi and T. Suyama, "Stability of Schwarzschild-like spacetime in parity violating gravitational theories," in *Proceedings of The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- [86] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Joint description of inflation and dark energy in extended $f(R)$ gravity," in *Proceedings of The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- [87] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, " $f(R)$ Cosmology and Massive Neutrinos," in *Proceedings of CosPA 2011*

(国内会議)

招待講演

- [88] 横山順一 "重力波でさぐる初期宇宙" 名古屋大学談話会 名古屋大学物理学教室 2011年9月13日
- [89] 横山順一 "宇宙創生論 現状と課題" 京都大学国際シンポジウム 知の統合 京都大学百周年記念館 2011年10月15日
- [90] 須藤 靖: "バイオマーカーと第二の地球の色"; 第11回 自然科学研究機構シンポジウム『宇宙と生命 - 宇宙に仲間はいるか否か』(名古屋ナディアパーク, 2011年6月12日)
- [91] 須藤 靖: "観測的宇宙論の展望"; 理論天文学懇談会シンポジウム (国立天文台, 2011年11月6日)
- [92] 須藤 靖: "加速膨張する宇宙論"; 日本物理学会 宇宙物理領域シンポジウム (関西学院大学, 2012年3月24日)
- [93] 藤井 友香: "地球型惑星のバイオマーカー"; 自然科学研究機構シンポジウム (東京国際フォーラム, 3/20-3/20, 2012)

一般講演

- [94] 横山順一 "Temporal enhancement and decay of superhorizon curvature fluctuations" RESCEU/DENET サマースクール 阿蘇 三愛高原ホテル 2011年7月25-29日

- [95] 小林洸 "CMB 観測で探る超弦理論" RESCEU 研究交流会, 東京大学, 日本, 2011年11月17日
- [96] 小林洸 "Density Perturbations from Curvatons Revisited" 第五回 超弦理論と宇宙, 大分, 日本, 2011年2月21日 - 23日
- [97] 宮本 裕平, 鎌田 耕平, 横山 順一: "cosmic string の重力波問題と超対称性インフレーション"; 日本物理学会 2011年秋季大会, 弘前大学, 青森, 日本, 2011年9月16日 - 19日
- [98] 本橋隼人, A. A. Starobinsky, 横山順一 「 $f(R)$ 重力理論によるインフレーションとダークエネルギーの統一」 本橋隼人, A. A. Starobinsky, 横山順一, 日本物理学会 2011年秋季大会, 弘前大学, 青森県, 日本, 2011年9月16日 - 19日.
- [99] 須山輝明: "Extension of local-type inequality for the higher order correlation functions"; 物理学会 (弘前大学, 9/18, 2011)
- [100] 本橋隼人, 須山輝明 「Chern-Simons 重力理論におけるブラックホール摂動論」 日本物理学会第67回年次大会 (2012年), 関西学院大学, 兵庫県, 日本, 2012年3月24日 - 27日.
- [101] 須山輝明: "Inborn metric of cosmic string"; 物理学会 (関西学院大学, 3/27, 2012)
- [102] 樽家篤史: "RegPTfast: 弱非線形領域における質量パワースペクトルの精密理論計算"; 天文学会 (龍谷大学, 3/21/2012)
- [103] 樽家篤史: "RegPTfast: 摂動論にもとづく非線形パワースペクトルの高速計算"; 物理学会 (関西学院大学, 3/26/2012)
- [104] 並河 俊弥, 高橋 龍一, 樽家 篤史 「不完全マップからの CMB の弱い重力レンズ効果の再構築」 日本天文学会 2012年春季年会, 龍谷大学, 2012年3月19日~22日
- [105] 並河 俊弥 「CMB の弱い重力レンズを用いたニュートリノ質量への制限: 現状と将来の展望」 東京大学 RA キャンプ, 伊豆, 2012年2月26日~28日
- [106] 並河 俊弥, 樽家 篤史 「CMB の弱い重力レンズ効果の再構築法: カール成分を含めた定式化」 日本天文学会 2011年秋季年会, 鹿児島大学, 2011年9月19日~22日
- [107] 並河 俊弥, 山内 大介, 樽家 篤史 「CMB の弱い重力レンズマップ再構築: 勾配・カール成分の分離法」 CMB ワークショップ, JAXA, 2011年7月11日
- [108] 平野 照幸, 樽家 篤史, 須藤 靖, 竹田 洋一, 成田 憲保, Joshua N. Winn, Roberto Sanchis-Ojeda, & Simon Albrecht: "ケプラー測光を用いた星の自転軸傾斜角の測定"; 天文学会 (龍谷大学, 3/22, 2012)
- [109] 平野 照幸, 成田 憲保, 佐藤 文衛, 須藤 靖, Joshua N. Winn, Simon Albrecht, 青木和光, & 田村元秀: "トランジット惑星系のロシター効果の観測: 最新データと精密モデル化"; 天文学会 (鹿児島大学, 9/22, 2011)
- [110] 藤井 友香, 河原 創: "地球型惑星のキャラクターゼーション"; 国際高等研究所「宇宙の生命」研究会 (東京大学, 6/16-6/18, 2011)

- [111] 藤井 友香, Edwin L. Turner, 須藤 靖: “地球型惑星の水吸収線と表層環境”; 天文学会 2012 年春季年会 (龍谷大学, 3/19-3/22, 2012)
- [112] 柏木俊哉, 須藤靖, 樽家篤史, 矢幡和浩, 加用一者: “SDSS カタログを用いた銀河系ダスト減光マップの検証とその系統誤差起源の追究”; 日本天文学会 2011 年秋季年会 (鹿児島大学, 9/19-9/22, 2011)
- [113] 柏木俊哉, 須藤靖, 樽家篤史, 矢幡和浩, 加用一者, 西道啓博: “遠方銀河の遠赤外放射に起因する SFD ダストマップの系統誤差”; 日本天文学会 2012 年春季年会 (龍谷大学, 3/19-3/22, 2012)
- (セミナー)
- [114] 横山順一 “G-inflation” 名古屋大学素粒子論セミナー 2011 年 4 月 19 日
- [115] 横山順一 “素粒子的宇宙論” 弘前大学集中セミナー 2011 年 11 月 9 日
- [116] T. Kobayashi, “D-Brane Inflation in String Cosmology” Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, Canada, Oct. 12, 2011
- [117] 小林洸 「インフレーション宇宙における密度揺らぎの生成」 東京大学 青木研究室, 2011 年 12 月 19 日
- [118] H. Motohashi, “Cosmological implications of $f(R)$ gravity” ICG, The University of Portsmouth, UK, Jun. 29, 2011.
- [119] 本橋隼人, 「 $f(R)$ 重力理論における宇宙論的帰結」 早稲田大学, 東京都, 日本, 2011 年 7 月 22 日.
- [120] H. Motohashi, “Viable $f(R)$ models for primordial and present cosmic acceleration” Centre de Physique Theorique (CPT), Universite Marseille, France, Nov. 1, 2011.
- [121] H. Motohashi, “Combined description of primordial and present dark energy in $f(R)$ gravity” Astroparticle et Cosmologie (APC), Universite Paris Diderot-Paris 7, France, Nov. 8, 2011.
- [122] H. Motohashi, “Unified $f(R)$ models of inflation and dark energy” Institut d’Astrophysique de Paris (IAP), Universite Pierre et Marie Curie, France, Nov. 9, 2011.
- [123] H. Motohashi, “ $f(R)$ models for the early and the present acceleration of the Universe” High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan, Feb. 13, 2012.
- [124] Yasushi Suto: ”Colors of a second Earth: towards exoplanetary remote-sensing” seminar at Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (Lyon, October 20, 2011)
- [125] Yasushi Suto: ”Cosmological implications of inhomogeneities in intra-cluster gas ” seminar at ASIAA (Taipei, February 2, 2012)
- [126] Yasushi Suto: ”Colors of a second Earth” Colloquium at ASIAA (Taipei, February 3, 2012)
- [127] 樽家篤史: “バリオン音響振動と宇宙大規模構造の非線形進化”; CG 研おんたけセミナー (木曽福島, 9/2, 2011)
- [128] 樽家篤史: “観測的宇宙論 観測から探る宇宙の様相”; 地球維新塾 (12/2, 2011)
- [129] 樽家篤史: “宇宙の彼方の非線形性”; ランチトーク @物理学教室 (12/9, 2011)
- [130] 樽家篤史: “宇宙大規模構造の(超)精密理論計算”; 宇宙物理(重力)・素粒子論グループコロキウム (大阪市立大学, 2/3, 2012)
- [131] Toshiya Namikawa “Lensing Reconstruction from Cosmic Microwave Background” 東京大学 IPMU, July 21, 2011
- [132] 並河 俊弥 「CMB の弱い重力レンズを用いた観測的宇宙論」 弘前大学, 2011 年 12 月 7 日
- [133] 並河 俊弥 「CMB の弱い重力レンズを用いた観測的宇宙論」 名古屋大学, 2012 年 2 月 16 日
- [134] Teruyuki Hirano: “Measurements of Stellar Obliquities and its Implication to Planetary Migration”; TA group seminar (Nagoya University, Dec. 2, 2011)
- [135] 藤井 友香: “第二の地球の覗き方: 反射光による系外惑星の表層環境の再構築”: (早稲田大学, 6/10 2011)
- (集中講義)
- [136] 横山順一 “Single Field Inflation” 名古屋大学 2011 年 9 月 12-14 日
- [137] 横山順一 “インフレーション宇宙論” 東京工業大学 2011 年 11 月 16,18,21 日
- [138] 横山順一 “インフレーション宇宙論と観測” 京都大学基礎物理学研究所 2012 年 3 月 3-4 日
- [139] J. Yokoyama “Reheating after inflation” AP-CosPA winter school, National Taiwan University, Taipei, January 13-15, 2012
- [140] J. Yokoyama “Introduction to inflationary cosmology” Asia Pacific Spring School on Gravitation and Cosmology, Yukawa Institute for Theoretical Physics, March 1-2, 2012
- (一般講演)
- [141] 横山順一 “重力波で探る宇宙” 小松高校見学会 2011 年 8 月 2 日
- [142] 横山順一 “東大への数理科学” 日比谷高校 SSH 講演会 2011 年 12 月 20 日
- [143] 横山順一 “重力波でさぐる初期宇宙” 東京大学オーブンキャンパス講演会 2011 年 12 月 23 日
- [144] 須藤 靖: “太陽系外惑星から宇宙生物学へ”; 第 12 回 林忠四郎記念講演会 (筑波大学, 2012 年 1 月 17 日)
- [145] 須藤 靖: “Invaluable で priceless な科学の価値と値段”; 九段中等教育学校キャリア講演会 (九段中等教育学校, 2012 年 2 月 24 日)

- [146] 須藤 靖: “いまこそ夜空を眺めよう” 相馬高校東京大学研修講演会 (東京大学経済学部、2011 年 4 月 15 日)
- [147] 須藤 靖: “夜空を通して世界を知る”; 駿台予備学校講演会 (駿台予備学校、2011 年 6 月 18 日)
- [148] 須藤 靖: “福島の夜空ノムコウ”; 第 3 回全国同時七夕講演会 (福島県立安達高校、福島高校、相馬高校、2011 年 7 月 7、8 日)
- [149] 須藤 靖: “宇宙を知り 世界を知る”; 東京大学第 62 回駒場祭公開講座「東大の知に触れる秋」(東大駒場キャンパス、2011 年 11 月 26 日)
- [150] 須藤 靖: “加速する宇宙論”; 宇宙科学講演会 (東大駒場キャンパス、2011 年 12 月 7 日)

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ことが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ている。

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

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

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

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

2.1 超新星

衝撃波面でのコンプトン散乱による非熱的放射形成

超新星爆発時に内部で発生した衝撃波が星の表面を通過する直前にコンプトン散乱によって熱的放射の光の一部がエネルギーを与えられることで、スペクトルが黒体放射からずれ、高エネルギー側にテールが形成される。爆発時の流体力学的なモデルに自己相似解を用い、輻射輸送をモンテカルロ法で扱うことで、この現象を数値計算した。衝撃波の伝播速度が光速に非常に近いときにも計算できる様にした。[15]

Ia型超新星の多様性の起源の研究

Ia型超新星は明るい標準光源として宇宙論的な研究にも利用されている。しかし、その明るさの変化には多様性も見られる。他方、Ia型超新星を起こす白色矮星では近年、強い磁場(表面で $\sim 10^9$ G)が見つかった。この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。[4]

Ia型超新星での伴星の影響と水素の吸収線

Ia型超新星は連星系中の白色矮星の爆発と考えられている。伴星が赤色巨星や主系列星だった場合、その外層の多くの部分は爆発とともに吹き飛ばされる。そこに含まれる水素が観測されるスペクトルに吸収線を残す可能性と爆発物質が伴星にぶつかって衝撃

波を発生し観測される向きによっては明るくなる可能性を2次元輻射流体力学計算コードを用いて計算している。[16, 21]

非常に明るい Ia 型超新星の起源

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

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。最近、ジェット方向に飛び出した鉄を多く含んだ物質が銀河の重力圏を突破して次世代の星に受け継がれない効果を取り入れた化学進化モデルを提案し、結果を論文にし投稿した。西オーストラリア大学の戸次氏、国立天文台の辻本氏との共同研究。

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

超新星爆発の流体力学数値計算により、超新星として光り始めた直後の明るさの時間変化のしかたと爆発の非球対称性や視線方向の関係を経験式により結びつけた研究。水素の外層がある青色超巨星と水素の外層が失われた Wolf-Rayet 星では衝撃波表面出現時の明るさの時間変化のしかたが著しく変わることがわかった。[7, 10]

2.2 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストジェットの長時間進化

大質量星でのジェット状爆発を2次元軸対称を仮定した特殊相対論的流体力学計算コードを用いて計算し、星を突き破ったジェットが Lorentz factor 100 を超えた速度で膨張する際に非常に狭い領域に密度の高い領域を先端部分に持つことを確認した。その先端部分は爆発から数日間は断熱自由膨張し、かつ光学的に厚いことから、その間断熱的に冷却していく。その部分からの黒体放射を時間積分するとスペクトルはベキ乗になることを指摘し、そのベキ指数が観測された GRB の即時放射のスペクトルの低エネルギー側の冪指数と一致することがわかった。爆発から数日間はジェットの黒体放射を受ける観測者にとっては数秒に対応するので、即時放射として観測される。[5, 8, 11, 17, 19]

ガンマ線バーストの新しい分類方法

ガンマ線バーストの即時放射のスペクトルパラメータ、赤方偏移、光度曲線のすべてのデータがそろっている GRB のデータを用いて、GRB のピークエネルギー (E_p) と明るさの相関と光度曲線の一定光度からのズレという新しい指標を用いた長いガンマ線バーストの分類手法についての研究をしている。(特任研究員、筒井亮氏の研究) [13, 18]

<受賞>

- [1] 鈴木 昭宏、理学系研究科研究奨励賞 (博士)、東京大学、2012年3月

<報文>

(原著論文)

- [2] Inayoshi, K., & Tsutsui, R. "Testing Two-Component Jet Models of GRBs with Orphan Afterglows", 2011, PASJ, 63, 735-739
- [3] Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., et al. "Improved $E_p - T_L - L_p$ Diagram and a Robust Regression Method", 2011, PASJ, 63, 741-753
- [4] Kutsuna, M., & Shigeyama, T. "Effects of Magnetic Fields on the Propagation of Nuclear Flames in Magnetic White Dwarfs", 2012, ApJ, 749, 51
- [5] Shigeyama, T., Suzuki, A., & Nakamura, K. "Early evolution of spherical ejecta expanding into the circumstellar matter at ultra-relativistic speeds", 2012, PASJ, 64, No. 5, in press
- [6] Satoshi Hamano, Naoto Kobayashi, Sohei Kondo, Takuji Tsujimoto, Katsuya Okoshi, and Toshikazu Shigeyama "Type Ia SUPERNOVA REMNANT SHELL AT $z = 3.5$ SEEN IN THE THREE SIGHTLINES TOWARD THE GRAVITATIONALLY LENSED QSO B1422+231", 2012 ApJ,

(会議抄録)

- [7] Suzuki, A. & Shigeyama, T. “Probing explosion geometry of core-collapse supernovae with light curves of the shock breakout”, IAU Symposium 279 on DEATH of MASSIVE STARS: SUPERNOVAE & GAMMA-RAY BURSTS, in press

(学位論文)

博士

- [8] 鈴木昭宏; Theoretical studies of high-energy emissions associated with the gravitational collapse of massive stars

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [9] Suzuki, A., & Shigeyama, T. “Numerical integration of the relativistic Vlasov-Maxwell system”, Internal Workshop on Particles and Radiation from Cosmic Accelerators CA2012, Chiba University, Japan, February 22, 2012, (Oral)
- [10] Suzuki, A., & Shigeyama, T. “Probing explosion geometry of core-collapse supernovae with light curves of shock breakout”, IAU Symposium 279 Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-ray Bursts, Nikko, Japan, March 16, 2012, (Oral)

(国内会議)

一般講演

- [11] 鈴木昭宏, 茂山俊和, “GRB jet の長時間進化と放射機構への示唆”, 超新星爆発と数値シミュレーション, 京都大学, 2011年12月28日(口頭).
- [12] 茂山俊和, “星団の色等級図から太陽質量の星の最初の数十億年の進化が見えるか”, 国立天文台ひのでサイエンスセンター・ワークショップシリーズ, 太陽の磁気的活動と生命の誕生, 「Faint Young Sun Paradox 研究会」, 2011年9月5日(口頭)
- [13] 筒井亮, 中村卓史, 米徳大輔, 村上敏夫, 高橋慶太郎 “長いガンマ線バーストの新しい種族分け”, 科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第五回領域シンポジウム, 東京工業大学, 2012年2月7日(口頭).
- [14] 鈴木昭宏, 茂山俊和, “超新星 shock breakout からの非熱放射”, Multi-Messenger astronomy で迫るコンパクト天体, 京都大学, 2012年2月23日(口頭).

日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学 2011/3/19-22

- [15] 大谷 友香理, 鈴木 昭宏, 茂山 俊和, “重力崩壊型超新星の超相対論的 shock breakout による高エネルギー光子の発生”, 2012年3月19日(口頭), K02a

- [16] 朽名正道, 茂山 俊和, “Ia 型超新星と伴星との衝突ではがれる水素の観測可能性”, 2012年3月19日(口頭+ポスター), K10b

- [17] 茂山俊和, 鈴木昭宏, 中村航, “超相対論的に膨張する物質と星周物質の衝突の初期進化”, 2012年3月22日(口頭), J54a

- [18] 筒井亮, 中村卓史, 米徳大輔, 村上敏夫, 高橋慶太郎 “長いガンマ線バーストの新しい分類法”, 2012年3月22日(口頭), J59a

- [19] 鈴木昭宏, 茂山俊和, “Long GRB jet の長時間進化計算と放射機構への示唆”, 2012年3月22日(口頭), J60a

日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学
2010/9/19-22

- [20] 鈴木昭宏, 茂山俊和, “強磁場中性子星表面での爆発的要素合成と X 線放射”, 2011 年日本天文学会秋季年会, 鹿児島大学, 2011 年 9 月 20 日(口頭), J19a

- [21] 朽名正道, 茂山俊和, “Ia 型超新星と伴星との衝突による H α 輝線”, 2011 年 9 月 20 日(口頭), K18a

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

赤方偏移 $z = 6.844 - 7.213$ にある 3 個のドロップアウト銀河の分光確認：赤方偏移 7 にある銀河のライマン・アルファ輝線の統計

大内正己（東京大学宇宙線研究所）、Bahram Mobasher (University of California), Mark Dickinson (National Optical Astronomical Observatories, Tucson), 柏川伸成 (国立天文台) らとの共同研究。

The Great Observatories Origins Deep Survey Northern (GOODS-N) Field で見つかった $z = 7$ にある銀河候補 11 個を Keck 望遠鏡の DEIMOS で分光し、そのうち 3 天体から強い輝線を検出した。輝線の非対称性や、他の輝線が受かっていることなどから、これらの輝線は赤方偏移したライマン・アルファ ($\text{Ly}\alpha$) 輝線だと結論づけた。赤方偏移はそれぞれ 7.213, 6.965, 6.844 である。特に $z = 7.213$ 銀河は、二度の独立した観測で、三つの異なる分光設定で検出を確認した。 $z = 6.965$ 銀河はすでに $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 IOK-1 として知られた天体だが、今回の高分解能の分光観測により、輝線の非対称性がロバストに求められた。分光確認できた 3 つの銀河からの $\text{Ly}\alpha$ 輝線のフラックスはいずれも約 $3 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ で、 $\text{Ly}\alpha$ 等価幅 (EW_0) は 33–43 Å だった。 $z = 7$ 銀河を分光した先行研究の結果を組み合わせ、43 個の $z = 7$ 銀河のうち、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線を強く ($\text{EW}_0 > 25 \text{ \AA}$) 放射している銀河の割合を調べた。その結果、紫外線で明るい ($M_{\text{UV}} = -21.0$) 銀河でも暗い ($M_{\text{UV}} = -19.5$) 銀河でも、低赤方偏移から外挿される値より小さくなっていることがわかった。特に、紫外線で暗い銀河の方での変化が大きいこともわかった。このことは、 $z = 6$ から $z = 7$ にかけて銀河間物質の水素の中性度が大きくなること、そして再電離が高密度領域から低密度領域へと進んだことを示唆している。[8]

$z = 5.7$ 原始銀河団候補の研究

大内正己（東京大学宇宙線研究所）らとの共同研究。
Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった $z = 5.7$ の 2 つの銀河数密度超過領域、すなわち原始銀河団候補の性質を調べた。SXDS

の可視 ($R, i', \text{NB816}$) の撮像データをもとに選択されたライマン・アルファ輝線銀河 (LAEs) から該当領域にあるものを、Subaru/FOCAS と Keck/DEIMOS を用いて計 36 天体可視分光観測したデータを解析したところ、これら 2 つの原始銀河団候補は密度超過が 12–47 であり、その時代としては非常に高密度な領域であった。しかし現在の宇宙の銀河団と比べるとこの密度超過は低く、質量も現在の銀河団の 1/10 から 1/100 程度であり、ビリアル系には達していない未熟な銀河集団であることが分かった。また、20 個もの銀河を分光同定したのもこれだけ遠方宇宙としては非常に数が多いものである。今後この原始銀河団候補の構成銀河の性質を詳しく調べることで、銀河団形成および進化の謎の解明に役立つことが期待される。

$z = 3.1$ にあるライマン・アルファ輝線銀河周囲の淡いライマン・アルファ・ハロー

松田有一 (California Institute of Technology), 山田亨, 林野友紀 (東北大学), 大内正己 (宇宙線研究所), 梅村雅之, 森正夫 (筑波大学) らとの共同研究。

$z = 3.1$ で見つかった 2128 個のライマン・アルファ ($\text{Ly}\alpha$) 輝線銀河 (LAE) の $\text{Ly}\alpha$ 画像を重ね合わせ、環境と紫外光度の関数として、高赤方偏移銀河周囲の $\text{Ly}\alpha$ ハローの表面輝度分布を調べた。その結果、 $\text{Ly}\alpha$ 放射の動径方向のプロファイルの傾きは局所的な LAE 表面密度が高いほど緩やかであるが、紫外光度にはほとんど依らないことがわかった。 $\text{Ly}\alpha$ ハローのスケール長は、LAE 表面密度の 2 乗に比例することもわかった。 $\text{Ly}\alpha$ ハローがダークマターの分布に従う銀河間物質の大規模構造を反映しているとする、 $\text{Ly}\alpha$ の空間的な広がりが、中心にある銀河の活動性より、周囲の Mpc スケールの環境に強く依存することは驚くべきことではない。[9]

3 つの狭帯域フィルターによる $z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) の平均的な重元素量と星形成率の推定

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

遠方の LAEs は質量の小さい星形成銀河であるため、重い銀河を作る部品 (building block) に相当し、銀河進化において重要な役割を担っていると考えられている。しかし、その物理的性質は未だ良く分かっていない。そこで我々は、独自の狭帯域フィルター (NB387) を Subaru/Suprime-Cam に装着し、 $z = 2.2$ の LAE 探査を行った。この赤方偏移では、一階電離した酸素原子からの輝線 ([OII] 輝線) と水素原子の $\text{H}\alpha$ 輝線を既存の近赤外狭帯域フィルター (それぞれ KPNO/NEWMFIRM の NB118 と NB209) で捕えることが出来るため、撮像観測から LAE の物理量が得られる。Subaru-XMM Newton Deep Survey 領域において我々は、100 個以上の LAE の NB118,

NB209 画像をスタックすることで平均的な LAE の [OII] と H α 輝線の検出に初めて成功した。H α 輝線強度から星形成率を推定したところ、 $14M_{\odot}/\text{yr}$ を得た。また、H α と [OII] 輝線の強度比から重元素量を調べたところ、下限値 (2σ) として、 $0.09 Z_{\odot}$ を得た。それほど低くない重元素量から、LAE を原始銀河とする説は $z \sim 2$ では成立していないと考える。また SED fit から推定された星質量 ($5 \times 10^8 M_{\odot}$) を元に物理量の質量依存性を調べてみると、LAE はその質量の割に星形成活動が弱く、また重元素量が高いことが判明した。興味深いことに、星質量と星形成率、重元素量を組み合わせて導き出された "fundamental mass-metallicity 関係" (Mannucci et al. 2010, MNRAS, 408, 2115) 上では、大質量銀河と矛盾の無い結果が得られた。[7]

$z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) の近赤外分光: 重元素量と星形成率の推定

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

Lya emitter (LAE) は非常に暗いため、基本的な物理量である星形成率や重元素量を求めることが難しい。我々は、Subaru/Suprime-Cam NB387 探査で見つけた $z = 2.2$ LAE の H α と [OII] 輝線を近赤外狭帯域撮像で捕え、LAE の平均的な星形成率と重元素量を見積もることに成功した。しかし、個々の LAE の性質や、物理量の質量依存性は依然としてよくわかっていない。そこで我々は個々の LAE を詳しく調べる目的で、Keck/NIRSPEC を用いて $z = 2.2$ LAE の近赤外分光を行った。COSMOS, GOODS-N 領域でそれぞれ 4 天体、2 天体の LAE を 1 時間以上分光したところ、GOODS-N の 2 天体を除く全ての LAE から 3σ 以上の有意性で H α 輝線の検出に成功した。内 1 天体は更に [OIII] と [OII] も NIRSPEC の観測から得られている。我々は既に Magellan/MMIRS による近赤外分光から GOODS-S と SSA22 領域で計 3 個の LAE の有意な H α , [OIII] 輝線の検出にも成功している。NIRSPEC によって内 1 天体を追観測した結果、[OII] の検出にも新たに成功した。我々は LAE では初めて、[OII] を含めた重要な輝線を複数持つ LAE を独自のサンプルから 2 天体も発見した。これら分光データを元に LAE の物理量を求めてみたところ、うち 1 天体は同じ質量、赤方偏移での他の銀河から推定される重元素量と比べ 0.65 dex ほど低重元素量であることが判明し、LAE の中には銀河進化の初期段階にいる天体も含まれている可能性が示唆された。今後分光天体をより詳しく解析し、LAE の強い Lya 輝線の放射メカニズムに迫っていく。

VLT/X-shooter を用いた $z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) の近紫外から近赤外までの同時分光観測

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

遠方銀河の重元素量の推定には、強い輝線の強度比が広く用いられている。しかし、異なる観測装置や時期に取得された輝線から正確な輝線比を導く事は困難で、得られた重元素量にも不定性が伴う。そこで我々は、ESO の Very Large Telescope (VLT) の X-shooter という分光装置を用い、 $z = 2.2$ の LAE の分光を行った。X-shooter は近紫外 (3000Å) から近赤外 (2.5 μm) までのスペクトルを 3 つの arm で同時に取得できるため、 $z = 2.2$ LAE からの Lya 輝線だけでなく、静止系可視の重要な輝線も高い波長分解能 ($R \sim 5000$) で取得できるため、正確な輝線比から信頼度高く重元素量を求めることができる。割り当てられた計 30.5 時間の内、約 8 時間が Queue Mode で行われ、GOODS-S の 2 天体のスペクトルを取得する事が出来た。現在解析中であり、得られた良質なデータを元に、これまでに得られた分光結果を補うと同時に、これまでは明るい OH 輝線によって隠されていた輝線も高い分解能によって捕える事が出来るため、ダスト量といった新しい情報も得る事が出来ると期待される。

$z = 2.2$ Lyman α Emitters(LAEs) の近赤外分光によるガス運動の研究

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

我々は大規模な $z \sim 2.2$ LAEs 測光サンプルの内、明るいものをターゲットに、Magellan/MMIRS および Keck/NIRSPEC を用いて近赤外分光を行ってきた。我々は、両輝線を同時に検出した 4 天体およびこれまで文献に掲載された他の 4 天体で両輝線を詳細に調べることで、LAEs においてもガスの吹き出し現象である outflow が普遍的に ($\sim 75\%$) 生じていることを突き止めた。LAEs における非常に根本的な問題である、なぜ共鳴散乱を受けてしまい銀河外へ脱出しにくい Lya を強く放射しているのか、という問題に迫るため、Lya 離脱率や等価幅といった Lya 強度の指標と、outflow 速度やダスト量などの相関を調べた。驚いたことに本サンプルにおいて、Lya 強度は outflow 速度とは予想と逆に負の相関を持ち、ダスト量には依存しないということが分かった。今後サンプルを増やすとともに、他の可能性についても検証することで解決の糸口を探す。

かみのけ座銀河団メンバー銀河に伴う広がった H α 放射の性質

八木雅文, 小宮山裕ら (国立天文台) 及び吉田道利 (広島大学) らとの共同研究。

かみのけ座銀河団にチューニングした H α 狭帯域フィルターをすばる望遠鏡 Suprime-Cam に装着して深い撮像を行ったところ、広がった H α 放射 (EIG: Extended Ionized Gas) を伴う銀河が 14 個見つかった。そのうちの 4 個について、更に深い撮像と分光観測を行った。その結果、これらの EIG の形態 (一方

向に流れ出ているように見える)と速度場は、銀河団ガスのラム圧によって銀河のガスが剥ぎ取られているとするシナリオで説明できることがわかった。H α 輝線の等価幅が200Åより大きく1000Åに達するものもあることから、EIGの中では活発な星生成活動が起きていることが示唆される。[12]

かみのけ座銀河団の光度関数の暗い部分の研究

山野井瞳, 小宮山裕, 八木雅文 (国立天文台) らとの共同研究。

かみのけ座銀河団の中心部、中間部、外縁部の3視野をSuprime-Camで撮像したデータ(B, Rバンド)を用いて、 $M_R \sim -10$ magという極めて暗い部分までのメンバー銀河の光度関数を求めた。従来の研究に比べて圧倒的に視野が広く、サンプル数が多くて統計的精度の高いデータを得たことが特長である。光度関数は、 $M_R \sim -13$ に見られる顕著なギャップを境に、二つの成分からなることがわかった。またその形は3視野ともにほぼ同じである。明るい方の成分はその大部分が、色が赤く広がった銀河であるが、暗い方の成分の大部分はPSFと区別がつかないほどコンパクトな銀河であることがわかった。暗い成分を3視野で比較してみると、中心部ではほとんど青い色の銀河がないが、外縁部では青い銀河も存在する。これらのことから、かみのけ座銀河団のもっとも暗い矮小銀河は様々な起源を持つ多様な種族であると推測される。[11]

かみのけ座銀河団の淡い銀河間光の研究

征矢野隆夫, 中田好一 (木曾観測所), 猿楽祐樹 (JAXA), 伊藤信成 (三重大学), 西浦慎吾 (東京学芸大) との共同研究。

東大天文センター木曾観測所のシュミット望遠鏡につけた2K-CCDカメラで、かみのけ座銀河団の淡い銀河間光 (Intracluster Light: ICL) の観測を行った。VバンドとIバンドでそれぞれ11時間に上る長時間露光を行って、限界等級はそれぞれ、28.5と27.8 mag arcsec⁻²に到達した。これは従来の観測より約1.5等級暗い。視野内にある明るい星のPSFとゴーストの影響を注意深く差し引いた。淡いICLの主要部分はほぼ東西に広がっており、その広がりの方向は二つのcD銀河の推定軌道に沿っている。主要部の周辺にさらに淡いICLが斑点状に不規則に分布している。ICLの主要部の色(V-R)は二つのcD銀河の色とほとんど同じである。これらの特徴から、銀河団ができる過程で、潮汐力によってcD銀河からはぎ取られた星がICLとなったと考えられる。

すばる望遠鏡主焦点グリズム探査で見つかった輝線銀河のSEDの研究

すばる望遠鏡主焦点にグリズムを装着してSXDF領域で行った輝線銀河探査で見つかった53個の輝

線銀河のSEDを調べた。紫外線, 可視光, 赤外線, 及び電波のカタログでこの53銀河を同定し, 各波長域のデータをまとめた統合カタログと顔写真を作った。このデータを基に, Hyper-zコードを用いてSED fittingを行い, 輝線を同定して銀河の距離を求め, 絶対等級, SEDタイプ, 年齢等の性質を調べている。

IAU Division VIII triennial report の作成

国際天文学連合のDivision VIII (Galaxies and the Universe) のSOC member (ex-President) として triennial report を作成した。[13]

<報文>

(原著論文)

- [1] Ikarashi, S. et al. (43 authors including Shimasaku, K.) 2011, "Detection of an ultrabright submillimetre galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE", *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **415**, 3081–3096
- [2] Jiang, L., Egami, E., Kashikawa, N., Walth, G., Matsuda, Y., Shimasaku, K., Nagao, T., Ota, K., Ouchi, M. 2011, "Keck Spectroscopy of Lyman-break Galaxies and Its Implications for the UV-continuum and Ly α Luminosity Functions at $z > 6$ ", *Astrophys. J.*, **743**, 65–74
- [3] Kashikawa, N. et al. (19 authors including Okamura, S. and Shimasaku, K.) 2011, "Completing the Census of Ly α Emitters at the Reionization Epoch", *Astrophys. J.*, **734**, 119–137
- [4] Koyama, Y., Kodama, T., Nakata, F., Shimasaku, K., Okamura, S., 2011, "Red Star Forming Galaxies and Their Environment at $z = 0.4$ Revealed by Panoramic H α Imaging", *Astrophys. J.*, **734**, 66–78
- [5] Ly, C., Malkan, M. A., Hayashi, M., Motohara, K., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Nagao, T., Grady, C. 2011, "A Census of Star-forming Galaxies at $z = 1 - 3$ in the Subaru Deep Field", *Astrophys. J.*, **735**, 91–115
- [6] Ly, C., Malkan, M. A., Kashikawa, N., Ota, K., Shimasaku, K., Iye, M., Currie, T. 2012, "Dust Attenuation and H α Star Formation Rates of $z \sim 0.5$ Galaxies", *Astrophys. J.*, **747**, L16–L22
- [7] Nakajima, K., Ouchi, M., Shimasaku, K., Ono, Y., Lee, J.C., Foucaud, S., Ly, C., Dale, D.A., Salim, S., Finn, R., Almaini, O., Okamura, S. 2012, "Average Metallicity and Star Formation Rate of Ly α Emitters Probed by a Triple Narrowband Survey", *Astrophys. J.*, **745**, 12–30
- [8] Ono, Y., Ouchi, M., Mobasher, B., Dickinson, M., Penner, K., Shimasaku, K., Weiner, B. J., Kartaltepe, J. S., Nakajima, K., Nayyeri, H., Stern, D., Kashikawa, N., Spinrad, H. 2012, "Spectroscopic Confirmation of Three z -Dropout Galaxies

- at $z = 6.844 - 7.213$: Demographics of Lyman-Alpha Emission in $z \sim 7$ Galaxies”, *Astrophys. J.*, **744**, 83–95
- [9] Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Umemura, M., Mori, M. 2012, “Diffuse Ly α haloes around Ly α emitters at $z = 3$: Does Mpc-scale environment determine the spatial extent of the circum-galactic medium?”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, submitted.
- [10] Shibuya, T., Kashikawa, N., Ota, K., Iye, M., Ouchi, M., Furusawa, H., Shimasaku, K., Hattori, T. 2012, “The First Systematic Survey for Lyman Alpha Emitters at $z = 7.3$ with Red-sensitive Subaru/Suprime-Cam”, *Astrophys. J.*, in press.
- [11] Yamanoi, H., Komiyama, Y., Yagi, M., Okamura, S., Iye, M., Kashikawa, N., Takata, T., Furusawa, H., Yoshida, M. 2012, “The Galaxy Luminosity Functions down to $M_R = -10$ in the Coma Cluster”, *Astron. J.*, submitted.
- [12] Yoshida, M., Yagi, M., Komiyama, Y., Furusawa, H., Kashikawa, N., Hattori, T., Okamura, S. 2012, “Kinematics and Excitation of the Ram Pressure Stripped Ionized Gas Filaments in the Coma Cluster of Galaxies”, *Astrophys. J.*, **749**, 43–59
- (会議集録)
- [13] Sadler, E., Combes, F., Okamura, S., Davies, R. L., Gallagher, J.S., Padmanabhan, T., Schmidt, B. P. 2012, “Division VIII: Galaxies and the Universe”, *Transactions of the IAU*, Volume 7, Issue T28, p.253-254.
- (学位論文)
- [14] 橋本拓也 “Gas motion statistics of Lyman α emitters at $z \sim 2$ using UV and optical emission lines” (修士論文)
- [15] 小野宜昭 “Physical Properties of Galaxies at $z \sim 6 - 7$ and Their Implications for Cosmic Reionization” (博士論文)
- (著書)
- [16] 「宇宙観 5000 年史」, 中村士, 岡村定矩著, 東京大学出版会
- [17] 「理科年表」2012, 岡村定矩, 柴橋博資 (天文部, 分担執筆), 丸善
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] Okamura, S., Nakajima, K., Shimasaku, K., Soyano, T., Sarugaku, Y., Nakada, Y., Itoh, N., Nishiura, S.: “Observation of Diffuse Intracluster Light in the Coma Cluster”, ESO Workshop on *Fornax, Virgo, Coma et al.*, *Stellar Systems in High Density Environments*, ESO, Garching, Germany, 2011/6/27-7/1.
- [19] Ono, Y., Ouchi, M., Mobasher, B., Dickinson, M., Penner, K., Shimasaku, K., Weiner, B. J., Kartaltepe, J. S., Nakajima, K., Nayyeri, H., Stern, D., Kashikawa, N., Spinrad, H.: “Ultra-Deep Spectroscopy of z -Dropout Galaxies at $z \sim 7$: Probing Reionization Epoch by the Redshift Evolution of Lyman Alpha Emitter Fraction”, New Horizons for High Redshifts, Institute of Astronomy, University of Cambridge, Cambridge, U.K., 2011/7/25-29.
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 岡村 定矩: “天体のイメージング”, 2011 年度日本物理学会科学セミナー「イメージングの科学」, 東京大学弥生講堂, 2011/7/25-26.
- [21] 嶋作一大: “宇宙の星形成:カクカクのモヤモヤ”, 滞在型研究会「全天体形成」, 北海道大学, 2011/8/29-31.
- [22] 嶋作一大: “宇宙再電離と銀河の早期進化”, 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」, 東京工業大学, 2012/2/6-8.
- [23] 篠木 新吾: “ $z = 5.7$ protoclusters in SXDF”, 2011 年度 天文・天体物理 若手の会 夏の学校. 愛知県西蒲温泉 ホテルたつき, 愛知県蒲郡市, 2011/8/1-4.
- [24] 橋本 拓也, “近赤外分光による $z \sim 2.2$ Lyman Alpha Emitter での nebular emission lines の検出”, 2011 年度 天文・天体物理 若手の会 夏の学校. 愛知県西蒲温泉 ホテルたつき, 愛知県蒲郡市, 2011/8/1-4.
- (学会発表)
- 日本天文学会 2011 年秋季年会, 鹿児島大学 (2011/09/19-22)
- [25] 小野宜昭, 嶋作 一大, 中島王彦, Spectroscopic Identification of 3 z -Dropout Galaxies at $z = 6.84 - 7.21$: Spectroscopic Demography of $z \sim 7$ Galaxies, X40a.
- [26] 中島王彦, 嶋作 一大, 小野宜昭, 岡村定矩, Average Metallicity and Star Formation Rate of Ly α Emitters Probed by a Triple Narrow-Band Survey, X14b.
- [27] 中島王彦, 橋本拓也, 嶋作 一大, 小野宜昭, $z = 2.2$ Ly α Emitters の近赤外分光 1: 複数輝線に基づく星形成率と金属量の測定, X18a.
- [28] 篠木新吾, 岡村定矩, 嶋作 一大, 小野宜昭, $z = 5.7$ 原始銀河団研究, X21b.
- [29] 橋本 拓也, 中島 王彦, 嶋作 一大, 小野 宜昭, $z = 2.2$ Ly α Emitters の近赤外分光 2: 輝線を用いたガス運動の考察, X19a.
- 日本天文学会 2012 年春季年会, 龍谷大学 (2012/03/19-22)
- (その他)
- 一般講演
- [30] 岡村 定矩: 「宇宙の姿と物質の起源」, 東京大学エグゼクティブ・プログラム講義, 2011/5/7

- [31] 岡村 定矩: 「宇宙の姿と物質の起源」, 東京大学サステナビリティ学連携研究機構, 2011/5/16
- [32] 岡村 定矩: 「宇宙のブライトサイド-新しい宇宙観の幕開け-」, 獨協大学天文・宇宙ウィーク, 2011/5/23
- [33] 岡村 定矩: 「宇宙の星形成史と銀河」, 「銀河研究の最前線」朝日カルチャーセンター新宿, 2011/7/23
- [34] 岡村 定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 旭陵同窓会関西支部総会記念講演, 大阪弥生会館, 2011/9/4
- [35] 岡村 定矩: 「見えない宇宙を観る」, 東京都立大泉高校附属中学校土曜講座, 2011/10/15
- [36] 岡村 定矩: 「自然理解の基礎」, 東京大学エグゼクティブ・マネージメント・プログラム講義, 2011/10/17
- [37] 岡村 定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 東京都立大泉高校附属中学校土曜講座, 2011/10/29
- [38] 岡村 定矩: 「宇宙の姿と物質の起源」, 東京大学エグゼクティブ・マネージメント・プログラム講義, 2011/11/12
- [39] 岡村 定矩: 「銀河天文学と観測的宇宙論-木曾から世界へ-」, 東京大学最終講義, 小柴ホール, 2012/3/12
- [40] 嶋作 一大: 「銀河進化をどう読むか」, 「銀河研究の最前線」朝日カルチャーセンター新宿, 2011/10/22
- [41] 嶋作 一大: 「銀河宇宙と私たち」, ビッグバン宇宙国際研究センター クリスマス講演会, 2011/12/23

新聞記者発表

- [42] 岡村 定矩他 3 名: 総務大臣への要望「電波天文観測に有害干渉をもたらす広帯域電力線搬送通信 (PLC) の拙速な屋外利用を進めないこと」, 2012/2/29, 於科学技術館
- [43] 小野 宜昭, 嶋作 一大, 中島 王彦他: 「129.1 億光年の彼方、宇宙の「夜明け」にきらめく銀河を発見」, 2011/12/15, 国立天文台プレスリリース
http://www.naoj.org/Pressrelease/2011/12/15/j_index.html

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 星・惑星形成の観測的研究

4.1.1 はじめに

【星・惑星系形成】 恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観測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現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在している。これまでの研究で、それらの組成は星間分子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることがわかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができるのである。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】 星間分子雲の温度はおおよそ 10 K 程度である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」のみを放射する。しかも、電波は光などに比べて星間物質による吸収散乱を受けにくく、透過力が高い。そのため、星間分子雲の奥深くで起こる星形成の核心部分を見通すことができる。また、電波領域には原子・分子のスペクトル線が多数存在し、それらの観測で星間分子雲の運動や分子組成がわかる。

【動き出した ALMA (アルマ)】 我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開しているが、感度、分解能ともに十分ではない。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA は、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波干渉計で、日本、北米、欧州による共同建設が進んでいる。2011 年 10 月から部分運用を開始し、2013 年から本格運用を予定している。ALMA は既存装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を一挙に進展させるであろう。

【テラヘルツ帯観測の開拓】 テラヘルツ帯は電波と赤

外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには C^+ , N^+ などの原子スペクトル線の他、 CH , H_2D^+ , HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められつつある。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おり、2011 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ分子観測を展開していきたい。

4.1.2 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著に違うことがわかった点である。その一つの典型は、 $HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293-2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子が異常に豊富な天体（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359）で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。WCCC 天体では、原始星近傍で CH_4 が星間塵から蒸発し、それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成されている。ホットコリノ天体とは対照的に、WCCC 天体では大型飽和有機分子は検出されない。このような分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成研究においても注目され始めている。一方で、分子組成の違いの惑星系への伝播についても大きな興味もたれる。本研究室では、低質量星形成領域を中心に、電波観測による幅広い研究を進めている。

【L1527 のラインサーベイ】 おうし座の L1527 ($d = 137$ pc) は WCCC を示す低質量原始星である。我々はその分子組成の全貌を明らかにするため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行っている。今年度までの観測で、3 mm 帯 (80-115 GHz) のほぼすべての周波数帯域を観測した。rms 雑音温度が 5 mK (T_A^*) 以下という高感度観測の結果、40 種類以上の分子を検出できた。c- C_3H_2 の高励起線、c- C_3H の微細構造線など他の天体では見られないものも多い。HCO、CCCO、HCCCHO、CCO などの酸素を含む有機分子も多数検出されたが、 $HCOOCH_3$ や $(CH_3O)_2$ などの大型飽和有機分子は検出されなかった。L1527 の分子組成を、同様に炭素鎖分子が豊富な星なしコア TMC-1 と比較したところ、窒素を含む分子が系統的に少ないなどの特徴がわかり、両者の化学過程の違いが浮き彫りになった。

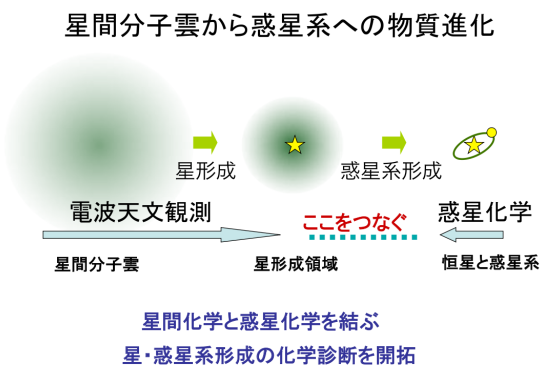


図 4.1: A schematic illustration of our goal

【Serpens SMM4 のラインサーベイ】 ホットコリノ天体ごとの分子組成の違いを調べる目的で、我々は ASTE 10 m 望遠鏡を用いた 345 GHz 帯のラインサーベイ観測を推進している。昨年度の R CrA IRS7B に引き続き、本年度は別のホットコリノ天体候補である Serpens SMM4 を観測した。332-364 GHz の周波数範囲を r.m.s 雑音温度 11-40 mK で高感度観測し、12 種の分子と 8 種の同位体分子を検出した。分子組成は、R CrA IRS7B と異なり、典型的なホットコリノ天体の IRAS 16293-2422 に近いことがわかった。この天体では NH_2D が検出され、 DCO^+ も比較的強く観測されたが、 HDCO や DCN の重水素濃縮度は IRAS 16293-2422 よりも低かった。距離がより遠い Serpens SMM4 ではエンベロープの影響をより強く受けているためと見られる。

【NGC2264 CMM3 のラインサーベイ】 NGC2264 CMM3 は、遠赤外線でも原始星が見えないほど若い大質量星形成領域である。我々はこの天体に対して、ASTE 10 m 望遠鏡及び野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。ASTE では 330-366 GHz の範囲を観測し、16 種の分子と 14 種の同位体分子を検出した。野辺山 45 m 望遠鏡では、84.8-94.6 GHz 及び 96.8 GHz-106.6 GHz の範囲を観測し、ASTE で検出された基本分子に加え、 C_4H 、 HC_3N 、 HC_5N などの炭素鎖分子を検出した。本サーベイでは上位準位エネルギー (E_{rmmu}) が 300 K を越える CH_3OH の超高励起輝線も検出した。これらは大質量原始星に付随していると考えられ、原始星近傍の運動や化学過程を知る手がかりとなると期待される。

【L1157 B1 衝撃波領域のラインサーベイ】 衝撃波は、星形成領域、銀河中心、超新星など、星間空間で普遍的に見られる。我々は、衝撃波に伴う化学過程を解明するために、低質量原始星 IRAS 20386+6751 周辺の衝撃波領域、L1157 B1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 78.1-115.8 GHz の周波数帯でのラインサーベイ観測を行った。この衝撃波領域は、原始星からの双極分子流が周辺ガスと衝突して生じてお

り、原始星から 0.1 pc ほど離れているため、純粋な衝撃波現象が観測できる。観測の結果、29 種類の分子の 130 本のスペクトル線を検出し、衝撃波領域の分子組成の全貌を明らかにすることができた。このサーベイにより、大型飽和有機分子である CH_3CHO 、 HCOOH 、 NH_2CHO 、リンを含む分子である PN、炭素鎖分子の CCS などが検出された。本観測のスペクトルデータは、論文として投稿し受理されている。今後、他の関連領域の分子組成や衝撃波化学モデルとの比較を進める予定である。

【低質量原始星 L1448 のラインサーベイ】 衝撃波領域の分子組成をさらに詳しく調べるため、ペルセウス座にある低質量星原始星 L1448 mm 周辺の衝撃波領域 L1448 B1/R1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 79-155.8 GHz 帯のラインサーベイ観測を行った。L1448 B1/R1 は原始星からの離角がそれぞれ $10''$ 程度なので、原始星方向を観測することで望遠鏡のビームサイズ ($\sim 20''$) 内に含まれる。この領域の特徴は、ジェットの高速度が 80 km s^{-1} に達し、L1157 B1 の 4 倍もあることである。L1448 B1/R1 におけるラインサーベイでは、L1157 B1 で観測された HCOOH 、 HCOOCH_3 、 CH_3CHO 等の有機分子は検出されていない。これは、L1157 B1 と L1448 B1/R1 での星間塵組成の違いや、双極分子流の年齢の違いなどを反映していると考えられる。同時に観測した原始星方向からは、 C_4H や CH_3CCH などの炭素鎖分子が検出されており、低質量星形成領域の分子組成としても興味を持たれる。

【NGC1333 における PN の検出】 我々は、衝撃波領域 L1157 B1 においてリンを含む分子 PN を検出した。これは低質量星形成領域としては初検出であるとともに、リンの化学が衝撃波化学と関連していることを示す結果であった。この結果を発展させるため、低質量星形成領域 NGC 1333 IRAS 4 近傍の衝撃波領域において PN ($J = 2 - 1$) の観測を行った。その結果、PN 輝線を 6σ 程度の強度で検出した。検出された PN 輝線は、ピーク速度が分子雲の視線速度とほぼ一致しており、速度幅は 1.5 km s^{-1} 程度であった。これは、衝撃波領域に存在している速度幅の広い SiO ($J = 2 - 1$) のスペクトルとは明らかに異なる。Charnley and Millar (1994) によれば、PN は星間塵上に存在する PH_3 が蒸発した後、気相反応で 10^4 yr 程度の時間をかけて生成される。このように、生成に一定時間を要することから、NGC 1333 IRAS 4 で観測された PN の起源は、線幅の広い SiO スペクトルの原因である現在の衝撃波ではなく、線幅の細い SiO スペクトルを生じさせている過去の減速した衝撃波に由来する可能性が高い。

【70 GHz 帯での D 化物の観測】 低質量原始星近傍の分子組成は、同じような原始星進化段階にあっても同じとは限らない。これまでの観測で、少なくともホットコリノ化学と WCCC の 2 種類の化学過程があり得ることがわかっている。我々は、星形成までの時間が長い場合にホットコリノとなり、短い場合に WCCC 天体となることを提案している。これを確かめるために、分子の重水素濃縮度に着目し

た。重水素濃縮度は、星形成までの時間が長いほど高くなるため、独立な検証ができる。その観測のために、基本的分子の重水素化物のスペクトル線が多数存在する 70 GHz 帯の高感度受信機を開発し、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した。この受信機を用いて、WCCC 天体である L1527, IRAS15398-3359、ホットコリノ天体である IRAS 16293-2422、および関連する星なしコア（星形成が起こる前の分子雲コア）に対して、 DCO^+ 、 N_2D^+ 、 DCN 、 CCD などの観測を行った。現在、その詳細な解析が進行中である。

【星形成に伴う重水素濃縮の変化】 原始星誕生に伴う分子の重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量星形成領域 L1551、IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度分布を野辺山 45 m 望遠鏡で調べた。L1551 では原始星方向で DCO^+ の重水素濃縮度が減少しているのに対して、中性分子 DNC の重水素濃縮度は周辺と差がないことがわかった。これは、中性分子は分子イオンよりも解消速度が遅いためと考えられる。一方、同じ分子イオンでも N_2D^+ では原始星方向での重水素濃縮度の減少が見られず、また、IRAS16293-2422 では DCO^+ についても減少を見ることができなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロープの影響を受けているためであり、この寄与を除くことが星形成に伴う重水素濃縮度の変化を調べる上で重要であることがわかった。

【TMC-1 における $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 】 星間分子雲において、一般に $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は 60 であると考えられてきたが、我々の研究により、星なしコアにおいては分子によってこの比が大きく異なることがわかってきた。CO 分子から生成される分子では 60 に近い値を示すが、 C^+ から生成される分子ではそれより高い値を示す傾向がある。このことを利用して、 CH_3OH の生成過程を調べた。IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、星なしコア TMC-1(CP) において CH_3OH の ^{13}C 同位体種 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ の観測を行ったところ、 CH_3OH の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比はほぼ 60 であることがわかり、CO 分子由来である可能性が高いことが示された。冷たい星なしコアでの CH_3OH の生成過程については、(1) 気相中で C^+ から生成する機構と、(2) 星間塵の表層で CO 分子の水素化によって生成し、何らかの理由で気相中に放出される機構が考えられている。本研究の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の結果は (2) を支持する。

【星なしコアの CH_3OH の起源】 CH_3OH は星形成領域で観測される代表的な分子で、星間塵表面上で生成されたものが星形成活動に伴い気相に放出されると考えられている。一方、 CH_3OH は TMC-1 のような 10 K 程度の冷たい星なしコアでも検出され、上で述べた ^{13}C 同位体の観測から星間塵起源と考えられる。そこで、10 K の環境でどのようにして CH_3OH (蒸発温度 ~ 100 K) が蒸発してくるかが問題となっていた。我々は、GBT 100 m 望遠鏡、IRAM 30 m 望遠鏡による高周波数分解能観測で、TMC-1 における CH_3OH スペクトル線プロファイルが他の分子と大きく異なることを見出した。 CH_3OH は小さな空間スケールで強度が変化しており、また、速度的

にはエンベロープとの中間に存在するように見える。コア内部での乱流やエンベロープガスのコアへの降着などで生じる衝撃波で、 CH_3OH が星間塵表面から蒸発している可能性がある。

【気相での CO_2 生成】 CO_2 は惑星大気や彗星などの主要な構成分子の一つであり、星間化学と惑星科学をつなぐ重要な分子である。赤外線観測で固体 CO_2 が広く観測されてきたため、この分子は星間塵の表面で生成されると考えられてきた。一方で、気相の CO_2 については、 CO_2 が電波領域に回転遷移スペクトル線を出さないため、観測は非常に限られてきた。我々は気相中の CO_2 を定量するのに HCO_2^+ が有効であることに着目し、IRAM 30 m 望遠鏡で観測を行った。 HCO_2^+ は星なしコア (TMC-1、L1544) でも検出され、気相で CO_2 生成が起こっていることが示唆された。気相生成には HCO と酸素原子の反応が重要な役割を果たすと考えられている。事実、これまでの観測で、3つの低質量 Class 0 天体と2つの星なしコアで HCO と HCO_2^+ がともに検出され、それらの関係性が示されつつある。

【NGC 2264 における SiO の分布】 我々は、衝撃波トレーサーとして知られる SiO 分子輝線で、大質量星形成領域 NGC 2264 のマッピング観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行った。その結果、SiO が大質量原始星 CMM 3 を中心としてシェル状の構造をしていることがわかった (図 4.2)。SiO の分布はこの領域の分子流の分布と大局的に似ているが、分子流が比較的弱いにもかかわらず SiO が卓越して多い領域も存在している。これは、現在は見えていない「過去の分子流」によって気相中に放出された SiO が生き残っているためと考えられる。NGC 2264 の SiO のスペクトルは、線幅 20 km/s 程度のブロードな成分と 5 km/s 程度のシャープな成分が存在しており、後者は領域全体に広く分布している。このシャープな成分も、やはり過去にダストから放出された SiO が減速されたものと考えられる。そのような古い衝撃波の痕跡が領域全体に存在することは、NGC 2264 において 10^5 年以上にわたって、分子流により乱流が継続的にクランプに供給されてきたことを示唆する。

4.1.3 系外銀河の化学組成

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

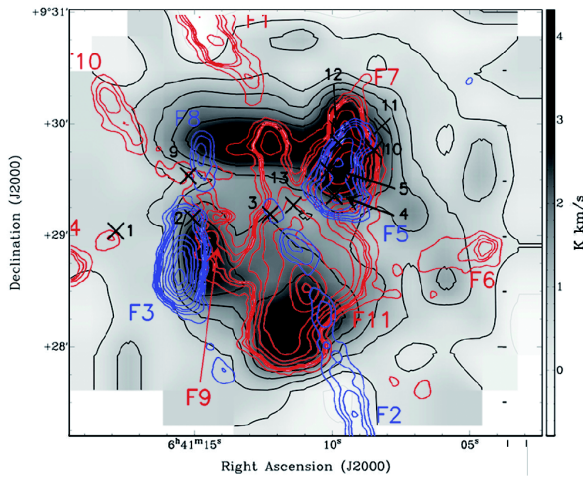


図 4.2: Integrated intensity map of SiO in NGC2264 CMM3 superposed on the distribution of outflows.

までの運動学的な視点と組み合わせることで、GMCの形成・進化に迫りたい。

【M51のラインサーベイ】 これまで活動銀河核や爆発的星形成領域といった極限的な環境下の分子ガスを除き、GMCスケールの化学組成を研究した例はほとんどない。そこで、我々は典型的な円盤銀河であるM51の渦状腕に対してIRAM 30m望遠鏡及び野辺山45m望遠鏡を用いてラインサーベイを実施した。85-116 GHz及び130-148 GHz帯を観測した結果、CCH、HNCO、CH₃OH、N₂H⁺、H₂COなど、これまで系外銀河の渦状腕では検出例のなかった分子を数多く検出した(図4.3)。本研究により、渦状腕上のGMCの化学組成をくまなく明らかにし、GMC進化に化学進化を適用する際に着目すべき分子を同定できた意義は大きい。今後はALMAを使った高空間分解能観測により、化学組成とGMC進化の関連を明らかにしていく。

4.1.4 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器(ヘテロダインミキサ)の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SISミキサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb(ニオブ)を超伝導物質に用いたものは、750 GHz以下では量子雑音に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz以上の周波数では、超伝導ギ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)ミキサ素子の開発を行っている。HEBミキサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「う

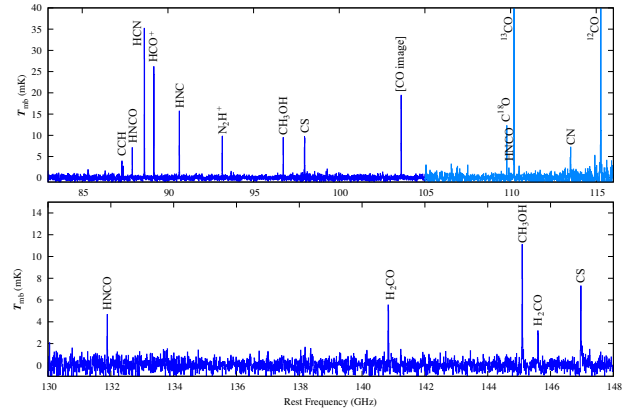


図 4.3: Spectral line survey toward M51

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。

【世界一低雑音のHEBミキサ】 ASTE望遠鏡でのTHz帯観測のために、NbTiNを超伝導物質に用いた0.9 THz帯、1.5 THz帯の導波管型HEBミキサ素子の開発を進めた。我々は、昨年度すでに、0.9 THz帯で450 K、1.5 THz帯で590 Kという低雑音温度を示すHEBミキサの製作に成功していた。今年度は、雑音温度をそれぞれ380 K、490 Kまで低下させた。これは量子雑音の約10倍、7倍に相当し、1.5 THz帯ミキサは世界で最も高感度なHEBミキサ素子である。このような低雑音を実現できた最も大きな要因は、超伝導マイクロブリッジの短縮である。NbTiNでは、超伝導の破壊で生じた熱電子を冷却する機構は格子冷却である。しかし、我々は格子冷却と同時に、伝導で電極の金属に電子を逃がす拡散冷却もある程度有効に働いていることに注目し、拡散をより有効に働かせるためにブリッジの長さを0.1 μmまで短くした。その結果、電子の冷却がよりスムーズになり、雑音の低下につながったと考えられる。

【加熱成膜を取入れたHEBミキサの製作】 HEBミキサの中間周波数帯域を拡大することは、同時観測帯域を広げる点で重要である。そのためには、3 nm程度の厚さで良好な超伝導特性を示す超伝導薄膜が必要であり、これを実現するために、スパッタ成膜中に基板を400℃程度まで加熱する基板加熱法を導入した。まずガラス基板を用いてNbTiN薄膜でその効果を調べたところ、厚さ8 nmの膜で4 K以上の超伝導転移温度(T_c)の上昇がみられた。そこで、これまでの製作プロセスを一部見直し、基板加熱とAlN

緩衝層を組み込んだ新たなプロセスを考案し、3 nm の膜厚の超伝導層を持つ HEB ミクサを製作した。その雑音温度は、1.1 GHz 帯で 490 K と、これまでの 10.8 nm の素子と遜色ない性能が得られた。中間周波数帯域の測定を行ったところ、10.8 nm の素子では 1.1 GHz だった帯域幅が、3 nm の素子では 2.1 GHz まで拡大した。このように、基板加熱が HEB ミクサの製作で有効であることが確認された。

【ASTE 用 THz 受信機の製作】 我々の開発した HEB ミクサを ASTE 望遠鏡に搭載するため、ASTE 望遠鏡に適合するカートリッジ型受信機を組み上げた。周波数帯は 0.9/1.3-1.5 THz 帯のデュアルバンドで、各周波数同時受信が可能である。0.9 THz 帯では既存の電波天文学に用いられてきた SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを使った観測が可能であるが、我々の製作した HEB ミクサの動作実証のため、両バンドとも HEB ミクサを用いた。この受信機カートリッジを ASTE 望遠鏡仕様のデューワーで試験し、研究段階と同等の性能で正常に動作していることを確認した。

【ASTE 用 IF システムの製作】 本研究室で開発した THz 帯超伝導 HEB 受信機からの中間周波数信号は 0.9-1.4 GHz 帯に出力される。しかし、ASTE 望遠鏡に備わっている伝送系統は 6 GHz 帯用なので、出力信号を 1.1 GHz 帯から 6 GHz 帯に周波数変換する必要がある。そのためのモジュールを、市販のアップコンバータを用いて設計・作成した。入出力レベルの調整、周波数変換後のフラットな特性、および高地での運用にあたっての発熱対策の 3 点に留意して製作したものを、実験室で評価したうえで、ASTE 望遠鏡に取り付け試験運用に用いた。

【ASTE 望遠鏡での THz 帯試験観測】 2011 年 9 月末から 10 月頭の 2 週間程度、チリの標高 5000 m のアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行った。今回は搭載期間が非常に限られている上、初めての搭載で試験観測が目的なので、0.9、1.3 THz のみ搭載した。我々の製作した HEB ミクサ受信機は望遠鏡サイトでも良好に動作し、0.9 THz 帯で月、木星の連続波観測およびオリオン A 分子雲中の ^{13}CO の回転スペクトル ($J = 8 - 7$; 881.3 GHz) の検出に成功した (図 4.4)。これにより、2012 年度以降本格的なテラヘルツ帯科学観測を行う目処が立った。

【準光学型 HEB ミクサの開発】 ツインスロットアンテナを集積した準光学型の 1.9THz 帯 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年は、1.9THz 帯の通倍型固体発振器を 2 台利用し、これらを入力信号と局部発振信号として HEB ミクサ (細線厚 5nm、長さ 150 nm) に入力し、0.8-1.8 GHz 帯において中間周波信号 (IF) を得ることに成功した。さらに IF を 1 GHz 帯域 (中心 0.5GHz) のデジタルフーリエ分光計へと導き、ヘテロダイン分光システムを構築した。現在、HEB ミクサの雑音評価を進めている。この研究は大阪府立大学の前澤裕之氏との共同研究である。

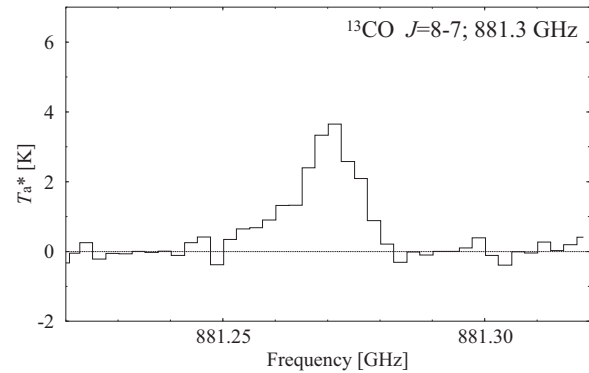


図 4.4: The ^{13}CO line observed toward the Orion A cloud with ASTE

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto, “DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation”, *Astrophys. J.*, **747**, 140 (10 p) (2012).
- [2] Y. Watanabe, N. Sakai, J.E. Lindberg, J.K. Jorgensen, S.E. Bisschop, and S. Yamamoto, “An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE”, *Astrophys. J.* **745**, 126 (23 pp) (2012).
- [3] S. Shiba, Y. Irimajiri, T. Yamakura, H. Maezawa, N. Sekine, I. Hosako, and S. Yamamoto, “3.1 THz Heterodyne Receiver Using an NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer and a Quantum Cascade Laser”, *IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech.* **2**, 22-28 (2012).
- [4] T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, “Detection of Phosphorous Nitride in the Lynds 1157 B1 Shocked Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, L37-L41 (2011).
- [5] T. Hirota, T. Sakai, N. Sakai, and S. Yamamoto, “Detection of Two Carbon-Chain-Rich Cores: CB130-3 and L673-SMM4”, *Astrophys. J.* **736**, 4 (8 pp) (2011).
- [6] M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, “Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 Shocked Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 459-472 (2011).
- [7] O. Saruwatari, N. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, T. Sakai, and S. Yamamoto, “Compact Molecular

Outflow from NGC2264 CMM3: A Candidate for Very Young High-Mass Protostar”, *Astrophys. J.*, **729**, 147 (7 pp) (2011).

(会議抄録)

- [8] “Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars”, N. Sakai and S. Yamamoto, “The Molecular Universe”, J. Cernicharo and R. Bachiller eds., *Proceedings IAU Symposium No. 280*, 43-52 (2011).
- [9] “Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions”, N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, “Condition and Impact of Star Formation”, M. Rolling, R. Simon, V. Ossenkopf, and J. Stutzki eds., *EAS Publication Series*, **52**, 235-238 (2011).
- [10] “Line Survey of L1157 B1 Shocked Region”, T. Yamaguchi, M. Sugimura, T. Sakai, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, *ibid* **52**, 311-312 (2011).

(国内雑誌)

- [11] 鶴澤佳徳、山本智、「テラヘルツ天文学を切り拓く受信機技術」、*日本物理学会誌*, **66**, 375-379 (2011).
- [12] 坂井南美、「化学の目でみた星形成：星形成の多様性」、*日本惑星学会誌*, **20**, 52-60 (2011).

(学位論文)

- [13] 柴田大輝、「低質量成形性に伴う重水素濃縮度変化の観測的研究」、*修士論文*、2012年3月
- [14] 古屋隆太、「テラヘルツ領域での天体観測を目指した超伝導 HEB ミクサの製作と基板加熱機構の導入」、*修士論文*、2012年3月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, “Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE”, *Molecular Universe*, *IAU Symposium No. 280*, Toledo, Spain, May 2011.
- [16] T. Shiino, L. Jiang, R. Furuya, T. Yamaguchi, S. Shiba, T. Sakai, N. Sakai, Y. Watanabe, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, S. Yamamoto, “Development of the 1.3-1.5 THz Band Superconducting HEB Mixer Receivers for ASTE 10 m Telescope”, *The 22nd International Symposium on Space Terahertz Technology*, 10-1, Tucson, U.S.A. April 2011.

招待講演

- [17] S. Yamamoto and N. Sakai, “ ^{13}C Isotope Fractionation in Cold Molecular Clouds”, *Isotopes in Astrochemistry: An Interstellar Heritage for Solar System Materials?*, Leiden, Netherland, December 2011.

- [18] “N. Sakai, Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars”, *IAU Symposium No. 280*, Toledo, Spain, May 2011.

(国内会議)

一般講演

【日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学、2011 年 9 月】

- [19] 坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「低質量星形成領域 L1527 における炭素鎖分子の高分解能観測」、P40a
- [20] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, S. Yamamoto, 「Spectral Line Survey of R CrA IRS7B with ASTE II」、P42c
- [21] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Jiang Ling、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機 開発 (1)」、V47c
- [22] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region」、Q17a
- [23] 柴田大輝、坂井南美、廣田朋也、酒井剛、山本智、「原始星形成による重水素濃縮の解消」、P41a
- [24] 相馬達也、椎野竜哉、古屋隆太、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Ling Jiang、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機開発 (2)」、V48c
- [25] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「大質量星形成領域 NGC2264 CMM3 のマッピング観測」、P43c
- [26] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、他ラインサーベイメンバー、「L1527 におけるスペクトル線サーベイ (2)」、P48b
- 【日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2012 年 3 月】**
- [27] 坂井南美、前澤裕之、酒井剛、Karl Menten、山本智、「Distribution of 9 cm CH Emission in Heiles Cloud 2」、P109a
- [28] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51 with NRO 45 m telescope」、R27a
- [29] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、渡邊祥正、坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、山倉鉄矢、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡への 0.9, 1.3 THz 帯超伝導 HEB ミクサ受信機搭載」、V144a
- [30] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region II」、P110a

- [31] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「星なし分子雲コアにおける豊富な CH_3OH の起源」、P107a
- [32] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「NGC2264 CMM 3 で見られるクランプへの継続的な乱流供給」、P103a
- [33] 古屋隆太、椎野竜哉、相馬達也、大口脩、前澤裕之、坂井南美、山本智、「広帯域化に向けた超伝導 HEB ミクサの改良と性能評価」、V115b
- [34] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、渡邊祥正、山本智、「Gas-phase Production of CO_2 in Dark Cloud Cores」、P108a

4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究

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

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

4.2.1 高赤方偏移銀河の観測研究

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

SSA22 領域は $z = 3.1$ においてライマンブレイク銀河やライマン α 輝線銀河の際立った密度超過が見られる領域であり、高赤方偏移宇宙における原始銀河団領域であると考えられている。これまでに同領域において AzTEC/ASTE による波長 1.1 mm の観測から 112 個のサブミリ波銀河が発見されている。 Λ CDM 宇宙モデルによる階層構造形成論によれば、大質量銀河であるサブミリ波銀河は大質量の暗黒物質ハローの中で形成され、原始銀河団のような暗黒物質の高密度環境に偏在することが予期される。また大質量の暗黒物質ハローは超大質量ブラックホールの形成現場でもありと考えられる。従って、高赤方偏移宇宙に存在する原始銀河団領域があり、深いサブミリ波サーベイが行われている SSA22 領域はサブミリ波銀河の形成過程を調べる上でこの上なく適した領域である。まず、全サブミリ波銀河の中から $z \sim 3.1$ のサブミリ波銀河を選択する為に可視光から近赤外線の波長域で最大 13 バンドの多波長測光サーベイを行い、測光赤方偏移を推定した。VLA 1.4 GHz、MIPS $24\mu\text{m}$ 、IRAC $3.6\mu\text{m} - 8.0\mu\text{m}$ と 3 つの同定手法を用いることで同定率の向上に成功し、48 個のサブミリ波銀河について対応天体を同定した。このうち 31 個のサブミリ波銀河対応天体について可視光から近赤外線測光赤方偏移の評価を行った。最終的に 7 個のサブミリ波銀河が $z = 3.1$ に存在している可能性が高いことが明らかにされた。これらのサブミリ波銀河とライマン α 輝線銀河について互いの空間分布の相関を 2 点角度相互相関関数で調べたところ顕著な相関が検出され、サブミリ波銀河が原始銀河団の質量集中領域で選択的に形成されることを主張する結果が得られた。また、 $z \sim 3.1$ のサブミリ波銀河の中で、ライマン α 輝線銀河の密度ピーク付近の 3 個は活動銀河核の母天体であることが X 線天体との対応から明らかになった。大質量銀河であるサブミリ波銀河、そして超大質量ブラックホールを持った AGN 母銀河が原始銀河団最密部付近に集中して見つかった今回の結果は、大質量の暗黒物質ハローが強いクラスタリングを示す現在の階層構造モデルに観測的証左を与えるものだと考えられる [16][21]。

AzTEC/ASTE で SXDF 領域に発見した超高光度サブミリ波銀河

サブミリ波望遠鏡 ASTE 搭載ボロメータカメラ AzTEC を用いて、波長 $1100\mu\text{m}$ での Subaru/XMM-Newton Deep Field (以下 SXDF) の連続波撮像観測を行い、その結果、通常のサブミリ波銀河の 10 倍程度の明るさを示す ($37\text{ mJy at } 1100\mu\text{m}$)、珍しい超高光度サブミリ波銀河 SXDF1100.001 を発見した。ミリ波干渉計 CARMA、およびサブミリ波干渉計

SMA を用いて、波長 $1300\mu\text{m}$ および $880\mu\text{m}$ での高解像度イメージングを行った結果、サブミリ波で明るいコンパクトな構造に加え、約 4 秒角程度に広がった構造も存在することがわかった。今までの SMGs のほとんどは、1 秒角以下のコンパクトな構造しかもたないことが知られており、今回の結果は、今までに見られなかった構造である。また、Caltech や JAXA が開発し、マウナケア山頂の CSO サブミリ波望遠鏡に搭載されたミリ波帯超広帯域分光器 Z-SPEC を用いて SXDF1100.001 の分光観測 ($1000\text{--}1500\mu\text{m}$) を行い、CO 輝線等の無バイアス検出による赤方偏移の同定を試みた。その結果、輝線を検出することはできず赤方偏移の同定はできなかったが、強いダスト連続波放射に対する、輝線の強度比 (輝線・連続波強度比) が非常に小さいという制限を与えることができ、既に CO 輝線の検出例がある高赤方偏移天体での輝線・連続波強度比との比較から、この天体が高赤方偏移に存在している可能性が高いことが示唆された。またそのミリ波での明るさと電波での明るさにより赤方偏移の推定を行ったところ $z \sim 3.4$ という結果を得た。一方、SMA/CARMA による位置同定では、約 1 秒角ほど離れた位置に、可視・近赤外線極めて赤い $z \sim 1.4$ の銀河が存在しており、赤方偏移が一致しない。Z-Spec での分光で得られた非常に小さい輝線連続波比は、 $z \sim 1.4$ の銀河では全く説明できないことを考慮すると、今回発見した非常に明るいサブミリ波銀河 SXDF1100.001 は、 $z \sim 1.4$ の赤い銀河によって重力的に増光を受けた、 $z \sim 3.4$ の爆発的星形成銀河であると考えられる。今後、それぞれの銀河の、いろいろな波長での分光観測により、正確な赤方偏移を確定していくと共に、重力レンズモデルを構築し、増光率等を調べる予定である。こうして、重力レンズの助けにより、詳しい観測が難しい、初期宇宙における極めて爆発的な星形成を行っている銀河の性質について、詳しく調べていくことのできる、極めて貴重な天体例になると考えられる。ウェブ・リリースという形での広報も行い、多くの反響を得た [11][33]。

Subaru/XMM-Newton Deep Field における $1100\mu\text{m}$ 選択サブミリ波銀河の Herschel 対応天体調査

我々は南米チリの標高 4800m 地点に設置されている ASTE サブミリ波望遠鏡に搭載された波長 $1100\mu\text{m}$ での連続波カメラ AzTEC を用いて Subaru/XMM-Newton Deep Field (以下 SXDF) において初期宇宙に存在した爆発的星形成銀河 (サブミリ波銀河、以下 SMGs) を探査し、およそ 1000 平方分という広大な領域で 221 個という 1 つの領域では最大数となる SMGs を発見した。しかし AzTEC/ASTE の観測では空間分解能が 30 秒角と悪く、検出した SMGs の特性を調べるにはより正確な位置決定をする必要がある。そこで空間分解能が高く、高い赤外線光度に感度のある中間赤外線 (Spitzer 宇宙望遠鏡による波長 $24\mu\text{m}$)、と電波 (eVLA による 21 cm) のデータを用いて SMGs の対応天体の同定を進めて

きた。さらにこれらのデータの SMGs への感度がなくなる赤方偏移 3 以上の SMGs をカバーする為に中間赤外線 (波長 $3.6\text{--}8\mu\text{m}$) のデータを用いた対応天体の同定法の開発も行ってきた。また Herschel 宇宙望遠鏡の波長 100、160、 $250\mu\text{m}$ のデータは同じく SMGs に感度があり、より高い空間分解能 (8-18 秒角) を持つため、我々の $1100\mu\text{m}$ -selected の SMGs に対して、より正確な位置情報を与えてくれる。これら Herschel のデータによる位置情報も用いて上記の電波や中間赤外のデータを用いた手法を併用することにより、より精度の高い対応天体の同定を行った。これらの解析により SXDF の $1100\mu\text{m}$ -selected SMGs の 70% に対して 95% 以上の信頼性で対応天体を見つけることができた。残りの 30% は $250\mu\text{m}$ で暗く、これらはより高赤方偏移 (>3) にあると考えられる [23][18]。

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

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

可視/近赤外の狭帯域フィルタを用いた広域サーベイにより、 $\text{Ly}\alpha$ や $\text{H}\alpha$ などの輝線を放つ銀河 (輝線銀河) が高密度に集まった '原始銀河団' 領域が見つかり、高密度環境における銀河形成の現場として重要なものと考えられている。しかし、星形成率が $1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ を超えるような爆発的な星形成銀河は、星形成により生成されると考えられる大量のダストにより可視/近赤外域で強い減光を受けるために、検出が容易でないという問題がある。これにより、可視近赤外域での観測では、比較的ダスト量の少ない星形成銀河しかトレースされず、バイアスを持つ可能性がある。

我々は AzTEC/ASTE による原始銀河団の観測から、そのようなダストに隠される爆発的星形成銀河を抽出し、高密度環境における銀河形成の全貌を明らかにし、高密度において働くと考えられる「銀河形成への環境の効果」を解明することを目指している。これまでに、 $z = 2.48$ の電波銀河 4C 23.56 周囲の原始銀河団領域において 1.1 mm サーベイを行い、 1.1 mm 連続波源の分布が原始銀河団を構成する $\text{H}\alpha$ 輝線銀河 ($\text{H}\alpha$ Emitters; HAEs) の分布とよく重なることを明らかにした。 1.1 mm フラックスから予測される 1.1 mm 波源の星形成率は $\sim 1000\text{--}3000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ にもなり、この領域においてダストの多い爆発的星形成銀河が多数存在することが明らかになった。また、Spitzer 宇宙望遠鏡による中間赤外線のアーカイブデータも活用し、 $z \sim 2.5$ 付近で検出された $\text{H}\alpha$ 輝線銀河の中間赤外線カラーを調べたところ、その多

くが、その時代のサブミリ波銀河が示す典型的な中間赤外線カラーとよく似ていることも分かった。

こうしたデータの蓄積を踏まえ、ダストに隠された星形成の位置を精度よく求め、さらに、分子ガスの輝線を検出することで、赤方偏移を確定させつつ、 $H\alpha$ 輝線銀河や付随するダストに埋もれた爆発的銀河がどの程度の星形成の材料を現在持っていて、どのような進化段階にあるのか、を探るため、米国の CARMA 干渉計や eVLA 干渉計、およびフランスにある PdB 干渉計に観測提案を申請し、採択された。PdB 干渉計の観測では、AzTEC による 1.1mm 放射を伴う $H\alpha$ 輝線銀河の一つから、CO 輝線を検出することに成功した。線幅は 1000 km s^{-1} 程度と非常に広く、激しい相互作用に乱されたガスの力学状態を示唆する。今後、得られたデータを詳しく解析していくと共に、この貴重なデータを踏まえた、ALMA cycle 1 への観測提案の検討も進める [22]。

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

AzTEC カメラを ASTE に搭載し、さまざまな波長での深い撮像探査が行われている GOODS-S 領域の 1.1mm 観測を行い、48 個のサブミリ波銀河が検出された。多波長データを駆使して、その他波長対応天体を同定し、測光赤方偏移を調べたところ、同定されたサブミリ波銀河の 80% が赤方偏移 2 より初期の宇宙にあることがわかった。また、30% の同定されたサブミリ波銀河は、赤方偏移 3.3 より彼方にあり、サブミリ波銀河の赤方偏移分布において議論となっている、いわゆる “high redshift tail” の存在を強く示すものとなっている。これらの結果は、 $860 \mu\text{m}$ 帯でのサーベイで検出されたサブミリ波銀河の赤方偏移分布よりも、波長 1.1mm 帯で探索された天体の赤方偏移分布は、有意に遠方側にシフトしていることを意味する。波長 1.1mm 帯での深宇宙探査の意義を示すとともに、初期宇宙に、これまで知られていなかったダストに深く埋もれた爆発的星形成銀河がまだ多数存在する可能性を示唆するものである [4]。

COSMOS 領域における AzTEC/ASTE を使ったサブミリ波銀河探査

AzTEC カメラを ASTE に搭載し、さまざまな波長域での広い撮像探査が行われている COSMOS 領域の 1.1mm 帯観測を行い、0.72 平方度を深さ $1.3 \text{ mJy} (1\sigma)$ で撮像することに成功した。その結果、189 個のサブミリ波銀河を検出した。これまでの観測によるサブミリ波銀河計数と比較したところ、COSMOS 領域では、有意により多くのサブミリ波銀河が検出されていることがわかった。COSMOS 領域の中で、特にどこでサブミリ波銀河の面密度が上昇しているかを詳しく調べたところ、low redshift に大規模構造の存在が認められるところでサブミリ波の銀河計数が上昇している傾向が明らかとなった。これは、手前の大規模構造により、その背後にある遠方のサブミ

リ波銀河が重力レンズによる軽度の増光を受け、それにより、銀河計数が上昇している可能性が示唆された。また、このサブミリ波銀河カタログを用いて、2 体角度相関関数を求め、サブミリ波銀河を宿主暗黒物質ハロー質量への制限をつけることにも成功した [10][12]。

ガンマ線バースト母銀河における隠された星形成と星間物質の観測的研究

long duration のガンマ線バースト（以下、単に GRB と呼ぶ）は、大質量星の終末に関係しており、極めて明るく、初期宇宙にまで存在することが明らかになりつつあるため、GRB をプローブとして宇宙における星形成史を探ることが可能であると期待されている。一方で、ガンマ線バースト発生率からその時代での星形成率へ換算する上で、GRB 母銀河が、どのような性質の銀河であり、各時代の星形成率においてどのような割合を占めているのか、ほとんどわかっていない。初期の GRB 母銀河の観測では、非常に多量のダストを持ち、超高光度赤外線銀河 (ULIRGs) 的な性質を持つものもあるとの報告がある一方、GRB 母銀河は低金属量の天体に偏っているとの指摘もある。こうした状況を踏まえ、GRB 母銀河に、どの程度のダストや分子ガスが存在し、隠された星形成が存在しているのか、を調べるため、ミリ波サブミリ波およびセンチ波を用いた、多角的な研究を行っている。

先行研究で ULIRG 的な性質を持つとの報告があった、 $z = 1.1$ にある GRB 母銀河、GRB 000418 の CO 輝線を、PdB 干渉計により深く探査したところ、CO 輝線が検出されず、隠された星形成はほとんどないことが判明した。また、ATCA 電波干渉計を用いた GRB 母銀河 3 天体でのシンクロトロン放射の観測でも、顕著な星形成起源の電波を検出することはできず、ここでも、ダストの減光を強く受けた星形成の存在を認めることができなかった。これらの結果は、GRB 母銀河が ULIRGs 的なダストに覆われた爆発的星形成銀河であるとの描像を否定し、金属量が低く減光も小さい dwarf starburst 銀河的な性質を持つという解釈を支持するものである [2][9]。

4.2.2 活動的な銀河における分子スペクトル線サーベイ

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

これにより、天の川銀河の中には存在し得ない、極めて活動性の高い領域・異なる活動性の領域において、どのような物理化学過程が発現しているのか、を系統的に調べることができる。さらに、活動銀河核に特徴的で、エネルギー源診断の「マーカー」と

なり得るスペクトル線やスペクトル線の組み合わせを見出すことも重要な目標の一つである。将来的には、ALMAによる高感度高分解能観測により、スペクトル線によるエネルギー源診断を高赤方偏移銀河、特に、サブミリ波銀河の中心核に適用することを目指す。

サブミリ波銀河は、膨大なダストに覆われており、その中心核は、可視光・赤外線はおろか、しばしば硬 X 線ですら見通すことができない (Compton-thick)。ダスト減光の影響がほとんどないミリ波サブミリ波帯の分光観測は、ダストに深く埋もれた銀河核のエネルギー源診断を行い、成長中の巨大ブラックホールの存在を紐解くための有望な手段となる筈である。

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

近傍にある活動銀河核 NGC 1097 の中心領域に存在する高密度分子ガスを、部分運用の始まった ALMA を用いて、約 100pc 分解能で分光撮像観測する提案を行い、無事採択された (PI: K. Kohno、プロジェクト番号 2011.0.00108S)。この銀河は、中心に低光度活動銀河核を持ち、その周囲には、活発な starburst ring を伴う。この中心の活動銀河核と、周囲をとりまく爆発的星形成領域とを空間的に分解し、それぞれの活動領域において、特徴的にみえる高密度分子輝線は何か、を明らかにすることが狙いである。特に、シアン化水素 (HCN) やホルミルイオン (HCO^+) は、この銀河の中心付近で強く検出されており、活動銀河核からの何らかの影響 (強い硬 X 線の影響、もしくは AGN jet の存在によるショックの注入と、それに伴う力学的エネルギーの散逸加熱) が示唆されるが、励起状態に起因するのか、あるいは実際にある分子の存在量が上昇しているのか、明確に切り分けられていなかった。この観測提案では、100GHz 帯にあるショックトレーサー、 $\text{SiO}(2-1)$ 分子の他、 $\text{HCN}(1-0)$ 、 $\text{HCO}^+(1-0)$ 等の輝線を band 3 (100GHz 帯) で、また、 $\text{CS}(7-6)$ や $\text{HCN}(4-3)$ 、 $\text{HCO}^+(4-3)$ 輝線等を band 7 (350GHz 帯) で、それぞれ観測することにより、活動銀河核周辺の 100pc スケールにまで迫りつつ、どのような分子が AGN の存在に顕著に反応しているかを明らかにできると期待される。この他、放射によりパンピングされた振動励起の HCN 輝線の調査に基づく、励起メカニズムの調査や、高い解像度・速度分解能での高密度ガスのダイナミクスの情報も得らると見込まれる。既に band 3 の観測が実施され、観測所側でのデータの評価が進められており、データの到着が待たれる。

4.2.3 ミリ波サブミリ波観測装置の開発

超伝導遷移端センサーを用いた多色ミリ波サブミリ波撮像カメラの開発

サブミリ波銀河の発見に加え、サブミリ波銀河の赤方偏移の推定や、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を用いた銀河団の高温プラズマの内部構造の研究、星形成領域におけるダストの物理量 (温度や β 指数) に制限をつける上で、複数の波長における flux 測定は極めて重要である。単色での連続波カメラ AzTEC (波長 1.1mm) による大規模な掃天観測の成功を踏まえ、その次のステップとして、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 (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) のアレイを採用した。複数の波長での同時観測は、ミリ波サブミリ波帯のダイクロイック素子を用いて実現する。読み出しは超伝導量子干渉計デバイス SQUID を用い、さらに、周波数分割方式により 1 本の読み出し系統で 8 画素の信号を多重に読み出すことで多画素を効率的に読み出すシステムである。まず 1.1mm および 0.87mm 帯の 2 色同時撮像を実現する、合計 400 画素のカメラ開発を進めている。これらの開発は、国立天文台野辺山の犬島が PI となり、本学のほか、国立天文台・北海道大学・UC Berkeley、Cardiff University、McGill University ほかとの共同研究により進められている。

本年度は、全コンポーネントを組み上げての総合性能評価と調整を行い、チリ現地へ輸送して ASTE 望遠鏡に搭載するための準備を整えた。極低温ステージの温度が設計より高く、十分に冷えないという問題があり、その解決は難航したが、その後、Cardiff University により開発された熱フィルターの特性が不十分であったことがわかり、対処した結果、ようやく、所定の極低温を安定して保持できる状態にこぎつけた。素子の性能評価の一部については、泉拓磨の課題研究としてまとめられた。本研究の一部は、特別推進研究「超広帯域ミリ波サブミリ波観測による大規模構造の進化の研究」(代表者: 河野孝太郎) により進められている。

ASTE 搭載用ミリ波サブミリ波 TES ボロメータの素子評価

サブミリ波銀河の赤方偏移や、星形成領域でのダストの物理量、銀河団における Sunyaev-Zel'dovich 効果などの高精度決定には、多波長での連続波観測が極めて重要である。我々は単色での連続波観測を行った AzTEC カメラの後継として開発している、TES ボロメータカメラの心臓部であるボロメータ素子 (UC Berkeley 製作) の性能評価を行なった。具体的には、まず回路の安定性を調べるために、電熱フィードバック回路 (TES の動作点を一定に保つ) の時定数の測定を行った。目標とする性能を実現する

ためには、時定数は $230\mu\text{sec}$ より大きいことが必要である。また、素子を $\sim 0.5\text{K}$ 程度まで冷却して素子を常伝導から超伝導へ転移させる過程での電流電圧特性の測定も行い、ボロメータのダイナミックレンジの上限電力 P_{sat} の評価も行った。

この結果、有効時定数は 4.1msec で十分に大きく、この回路は発振せずに安定と言えることがわかった。ただし、測定時に流す電流の大小により、時定数の値が大きく変わることが判明した。今後、測定手法の改善を検討する必要がある。 P_{sat} の測定結果は、設計値 66pW に対し 49pW と少し小さい値が得られた。しかし、元々 P_{sat} の設計値は、悪天候かつ低高度の観測を想定しているものなので、現実的には今回の 49pW でも観測に支障はないと考えられる。ボロメータ素子は現在も野辺山観測所内で評価試験が続いており、この結果を UC Berkley での製造過程にフィードバックすることで、さらに高品質な素子を製作し、この TES ボロメータカメラの ASTE 望遠鏡での本格的な科学観測に備える予定である。

野辺山 45m 望遠鏡用 140 GHz 帯受信機の開発

酒井剛特任助教らは、野辺山 45m 望遠鏡用 140 GHz 帯 2SB 受信機を開発を行った。本受信機を用いることで重水素化物の $J=2-1$ 輝線を観測できる。既に野辺山 45m 望遠鏡に搭載されている 70 GHz 帯受信機も用いることで、重水素化物の多輝線観測が可能になり、放射領域の物理状態を明らかにすることができる。70 GHz 帯と 140 GHz 帯、2つの周波数帯を観測可能な大型望遠鏡は他になく、これら受信機を用いて独自のサイエンスを展開していくことができる。本年度は、光学系の設計、製作、受信機デュワーの設計、製作を行った。光学系は、副鏡でのエッジレベルを -35 dB とし 144 GHz でのビームサイズを 100 GHz と同じになるように設計した。また、受信機デュワーは野辺山ミリ波干渉計で使用されていたものを 140 GHz 帯受信機用に改良した。受信機のすべてのコンポーネントの製作を完了し、組み上げることができた。来年度、野辺山 45m 望遠鏡に搭載し、観測を行う予定である。

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。既に、4-8 GHz というこれまでに報告のない高い周波数帯でも、見積もられる増幅器の雑音温度が既存の方法と $\pm 2\text{ K}$ の精度で一致し、SIS 雑音源が有用である事を世界で初めて示した。

このマイクロ波帯での SIS 雑音源の成果をふまえ、ミリ波帯への拡張に取り組んでいる。電波天文学用ミリ波サブミリ波帯受信機の雑音温度の特性評価にはマイクロ波帯同様 Y-factor 法が用いられるが、雑音源として常温と液体窒素に浸した電波吸収体が使われる。この雑音源を用いた場合、感度の良いミキサでは常温雑音源を入力すると飽和を起こしてしまい正しく特性を評価できないという問題点がある。SIS 雑音源はその出力をバイアス電圧で連続的に制御できるためこれらの問題を解決できる可能性を秘めている。

本年度は、100 GHz 帯の導波管マウント型 SIS 雑音源の開発を行った。実験の結果、100GHz 以上の周波数で超伝導トンネル素子のショット雑音を検出することに初めて成功した。また、黒体放射との比較を行い、この雑音源からのミリ波出力とバイアス電圧の間に、多少の非直線性が認められるものの、理論予測の 80% 程度の効率で雑音源からのミリ波出力が実現されていることを確かめることができた。実際に雑音源として使用するにはさらに種々の補正が必要になるが、この方法が有望な方法であることを実験で確かめたことは電波天文学観測技術の発展に大きく寄与するものと考えられる。この成果は、井上裕文の博士論文としてまとめられた [15]。

ミリ波大気透過率イメージャ (MiSTI) の改良・運用

ミリ波サブミリ波帯の電波観測においては、対流圏中の水蒸気がつねに科学観測を大きく制限する。ミリ波大気透過率イメージャ (MiSTI) は、183 GHz の水蒸気放射をイメージングし、任意の方向のミリ波サブミリ波大気透過率を推定する専用小型望遠鏡であり、2008 年に ASTE 望遠鏡サイトに設置した。2011 年度は MiSTI の継続的なソフトウェア開発と運用・保守を行った。とくにチリ・チャナントール地域一帯の天文学コミュニティに対するデータ提供を主眼とした、ミリ波水蒸気全天モニターの公開を精力的に進めた。2011 年 11 月より全球予測システム (GFS) を用いた可降水量予測システムの開発を進めており、ウェブ上での試験的なデータ提供を開始している。本装置と長期測定に基づく統計的研究をまとめた論文は Tamura et al. として出版された [14]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Scott, K. S., Wilson, G. W., Aretxaga, I., Austermann, J. E., Chapin, E. L., Dunlop, J. S., Ezawa, H., Halpern, M., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kim, S., Kohno, K., Lowenthal, J. D., Montanildea, A., Nakanishi, K., Oshima, T., Sanders, D., Scott, D., Scoville, N., Tamura, Y., Welch, D., Yun, M. S., and Zeballos, M., "The source counts of submillimeter galaxies detected at $\lambda = 1.1\text{ mm}$ ", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press. (2012)
- [2] Hatsukade, B., Hashimoto, T., Ohta, K., Nakanishi, K., Tamura, Y., and Kohno, K., "Constraints

- on Obscured Star Formation in Host Galaxies of Gamma-Ray Bursts”, *The Astrophysical Journal*, Volume 748, 108 (2012)
- [3] Hsieh, P.-Y., Ho, P. T. P., Kohno, K., Hwang, C.-Y., and Matsushita, S., “Probing Circumnuclear Environments with the HCN($J = 3-2$) and HCO⁺($J = 3-2$) Lines: Case of NGC 1097”, *The Astrophysical Journal*, Volume 747, 90 (2012)
- [4] Yun, M. S., Scott, K. S., Guo, Y., Aretxaga, I., Giavalisco, M., Austermann, J. E., Capak, P., Chen, Y., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Johnson, S., Kawabe, R., Kohno, K., Lowenthal, J., Miller, N., Morrison, G., Oshima, T., Perera, T. A., Salvato, M., Silverman, J., Tamura, Y., Williams, C. C., and Wilson, G. W., “Deep 1.1 mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE - II. Redshift distribution and nature of the submillimetre galaxy population”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 420, pp. 957-985 (2012)
- [5] Tosaki, T., Kuno, N., Onodera, S. M., Rie, Sawada, T., Muraoka, K., Nakanishi, K., Komugi, S., Nakanishi, H., Kaneko, H., Hirota, A., Kohno, K., and Kawabe, R., “NRO M33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC). I. HI to H₂ Transition”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.63, pp.1171-1179, (2011)
- [6] Humphrey, A., Zeballos, M., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Yun, M. S., Cybulski, R., Wilson, G. W., Austermann, J., Ezawa, H., Kawabe, R., Kohno, K., Perera, T., Scott, K., Sanchez-Arguelles, D., and Gutermuth, R., “AzTEC 1.1-mm images of 16 radio galaxies at $0.5 < z < 5.2$ and a quasar at $z = 6.3$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 418, pp. 74-89 (2011)
- [7] Doi, A., Nakanishi, K., Nagai, H., Kohno, K., and Kamenno, S., “Millimeter Radio Continuum Emissions as the Activity of Supermassive Black Holes in Nearby Early-type Galaxies and Low-luminosity Active Galactic Nuclei”, *The Astronomical Journal*, Volume 142, 167 (2011)
- [8] Komugi, S., Tosaki, T., Kohno, K., Tsukagoshi, T., Nakanishi, K., Sawada, T., Kawabe, R., Ezawa, H., Kuno, N., Onodera, S., Tamura, Y., Wilson, G. W., Yun, M. S., Scott, K. S., Perera, T. A., Austermann, J. E., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Tanaka, K., Muraoka, K., Miura, R., and Egusa, F., “Temperature Variations of Cold Dust in the Triangulum Galaxy M 33”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.63, pp.1139-1150 (2011)
- [9] Hatsukade, B., Kohno, K., Endo, A., Nakanishi, K., and Ohta, K., “CO Observations of the Host Galaxy of GRB 000418 at $z = 1.1$ ”, *The Astrophysical Journal*, Volume 738, 33 (2011)
- [10] Aretxaga, I., Wilson, G. W., Aguilar, E., Alberts, S., Scott, K. S., Scoville, N., Yun, M. S., Austermann, J., Downes, T. P., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kohno, K., Oshima, T., Perera, T. A., Tamura, Y., and Zeballos, M., “Erratum: AzTEC millimetre survey of the COSMOS field - III. Source catalogue over 0.72 deg² and plausible boosting by large-scale structure”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 415, pp. 3831-385 (2011)
- [11] Ikarashi, S., Kohno, K., Aguirre, J. E., Aretxaga, I., Arumugam, V., Austermann, J. E., Bock, J. J., Bradford, C. M., Cirasuolo, M., Earle, L., Ezawa, H., Furusawa, H., Furusawa, J., Glenn, J., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Ivison, R. J., Johnson, S., Kamenetzky, J., Kawabe, R., Lupu, R., Maloney, P., Matsuhara, H., Maukopf, P. D., Motohara, K., Murphy, E. J., Nakajima, K., Nakanishi, K., Naylor, B. J., Nguyen, H. T., Perera, T. A., Scott, K. S., Shimasaku, K., Takagi, T., Takata, T., Tamura, Y., Tanaka, K., Tsukagoshi, T., Wilner, D. J., Wilson, G. W., Yun, M. S., and Zmuidzinas, J., “Detection of an ultrabright submillimetre galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 415, pp. 3081-3096 (2011)
- [12] Williams, C. C., Giavalisco, M., Porciani, C., Yun, M. S., Pope, A., Scott, K. S., Austermann, J. E., Aretxaga, I., Hatsukade, B., Lee, K.-S., Wilson, G. W., Cybulski, R., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kohno, K., Perera, T., and Schloerb, F. P., “On the Clustering of Submillimeter Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, Volume 733, 92 (2011)
- [13] Koo, B.-C., McKee, C. F., Suh, K.-W., Moon, D.-S., Onaka, T., Burton, M. G., Hiramatsu, M., Bessell, M. S., Gaensler, B. M., Kim, H.-J., Lee, J.-J., Jeong, W.-S., Lee, H.-G., Im, M., Tatematsu, K., Kohno, K., Kawabe, R., Ezawa, H., Wilson, G., Yun, M. S., and Hughes, D. H., “IRAS 15099-5856: Remarkable Mid-infrared Source with Prominent Crystalline Silicate Emission Embedded in the Supernova Remnant MSH15-52”, *The Astrophysical Journal*, Volume 732, 6 (2011)
- [14] Tamura, Y., Kawabe, R., Kohno, K., Fukuhara, M., Momose, M., Ezawa, H., Kuboi, A., Sekiguchi, T., Kamazaki, T., Vila-Vilaro, B., Nakagawa, Y., and Okada, N., “The Millimeter Sky Transparency Imager (MiSTI)”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.63, pp.347-356 (2011)
- (学位論文)
- [15] 井上裕文、“Tunnel junction as a noise source for millimeter-wave devices”, 博士論文、2012年3月
- [16] 梅畑豪紀、「赤方偏移 $z = 3.1$ の原始銀河団領域 SSA22 におけるサブミリ波銀河の多波長測光サーベイ及び銀河形成の大局的描像」、修士論文、2012年3月
- <学術講演>
- (国際会議)

一般講演

- [17] Kohno, K., “Dusty extreme starburst galaxies explored by SPICA and ground-based mm/submm telescopes”, Unveiling the Far-IR and Sub-mm Extragalactic Universe: Herschel, ALMA, CCAT, SPICA, and Beyond, UC Irvine, California, U.S.A, May 12, 2011
- [18] S. Ikarashi, K. Kohno, Y. Tamura, K. Suzuki, H. Umehata, B. Hatsukade, D. Iono, K. Nakanishi, R. Kawabe, G. Wilson, M. Yun, D. Hughes, I. Aretxaga, K. Scott, K. Motohara, K. Ohta, K. Yabe, R. Ivison, V. Arumugam, J. Dunlop, K. Caputi, “AzTEC/ASTE 1100 μ m deep survey of the Subaru/XMM-Newton Deep Field – Surveys and Counterpart identifications –”, Unveiling the Far-IR and Sub-mm Extragalactic Universe: Herschel, ALMA, CCAT, SPICA, and Beyond, UC Irvine, California, U.S.A, May 13, 2011
- [19] Kohno, K., : “Workshop Summary and Discussion”, “Large Aperture Millimeter/Submillimeter Telescopes in the ALMA Era”, Osaka Prefecture University, Nakamozu, Osaka, Japan, September 13, 2011

(国内会議)

一般講演

- [20] 酒井剛, 柴田大輝, 渡辺祥正, 坂井南美, 山本智, 河野孝太郎 (東京大学), 藤井由美, 野口卓, 浅山信一郎, 中島拓, 廣田朋也, 高野秀路 (国立天文台), 木村公洋 (大阪府大), 前澤裕之 (名古屋大学) 「野辺山 45m 望遠鏡用 70 GHz 帯受信機の開発」, 日本天文学会 2011 秋季年会, 鹿児島大学, 2011/09/20
- [21] 梅畑豪紀, 田村陽一, 五十嵐創, 鈴木健太, 河野孝太郎 (東京大学), 中西康一郎, 高田唯史, 川邊良平, 伊王野大介 (国立天文台), 廿日出文洋 (京都大学), 山田亨, 林野友紀, 市川隆, 内一由夏, 久保真理子 (東北大学), 松田有一 (ダークラム大学) 「SSA22 領域におけるサブミリ波銀河の性質: II. 赤方偏移の推定」, 日本天文学会 2011 秋季年会, 鹿児島大学, 2011/09/21
- [22] 鈴木賢太, 河野孝太郎, 田村陽一, 井上裕文, 五十嵐創, 梅畑豪紀 (東大), 中西康一郎, 児玉忠恭, 田中壱 (NAOJ), 廿日出文洋 (京大), 鍛冶澤賢 (愛媛大), Rob Ivison (Royal observatory), Grant Wilson, Min Yun (UMASS), David Hughes, Itziar Aretxaga, Milagros Zeballos (INAOE), 「Submm/IR Observations for Dusty Star-forming Galaxies in the Proto-cluster at $z = 2.48$ 」, 日本天文学会 2011 秋季年会, 鹿児島大学, 2011/09/21
- [23] 五十嵐創, 河野孝太郎, 田村陽一, 本原健太郎, 鈴木賢太, 梅畑豪紀 (東京大学), 太田耕司, 廿日出文洋, 矢部清人 (京都大学), 伊王野大介, 川邊良平, 中西康一郎 (国立天文台), R. Ivison, J. Dunlop, V. Arumugam (University of Edinburgh), 他 AzTEC チーム 「SXDF におけるサブミリ波銀河探索とその対応天体の同定」, 日本天文学会 2011 秋季年会, 鹿児島大学, 2011/09/22
- [24] 梅畑豪紀, 田村陽一, 五十嵐創, 鈴木健太, 河野孝太郎 (東京大学), 中西康一郎, 高田唯史, 川邊良平, 伊王野大介 (国立天文台), 廿日出文洋 (京都大学), 山田亨, 林野友紀, 市川隆, 内一由夏, 久保真理子 (東北大学), 松田有一 (ダークラム大学) 日本天文学会 2012 年春季年会, 龍谷大学, 2012/03/21
- [25] 河野孝太郎, 「SPICA と ALMA で探るダストに隠された爆発的星形成銀河」, 次世代赤外線天文衛星 SPICA が目指す宇宙星形成史とブラックホール進化史の解明, 於・名古屋大学理学南館 理学セミナー室 2011 年 10 月 19 日
- [26] 河野孝太郎, 「ALMA cycle-0 plan of M51 and other related nearby AGNs」, ALMA AGN subWG meeting, 国立天文台三鷹, 2011/4/28
- [27] 河野孝太郎, 「サブミリ波による銀河探索」, RESCEU サマースクール, 熊本, 2011/7/25-26
- [28] 河野孝太郎, 「今後 10 年の (日本の) 電波天文学: 銀河の研究, 大学と国立天文台との関係など」, 野辺山ユーザーズ・ミーティング, 国立天文台野辺山, 2011/7/27
- [29] 河野孝太郎, 「ASTE status」, Line survey meeting, 東京大学, 2011/10/12,
- [30] 河野孝太郎, 「超広帯域ミリ波サブミリ波観測による大規模構造の進化の研究」, 45m/ASTE 将来計画ワークショップ, 箱根, 2012/3/13-14

(その他講演 (アウトリーチ活動))

- [31] 河野孝太郎, 「電波で見る宇宙 3. 系外銀河・活動銀河核」, 最新の天文学の普及を目指すワークショップ・電波天文学最前線, 国立天文台 講義室, 2011 年 11 月 7 日
- [32] 河野孝太郎, 「超巨大ブラックホールに挑む」, 東京大学理学部 高校生のための春休み講座 2012・世界をリードする Top Scientists による特別授業, 東京大学理学部 1 号館西棟 206 号 (第 3 講義室), 2012 年 3 月 30 日

(プレスリリース)

- [33] 五十嵐創, 河野孝太郎 (東京大学), 伊王野大介 (国立天文台), 「初期宇宙のモンスター銀河の王・オロチ!」, 2011 年 11 月 1 日

5 重力波探査

——重力波によるビッグバン宇宙の探索—— ——（坪野）

日本の重力波研究の長年の目標であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 KAGRA(旧 LCGT) プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。メインのターゲットは連星中性子星の合体にともなう重力波であり、KAGRA が完成すれば確実に年に数回の重力波イベントを検出できるはずである。現在は光学設計やインフラ整備が急ピッチで進んでいる。また全長 6km におよぶ巨大な真空パイプや低温冷却系の一部が完成している。

一方で、宇宙空間を利用した重力波検出計画も構想されており、われわれは日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。

また、地上で低周波の重力波を検出することが可能な新しいタイプの重力波検出器 TOBA(Torsion Bar Antenna)を開発し、実際に観測をおこなった。この TOBA の開発およびそれを用いた観測をまとめた博士論文によって、石徹白晃治氏（現東北大学）は第 6 回（2012 年）日本物理学会若手奨励賞を受賞した [1, 7]。

5.1 大型レーザー干渉計重力波検出器 KAGRA の建設

KAGRA(LCGT) は岐阜県神岡の地下サイトに一辺 3km 全長 6km の L 字型巨大レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである。2010 年 10 月よりプロジェクトがスタートしたが、本年度は 1 月 20 日に神岡でトンネル施設の着工式が開催され、1 月 28 日にはそれまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。装置の建設は順調に進んでおり、2015 年には常温での運転が、2018 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている [5, 6, 14, 26, 30, 33, 50]。

主干渉計設計

KAGRA の心臓部である主干渉計は、到来する重力波の情報をレーザーの位相変化へ転写し、最終的

に計算機が処理可能な電圧信号へと変換するトランスデューサーの役割を果たす。主干渉計の各種パラメーターは様々な要素を考慮して最適化されなければならない。重力波に対する感度を最大化することはもちろんであるが、現実の光学部品等に不可避免的に含まれる誤差などの影響を受けにくく、さらに干渉計を制御するための信号が取得可能であるような設計を行う必要がある。本研究室では干渉計の動作をシミュレートする計算機モデルを構築し、この多自由度最適化問題にアタックしている。現在までに、主干渉計の基本パラメータを全て決定した。さらにこのシミュレーションコードを用いて、入力レーザーの周波数雑音などのテクニカルノイズが干渉計出力にどのように現れるかを計算し、それらに対する要求値を設定した。また、ガウシアンビームを任意の光学系中で自動的にレイトレースするプログラムを開発し、これを用いて干渉計レイアウトの最適化と、鏡 AR 面反射などで発生する迷光の追跡及び対策を行っている [3, 4, 12, 25, 43, 49, 51]。

アラインメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精度に制御する必要がある。KAGRA では高出力レーザーを入射光として用いるため、干渉計の片腕の Fabry-Perot 共振器内を往復するレーザーパワーは 400 kW にも及ぶ。そのため、共振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧トルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々は干渉計シミュレーションを元に、各鏡の変位信号の分離がしやすく、また、角度不安定性が小さくなるよう KAGRA の干渉計パラメータを決定した。さらに、鏡の懸架系の 3 次元剛体シミュレーションの結果と合わせ、角度制御系の設計を行った [11, 43]。

パラメトリック不安定性

KAGRA では、その腕には数百 kW もの光学パワー蓄えられる設計になっている。このとき干渉計のパラメータによっては、鏡の弾性モードが干渉計の基本モードのフォトンに散乱して高次モードに励起し、本来蓄えられないはずの TEM 高次モードが干渉計の中に蓄えられることによって、干渉計のロックに支障を来しうる。この問題をパラメトリック不安定性と呼ぶ。bKAGRA における鏡の曲率半径の候補値それぞれについて、候補値周りでパラメトリック不安定性が起こるのか否かを検証した。

低温接合・低温物性の研究

KAGRA では鏡の熱雑音を低減するために最終的には干渉計の鏡を極低温まで冷却する。また、干渉計の鏡を吊るす際にシリケート接合と呼ばれる接合

法が使用される予定である。しかしながらシリケート接合は常温でよく用いられる接合であり、低温での特性(機械強度など)はよくわかっていない。また、KAGRA で鏡を吊るすのに使用される金属ワイヤーの選定も行う必要がある。そこで、坪野研究室では高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同でシリケート接合の低温物性測定や金属ワイヤーの低温物性測定を行っている。

2011年度は水酸化カリウム水溶液を用いてサファイアサンプルの接合およびサンプルの熱サイクル試験・種々の金属ワイヤーのRRR測定を行った。RRRとは常温での抵抗値を極低温(今回は4.2K)での抵抗値で割った値のことで、残留抵抗比と呼ばれるものである。金属ワイヤーのRRRの測定では、ベリリウム銅・リン青銅・モリブデンの三種類の金属ワイヤーのRRRの測定に成功した。[15, 16]。

光検出器(PD)感度一様性の測定

KAGRAのレーザーには極めて高い強度安定度が要求とされ、その要求値は相対強度変動で 10^{-9} 以下である。そのため、極めて高性能のレーザー強度安定化制御を行うことが必要とされる。強度安定化制御に用いられる光検出器(PD)は、レーザー強度の実変動のみを捉える必要がある。しかし、もしPD受光面に光-電流変換効率の非一様性があると、ビームジッタが強度変動へと変換されてしまい、正しい測定ができない。そこで、我々はピエゾミラーとロックインアンプを組み合わせて、PD受光面の感度マップを自動測定する装置を開発した。この装置でPD受光面中の感度ができるだけ一様な領域を選び、そこにビームを当てることで、ビームジッタの影響を最小に抑えることができる。今後はこの装置の改良、高速化を行っていく。

5.2 宇宙空間レーザー干渉計DECIGO

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

考えられている残留ガス雑音に関する研究も行っている[18, 32, 38, 49]。

DPFの開発

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500kmの地球周回軌道に投入される350kg級の小型衛星として設計が進められている。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、現在、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[19, 28, 29, 39, 49]。

SWIM_{μν}

SWIM(SpaceWire Interface demonstration Module)は、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、2010年9月に運用を終了(衛星が停波)した。

昨年度までで、観測運用を終了しデータを得ていた。しかし、そのデータには不具合が発生していたためにそのまま解析に供することはできない状態であった。そのため今年度は、まず不具合が発生していたデータの修復を行った。その後、プロジェクトの最終目的の一つである、重力波探査を実施した。

SWIM_{μν}は小型軽量な実証機であるため感度が良いわけではないが、この結果は円偏光モードについての背景重力波の上限値を定めた初めての例となった。このように、小型衛星上の小型検出器を用いて重力波探査という科学的成果にまで到達したことで、SWIM_{μν}プロジェクトの重要な目的である、将来につながる技術の軌道上実証を達成したといえる。これらの成果は、穀山が博士学位論文としてまとめている。さらに、投稿論文としても発表する準備を行っている[20, 27, 31, 34, 53]。

DPFにおける残留ガス雑音の実験

DPFでは重力を検知するための試験マスとその周りにある静電センサの極板との距離が近いために残留ガス雑音が増加するSqueeze film dampingという効果が重要となる。このSqueeze film dampingの効果を研究するためねじれ振り子を用いた実験を行った。

Squeeze film dampingの効果は壁を例えば楕円形などにしてガス分子が逃げる経路を作ることにより低減することが可能である。今回、通常の壁の場合と

2 mm 間隔で細長い穴が空いた楕形の壁の場合で比較した。また、残留ガスの組成を知るために質量ガス分析器を用いて残留ガスの組成を調べ、おおむね H_2O がその成分であることがわかった。ダンピング測定を行った結果、試験マスと壁との距離が 1mm 程度の距離で通常の壁と比べ Squeeze film damping による残留ガス雑音が 3 分の 1 程度にまで低減していた。これは DPF において静電センサを楕形にすることで Squeeze film damping による残留ガス雑音をこの程度低減できることを示す結果である [21, 40]。

5.3 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

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

背景重力波のデータ解析

背景重力波とは、宇宙マイクロ波背景放射と同様、天体全域からほぼ一様に放射されている重力波で、天文学的起源の重力波と宇宙論的起源の重力波の重ね合わせであると考えられている。特に宇宙論的起源のものは、誕生直後の宇宙の姿を映し出すものとして注目されている。これを効率的に検出する為、東京大学と京都大学の 2ヶ所に設置されているプロトタイプ TOBA2 台を用い、同時観測を行った。これによって、TOBA における相関解析の手法を確立し、背景重力波に対する新たな上限値を与える事に成功した。この結果は TOBA1 台での解析結果を 4 倍ほど上回る結果であり、上限値を与えた周波数帯も 0.035~0.830Hz と、大幅に拡大する事ができた [2, 8, 10, 37]。

新型 actuator の開発

今後、TOBA の更なる感度向上を目指す為には、現在低周波数帯の感度を制限している磁場雑音の問題を解決する必要がある。この磁場雑音は、従来使用されているコイル-マグネットアクチュエータによって導入されている可能性が高い事が示唆されている。そこで、コイル-コイルアクチュエータと呼ばれる、磁場雑音に強く駆動力も大きい新型のアクチュエータを開発した。このアクチュエータは向かい合う 2 つのコイルに流れる交流電流の作る磁氣的相互作用を使用している。ここで、コイルには高周波の交流電流を流す事で、磁場雑音の影響を低減させている。現在までにこのアクチュエータについて 3 種類の使用方法を考案し、それぞれについて理論構築、検証、及びプロトタイプ TOBA の制御に成功している。今後は、ノイズの評価や、超伝導コイル使用の可能性などを検討する予定である [24]。

5.4 低温光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発

高安定なレーザー光源の開発は、光原子時計のプロローブレーザーや重力波検出器、高精度分光等、広い応用が期待される。一般に高精度のレーザー周波数安定化は、長さを安定化した光共振器にレーザーをロックすることによって実現される。従来は、温度膨張率が低い ULE ガラスを用いた光共振器が広く使われてきたが、その性能は熱雑音で制限されていることが分かっている。坪野研では、この熱雑音を下げるための冷却した光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発を行なっている [13, 41]。

開発の現状

光共振器の形状及び支持方法は地面振動による弾性変形の影響を最小化するように最適化する必要がある。我々は有限要素解析を用いて最適な形状を決定した。現在までに単結晶シリコン製光共振器の形状加工および研磨がほぼ終了し、今後、高反射率コーティングに進む予定である。また、この光共振器を収容し、冷却するためのクライオスタットの開発を行ない、納品された。このクライオスタットでは、液体ヘリウム再凝縮型と呼ばれる新しい冷凍機を採用し、光共振器への振動伝達を抑えるように設計されている。現在はこのクライオスタットの性能試験を行っている [52]。

プレ安定化レーザー

低温光共振器の波長は、Sr 光格子時計で使用されている 698 nm の 2 倍の波長の 1396 nm で設計した。波長 1396 nm のレーザーで、波長の制御などを考慮し、外部共振器型半導体レーザー (External Cavity

Diode Laser, ECDL) の設計・製作を行い、100 mW の単一周波数出力を得た。さらにモードクリーナーと呼ばれる光共振器を用いて周波数のプレ安定化システムの構築を行った。これらは、ネオアーク株式会社との共同で行った [43, 48]。

光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面振動によって共振器長が変動するのを防がなければならない。この為に必要なのが防振台である。我々の標的とする 1Hz で防振を行う為には、能動防振装置の開発が必要となる。ここではヘキサポッドと呼ばれる 6 本脚の台を使用する。6 本の脚にはそれぞれピエゾ素子が組み込まれており、小型の seismometer (速度計) でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバックして脚の長さを調節する事で、全自由度の振動を抑える。この能動防振装置によって、東京の地面振動レベルを約一桁防振した支持台を構築する事を目標とし、現在までにその設計、発注が完了している [13]。

低温における接合の研究

低温光共振器では共振器のミラーの取り付けにオプティカルコンタクト (オプコン) が用いられ、光共振器の支持系にシリケート接合が用いられる。しかし、これらの接合は低温での使用実績がないので、低温での強度や熱伝導率などの測定を行う必要がある。そこで、坪野研究室では単結晶シリコンのオプコンおよびシリケート接合の研究を行っている。2011 年度はシリコンのオプコンおよびシリケート接合サンプルの作製・サンプルの熱サイクル試験・サンプルの熱伝導率測定を行った。熱伝導測定はシリケート接合のサンプルにのみ行い、接合面を含む部分の熱抵抗が接合面を含まないバルク部分での熱抵抗に比べて液体窒素温度付近で 10 倍程度大きくなることがわかった。[16]。

5.5 非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光とは、共役な物理量のうち一方の揺らぎが量子限界よりも大きい、他方の揺らぎは量子限界よりも小さくなっている状態である。我々の実験では、直交位相振幅の揺らぎを小さくした直交位相振幅スクイーズド光を生成する。このような光を発生させるには光子間に相関をもたせる必要がある、そのために非線形光学効果を用いる。具体的には、2 次の非線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振器の中で行う OPO (Optical Parametric

Oscillator) を作成し、スクイーズド光を生成する。また、この際必要になる第二次高調波を生成するために、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ーズド光の生成を目指している。2011 年度は -6 dB のスクイーズングレベルを達成した。また、生成したスクイーズド真空場をプロトタイプ重力波検出器に導入する事で検出器の散乱雑音を -2 dB 低減する事に成功した [17, 42]。

5.6 極小距離領域における重力法則の検証

ねじれ振動子による重力実験

量子重力理論のある種のモデルでは、時空が通常の 4 次元座標だけではなく、複数の余剰次元で記述される。そういったモデルが正しいとすれば、余剰次元の存在のためにサブミリメートル領域で重力の逆二乗則が成り立たないことになる。坪野研究室ではかつて重力波検出器として用いられていたねじれ振動子でその検証実験を試みている。この検出器は高い Q 値と低い共振周波数をもつため、高い S/N 比で重力信号を検出することができる。

2011 年度はアンテナに加える変調重力場の周波数安定化、および防振装置の改良に取り組み、その上で予備実験としてキャリブレーション用のデータの取得、雑音信号の評価を行った。

以上の成果を踏まえ、今後は本測定および解析を行い、重力の逆二乗則を先行研究よりも高い精度で検証する予定である [22, 35, 36]。

5.7 空間等方性の研究

三角光共振器を用いた異方性検出実験

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。しかし、これまでの多くの実験は Michelson-Morley の実験と同じように往復光速の異方性探査となっており、片道光速の異方性への上限値は往復光速に比べて 4 桁大きいものとなっていた。そこで、我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なっている。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探査実験では、光共振器の鏡像反転対称性のため、往復光速の異方性しか測定することはできなかった。そこで、光リング共振器の光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振

器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定することを考案した。ダブルパス構成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射する。これにより測定が高精度な null 測定となる。現在までに片道光速の異方性に対し、これまでの世界最高精度での測定に比べて 2 倍以上厳しい上限値を与えた。これは本手法の特長があったためであり、論文投稿準備中である。[9, 23]。

<受賞>

- [1] 石徹白晃治：第 6 回（2012 年）日本物理学会若手奨励賞。

<報文>

(原著論文)

- [2] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hirota Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 161101.
- [3] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, Length sensing and control strategies for the LCGT interferometer, *Classical and Quantum Gravity*, accepted for publication.
- [4] Y. Aso and the LCGT Collaboration, Optical Configuration and Control of Ultra-sensitive Gravitational Wave Detectors, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **54** (2011) 597.
- [5] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ring-down, *Physical Review D*, **83** (2011) 122005.
- [6] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar, *Physical Review D*, **83** (2011) 042001.

(国内雑誌)

- [7] 坪野公夫:重力探査衛星 B 実験の 50 年 (翻訳)、*パリティ* **27-4** (2012) 38-41.

(学位論文)

- [8] 正田亜八香: ねじれ型重力波検出器 TOBA の開発及び背景重力波探査, 修士論文, 2012 年.
- [9] 道村唯太: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査, 修士論文, 2012 年.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] A. Shoda, M. Ando, K. Okada, K. Ishidoshiro, W. Kokuyama, Y. Aso and K. Tsubono : Search for a stochastic gravitational-wave background with Torsion-bar Antennas, (July 2011, Amaldi9/NRDA meeting, Cardiff University).

- [11] Y. Michimura, Y. Aso, K. Agatsuma, T. Sekiguchi, M. Evans, L. Barsotti, LCGT Collaboration: Alignment Sensing and Control for LCGT, 9th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (July 2011, Cardiff).

招待講演

- [12] Y. Aso, Interferometer Control of Advanced Detectors, 9th Amaldi Meeting on Gravitational Waves, Cardiff University, UK, July 2011.

(国内会議)

一般講演

- [13] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 牛場崇文, 柴田和憲, 正田亜八香, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 III, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [14] 黒田和明, 梶田隆章, 中谷一郎, 大橋正健, 川村静児, 三代木伸二, 内山隆, 宮川治, 高橋竜太郎, 山元一広, 石塚秀喜, 東谷千比呂, 廣瀬榮一, 上泉眞裕, 岩崎詩子, 斎藤陽紀, 榊原裕介, 関口貴令, 藤本眞克, 上田暁俊, 大石奈緒子, 阿久津智忠, 辰巳大輔, 固武慶, 端山和大, 我妻一博, 中村康二, 江口智士, 石崎秀晴, 鳥居泰男, 福嶋美津広, 田中伸幸, 山本明, 鈴木敏一, 木村誠宏, 春山富義, 井岡邦仁, 齊藤芳男, 小池重明, 横山順一, 樽家篤史, 坪野公夫, 麻生洋一, 平松成範, 穀山渉, 岡田健志, 瓦尊慶, 松本伸之, 道村唯太, 正田亜八香, 柴田和憲, 牛場崇文, 森脇成典, 森匠, 高山圭吾, 渡部恭平, 及川溪, 平谷真也, 三尾典克, 大前宣昭, 細谷暁夫, 河合誠之, 宗宮健太郎, 鹿野豊, 須佐友紀, 神田展行, 岡田雄太, 山本尚弘, 譲原浩貴, 中尾憲一, 中村卓史, 安東正樹, 瀬戸直樹, 櫻山和己, 八木絢外, 植田憲一, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 阪田紫帆里, 新谷昌人, 高森昭光, 和泉究, 陳タン, 佐藤修一, 田嶋茂樹, 本間彰, 樋口亜希子, 林翔平, 東浦孝典, 角谷昌憲, 高辻利之, 尾藤洋一, 寺田総一, 長野重夫, 田越秀行, 佐々木節, 柴田大, 田中貴浩, 佐合紀親, 関口雄一郎, 西澤篤志, 西田恵里奈, 権藤里奈, 新富孝和, 大原謙一, 高橋弘毅, 姫本宣朗, 浅田秀樹, 二間瀬敏史, 伊藤洋介, 高橋史宜, 原田知広, 西條統之, 小嶋康史, 瓜生康史, 山田章一, 古在由秀, 橋詰克也, 大森隆夫, 川添史子, Yanbei Chenf, 河邊径太, 新井宏二, Haixing Miaof, M.E.Tobarg, D. Blair, Ju Lig, Chunnong Zhaog, Linqing Weng, Warren Johnson, 苔山圭以子, 中野寛之, Zong-Hong Zhuj, S. Dhurandhark, S. Mittrak, V. Milyukov, Lucio Baggiom, Yang Zhangn, Chao-Guang Huango, Junwei Caop, Sheau-Shi Panq, Sheng-Jui Chenq, 沼田健司, Szabolcs Marks, Stuart Reidt, Riccardo DeSalvou, Wei-Tou Niv, Xiang-hua Zhaiv, Ping Xiv, Hsien-Hao Meiw, Tai Hyun Yoonx, Hyung Won Leey, Hyung Mok Leez, Jae Wan Kim, Yong-Ho Cha, Hyun kyu Kim, Chang-Hwan Lee, Gungwon Kang, John J. Oh, Sang Hoon Oh, Myeong-Gu Park, Sang Pyo Kim, Maurice H.P.M. van Putten, Archana Pai, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) プロジェクトの現状, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).

- [15] 山元一広, 高橋竜太郎, 関口貴令, 榊原裕介, 東谷千比呂, 上泉眞裕, 岩崎詩子, 内山隆, 三代木伸二, 大橋正健, 阿久津智忠, 石崎秀晴, 高森昭光, 鈴木敏一, 木村誠宏, 小池重明, 坪野公夫, 麻生洋一, 牛場崇文, 柴田和憲, 大前宣昭, 宗宮健太郎, Riccardo DeSalvo, Ettore Majorana, Eric Hennes, Jo van den Brand, Alessandro Bertolini, J, Nick A. Lockerbie, LCGT collaboration, LCGT 用防振装置の開発 VII, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [16] 牛場崇文, 柴田和憲, 大塚茂巳, 坪野公夫, 鈴木敏一, 低温光共振器のための接合物の物性測定, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [17] 松本伸之, 道村唯太, 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 干渉計のオートアライメント制御, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [18] 安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨典, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 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, 正田亜八香, 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, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本陸子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (36): DECIGO/DPF, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [19] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 権藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山涉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (4), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [20] 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, 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 X (観測成果), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [21] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の研究 IV, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [22] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (5), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [23] 道村唯太, 大前宣昭, 穀山涉, 麻生洋一, 安東正樹, 坪野公夫, 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [24] 正田亜八香, 安東正樹, 岡田健志, 石徹白晃治, 穀山涉, 麻生洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナのための新型アクチュエータの開発, 及び背景重力波探査, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [25] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 山元一広, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, LCGT Collaboration, LCGT の主干渉計設計 II, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [26] 宮川治, 大石奈緒子, 上泉眞裕, 斎藤陽紀, 三代木伸二, 和泉究, 麻生洋一, 道村唯太, 端山和大, LCGT Collaboration, 計算機を利用した LCGT の制御 (II), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [27] 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: SDS-1/SWIM による重力波観測成果と DPF 技術の宇宙実証, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月 6 日, JAXA/ISAS).
- [28] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹, 穀山涉, 坪野公夫: DECIGO pathfinder における重力場観測の感度評価, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月, JAXA/ISAS).
- [29] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 阿久津智忠, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月, JAXA/ISAS).
- [30] 宗宮健太郎, 寺田聡一, 宮川治, 麻生洋一, 川添史子, Andreas Freise, LCGT 用 DC readout system の開発, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [31] 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: SDS-1/SWIM 搭載

- 超小型重力波検出器による観測成果, 第12回宇宙科学シンポジウム (2012年1月, JAXA/ISAS)
- [32] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹, 穀山渉, 坪野公夫: DECIGO pathfinder における重力場観測の感度評価, 第12回宇宙科学シンポジウム (2012年1月, JAXA/ISAS).
- [33] 坪野公夫, スタートした LCGT 計画, ビッグバンセンター研究交流会 (2011年11月, 東京大学, 本郷).
- [34] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明: SWIM による重力波観測成果と DPF 技術の宇宙実証, 第10回 DECIGO ワークショップ (2011年11月19日, 京都大学).
- [35] 牛場崇文, 柴田和憲, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [36] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (4), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [37] 正田亜八香, 岡田健志, 石徹白晃治, 安東正樹, 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東京・京都での重力波同時観測 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [38] 安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市来浄興, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山渉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小篤康史, 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, 正田亜八香, 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, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 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, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (33):DECIGO/DPF, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [39] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 権藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (3), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [40] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の研究 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [41] 坪野公夫, 波多野智, 三橋秀人, 池上健, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 鈴木敏一, 麻生洋一, 平松成範, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [42] 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 V, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [43] 大前宣昭, 麻生洋一, 坪野公夫, 平松成範, 正田亜八香, 波多野智, 三橋秀人, 香取秀俊, 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [44] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 山本博章, LCGT Collaboration, LCGT の主干渉計設計, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [45] 道村唯太, 麻生洋一, 我妻一博, 関口貴令, Matt Evans, Lisa Barsotti, The LCGT Collaboration, LCGT のアラインメント制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [46] 我妻一博, 辰巳大輔, Chen Dan, 山本博章, 麻生洋一, LCGT Collaboration, LCGT 用 Power Recycling Cavity の設計に関する考察, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [47] 宮川治, 大石奈緒子, 三代木伸二, 和泉究, 麻生洋一, 斎藤陽紀, 道村唯太, 端山和大, LCGT Collaboration, 計算機を利用した LCGT の制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 弘前大学, 青森).
- [48] 大前 宣昭, 麻生 洋一, 坪野 公夫, 平松 成範, 正田 亜八香, 波多野 智, 三橋 秀人, 香取 秀俊: 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011年9月, 富山大学, 富山).
- [49] 坪野 公夫, 重力波プロジェクト報告 LCGT, DECIGO, DPF, RESCUE 夏の学校 (2011年7月, 熊本, 三愛高原ホテル) .
- [50] 坪野公夫, ついにスタート! LCGT, 物理教室ランチトーク (2011年5月, 東京大学, 本郷).
- 招待講演
- [51] 麻生洋一, 超高感度重力波検出器へ向けた光学設計技術, 2012年春季第59回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「重力波観測用巨大干渉計の設計と建設」(早稲田大学), 2012年3月.

- [52] 坪野公夫, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発, 「最も正確なものさし 光コム」のためのレーザー開発ワークショップ (台場、日本科学未来館), 2011 年 12 月.

(セミナー)

- [53] 穀山渉: ねじれ型重力波アンテナ (TOBA) と宇宙空間回転 TOBA による重力波観測, 京都大学天体核研究室 重力波・重力実験セミナー (2011 年 10 月 21 日, 京都大学).

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——
(藁輪・井上)

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

6.1 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター

国際原子力機関（IAEA）は核兵器不拡散条約（NPT）に基づき、世界各地の原子力関連施設において査察活動をはじめとした保障措置を行っている。現在の査察は、原子炉から放出される中性子や使用済み核燃料の放射能をモニタリングすることで行われており、査察機関と査察対象国双方にとって負担が大きい侵襲的な方法であることが課題となっている。

そこで現在、非侵襲的なモニタリング方法として反電子ニュートリノの検出技術を応用するための研究が世界の複数のグループにより進められている。原子炉内で発生する反電子ニュートリノを捉えることで、原子炉の運転状況を外部から把握することが目的である。ニュートリノは透過性が極めて高く、また代替のニュートリノ源を用意することが困難であることから、原子力関連施設の監視に大きな威力を発揮するものと期待されている。

我々のグループは、原子炉モニタリングを目的とする可搬性の反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) の開発をおこなっている。PANDA は不燃性のプラスチックシンチレータを使用しているため、可燃性の液体シンチレータを使用している他の研究グループの原子炉ニュートリノ検出器と比べ安全面で優れている点が大きな特長である。原子力発電所の敷地内において原子炉モニタリング測定をおこなう際には高い安全性が求められるため、この特長は大きなメリットとなる。また PANDA のもう一つの特長として、トラックに積載して移動できるように設計されている点が挙げられる。同一の検出器を用いて複数の原子炉のニュートリノ測定をおこなうことができるため、燃料組成比の異なる核燃料を使用している複数の原子炉に設置することで、それぞれの原子炉におけるニュートリノスペクトルの違いを観測することが可能であると考えている。

PANDA の構造は、10cm×10cm×100cm の棒状プラスチックシンチレータを縦横に 10 本×10 本の計

100 本を積み重ね、その間にガドリニウム含有フィルムを挟み込むものである。原子炉で発生する反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) がプラスチックシンチレータ中に含まれる陽子 (p) と反応すると、逆β崩壊により陽電子 (e^+) と中性子 (n) が発生する。陽電子はシンチレータにエネルギーを落としながら短距離を移動し、その後シンチレータ中の電子と対消滅して 2 本の γ 線を放出する。一方、中性子はシンチレータ中で繰り返し散乱しエネルギーを十分に失った後、ガドリニウム含有フィルムに含まれるガドリニウムによって吸収され、そのときに合計約 8M eV の γ 線を放出する。陽電子と中性子によるこの 2 つの信号の時間差は平均 60 μ s 程度であり、この時間差を利用することでバックグラウンドの影響を大きく排除して反電子ニュートリノを検出することができる。

2011 年度は、2010 年度に開発したプラスチックシンチレータ 16 本を用いた第 1 次プロトタイプ検出器である lesser PANDA を用いて試験的な測定をおこなった。測定は中部電力浜岡原子力発電所において、2011 年 3 月上旬から開始した。浜岡原子力発電所 3 号機の炉心から約 40m の位置に lesser PANDA 検出器をトラックに積載した状態で設置し、原子炉の非稼働 (OFF) から稼働 (ON) への遷移に伴うニュートリノフラックスの変動の観測を目的として測定を開始した。しかし 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響で浜岡原子力発電所 3 号機が稼働せず、結果として 2011 年 5 月中旬まで 2ヶ月間のバックグラウンド測定を行うこととなった。この測定では原子炉の ON/OFF に伴うニュートリノフラックスの変動を測定することは出来なかったが、定期的なデータ回収作業を除くと、2ヶ月間の無人運転が可能であること、バックグラウンドの変動が十分に小さいことが確認できた。



図 6.1: 第 2 次プロトタイプ検出器 PANDA36

lesser PANDA の浜岡原子力発電所での測定終了後、プラスチックシンチレータを 36 本用いた第 2 次プロトタイプ検出器 PANDA36 の開発をおこなった (図 6.1)。PANDA36 の開発にあたっては、lesser PANDA で得られた知見をいかして複数の改善がなされた。lesser PANDA ではプラスチックシンチレータとライトガイドの接着面に気泡が入ったり、光電子

増倍管とライトガイドの接着が弱くばねで支える構造が必要であるなどの問題点があったが、PANDA36では接着方法の変更によりこれらの問題が改善した。接着部分の強度の改善により、プラスチックシンチレータを1本ずつ遮光することが可能になり、検出器本体構造の大幅な簡略化が実現した。またデータ取得回路についても見直しをおこない、lesser PANDAと比べ複雑なコインシデンスをとることが可能になった。またコインシデンス設定値やゲート幅などをオンラインで変更できるようにするなど、原子力発電所敷地内での無人測定に適したデータ取得回路を設計した。



図 6.2: トラックに積載した状態で関西電力大飯発電所に設置された PANDA36

完成した PANDA36 は関西電力大飯発電所の 2 号機近傍に輸送され、2011 年 11 月中旬から 2012 年 1 月中旬までの 2ヶ月間測定をおこなった (図 6.2)。原子炉は 2011 年 12 月中旬に定期検査入りしたため、原子炉稼働中 (ON) と停止中 (OFF) それぞれ 1ヶ月間ずつのデータを取得した。両者を比較した結果、ニュートリノ由来だと思われる差が確認された。一方でバックグラウンドの大多数が宇宙線起源の高速中性子による事象であると解明し、高速中性子バックグラウンド事象とニュートリノ事象を判別する手法を確立した。

今後は今回プロトタイプで得られた知見を生かし、さらに一回り大きい検出器を作成して地上での原子炉ニュートリノのさらに明確な観測を目指す。具体的には水タンクによる高速中性子の遮蔽、MPPCを活用した安価な active shieldなどを検討している。

6.2 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。しかし、今のところこの素粒子はいかなる実験、観測によっても発見されていない。アクシオンは小さい質量を持った中性擬スカラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互作用しないと考えられている。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捉えるために、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東京アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope、愛称 Sumico) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆ブリュワコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。また、磁場領域に He ガスを導入することで質量を持ったアクシオンに対して感度を持たせることができる。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクシオンの質量として $m_a < 0.27 \text{ eV}$ 、 $0.84 \text{ eV} < m_a < 1.00 \text{ eV}$ という範囲でアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6 - 13.4 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ という上限値を得ることに成功している。現在は質量 1 eV 以上のアクシオン探索を行うべく、実験装置の改修を行い、測定準備をしている。

6.3 Hidden photon 探索実験について

標準模型の諸問題を解決する手段の一つとして新たな対称性、特に $U(1)_h$ 対称性を導入する方法が考えられるが、対応するゲージボソンとして Okun が提唱した hidden photon が挙げられる。hidden photon は物質と直接相互作用しない粒子だが、ニュートリノ振動のようにその質量 $m_{\gamma'}$ 、飛距離、エネルギー、媒質密度、hidden photon と光子 (photon) の混合角 χ 等に応じたある確率で光子に振動、転換する性質を持つ。現在までに世界中で種々の hidden photon の探索実験、考察が行われてきたが発見されていない。

本研究では太陽が強力な光源であると同時に hidden photon 発生源であることに着目して、数 eV のエネルギーの太陽 hidden photon の探索実験を検討し hidden photon 探索測定を行ってきた。hidden photon 検出装置は hidden photon が光子に転換する真空容器、転換光子を集光するための放物面鏡、集光された光子を検出するための光検出器 (浜松ホトニクス製 PMT (R3550P)) で構成される。また、測定

際には検出装置を太陽に向ける必要があるがこれを実現するために既存の装置である東京アクシオンヘリオスコープに本検出装置を搭載し、その太陽追尾システムを利用する手段を用いている (図 6.3 参照)。

以下に本年度の研究実績をまとめる。

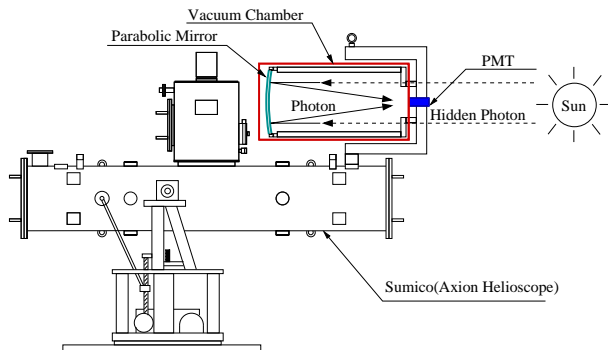


図 6.3: hidden photon 探索装置の模式図

太陽内部からの hidden photon flux の修正

hidden photon 探索は太陽追尾測定時とバックグラウンド測定時における single photon like なイベントのカウンtrateの差を求めることで行う。2010 年度に行った測定では検出頻度に有意な差が見られなかったため hidden photon イベントの上限値を決定し、PMT の検出効率等を考慮することで photon と hidden photon との混合角 χ の上限値を決定した。

このとき太陽からの hidden photon flux は 2008 年に Redondo が行った見積りを用いていた。しかし 2012 年に Redondo が太陽内部からの hidden photon flux についてより詳細な見積りをし、我々が検出を目指している可視光領域のエネルギーをもった hidden photon については 2008 年時の見積りより 2 桁以上大きな flux があることがわかった。

これを用いて再び photon と hidden photon との混合角 χ の上限値を決定した。混合角 χ の上限値は hidden photon の質量 $m_{\gamma'}$ の関数で表され、図 6.4 の通りである。

バックグラウンドの位置依存性

2010 年度の測定において太陽追尾測定時にはアクシオン望遠鏡を動かしていたが、バックグラウンド測定時にはアクシオン望遠鏡を動かさずに測定を行っており、太陽追尾測定時における測定容器の位置変化による系統誤差が大きかった。

この問題に対し、我々の研究室では光路遮断機を用いた測定手法の確立を目指している。測定時に光路を開放、遮断することで太陽追尾測定およびバックグラウンド測定を同時に行うことを可能にする。この手法を用いればバックグラウンドが測定位置な

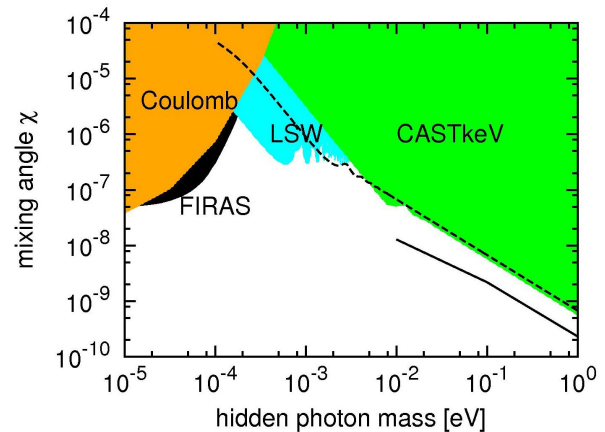


図 6.4: 2010 年度における測定により得られた χ の上限値。破線は 2008 年時における hidden photon flux の見積りを、実線は 2012 年に行われた再計算の結果を用いた場合に得られる上限値。塗りつぶされた領域は他グループの実験結果、考察結果によって否定された領域。

どから与えられる影響を避けることができると期待される。

6.4 安価な食物放射能測定器の開発

2011 年に起こった東日本大震災の津波の際の原子力発電所事故による食品の放射能汚染が問題視されている。放射能を計測するためにはシンチレーション検出器やゲルマニウム検出器が必要となるが、現時点での食品放射能測定器は非常に高価なものしか市販されていない。一般家庭における食への不信感を払拭するためには、より安価な放射能測定器が必要不可欠である。

そうした観点から、我々は CsI シンチレータと PIN フォトダイオードを用いた放射能測定器の開発を行っている。φ25 mm × 25 mm の CsI(Tl) シンチレータに 10 mm × 10 mm の PIN フォトダイオードを接着し、その信号をチャージアンプに通し増幅する。通常であればこの信号をさらにシェーピングアンプで整形しマルチチャンネルアナライザーを介して PC へと取り込んでいくのだが、価格を低減させるために、ここでは USB 接続のデジタルオシロスコープを用いてチャージアンプからの信号を直接 PC へと取り込み、PC 上でデジタルシェーピング及びヒストグラムの作成を行うことにした。PC の高性能化と一般家庭への普及によってこれが可能になっている。これによって、PC を除いて 6 万円弱で構成することが可能になった (図 6.5)。

また、放射能測定を行う際には、カウントレートと放射能との換算が必要となってくる。一般に被測定物は、マリネリピーカーと呼ばれる中心にシンチレータを入れるくぼみを備えた容器に詰めることになるが、これによってジオメトリを固定することで放射能の見積もりが可能になる。我々はGeant4によるモンテカルロ・シミュレーションを行い、このカウントレートと放射能の換算係数を求めていった。また、マリネリピーカーの形状を最適化するために、直径や体積を変化させていった時に効率がどのように変わっていくのかを調べた。

回路やシェーピングアルゴリズムの改良により、現在のところ分解能 11% (@662 keV) が得られている。これとバックグラウンド・レートの測定によって、検出限界として 30 Bq/L を達成することに成功した。この値は遮蔽などを行わないときの値であり、鉛による遮蔽などを行うことによって検出限界を引き下げることが可能である。

実際に理学部一号館付近で採取した土を測定した結果、 ^{134}Cs からの 605 keV と ^{137}Cs からの 662 keV は重なって区別ができないが、 ^{134}Cs の 796 keV は分離して見えているため、それぞれの量を個別に見積もることも可能となっている。

今後は性能向上や低価格化を目指した装置のさらなる改良を行なっていく予定である。また、食品の違いによる自己遮蔽の効果なども取り入れる一方で、一般家庭での使用に耐えるような使いやすいユーザーインターフェイスの開発が必要である。

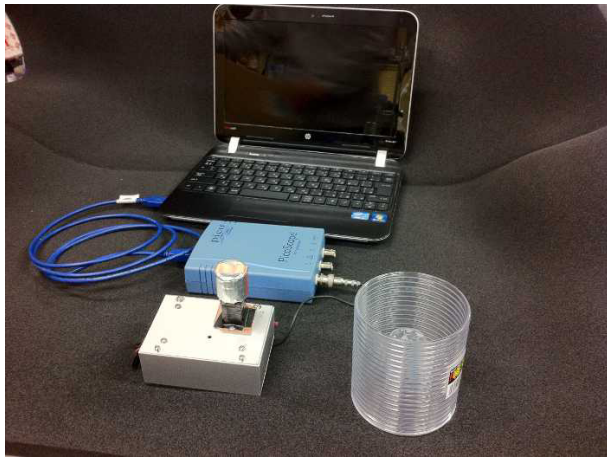


図 6.5: 食物放射能測定器

< 報文 >

(原著論文)

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

(会議抄録)

Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, T. Horie, A. Yamamoto, M. Minowa: Tokyo axion helioscope experiment, Proceedings of the XLVIth Rencontres de Moriond, 2011 Electroweak Interactions and Unified Theories, eds. E. Augé, J. Dumarchez, and J. Trần Thanh Vân, pp.395–400.

(学位論文)

- [2] 太田良介: Search for solar axions with mass below 1 eV using coherent conversion of axions into photons, 平成 24 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。
- [3] 堀江友樹: hidden sector photon 探索装置の改良、平成 24 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。
- [4] 加藤 陽: 原子炉由来反電子ニュートリノ検出器の開発、平成 24 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)

- [5] M. Minowa: Plastic Anti-Neutrino Detector Array (PANDA) at a nuclear power station in Japan, AAP2012(Applied Antineutrino Physics workshop 2011), Technische Universität Wien, Austria, 15 September 2011.
- [6] M. Minowa: Tokyo Axion Helioscope aka Sumico, ASK2011(2011 Axion Search in Korea), Seoul National University, Korea, 12 April 2011.

(国内会議)

一般講演

- [7] 井上慶純: Tokyo axion helioscope, RESCEU/DENET 「第 11 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、熊本県阿蘇郡三愛高高原ホテル、2011 年 7 月 25 日。
- [8] 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 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 16 日。
- [9] 堀江友樹: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索—検出器の改良、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 16 日。
- [10] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 浜岡原子力発電所における予備実験、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。
- [11] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] 浜岡原子力発電所における実験システムとバックグラウンド測定結果、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。
- [12] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [3] 検出器の拡張に向けた設計、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。

- [13] 蓑輪 眞: Short baseline reactor anomaly and sterile neutrinos、ビッグバンセンター研究交流会、東京大学 2011 年 11 月 17 日.
- [14] 加藤陽: 原子炉由来反電子ニュートリノ検出器の開発、第 18 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2012 年 2 月 21 日.
- [15] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 検出器の開発と測定実験の概要、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [16] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] PANDA36 による原子炉ニュートリノの測定結果、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [17] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [3] 原子炉近傍におけるバックグラウンドの評価、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [18] 鈴木惇也: 安価な食品放射能測定器の開発、日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [19] 太田良介: アクシオン望遠鏡を用いた実験について、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 27 日.
- [20] 堀江友樹: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索 - 検出器の改良量 2、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 27 日.

セミナー

- [21] 蓑輪 眞: 原子炉ニュートリノモニター、文部科学省 核不拡散・保障措置室、2011 年 6 月 14 日.
- [22] 蓑輪 眞: 宇宙の話、第 96 回 WDC 勉強会、国際協力銀行、2011 年 12 月 8 日.

7 飛翔体を用いた宇宙観測

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

7.1 衛星を用いたX線・ γ 線観測

7.1.1 科学衛星の運用と稼働状況 [109]

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6年目に入った。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が、放射線障害により太陽電池の出力が、徐々に劣化しつつある。我々は本年度も、衛星および硬X線検出器 (HXD) の運用を支援するとともに、搭載装置の較正を続行し [4, 15]、観測データの解析を進めた。

国際宇宙ステーション搭載 MAXI

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の曝露部に搭載された全天X線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、2009年夏より観測を続けており、理研、JAXA、東工大、青学大、日大、京大、宮崎大などにより運用されている。牧島は引き続き、理研・基幹研究所に所属する MAXI チームのチームリーダーを、非常勤で兼務している。2011年の秋で、MAXI は当初の約束である2年間の定常運用を完遂したが、ブラックホール [5]、中性子星 [14]、恒星のフレア、ガンマ線バーストなどで多くの科学的成果が得られていること、装置が引き続き稼働できることから、3年間 (2012–2014年度) の運用延長が JAXA により、正式に認められた。

東大物理学教室では、MAXI に直接に参加してはいないが、狭い視野を深く見る「すざく」と、全天を浅く見わたす MAXI の相補性を活かすべく、両者の連携を支援している。今年度は日本天文学会欧文誌より、「すざく + MAXI」の合併特集号が出版された。「すざく」の特集号としては4冊目に当たる。

7.1.2 質量降着するブラックホール [33]

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、静止質量エネルギーの $\sim 10\%$ が外界に放射される。降着物質は、 ~ 0.01 keV から ~ 100 MeV まで、広範囲なエネルギーをもつことができ、その放射は光子エネルギーにして5桁以上にもわたる。

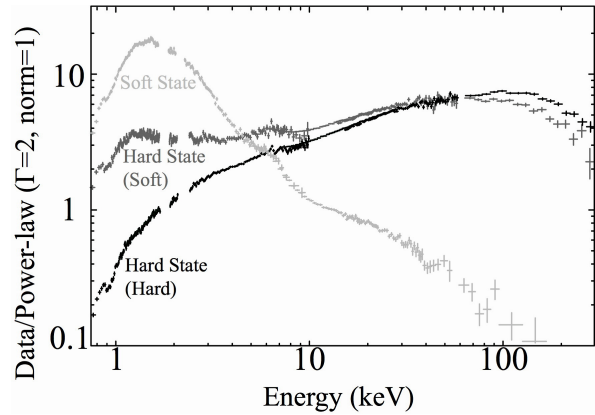


図 7.1: Broad-band spectra of the black-hole binary Cyg X-1 obtained on three occasions, with the *Suzaku* XIS (below 10 keV) and the HXD (above 10 keV). Light gray, dark gray, and black indicate the soft state, a brighter had state, and a fainter hard state, respectively.

恒星質量ブラックホール [5, 13, 18, 36, 51, 60]

「はくちょう座 X-1」 (Cyg X-1) は、1970年代半ばに小田稔らの観測にもとづき、ブラックホールとして認定された最初の天体で、質量降着する恒星質量 BH の代表格である。鳥井、山田らは今年度も、「すざく」で25回にわたり観測された Cyg X-1 の広帯域スペクトルや短時間変動 ($10^{-3} - 10$ Hz) を解析した。この種の天体は図 7.1 に示すように、質量降着率の変動に伴い、特徴的な2状態 (ハード状態とソフト状態) の間を遷移する。今年度は、広帯域を誇る「すざく」のデータを用い、この両状態の詳しい比較を進めた。

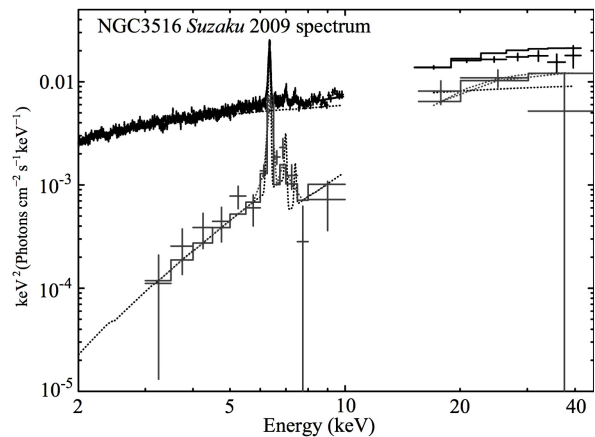


図 7.2: $\nu F\nu$ spectra of the Seyfert galaxy NGC 3516, obtained with *Suzaku*. The higher points indicate the time averaged data, while the lower points show the invariant component derived with a new C3PO method. The superposed dotted line indicates a fit by a standard cold reflection model with ~ 1 solar abundances.

巨大ブラックホールと活動銀河核 [6, 11, 39, 43, 62, 86]

銀河の中心にある巨大BHにガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。AGNは恒星質量BHと類似するものの、BH質量が大きいと、星間吸収の強い真空紫外領域に円盤放射が来るため、複雑なスペクトル成分を切り分けることが難しく、さまざまな学説が林立し、手詰まり状態にあった。この事態を打開すべく野田らは、「すざく」で得た広帯域のスペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する方法を開発してきた。その結果、セイファート銀河 MCG-6-30-15 ではスペクトルの 20–40 keV 付近に、また吸収の少ないセイファート銀河 Mkn 509 では ~ 2 keV 以下に、パワーロー型の連続成分とは独立した、別の変動成分があることを突き止めた。

野田らはこの手法を一般化し、あるエネルギーバンドのカウント数と、別のバンドのカウント数との相関を調べ、ゼロ点からのオフセットを測るという手法を開発し、C3PO (Count Count Correlation with Positive Offset) と名付けた。その結果、2–3 keV のカウント数を基準にとると図 7.2 の事例のように、変動しない成分のスペクトルが得られた。これはパワーロー型の 1 次放射が、AGN から > 0.1 pc の距離にある冷たい物質で反射された信号としてみごとに説明でき、強い鉄の蛍光輝線も見える。時間平均したスペクトルは、熱的コンプトン過程を表わすパワーロー成分と、この反射成分の和で、きれいに説明できた。この技法の登場は、AGN の研究に大きなブレークスルーをもたらすと考えられ、*ASTRO-H* 衛星 (§7.1.5) での大きな飛躍が期待される。

7.1.3 中性子星とその磁場 [34, 26]

磁場の弱い中性子星 [3, 2, 21, 40, 44, 59]

中性子星 (NS) のあるものは磁場が $< 10^9$ と弱く、それらが小質量の恒星と連星系をなしたものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。降着流の振舞いはBHの場合に似るが、NSの「硬い表面」が存在することが、BHとの大きな違いである。

桜井らは昨年(2015年)に続き、トランジェント LMXB である Aquila X-1 の「すざく」データを解析した結果、中性子星表面からの黒体放射の半径が、光度 (\approx 質量降着率) とともに図 7.3 のように変化することを、世界で初めて明らかにした。光度が高いとき (ソフト状態) では、光学的に厚く幾何学的に薄い「標準降着円盤」が接する NS の赤道面付近から、黒体放射が放射される。光度が下がると (ハード状態)、円盤は光学的に薄く幾何学的に厚い高温コロナ流へと遷移し、NS 表面にほぼ球対称に降着するが、さらに光度が下がると放射領域は小さくなる。これは弱い磁気圏が頭をもたげ、降着流が南北の磁極に絞られる結果と解釈され、X線の速いパルス検出が期待される。成功すれば中性子星の半径と質量が制限でき、原子核の状態方程式に貴重な情報となるため、「すざく」から *ASTRO-H* (§7.1.5) への絶好テーマである。

SFXT 天体と超長周期パルサー [22, 41, 42]

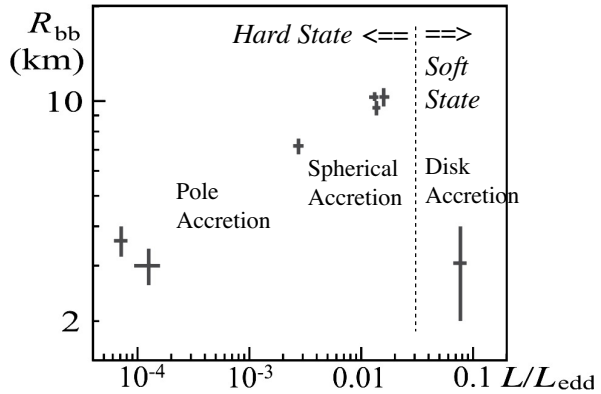


図 7.3: *Suzaku* measurements of the blackbody radius (assuming a spherical region) on the neutron star in Aql X-1. Inferred accretion geometry is also indicated.

近年、SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる硬X線天体が注目を集めている。これらは超巨星を主星にもつ強磁場 NS 連星で、通常そのX線光度は低いが、数十分から数時間で強度が 2–3 桁も増加するなど激しい変動を示す。変動の生成機構として、主星からの星風の濃い部分に NS が突入した際にフレアが生じるとする「非一様星風」説と、降着物質が強い磁場のアルヴェーン面に蓄えられ、間欠的に NS へと落下する「磁氣的ししおどし」説がある。笹野らは昨年度、「すざく」で観測された SFXT である IGR 16195–4945 の公開データを解析し、後者を強化する結果を導いた。

SFXT のあるものは、数百秒から数千秒と、ひじょうに長いパルス周期を示し、NS が超強磁場をもつことを示唆する。そこで笹野らは、SFXT の類似天体として、 $\sim 1 \times 10^4$ sec という長い自転周期をもつ X 線パルサー 4U 0114+65 を「すざく」で観測し、図 7.4 に示す高品質データを得た。遅い自転に伴い、鉄輝線、吸収などがどう変化するか調べることで、降着物質が NS から $\sim 10^{10}$ cm の Alfvén 面に蓄えられていることを示し、結果として、NS の磁場が $\sim 10^{13}$ G を超すことを証明したい。これも *ASTRO-H* (§7.1.5) の重要テーマとなる。

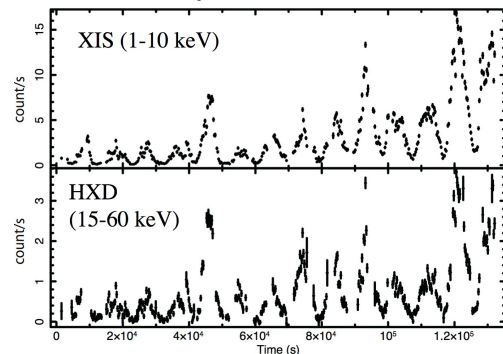


図 7.4: Light curves of the ultra-long-period pulsar 4U 0114+65, obtained with the *Suzaku* XIS (top) and the HXD (bottom). The 10^4 sec pulsations are visible.

マグネター天体 [7, 8, 12, 16, 17, 37, 58, 97, 98]

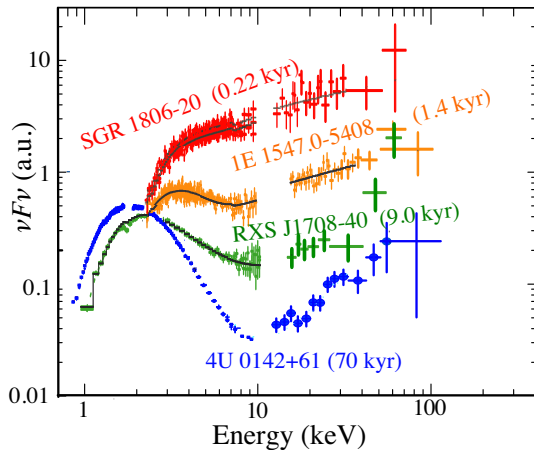


図 7.5: Wide-band νF_ν spectra of representative magnetars, observed with *Suzaku* and normalized at 2 keV. The spectral properties are seen to depend strongly on the characteristic age which is indicated in the parentheses.

銀河系やマゼラン雲にある 20 個ほどの X 線源は、回転駆動でも降着駆動でもなく、 10^{14-15} G の超強磁場をエネルギー源として X 線を放射する特殊な NS、「マグネター」と考えられている。我々はこれまで「すざく」により、図 7.5 のように、マグネターの広帯域スペクトルを明らかにしてきた。どれも硬軟 2 成分から成る特徴的なスペクトルを示し、老齢な天体ほど硬成分の強度が下がるが、その傾きは硬くなることなど、特異な性質が見られる。

中野、平賀らは、マグネターに付随する超新星残骸 (SNR) CTB109 の「すざく」データを解析した結果、その年齢 (1~2 万年以下) は、中心にあるマグネター 1E2259+586 の特性年齢 (23 万年) より大幅に若いこと、よってマグネターの年齢はこれまで、系統的に過大評価されていた可能性に到達した。そこでマグネターの磁場が減衰する効果を含めて特性年齢を定式化し直したところ、この見かけ上の年齢齟齬が説明できることが判明した。これは、マグネターが磁気エネルギーを放射して輝く、真の「磁気駆動 NS」であることを意味するとともに、マグネターの活動期間は実はかなり短いこと、よって発見数から逆算したマグネターの誕生率はきわめて高く、重力崩壊型の超新星爆発では、 $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ NS よりマグネターの方が多く誕生する可能性までも示唆し、中性子星の研究に大きなインパクトが予想される。

この斬新な可能性を検証するには、磁気活動を終えつつあるマグネターの末裔が、銀河面に数多く存在することを示せばよい。そのため我々は、「あすか」銀河面サーベイで検出された暗い未同定 X 線源のうち、温度 0.3–0.5 keV の黒体放射に似たスペクトルを示すもの 4 例を選び、「すざく」で観測を始めた。黒体放射的なスペクトルをより精度よく定量化し、10 秒程度のパルスを探査することが目的である。さらに *ASTRO-H* (§7.1.5) の硬 X 線感度を活かし、微弱な硬 X 線成分を検出できれば、我々の仮説が実証

できる。これは「あすか」、「すざく」、*ASTRO-H* という三世代の X 線衛星を用いた、大事業といえる。

7.1.4 銀河系および銀河団の研究

銀河面と銀河中心の X 線放射の研究 [61, 96]

我々の銀河面には、広がった「銀河面 X 線放射」(GRXE) が分布し、そのスペクトルには強い Fe、S、Si などの電離輝線が見られる。熱的プラズマ放射として解釈できるが、その発生源は 1980 年代から大きな謎で、電波の弱い SNR の集まり、暗い点源の集合、真にディフューズな高温プラズマの分布などの解釈が提案され、論争が続いていた。昨年度、湯浅らは「すざく」で観測した GRXE のスペクトルが、質量降着する白色矮星連星と、より柔らかい熱的放射 (おそらく星のコロナやフレア) の和で再現できることを示した。これはロシアグループが X 線画像や点源の数から導いた結果と整合し、GRXE がおもに暗い点源の集合であることが、確定的しつつある。

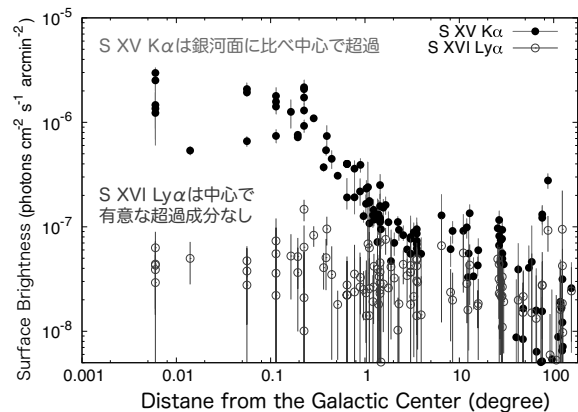


図 7.6: Galactic longitude distribution of He-like and H-like Sulphur K-line intensities in the Galactic diffuse emission. The excess brightness associated with the Galactic center is clearly visible in the He-like line, but is absent in the H-like line.

こうして GRXE の正体はほぼ明らかになりつつあるが、銀河中心から $\sim 1^\circ$ 以内には、GRXE と酷似した性質をもち、かつ表面輝度が 1 桁以上も高い、広がった熱的放射が存在する。この現象は「すざく」を用い、京大などを中心に活発に研究されており、GRXE とは異なる起源 (とくに真にディフューズな高温プラズマ) をもつ可能性が高い。内山らは「すざく」による大規模観測データを用い、銀河中心から銀河面に至る広い領域で、いろいろな重元素輝線の強度分布を調べたところ、図 7.6 に示す新しい成果を得た。すなわち He-like な S-K α 輝線は、銀河中心で強い表面輝度の増加を示し、これは電離鉄輝線 (H-like および He-line) で知られていた結果と一致するが、H-like な S-K α 輝線では、そうした表面輝度の増大が見られない。この謎は *ASTRO-H* (§7.1.5) で解かれると期待している。

銀河団プラズマの 2 温度構造 [1, 24, 38, 45, 66]

我々は長年の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。このテーマでは昨年度より、上海交通大学の顧力意 (Gu Liyi) と協力して来たが、今年度は彼が学振外国人特別研究員としてして来日した結果、大幅に研究を進めることができた。Abell 1795 銀河団の中心 100 kpc 以内では、高温 (~ 5.3 keV) と低温 (~ 2.1 keV) のプラズマが共存していることが立証でき、さらに低温成分の多い領域で、重元素アバダンスが有意に高くなっていること、すなわち中心銀河からの元素供給が働いていることも検証できた。これらは我々が過去に得た、ケンタウルス座銀河団などの結果とよく一致し、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。

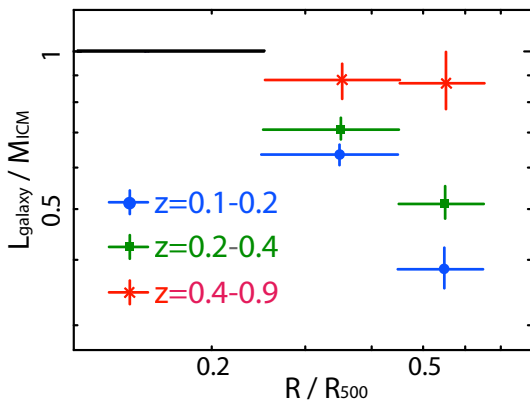


図 7.7: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Results on 34 clusters have been averaged into three subgroups with different redshifts. In nearer (hence older) clusters, the member galaxies are more strongly concentrated to the central region of their plasma spheres.

銀河団の宇宙論的進化の新しい徴候 [48, 65, 84, 85, 110, 115, 116, 117, 118]

我々の磁気流体的描像によれば、銀河団のメンバー銀河が高温プラズマ中を運動するさい、プラズマは加熱され、銀河は抵抗を受け中心に落下するであろう。その証拠を探るため引き続き、顧力意 (Gu Liyi) を中心に、奈良高専の稲田直久らと協力し、近傍 ($z \sim 0.1$) から遠方 ($z \sim 0.9$) までの 34 個の銀河団に対して、可視光でのメンバー銀河の空間分布を、X線で求めた高温プラズマの空間分布と比較する作業を続けた。その結果、図 7.7 に示すように、遠方の (若い) 銀河団ではプラズマの周辺部まで銀河が分布するのに対し、近い (老齢の) 系では、プラズマの中心部に銀河が集中することを、世界で初めて明らかにすることに成功した。この成果は今後、多大なインパクトをもつと自負する。

この解析では、分光情報を伴わない可視光の多色測光画像から、各銀河団のメンバー銀河を選んでいる。我々は複数の異なる手法を比較することにより、メンバー選定における系統的誤差を取り除くよう注意し

た。さらに様々な観測上のバイアスも慎重に考慮した結果、この進化は有意であると確信するに至った。

この結果は、宇宙年齢かけて銀河が中心に落下してきたことを強く示唆するが、その原因としては、我々の提唱する磁気流体的な効果が唯一の解釈ではなく、重力相互作用のみに基づく dynamical friction などがありうる。また同様な効果を生むものとして、進化に伴う銀河団外縁部へのプラズマ集積などがある。現在、これら競合過程の見積りを進めている。

銀河団の質量分布 [64, 95]

全重力質量の空間分布は、銀河団の形成過程、ひいては暗黒物質の性質を反映する、重要なパラメータであり、一般に Navarro-Frenk-White 型の、カスプをもつ半径分布で表現できるとされている。しかし多くの銀河団でこの描像は必ずしも観測事実とは一致せず、全重力質量が中心銀河と全銀河団という、階層構造をもつ特徴が強い。昨年、Gu らが Abell 1795 銀河団でこのことを検証した [1] のに続き、今年度は西田らが、「すざく」で観測した Ophiuchus 銀河団のデータを解析したところ、図 7.8 に示すように、やはり全重力質量は、銀河団と銀河という明らかな階層構造をもつことが判明した。小さい方の構造は中心銀河に付随しており、星などのバリオンの寄与が大きいと思われる。

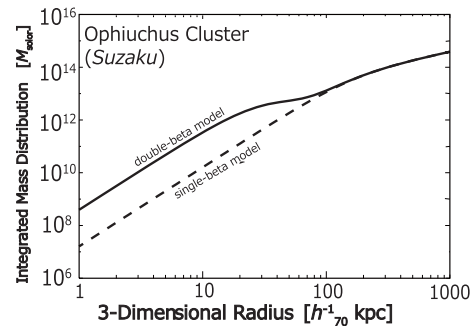


図 7.8: A spherically integrated profile of the total gravitating mass in the Ophiuchus cluster of galaxies. A solution based on a hierarchical potential model is indicated by a solid curve, of which the contribution of the larger component is shown by the dashed line.

銀河団の周辺部

銀河団の中心とともに、それらの周辺部も、宇宙論の実験室として重要である。中澤らは今年度、宇宙研の川原田、首都大の赤松、東京理科大の佐藤や松下らと協力し、「すざく」を用いた銀河団周辺部の研究を進めた [95]。その結果、銀河団の周辺部にかけてプラズマ温度が低下するという現象が、広く見られることを確認しつつある。

Sengul らは中心銀河をもたない Aell 2147 銀河団の XMM-Newton のデータを解析した結果、ここでも同様に外縁部での温度の低下を確認することができた [31, 63]。したがって外縁部でのプラズマの振る舞いは、中心 cD 銀河の有無とは独立に見られる、銀河団の広範な特徴となりつつある。

7.1.5 ASTRO-H衛星計画

ASTRO-H衛星とその搭載装置

ASTRO-H衛星は、米国NASAおよび欧州ESAなどとの国際協力を含め、オールジャパンの体制で開発が進められている、次世代の宇宙X線衛星で、「すざく」の後継機となる。機上には、1–10 keV域でX線エネルギーを数eVの精度で測定するX線マイクロローメータ、5–80 keVで集光できる2台のスーパーミラー硬X線望遠鏡(HXT)、その焦点面に置かれる硬X線イメージャー(HXI)、1台の軟X線望遠鏡とその焦点面に置かれる広視野のX線CCD、60–600 keVで働く軟ガンマ線検出器(SGD)が搭載される。これらの協力により、ASTRO-Hは広帯域、高感度、高精度での分光観測を得意とし、高エネルギー宇宙物理学に大きな貢献を行なう。

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

我々は、JAXAほか国内の大学研究機関、スタンフォード大、フランスCNESなどと共同し、中澤および内山を中心に研究室の総力を挙げて、HXIとSGDの開発に参加している。2011年度は、試作品の製作と評価を進めつつ、詳細設計審査会(CDR)をクリアし、衛星搭載品の最終設計を固めた。

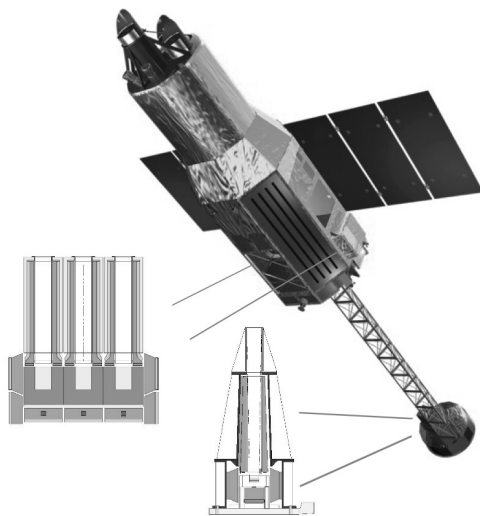


図 7.9: Drawing of the ASTRO-H satellite, to be launched in 2014. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

HXI と SGD [52, 57, 74, 75, 89, 100, 104]

HXI は、5–70 keV の帯域を 9 分角の視野と 1.7 分角の角分解能で撮像しつつ、エネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。その検出器部は図 7.9 に示すように、BGO 結晶シンチレータを用いたアク

ティブシールドにより低バックグラウンド環境を実現し、その中に 4 段の両面シリコンストリップ検出器と 1 段の両面 CdTe ストリップ検出器を重ねたイメージャーを搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来の装置より 2 桁よい感度を実現する。

SGD は図 7.9 のように、3 × 2 台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む 25 × 2 個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラは、半導体パッド検出器(シリコンおよび CdTe)を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するもので、60–600 keV の帯域で動作し、数度の角度分解能を持つ。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去し、「すざく」HXD より感度を一桁上げる。

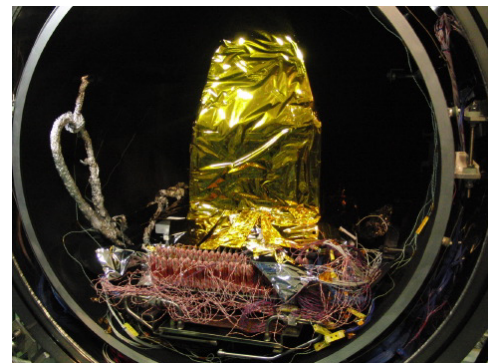


図 7.10: Tests at ISAS/JAXA. (top) A vibration test for a BGO block used in the SGD, performed on 2011 September 9. (bottom) A thermal dummy of the HXI detector, about to be tested inside a vacuum chamber.

HXI および SGD の機構開発 [76, 107]

我々は、HXI および SGD 検出器部の、機構開発で中心的な役割を担っている。中澤は昨年(2010年)に続き、炭素繊維強化プラスチックを用いた、HXI および SGD のハウジング構造の設計を進め、HXI ハウジングの試作品がスーパーレジン工業(株)により製造された。内山、笹野、中野らを中心に、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの構造開発を進め、図 7.10(上)のように、数回の振動試験を行ない、設計の健全性を確認した。こうして確立した BGO シールド部の設計と製造方法は、搭載品の製造メーカーである三菱重工に技術移転した。

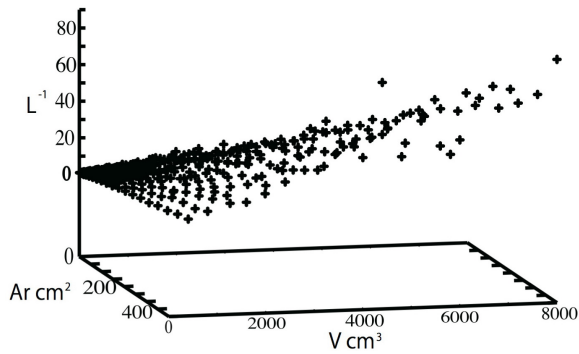


図 7.11: Behavior of light output L from large BGO crystals as read out using a $1 \times 1 \text{ cm}^2$ APD, derived with numerical simulations (crosses) and experiment (not shown). V is the scintillator volume, while A_r is the BGO surface area where the APD is attached.

HXI および SGD の熱設計 [25, 56, 101, 105, 79]

HXI と SGD は、主検出部に Si や CdTe、アクティブシールド部には APD など、多くの半導体素子を用いるため、検出器の全体を -20°C 程度まで放射冷却する必要がある。ところが両装置ともかなりの内部発熱をもち、加えてどちらも衛星構体の外に搭載せざるをえず、そのため直射日光や地球赤外線を浴び、日陰では冷たい宇宙空間を見ることになる。対流のない宇宙空間で、所期の低温を達成しつつ、軌道周回や姿勢変更に伴う温度変動を小さく抑えるには、両装置ともに慎重な熱設計が求められる。

我々は野田らを中心としてこの困難な課題に取り組む、素材を機械的と熱的観点から最適に選ぶこと、グラフィートシートや銅の柱を熱伝導素子として用いること、放射遮蔽材 (MLI) を高性能化することなど、数々の改良を行なった。数値計算と実験室測定を併用することで、ほぼ満足のゆく熱設計に到達しつつある。しかし数値計算には、接触伝熱などの不要素がつきまとう。そこで実機に近い熱的ダミーを製作し、三菱重工とともに図 7.10(下) のように真空チャンバーを用いた実証試験を繰り返し、搭載品の最終設計を固めつつある。

アクティブシールド部の開発

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

BGO は屈折率が 2.15 と極めて高く、蛍光光子が内部に閉じ込められやすく、しかも用いる APD が 1 cm 角と小さいため、シンチレーション光を効率よく読み出すことが重要である。昨年の西岡に続き、笹野らは、実験室用に試作した結晶や、HXI や SGD の EM (Engineering Model) 品の結晶を実測し、さらに GEANT4 によるモンテカルロシミュレーションを組

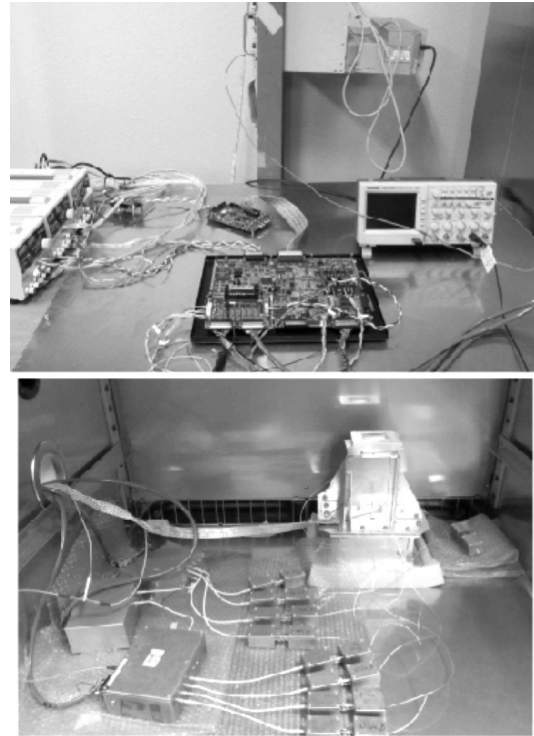


図 7.12: Tests of the HXI/SGD active shield system. (top) The read-out electronics. (bottom) A breadboard model detector with 9 APD readouts, together with charge sensitive amplifiers, all placed inside a thermostatic chamber.

み合わせて、この問題に取り組んで来た [29, 50, 108]。その結果、図 7.11 のように、結晶から読み出す光量 L (1 cm 立方の結晶の値で規格化) の逆数は、結晶の体積 V と、APD を取り付ける結晶面の面積 A_r との一次関数になるという、美しいスケーリング則を発見し、その物理的な解釈にも成功した。これにより BGO アクティブシールド搭載品の性能を、良い精度で推定できるようになった。笹野、内山、西田らはまた、ロシアから到着した多数の結晶の受け入れ試験として、外観、寸法、重量の測定や、ガンマ線源を照射した時の発光量の測定を続けている。

鳥井、笹野らは、広島大、早大などと協力し、アクティブシールドの信号処理部 (APMU) の開発と試験を行ってきた [77, 93, 106, 99]。そのため図 7.12 に示すように、APD 読み出しの BGO シンチレータ、プリアンプ、波形整形器、ADC、デジタル信号処理システムなどを組み合わせ、アクティブシールド全体のブレッドボードモデルを作成した。これを用い、陽子や鉄イオンなど荷電高粒子による巨大信号や、仕様素材の放射化に伴うハイレート信号に耐えるよう、アナログ回路設計やデジタル信号処理の最適化を行っている。今後は、このアクティブシールドと主検出部 (イメージャー) を組み合わせた試験を行って、バックグラウンドの除去性能を検証し、最終的に搭載品の仕様決定を行う予定である。

HXI 主検出部 (イメージャー) の開発

中野らは JAXA と協力し、HXI 主検出部 (イメージャー) に用いる、両面 Si ストリップ検出器 (DSSD) の開発を行ってきた [30, 53, 92]。DSSD は N 側にも P 側にも、250 μm 間隔で設けられた幅 150 μm のストリップ列 128 本をもつ。隣接ストリップ間で X 線が検出されたときの挙動を調べるため、試作品に SPring-8 にて 30 keV の細いビームを照射しスキャンしたところ、図 7.13 の結果が得られた。すなわち、ストリップ間の約 40 μm の領域では、電荷が両側に分割する現象が見られたが、両方のパルス高さを加算することで、問題なくイベントが再生できることがわかった。この電荷分割領域の幅は、1 次電子の飛程を反映して、X 線エネルギーと正相関することも明らかになった。

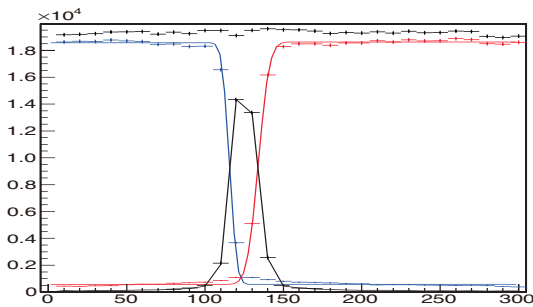


図 7.13: A narrow beam scan across a DSSD chip, performed at SPring-8 using an energy of 30 keV. Count rates of a particular strip (solid), and those with the adjacent one (gray), are plotted as a function of cross-strip position (in microns). The dotted data points are split events over the two strips. Summing the pulse heights of the two channels gives the count rates shown at the figure top.

イメージャー部の 1 つの DSSD から出る多チャンネル出力は、イメージャー部に組み込まれた ASIC で読み出され、A/D 変換される。この「HXI フロントエンド部」のデータは、HXI-DPU と呼ばれるファームウェア回路で高速に収集処理され、その出力は、機上の CPU 処理部 (HXI-DE) に転送される。SGD もほぼ同様である。櫻井らは JAXA とともに HXI-DPU の開発に参加し、その性能試験において必要となるシミュレータを開発した [28, 102]。これはフロントエンド部のデジタル出力を模擬する機能をもち、SpaceWire プロトコルに準拠する。

SXI 装置の開発

SXI (Soft X-ray Imager) は軟 X 線望遠鏡 (SXT) の焦点面検出器として搭載される X 線 CCD カメラで、広い視野 (38 分四角) で 0.4 – 12.0 keV の撮像分光を実現する。SXI には大阪大学、国立天文台などが中心となって、浜松ホトニクス社と共同開発してきた、空乏層の厚い大型 CCD 素子が搭載される。2011 年度前半には、EM (エンジニアリングモデル) となる CCD 素子の動作確認を行い、5.9 keV でのエネルギー分解能 156 eV (FWHM) を達成し、FM (フライトモデル) 候補となる素子の製造に着手した。2011 年度はまた上記の EM 素子を用いて EM 検出器を組上げ、熱設計の整合性や、機械環境耐性など、

様々な検証試験を実施した。アナログエレクトロニクスについては、BBM (ブレッドボードモデル) を製作し、安定して低雑音で動作することを実証した。以上の成果を踏まえ 2011 年 12 月に、FM 製造に進むことの妥当性を審査する審査会 (CDR: Critical Design Review) を実施し、無事に終了することができた。2012 年度に FM 製作へと着手する予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Gu, L. Xu, H., Gu, J. Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z., Makishima, K.: “Two-phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies A1795: A Joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* View”, *Astrophys. J.* **749**, 186 (2012)
- [2] Takahashi, H., Sakurai, S. & Makishima, Kazuo “Rossi X-ray Timing Explorer Observations of the Low-mass X-ray Binary 4U 1608-522 in the Upper-banana State”, *Astrophys. J.* **738**, 62 (2011)
- [3] Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: “Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [4] Yamada, S., Uchiyama, H., Dotani, T., Tsujimoto, M., Katsuda, S., Makishima, K., Takahashi, H., Noda, H., Torii, S., Sakurai, S., Enoto, T. et al.: “Data-oriented Diagnostics of Pileup Effects on the *Suzaku* XIS”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [5] Nakahira, S., Koyama, S., Ueda, Y., Yamaoka, K., Sugizaki, M., Mihara, T., Matsuoka, M., Yoshida, A., Makishima, K. et al.: “A Spectral Study of the Black Hole Candidate XTE J1752-223 in the High/Soft State with *MAXI*, *Suzaku*, and *Swift*”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, 13 (2012)
- [6] Noda, H., Makishima, K., Uehara, Y., Yamada, S., Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG-6-30-15”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **63**, 449-458 (2011)
- [7] Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. & Shibazaki, N.: “Soft and Hard X-Ray Emissions from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with *Suzaku*”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 387-396 (2011)
- [8] Esposito, P., Israel, G. L., Turolla, R., Mattana, F., Tiengo, A., Possenti, A., Zane, S., Rea, N., Burgay, M., Götz, D., Mereghetti, S., Stella, L., Wieringa, M. H., Sarkissian, J. M., Enoto, T., Romano, P., Sakamoto, T., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Nakazawa, K., Nishioka, H., & Francois-Martin, C.: “Long-term spectral and timing properties of the soft gamma-ray repeater SGR

- 1833-0832 and detection of extended X-ray emission around the radio pulsar PSR B1830-08”, *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* **416**, 205–215 (2011)
- [9] Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., Takita, M., Chen, D., Huang, J., Miyasaka, M., Kondo, I., Takahashi, E., Shimoda, S., Yamada, Y., Lu, H., Zhang, J. L., Yu, X. X., Tan, Y. H., Nie, S. M., Munakata, K., Enoto, T. & Makishima, K. “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, *Phys. Rev. D*, in press (2012)
- [10] Tsuchiya, H.; Enoto, T.; Yamada, S.; Yuasa, T.; Nakazawa, K.; Kitaguchi, T.; Kawaharada, M.; Kokubun, M.; Kato, H.; Okano, M.; Makishima, K.: “Long-duration γ ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms”, *J. Geophys. Res.* **116**, D09113 (2011)
- *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, すざく + MAXI 合併特集号 (2011)
- [11] Noda H., Makishima K., Yamada S., Torii S., Sakurai S., & Nakazawa, K.: “Suzaku Studies of Wide-Band Spectral Variability of the Bright Type I Seyfert Galaxy Markarian 509”, S925–S936
- [12] Nakagawa, Y., Makishima, K., & Enoto, T.: “The Suzaku Discovery of A Hard Power-Law Component in the Spectra of Short Bursts from SGR 0501+4516”, S13–S820
- [13] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Sakurai, S., Nakazawa, K., Noda, H., Done, C., Takahashi, H. & Gandhi, P.: “Spectral and Timing Studies of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku”, S771–S783
- [14] Yamamoto, T., Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., Yamaoka, K., Matsuoka, M., Morii, M., & Makishima, K.: “Discovery of a Cyclotron Resonance Feature in the X-ray Spectrum of GX 304–1 with RXTE and Suzaku during Outbursts Detected by MAXI in 2010”, S753–S757
- [15] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Watanabe, S., Takahashi, H., Noda, H., Nishioka, H., Hiragi, K., Hayashi, K., Nakajima, K., Tashiro, M., Sasano, M., Nishino, S., Torii, S., Sakurai, S., Takahashi, T., Mizuno, T., Enoto, T., Yuasa, T., Tanaka, T., Kouzu, T., Nakano, T., et al. “Improvements in Calibration of GSO Scintillators in the Suzaku Hard X-Ray Detector”, S645–S656
- (会議抄録)
- *Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe*, AIP Conference Proceedings, Volume 1427
- [16] Enoto, T., Nakagawa, Y.E., Nakano, T., Nishioka, H., Yasuda, T., Terada, T. Sakamoto, T., Makishima, K. and *Suzaku* Magnetar Members: “Recent Suzaku studies of the X-ray emission from magnetars”, 68–75
- [17] Nakano, T., K. Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: “Attempts toward understanding the formation of magnetars”, 126–128
- [18] Torii, S., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “The *Suzaku* view of Cyg X-1 over the two spectral states”, 129–131
- [19] Kouzu, T., Terada, Y., Tashiro, M. S., Yamada, S., Bamba, A., Yuasa, Mori, T., Fukazawa, Y., Enoto, T., Tanaka, T., Shibata, S. & Makishima, K.: “Hard X-ray properties of a variable standard candle, Crab, with the *Suzaku*/HXD”, 265–266
- [20] Yamamoto, T., Mihara, T., Suguzaki, M., Nakajima, M. Yamamoka, K., Matsuoka, M. & Makishima, K.: “*Suzaku* observations of X-ray binary pulsar GX 304-1 triggered by MAXI/GSC in 2010 August”, 302–303
- [21] Sakurai, S., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Broad-band *Suzaku* spectra of the LMXB Aql X-1 in Soft and Hard States”, 308–309
- [22] Sasano, M., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* studies of SFXT flare mechanisms”, 312–313
- [23] Yoshida, Y., Isobe, N., Mineshige, S., Kubota, A., Mizuno, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* observations of two ultraluminous X-ray sources in the nearby spiral galaxy IC 342”, 318–319
- [24] Gu, L., Xu, H. & Makishima, K.: “Two-phase ICM in the central region of the rich cluster of galaxies Abell 1795: A joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* view”, 334–335
- その他の収録
- [25] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原 田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 硬 X 線撮像検出器の熱設計」、第 12 回宇宙科学シンポジウム講演後刷集、P4-00C
- [26] Makishima, K.: “What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations?”, *Proc. The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (OMEG11), AIP, in press (refereed)
- (国内雑誌)
- [27] 牧島一夫: 「科学衛星による宇宙 X 線の観測技術」、光技術コンタクト誌 2012 年 2 月号 (日本オプトメカトロニクス協会)
- (学位論文)
- [28] 櫻井壮希 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 硬 X 線撮像検出器デジタルデータ処理系の開発と検証」、修士学位論文
- [29] 笹野 理 「ASTRO-H 衛星に向けた BGO シンチレータの APD 読み出しとその集光効率」、修士学位論文

- [30] 中野俊男、「X線衛星 ASTRO-H 搭載用 Si 両面ストリップ検出器の評価と検証」、修士学位論文
- [31] Sengul Ozden, “X-ray Properties of the Non-Cool-Core Cluster Abell 2147”, 修士学位論文
- [32] あべ松 高志 (横浜国立大学大学院: 東京大学受託学生): 「低エネルギー X 線の検出向上を目指した裏面照射型 CCD の研究用」修士学位論文
- < 学術講演 >
- (国際会議招待講演)
- [33] Makishima, K.: ”Observational Studies of High Energy Astrophysical Objects”, Rashid Snyaeв 教授の京都賞受賞記念ワークショップ (京都国際会館、2011 年 11 月 11 日)
- [34] Makishima, K.: “What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations?”, *The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11)* (理化学研究所、2011 年 11 月 16 日)
- [35] Makishima, K.: ”Kamae-sensei’s Gradual “Conversion” to Astrophysics”, Prof. Kamae’s retirement symposium (Stanford, 2011 年 12 月 3 日)
- (国際会議一般講演/ポスター)
- *Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond*, Stanford University, July 20–22 (2011)
- [36] Torii, S., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “The Suzaku View of Cyg X-1 over the Two Spectral States”, oral
- [37] Nakano, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: ”Attempts toward Understanding the Formation of Magnetars”, oral
- [38] Gu, L., Xu, H., Gu, J., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z. & Makishima, K.: “A Joint Chandra, XMM-Newton and Suzaku View of Two-Phase ICM of Abell 1795”, poster
- [39] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “Suzaku Studies of the Origin of Soft X-ray Excess in Markarian 509”, poster
- [40] Sakurai, S., Yamada, Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Broad-band *Suzaku* spectra of the LMXB Aql X-1 in the soft and hard states”, poster
- [41] Sasano, M., Nakajima, K., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* studies of SFXTs”, poster
- *The X-ray Universe 2011*, Berlin, Germany, June 27-30 (2011)
- [42] Sasano, M., Nakajima, K., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of SFXTs”, oral
- [43] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a New Variable Component in MCG-6-30-15”, poster
- [44] Sakurai, S., Yamada, Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Spectral analysis of LMXB Aql X-1 in soft and hard states with *Suzaku*”, poster
- その他の国際会議
- [45] Gu, L., Xu, H., Gu, J., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z. & Makishima, K.: “Two-Phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies Abell 1795: A Joint Chandra, XMM-Newton, and Suzaku View”, *Suzaku/Astro-H Cluster workshop* (東京理科大学、2011 年 6 月 11 日).
- [46] Hayashida, K., Tsunemi, H., Dotani, T., Nakajima, H., Anabuki, N., Ozaki, M., Natsukari, C., Hiraga, S. J., Tomida, H., Kohmura, T., Murakami, H., Mori, K., Yamauchi, M., Hatsukade, I., Bamba, A., Uchida, H., Nobukawa, M., Ueda, S., Fujinaga, T., Matsuta, K., Ohnishi, T., & Doty, J.: “Development the soft x-ray imager (SXI) for *Astro-H*”, SPIE Optics+Photonics 2011: (2011 Aug 21–25; San Diego, USA).
- [47] Fujinaga, T., Anabuki, N., Aoyama, S., Kawano, H., Ikeda, S., Iwai, M., Ozaki, M., Dotani, T., Natsukari, C., Matsuta, K., Shimizu, K., Nakajima, H., Hayashida, K., Tsunemi, H., Ueda, S., Komatsu, S., Murayoshi, T., Mori, K., Watanabe, T., Uchida, H., Ohnishi, T., & Hiraga, S. J., “Development of the data acquisition system for the x-ray CCD camera (SXI) onboard *ASTRO-H*”, *ibid.*
- [48] Gu, L., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M. & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”, Cluster Workshop (箱根、2011 年 12 月 18-19 日).
- (国内会議/一般講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2011 年 9 月 16~19 日、弘前大学)
- [49] 玉川徹、山田真也、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子、早藤麻美、Jean Swank C、Keith Jahoda C、Keith Gendreau C、岩切渉、幸村孝由、金子健太、田原譲、高橋忠幸、牧島一夫ほか GEMS/XACT チーム: 「X 線偏光観測衛星 GEMS と偏光観測ロケット実験 XACT の現状 II」、17aSX-1
- [50] 笹野理、西岡博之、奥山翔、中澤知洋、牧島一夫、奥村暁、湯浅孝行、山田真也、片岡淳、深沢泰司ほか: 「Avalanche Photo Diode を用いた大型 BGO 結晶での集光効率の測定」、17pSK-04
- [51] 山田真也、牧島一夫、鳥井俊輔: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星 Cygnus X-1 の最新成果」、18aSX-6
- [52] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司 B、内山秀樹、内山泰伸、榎戸輝揚、太田方之、大野雅功、小高裕和、片岡淳、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋弘充、高橋忠幸、田代信、田中孝明、寺田幸功、中澤知洋ほか ASTRO-H SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発の現状」、18aSX-7

- [53] 道津匡平、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、西野翔、林克洋、朴寅春、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、斉藤新也、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、太田方之、福山太郎、中澤知洋ほか HXI/SGD チーム:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器用 Si 検出器の開発」、18aSX-8
- [54] 林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久、鶴剛、信川正順、内田裕之、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、幸村孝由、村上弘志、平賀純子、森浩二、廿日出勇、山内誠、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム:「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 II」(18pSX-4)
- [55] 幸村孝由、河合耕平、池田翔馬、金子健太、渡辺辰雄、北本俊二、村上弘志、八木橋伸佳、水野瑛己、轟章太郎、坂田和也、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、上田周太郎、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、富田洋、藤永貴久、森浩二、平賀純子、馬場彩、他 ASTRO-H SXI チーム:「ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の可視光遮断用フィルムの開発」(18pSX-6)
- [56] 野田博文、牧島一夫、中澤知洋、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、高橋忠幸、国分紀秀、渡辺伸、小川博之、岩田直子、深沢泰司ほか SGD チーム:「X 線衛星 ASTRO-H 搭載 軟 γ 線検出器の熱設計」、18pSX-9
- [57] 国分紀秀、川原田円、佐藤悟朗、渡辺伸、大野雅功、田中康之、太田方之、高橋忠幸、中澤知洋、内山秀樹、牧島一夫ほか HXI/SGD チーム:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、18pSX-11
- 日本天文学会・秋季年会 (2011 年 9 月 22 日~24 日、鹿児島大学)
- [58] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹、榎戸輝揚:「マグネター特性年齢の過大評価と磁場の減衰」、J18a
- [59] 櫻井 壮希、鳥井 俊輔、中澤 知洋、牧島 一夫、山田 真也:「『すざく』による Aql X-1 のソフト/ハード状態における降着流の幾何」、J48a
- [60] 鳥井 俊輔、牧島 一夫、山田 真也、櫻井 壮希、中澤 知洋、野田 博文:「『すざく』を用いたハード/ソフト状態における Cyg X-1 の系統解析」、J60a、
- [61] 内山秀樹、牧島一夫:「『すざく』による天の川銀河拡散 X 線放射の高統計スペクトルの研究」、Q14b、
- [62] 野田 博文、牧島 一夫、山田 真也、中澤 知洋:「『すざく』で迫る I 型セイファート銀河 Markarian 509 の軟 X 線超過の起源」、S46a
- [63] Sengul, O., Gu, L. & Makishima, K.: “Thermal Conditions at the Central Regions of non-cD Clusters (3)”, T03a
- [64] 西田 瑛量、牧島 一夫、中澤 知洋、内山 秀樹、Gu liyi、古澤 彰浩:「『すざく』を用いたへびつかい座銀河団の重力ポテンシャル形状の解析」、T10a
- [65] Gu, L., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Investigation of Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters”, T11a
- [66] Gu Liyi & Xu Haiguang: “A Chandra Study of Temperature Substructures in Intermediate-redshift Galaxy Clusters”, T12b
- [67] 常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、馬場彩、幸村孝由、村上弘志、平賀純子、森浩二、廿日出勇、山内誠 他 SXI チーム、「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状」(W29a)
- [68] 穴吹直久、小松聖児、林田清、中嶋大、上田周太郎、常深博、藤永貴久、夏苺権、尾崎正伸、堂谷忠靖、湯浅孝行、森浩二、平賀純子、村上弘志、他 SXI チーム、「ASTRO-H 搭載 SXI (Soft X-ray Imager) 用 EGSE の開発」(W31b)
- [69] 上田周太郎、中嶋大、林田清、穴吹直久、森秀樹、小松聖児、藤川真理、常深博、幸村孝由、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、藤永貴久、松田佳子、森浩二、平賀純子、他 SXI チーム、「ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ (SXI) 用素子エンジニアリングモデルの開発と性能評価」(W34b)
- [70] 池田翔馬、幸村孝由、河合耕平、渡辺辰雄、金子健太、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太郎、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田佳子、北本俊二、村上弘志、平賀純子、森浩二、他 SXI チーム、「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 CCD (SXI) 用可視光遮断膜の性能評価」(W35b)
- [71] 河合耕平、幸村孝由、池田翔馬、渡辺辰雄、金子健太、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太郎、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田佳子、北本俊二、村上弘志、平賀純子、森浩二、他 SXI チーム、「ASTRO-H 搭載 X 線 CCD(SXI) の可視光遮断膜の X 線透過率測定」(W36b)
- [72] 菅裕哲、中嶋大、森秀樹、小松聖児、藤川真里、上田周太郎、穴吹直久、林田清、常深博、鶴剛、平賀純子 他 SXI チーム、「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 SXI(Soft X-ray Imager) 用 X 線 CCD を用いた電荷注入による分光性能補償効果」(W38b)
- [73] あべ松高志、平賀純子、西村和真、常深博、中村正吾、高橋俊輔:「低エネルギー X 線側の検出効率向上を目指した裏面照射型 N チャネル CCD の開発」(W52b)
- [74] 中澤知洋、牧島一夫、内山秀樹、国分紀秀、渡辺伸、高橋忠幸、太田方之、小高裕和、川原田円、佐藤悟朗、武田伸一郎、湯浅孝行、田島宏康、深沢泰司ほか:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状~FM 製造へ向けて~」、W62a
- [75] 深沢泰司、田島宏康、渡辺伸、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、内山泰伸、榎戸輝揚、田中孝明、太田方之、小高裕和、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、湯浅孝行、武田伸一郎、森國城、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発現状」、W65a
- [76] 木村太輔、水野恒史、深沢泰司、吉田道利、植村誠、川端弘治、秋田谷洋、松本浩典、田島宏康、牧島一夫、中澤知洋、中島健太、鳥井俊輔、高橋忠幸ほか:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器用ファインコリメータの試作品性能評価」、W66s

- [77] 吉野将生、齋藤龍彦、中森健之、片岡淳、国分紀秀、渡辺伸、大野雅功、湯浅孝行、高橋忠幸、森國城、西岡博之、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H搭載BGOシールド用APDセンサ及びアナログシステムの開発」、W70a
- [78] 杉田聡司、山岡和貴、深沢泰司、大野雅功、高橋拓也、上原岳士、花畑義隆、田代信、寺田幸功、岩切渉、高原一紀、安田哲也、中川友進、高橋忠幸、国分紀秀、山内誠、大森法輔、秋山満、牧島一夫、中澤知洋ほか「すざく衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニター部(HXD-WAM)の現状 IIX」、W73a
- 第12回宇宙科学シンポジウム(2012年1月5-6日、宇宙科学研究所)
- [79] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 硬 X 線撮像検出器の熱設計」(ポスター P4-00C)
- [80] 上田周太郎、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、堂谷忠靖、尾崎正伸、富田洋、夏苺権、藤永貴久、松田桂子、鶴剛、内田裕之、信川正順、大西隆雄、幸村孝由、馬場彩、村上弘志、森浩二、廿日出勇、山内誠、平賀純子、他 ASTRO-H/SXI チーム「ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ (SXI) のシステム開発の現状」(ポスター P4-00D)
- [81] 池田翔馬、幸村孝由、河合耕平、金子健太、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太郎、菅裕哲、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子、富田洋、北本俊二、村上弘志、清水佑輔、吉田裕貴、梅津里香、小松飛斗、平賀純子、森浩二「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD(SXI) 用可視光遮断膜 (OBL) の性能評価」(ポスター P4-00E)
- [82] 金子健太、幸村孝由、河合耕平、池田翔馬、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太郎、菅裕哲、鶴剛、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子、富田洋、北本俊二、村上弘志、清水佑輔、吉田裕貴、梅津里香、小松飛斗、平賀純子、森浩二「ASTRO-H 搭載の X 線 CCD(SXI) の可視光遮断膜の軟 X 線透過率測定」(ポスター P4-00F)
- [83] 菅裕哲、森秀樹、上田周太郎、中嶋大、林田清、穴吹直久、常深博、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、鶴剛、森浩二、廿日出勇、山内誠、平賀純子、幸村孝由、村上弘志、他 ASTRO-H/SXI チーム「ASTRO-H 搭載 SXI 用 CCD 素子エンジニアリングモデルの開発と性能評価」(ポスター P4-00G)
- 日本天文学会・春季年会(2012年3月19日~22日、龍谷大学)
- [84] 牧島一夫、顧力意、稲田直久、中澤知洋、小波さおり、川原田 円、北口貴雄:「Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters I」、A05a
- [85] Gu, L., Makishima, K., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M. & Kitaguchi, T.: «Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters II», A06a
- [86] 野田 博文、牧島 一夫、中澤 知洋、山田 真也:「X 線天文衛星 ASTRO-H で確立する AGN セントラルエンジンの新描像」、B29a
- [87] 山田真也、牧島一夫、玉川 徹、寺島雄一、根来 均、鳥井俊介、野田博文、Poshak Gandhi:「ASTRO-H 衛星と X 線偏光衛星 GEMS で迫るブラックホールの激しい時間変動の起源」、B32a
- [88] 内山秀樹、牧島一夫:「『すざく』による天の川銀河拡散 X 線放射の空間依存性の研究」、R02a
- [89] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司、太田方之、小高裕和、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、武田伸一郎、森國城、湯浅孝行、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、内山泰伸、榎戸輝揚、田中孝明、Roger Blandford、Grzegorz Madejski、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫ほか ASTRO-H SGD チーム:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発現状」、W102a
- [90] あべ松高志、平賀純子、西村和真、常深博、中村正吾:「低エネルギー X 線側の感度向上を目指した裏面照射型 CCD の検出効率測定」
- [91] 林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、鶴剛、信川正順、内田裕之、幸村孝由、村上弘志、平賀純子、森浩二、廿日出勇、山内誠、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム、「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状」、W103a
- [92] 萩野浩一、中野俊男、小高裕和、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 HXI 用両面ストリップ検出器の応答の研究」、W117a
- [93] 吉野将生、齋藤龍彦、溝間青樹、中森健之、片岡淳、後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深澤泰司、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、森國城、笹野理、鳥居俊輔、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 BGO シールド統合試験に向けたアナログ信号処理部の検証」、W118a
- 日本物理学会・春季大会(2012年3月24~27日、関西学院大学)
- [94] 岩田憲、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、中澤知洋、国分紀秀、加藤博、岡野 治、牧島一夫:「2009 年および 2010 年における雷や雷雲からの放射線観測」、24pGF-13
- [95] 西田 瑛量、牧島 一夫、中澤 知洋、内山 秀樹、古澤 彰浩:「X 線衛星「すざく」によるへびつかい座銀河団の重力質量分布の推定」、25aGJ-8
- [96] 内山秀樹、牧島一夫:「『すざく』長時間観測アーカイブデータを用いた天の川銀河拡散 X 線放射の研究」、25aGJ-10
- [97] 牧島一夫、中野俊男、中澤知洋、内山秀樹、笹野理、榎戸輝揚:「磁気エネルギーの解放を考慮した超強磁場中性子星の年齢推定 (1)」、25aGJ-11
- [98] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹、笹野理、榎戸輝揚:「磁気エネルギーの解放を考慮した超強磁場中性子星の年齢推定 (2)」、25aGJ-12

- [99] 齋藤龍彦、吉野将生、溝間青樹、中森健之、片岡淳、後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、森國城、笹野理、鳥井俊輔、中澤知洋、牧島一夫、田島宏康ほか HXI/SGD チーム:「ASTRO-H 衛星搭載 BGO シールド統合試験に向けたアナログ信号処理部の検証」、26pGJ-1
- [100] 川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、渡辺伸、田中康之、太田方之、湯浅孝行、小高裕和、高橋忠幸、中澤知洋、内山秀樹、牧島一夫ほか HXI/SGD チーム 26pGJ-3
- [101] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原 田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康:「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載の硬 X 線撮像検出器の熱設計」、26pGJ-4
- [102] 櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫、小高裕和、湯浅孝行、佐藤 有、齋藤新也、渡辺 伸、国分紀秀、高橋忠幸、高橋弘充、田島宏康:「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器におけるイベントデータ処理機能の検証」、26pGJ-5
- [103] 鶴剛、信川正順、内田裕之、林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、幸村孝由、村上弘志、平賀純子、森浩二、廿日出勇、山内誠、馬場彩、John Doty、他 SXI チーム:「X 線衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 III」(26pGJ-6)
- [104] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、内山秀樹、内山泰伸、榎戸輝揚、太田方之、大野雅功、小高裕和、片岡淳 E、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、高橋弘充、武田伸一郎、田代信、田中孝明、寺田幸功、中澤知洋、中森健之、Roger Blandford D、牧島一夫ほか SGD チーム:「Astro-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発」、26pGJ-8
- [105] 大野雅功、上野一誠、深沢泰司、田島宏康、野田博文、中澤和洋、牧島一夫、太田方之、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、岩田直子、小川博之ほか SGD チーム:「X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器システムの熱設計と検証」、26pGJ-9
- [106] 鳥井 俊輔、笹野 理、西田 瑛量、中澤 知洋、牧島一夫ほか:「硬 X 線撮像検出器 HXI に向けたアクティブシールド 機能の検証実験」、26pGJ-12
- [107] 木村太輔、水野恒史、深沢泰司、吉田道利、植村誠、川端弘治、秋田谷洋、北村唯子、松本浩典 A、田島宏康、石橋和紀 B、森英之、宮澤拓也、酒井理人、坂廻邊果林、牧島一夫、中澤知洋、高橋忠幸ほか HXI/SGD チーム:「衛星搭載軟ガンマ線検出器用高精細金属コリメータの性能評価」、26pGJ-12
- [108] 笹野理、西岡博之、奥山翔、中澤知洋、牧島一夫、奥村暁、湯浅孝行、山田真也、片岡淳、深沢泰司ほか:「APD による衛星搭載用大型 BGO 結晶の測定」、27aGC-4
- その他の国内研究集会
- [109] 牧島一夫:「すざく、MAXI、ASTRO-H」、ビッグバンセンター第 11 回サマースクール (久住高原、2011 年 7 月 25 日)
- [110] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Interactions Between Galaxies and Hot Plasmas”, RESCEU 研究交流会 (本郷、2011 年 11 月 17 日)
- [111] 牧島一夫:「X 線観測分野からのコメント」第 2 回 CRC タウンミーティング (東工大大岡山キャンパス、2012 年 1 月 11 日)
- [112] あべ松高志、平賀純子、常深博、西村和真、中村正吾:「低エネルギー X 線側の感度向上を目指した裏面照射型 CCD の量子効率測定」(16p-C4-20)、第 59 回応用物理関連連合講演会 2012 年 3 月 15-18 日、早稲田大学
- [113] 西村和真、平賀純子、あべ松高志:「CMOS イメージセンサを用いた X 線直接撮像分光」(17p-DP1-5)、同上
(セミナー、談話会)
- [114] 牧島一夫:「X 線で探るコンパクト天体～『すざく』から ASTRO-H へ～」、天文・天体物理若手 夏の学校 (愛知県蒲郡、2011 年 8 月 3 日)
- [115] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Evolution of galaxy light and ICM distributions in galaxy clusters”, 東京大学天文学教育研究センター 談話会 (三鷹、2011 年 10 月 17 日)
- [116] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters”, 国立天文台談話会 (三鷹、2012 年 1 月 31 日)
- [117] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Cluster of Galaxies”, JAXA 宇宙科学研究所 (相模原、2012 年 3 月 1 日)
- [118] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: 東京大学天文学教室談話会 (本郷、2012 年 3 月 13 日)
(一般向け講演、テレビ番組)
- [119] 牧島一夫:「宇宙の大きさを考えよう」、日本舞踊協会+理化学研究所「かぐや新作講演会コラボレーション」(国立劇場、2011 年 7 月 16 日)
- [120] 牧島一夫:「最新の宇宙像を学ぼう～ビッグバン・ブラックホール・暗黒物質と暗黒エネルギー～」、埼玉県立川越高校スーパーサイエンスハイスクール講演会 (2011 年 7 月 30 日)
- [121] 牧島一夫: NHK(BS プレミアム) コズミックフロント「驚異! ブラックホール 頭脳がみつけた奇妙な天体」に出演 (2011 年 11 月 15 日放映)
- [122] 牧島一夫:「ビッグバンとブラックホールとロケット」、文京区子ども科学カレッジ第 1 回 (文京区教育センター、2012 年 4 月 14 日)
- [123] 牧島一夫: NHK(E テレ) サイエンス ZERO 「謎の天体ブラックホールを解き明かせ!」に出演 (2012 年 4 月 29 日放映)

7.2 BESS 気球実験測

7.2.1 超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測

BESS 気球実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) は、大気球・飛翔実験の為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る一次起源反粒子、反物質の探索を通して、初期宇宙における素粒子像を探ることを主目的とし、気球による飛翔体・宇宙線精密観測を系統的に推進した。超伝導技術を駆使し、粒子透過性に優れた薄肉ソレノイド型超伝導磁石スペクトロメータの開発によって、大立体角、運動量分解能及び粒子識別性能に優れた観測の実現を特徴とした。観測器の概念図を図 7.14 に示す。観測には、東京大学、KEK、ISAS/JAXA、NASA、メリーランド大、デンバー大が参加し、日米共同実験として、ISAS/JAXS、NASA の強いサポートを受けて、1993 年以來、カナダ北部、南極において観測を積み重ねた。その集大成として、太陽活動極小期にあたる平成 18 年度に、南極周回・長時間宇宙線観測実験 (第二回) に成功し、高度 34 38 km の南極周回軌道上において 24.5 日間に亘る連続的な宇宙線観測を実現した。宇宙線観測イベントは、47 億イベントに達し、実データサイズは、13.5 TB に達した。スペクトロメータは、平成 21 年度に回収され、その後の復元、点検作業により、超伝導スペクトロメータとして、装置が当初の性能を発揮したことを確認することができた。平成 23 年度には、主要課題であった低エネルギー反陽子流束観測および宇宙反物質探索結果を以下に示すように確定し、公表した。

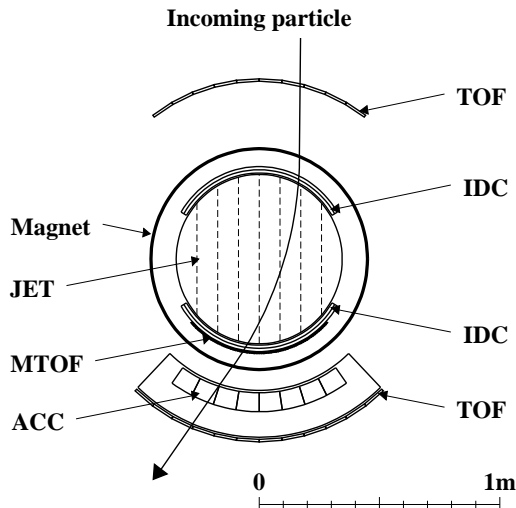


図 7.14: Cross section of the BESS superconducting magnet spectrometer.

7.2.2 BES-Polar 観測結果

低エネルギー反陽子流束

2007-2008 年太陽活動極小期における BESS-Polar II 観測から、質量同定を伴う明確な解析結果として、総数 7886 個の反陽子流束の検出を確定し、図 7.15 に示すエネルギースペクトルおよび宇宙起源反陽子探索結果を公表した [1]。この観測結果は、1GeV 以下のエネルギー領域において、11 年前の太陽活動極小期 (BESS '95+'97) の観測結果の約 14 倍の統計量に達し、様々な理論モデルとの明確な比較の結果、二次起源反陽子流束モデル計算と良く整合する結論を得た。二次起源反陽子のモデル計算は、一次宇宙線である陽子が、銀河磁場による拡散、対流、星間ガスによる加速を受けながら、衝突反応により反陽子生成をする過程 (宇宙線伝播モデル) と、太陽圏内における太陽磁場の擾乱による変調 (太陽変調モデル) の効果をかけ合わせたものとなり、この二次起源反陽子流束評価を基に、低エネルギー領域においてその寄与が顕著に現れる可能性がある『原始ブラックホール (PBH)』起源・反陽子流束の評価を行った。反陽子流束観測結果から、二次起源反陽子モデル計算を引いた差分を説明できる PBH 起源反陽子流束の絶対量を見積もり、PBH の蒸発率 R の上限値を評価した。二次起源反陽子モデル不定性の影響を考慮するために、数種の二次起源反陽子モデルについて計算を行い、蒸発率 R の確率密度関数を求めた。BESS '95+'97 の低エネルギー反陽子流束観測に対して統計精度を一桁以上高めた BESS-Polar II 実験結果として、 $R \sim 1.2 \times 10^{-3} [\text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}]$ (90% C.L.) を上限値とする結果を得た。この値は、前回の太陽活動極小期における BESS 実験の観測結果に対して、 $> 9\sigma$ 離れる低い結果となり、PBH 起源・低エネルギー宇宙線反陽子が現在、我々が観測することができる宇宙では観測されないと結論した。

宇宙反物質の探索

BESS-Polar 実験では、長時間フライトの特色を活かし、反物質としての反ヘリウム探索を飛躍的に進展させた。観測されたヘリウム流束は BESS-Polar I の観測においてのリジディティ領域で 4×10^7 イベントに達したが、反ヘリウムは 1 例も観測されなかった。1993 年以來の全 BESS 実験における積分統計量から、1~14 GV 領域において反ヘリウムとヘリウムが同じスペクトル形状をもっていると仮定した場合に於いて、反ヘリウム/ヘリウム上限値、 6.9×10^{-8} を得た。この結果を、図 7.16 に示す。また、反ヘリウムにスペクトル形状を仮定せず、個々のフライトに対し重みをつけ、最も低いヘリウム観測効率を仮定した場合において、反ヘリウム/ヘリウムの上限値として、1.6~14 GV のリジディティ領域で、 1.0×10^{-7} の上限値を得た。1993 年以來積み重ねられた BESS 実験による宇宙反物質探索は、BESS 実験以前の探索結果に対して、上限値を三桁押し下げ、最も高い感度での宇宙反物質探索結果を報告した [2]。

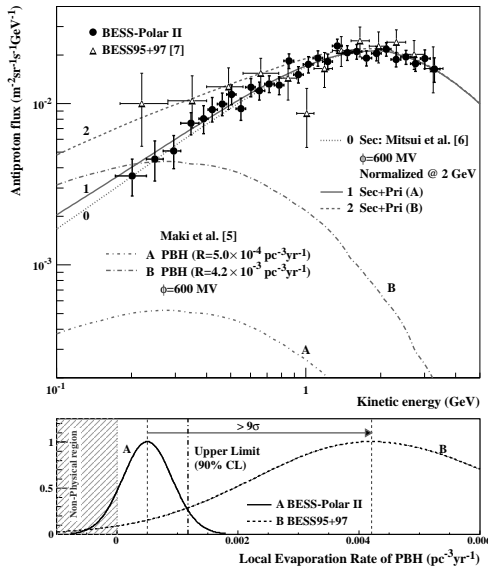


図 7.15: Antiproton spectrum measured in BESS-Polar II experiment compared with the BESS95+97 and secondary production models, and possible primary fluxes from PBH evaporations calculated for BESS Polar II and BESS(95+97) experiments [1].

7.2.3 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力実験として 1987 年に実験の準備を開始以来 25 年、1993 年に第一回観測を実現して以来、19 年に亘る歴史を重ねた。カナダ北部、南極での観測を含み、合計 11 回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。宇宙起源反粒子の探索および宇宙線の絶対流束の精密観測データの提供、太陽活動による変動を観測し、精密な実験結果を提供し続けてきた。平成 19 年度には、その集大成として、太陽活動極小期に第二回南極周回気球実験を実現し、高度 34~38km に於ける 24.5 日間に亘る連続気球観測に成功した。平成 23 年度には、『太陽活動極小期における低エネルギー宇宙線反陽子観測』、『反ヘリウム探索』に関するデータ解析を完了し、BESS 実験としての最終結果を公表した。反陽子については、太陽活動極小期における粒束を決定するとともに、原始ブラックホール等の宇宙（一次）起源反陽子の存在可能性に対して、厳しい上限値を導いた。反物質探索においては、BESS 実験のこれまでの全フライトの統計量から、エネルギースペクトル形状を同じと仮定した場合、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値 6.9×10^{-8} を結論とした。以上より、BESS-Polar 実験は、かつてない統計精度で、宇宙線伝播モデル、初期宇宙の素粒子描像の精密な理解に不可欠な基礎データを提供する事に貢献した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Kim, Kusumoto, A., Lee, M.H.,

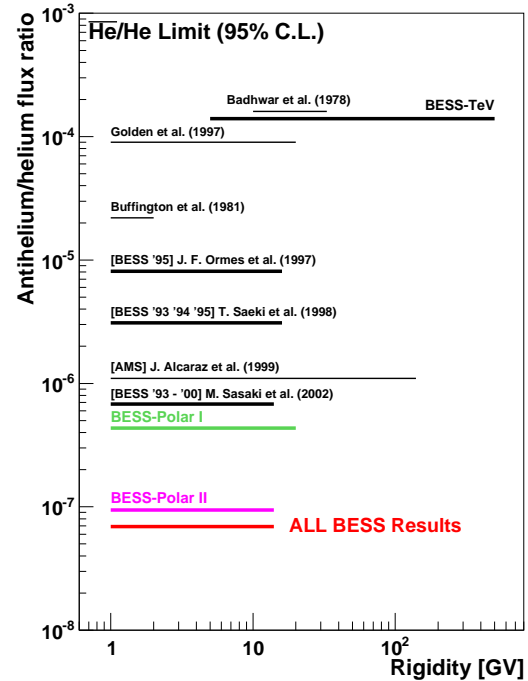


図 7.16: The new upper limit of antihelium/helium at the top-of-atmosphere calculated assuming the same energy spectrum for antihelium for helium with previous experimental results. The limit calculated with no spectral assumption is about 25 % higher [2].

Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Mitchell, J.W., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., and Yoshimura, K.: “Measurement of the Cosmic-Ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with a Long-duration Balloon Flight over Antarctica”, *Phys. Rev. Lett.*, 108, 051102 (2012).

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

Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shikaze, Y., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Takasugi, Y., Takeuchi, K., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yoshida, T., and Yoshimura, K.: "Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS", *Advances in Space Research*, in press, 2011.

- [4] Kim, K., Abe, K., Fuke, H., Hams, T., Lee, M.L., E.S., Shikaze Y., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Tanaka, K., Yamamoto, A., Yoshida K., , and Yoshimura, K., "Cosmic-Ray 2H/1H ratios measured from in 2000 during solar maximum," *Advances in Space Research*, in press, 2011.

(会議抄録)

• *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, August 11-18, 2011, Beijing, China

- [5] Sakai, K., Yamamoto A., et al.: "Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with BESS-Polar II".
- [6] Yoshimura, K., Yamamoto, A., et al.: "Search for Antideuteron with BESS-Polar".
- [7] Sasaki, M., Yamamoto, A., et al.: "BESS-Polar: Search for Antihelium".
- [8] Thakur, N., Yamamoto, A., et al.: "Transient variations in cosmic ray proton fluxes from BESS-Polar I".
- [9] Picot-Clemente, N., Yamamoto, A., et al.: "Cosmic ray helium isotopes from the BESS Polar I experiment".

(国内雑誌)

- [10] 山本 明、Mitchell J.W. 『BESS-Polar: 南極周回気球超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の探索』、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所大気球シンポジウム報告 (2011年10月6日～7日)

< 学術講演 >

(国際会議招待講演)

- [11] Yamamoto A. and Mitchell J.W.: "Results from BESS Experiment", *The 32nd International Cosmic Ray Conference*, Beijing, Aug. 11-18, 2011.
- [12] Yoshimura, K., Yamamoto A., et al., "Precision Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum and Search for Antimatter with BESS", *LEAP 2011*, Vancouver, Apr. 27 - May 1, 2011.
- [13] "Results from BESS-Polar Experiments", *HEAP 2011*, KEK, Nov. 13-15, 2011.
- [14] Yoshimura, K., Yamamoto A., et al., "Results from BESS-Polar", *KEKPH 2012*, KEK, Feb. 27 - Mar. 1, 2012.

(国際会議一般講演/ポスター)

• *The 32nd International Cosmic Ray Conference*, Beijing, China, Aug. 11-18 (2011)

- [15] Sakai, K., Yamamoto A., et al.: "Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with BESS-Polar II"
- [16] Yoshimura, K., Yamamoto, A., et al.: "Search for Antideuteron with BESS-Polar"
- [17] Sasaki, M., Yamamoto, A., et al.: "BESS-Polar: Search for Antihelium"
- [18] Thakur, N., Yamamoto, A., et al.: "Transient variations in cosmic ray proton fluxes from BESS-Polar I"
- [19] Picot-Clemente, N., Yamamoto, A., et al.: "Cosmic ray helium isotopes from the BESS Polar I experiment"

(国内会議/一般講演)

- [20] 坂井賢一、山本 明 他: 『BESS-Polar II 実験: 宇宙線反陽子スペクトラムの精密測定結果』、18aSW-9. 日本物理学会・秋季分科会 (2011年9月16～19日、弘前大学)
- [21] 吉村浩司、山本 明 他: 『BESS-Polar II 実験による宇宙線反重陽子探索』、24aGK-7 日本物理学会・春季大会 (2012年3月24～27日、関西学院大学)
- [22] 吉村浩司、山本 明 他: 『BESS 実験による宇宙線の太陽変調 (長期、短期) の観測』、太陽圏シンポジウム 2012, (2012年3月15日～16日、名古屋大学), 2012.

(セミナー、談話会)

- [23] 吉村浩司、山本 明 『BESS 実験の最新結果』 岡山大学セミナー、2012年2月7日.