

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

Annual Report

2010

平成22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

目次

I	2010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	第8回 DECIGO ワークショップ	10
4.2	CL J2010+0628: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy	10
4.3	全国同時七夕講演会	14
4.4	ビッグバン宇宙国際研究センター第六回公開講演会:「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」	14
4.5	第10回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会:“Dark Energy in the Universe” サマースクール	14
4.6	Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010	16
4.7	The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010	24
4.8	ビッグバン宇宙国際研究センター第七回公開講演会:「ビッグバンセンタークリスマス講演会」	25
5	プレプリント・リスト	26
II	2010年度 プロジェクト別 研究活動報告	30
1	初期宇宙進化論	32
1.1	初期宇宙・相対論	32
1.2	観測的宇宙論	35
1.3	太陽系外惑星	37
2	銀河進化理論	45
2.1	銀河系	45
2.2	超新星	45
2.3	新星	46
3	銀河と宇宙構造の進化	48
3.0.1	宇宙及び系外銀河	48
3.0.2	太陽及び太陽系	51
4	サブミリ波観測	56
4.1	星形成から惑星系形成に至る物質進化の研究	56
4.1.1	はじめに	56
4.1.2	星形成の観測研究	56
4.1.3	スペクトル線サーベイ観測	57
4.1.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	59
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	62
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	62
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	64
4.2.3	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	65

5	重力波探査	69
5.0.4	地上レーザー干渉計重力波検出器	69
5.0.5	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	69
5.0.6	磁気浮上重力波検出器	71
5.0.7	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化	71
5.0.8	超高安定レーザー光源の開発	71
5.0.9	極小距離領域における重力法則の検証	72
6	暗黒物質・太陽アクシオン直接検出	76
6.1	衰輪 研究室	76
6.1.1	PANDA – 原子炉ニュートリノモニター	76
6.1.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験	77
6.1.3	太陽 hidden sector photon 探索実験	78
7	飛翔体を用いた宇宙観測	81
7.1	衛星を用いたX線・ γ 線観測	81
7.1.1	科学衛星の運用と稼働状況	81
7.1.2	質量降着するブラックホール	81
7.1.3	さまざまな磁場強度の中性子星	82
7.1.4	星間空間における高エネルギー現象	84
7.1.5	銀河団および銀河群の研究 [4, 5, 11, 17, 73, 109]	85
7.1.6	ASTRO-H 衛星計画	86
7.2	BESS 気球実験	88
7.2.1	はじめに	88
7.2.2	BESS-Polar II のデータ解析	89
7.2.3	まとめ	90

I

2010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

学士院賞 佐藤勝彦前センター長

前センター長であり、物理学専攻を2009年に定年退職した佐藤勝彦名誉教授（現自然科学研究機構長）に2010年度学士院賞が授与されました。佐藤前センター長は、素粒子物理学における相互作用の大統一理論を初期宇宙に応用することにより、真空の相転移が宇宙初期に起こり、その結果、宇宙が何十桁も指数関数的に膨張することを示しました。それによって単純なビッグバン宇宙論をインフレーション宇宙論へと発展させました。その際宇宙の大規模構造の種となり得る揺らぎがインフレーション時に生成可能なこと、またインフレーションによって地平線が十分広がることにより、現在観測されているように、大きな領域に亘って一様に正のバリオン数をもつ物質宇宙が実現することを示しました。さらに、この相転移の進行にともなって、母宇宙、子宇宙、孫宇宙、……、と宇宙が自己相似的に多重発生することを示しました。これは「唯一絶対の宇宙」という古典的な宇宙観を、「多種多様な宇宙の中でのわれわれの宇宙」という考え方に変更することを迫った、画期的なものでした。近年、量子宇宙論や、超ひも理論におけるランドスケープ描像において、われわれの宇宙が実現する確率まで議論されるようになっていますが、こうした研究の背景には、佐藤前センター長を嚆矢とする上述のような宇宙観の変遷があるのです。

オスカー・クラインメダル Alexei A. Starobinsky 客員教授

当センターに客員教授として毎年滞在し、共同研究を推進しているスタロビンスキー教授（ロシア・ランダウ研究所首席研究員）に、オスカー・クラインメダルが授与されました。スタロビンスキー教授は、佐藤前センター長、アラン・グース教授（マサチューセッツ工科大学）と並ぶインフレーション宇宙論の開祖の一人であり、一般相対論のアインシュタイン・ヒルベルト作用に量子補正を加えることにより、初期宇宙にインフレーションが起こること、その後重力的粒子生成により再加熱が起こることを示しました。さらに、スタロビンスキー教授は、インフレーション期に量子的に生成する曲率ゆらぎが銀河等の大規模構造の種を与えることを示しました。また、同時に量子的重力波としてテンソル型のゆらぎも生成することを示しました。

2 教員，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫 (センター長/教授; 併任)

横山 順一 (教授)

茂山 俊和 (准教授)

樽家 篤史 (助教)

坂井 南美 (助教)

平賀 純子 (2010/2/16-) (助教)

Meneghetti, Massimo (2010/8/1-2010/9/29) (外国人客員教授)

Starobinsky, Alexei A. (2010/10/1-2010/11/10, 2011/1/21-2011/3/30) (外国人客員教授)

Turner, Edwin (2011/1/21-2011/3/5) (外国人客員教授)

高水 裕一 (特任研究員)

稲田 直久 (特任研究員)

小林 努 (特任研究員)

永野 早百合 (事務補佐員)

南澤 三恵子 (事務補佐員)

仲家 増美 (事務補佐員; 岡村研究室)

研究プロジェクト及び担当者

(無印はセンター固有の教員、上添字付きは研究協力者)

- | | | | |
|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1. 初期宇宙進化論 | 横山 順一 | 樽家 篤史 | 須藤 靖 ¹ |
| 2. 銀河進化理論 | 茂山 俊和 | | |
| 3. 銀河と宇宙構造の進化 | 岡村 定矩 ² | 嶋作 一大 ² | |
| 4. サブミリ波観測 | 坂井 南美 | 山本 智 ¹ | 河野 孝太郎 ³ |
| 5. 重力波探査 | 坪野 公夫 ¹ | | |
| 6. 暗黒物質・太陽アクシオン直接検出 | 袁 輪 眞 ¹ | 井上 慶純 ¹ | |
| 7. 飛翔体による宇宙観測 | 牧島 一夫 ¹ | 平賀 純子 | 山本 明 ⁴ |

¹ 物理学専攻、² 天文学専攻、³ 天文学教育センター、⁴ 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。

2010年6月28日～7月2日にIPMUで、“CL J2010+0628: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy”という宇宙論の国際会議を共催した。8月29日から9月1日には高知でサマースクールを開催し、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、大学院生の理解を深めた。また9月27日～10月1日に堀場国際会議COSMO/CosPA2010という会議をビッグバン宇宙国際研究センター等と共催した。この国際会議は、暗黒エネルギーの起源をはじめとする素粒子的宇宙論を広くカバーする国際会議であり、欧米で交互に開催されてきているCOSMO会議とアジア太平洋地区を巡回しているCosPA会議を同時にホストすることにより、世界各国から研究者が結集し、暗黒エネルギーについて多くの意見交換がなされた。10月にはカリフォルニア工科大学で暗黒エネルギーに関する国際会議を主催し、20人程度の日本人研究者が出席、分光観測プロジェクトSuMIReの推進に向けた国際共同研究の枠作りを決める重要な場となった。

加えて、2010年8月4日に「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」、2010年12月22日に「ビッグバンセンタークリスマス講演会」と題する2つの一般向けの公開講演会を開催した。また、2010年8月29日～9月1日には、高知県高知市「高知パレスホテル」、および高知工科大学において「Dark energy in the Universe」というタイトルのサマースクールを行い、海外の協力機関などから講師を招いて、国内の大学院生と若手研究者を対象とするダークエネルギーに関する系統的な講義を行っている。

4 シンポジウム・研究会

4.1 第8回DECIGOワークショップ

日時：2010年6月14日(火)

場所：東京大学理学部1号館小柴ホール

プログラム

10:10 – 12:20

- 横山 順一 はじめに
- 瀬戸 直樹 DECIGOのサイエンスレビュー
- 黒柳 幸子 重力波とインフレーション
- 中山 和則 重力波と密度ゆらぎ
- 鎌田 耕平 重力波と宇宙のバリオン数
- 齊藤 遼 重力波とダークマター
- 西澤 篤志 重力波とダークエネルギー
- 西澤 篤志 重力波と重力理論

13:30 – 15:10

- 霜田 光一 特別講演 レーザー誕生50年
- 牧島 一夫 X線天文学とASTRO-H

15:10 – 18:00

- 中須賀 真一 超小型衛星による新しい宇宙利用の開拓
- 尾中 敬 赤外線天文学とSPICA
- 羽澄 昌史 CMB観測と宇宙背景重力波
- 川村 静児 DECIGO計画
- 安東 正樹 DECIGパズファインダー
- 川村 静児 まとめ

4.2 CL J2010+0628: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy

日時：2010年6月28日(月)–7月2日(金)

場所：数物連携宇宙研究機構

プログラム**6月28日(月)**

9:00 – 12:30

- | | |
|--------------------|---|
| Hitoshi Murayama | Welcome |
| August Evrard | When clusters merge with massive halos |
| Gabriella De Lucia | The formation of galaxy clusters and of their brightest galaxies in hierarchical models |
| Kevin Bundy | Observational probes of the assembly history of massive halos |
| Eiichi Egami | Spitzer infrared observations of the brightest cluster galaxies |
| William Holzapfel | Cluster Cosmology with the South Pole Telescope |

14:00 – 17:00

- | | |
|------------------|---|
| Stefano Ettori | Cosmological constraints from estimates of the gas mass, total mass and concentration parameter in X-ray luminous galaxy clusters |
| Eiichiro Komatsu | WMAP 7-year results: Sunyaev-Zel'dovich effect |
| Tetsu Kitayama | Multi-wavelength studies of substructures and inhomogeneities in galaxy clusters |
| Kyoko Matsushita | Metal abundances in the Intracluster medium observed with XMM and Suzaku |

6月29日(火)

9:20 – 12:20

- | | |
|------------------|---|
| James Bullock | The hierarchical assembly of galaxy clusters and intra-cluster light |
| Anthony Gonzalez | Coevolution of brightest cluster galaxies and intracluster light |
| Sarah Hansen | Galaxy populations and intracluster light in local Universe clusters |
| Henk Hoekstra | Weak lensing studies of clusters of galaxies |
| Tomaso Treu | Measuring the invisible with gravitational lensing: dark matter and the highest redshift galaxies |

12:35 – 13:45

- | | |
|-------------------|---|
| Brian Mason | New high resolution SZ measurements with MUSTANG on the GBT |
| Jesper Rasmussen | Witnessing the formation of a brightest cluster galaxy |
| Kaustuv Basu | SZ/X-ray Joint Analysis of the Intra-Cluster Medium using APEX-SZ Data |
| Madoka Kawaharada | Joint X-ray, lensing and optical study of Abell 1689: anisotropic gas temperature and entropy distributions associated with the large-scale structure |
| Pasquale Mazzotta | Study of the spectacular shock wave propagation in the extended and time-dependent gravitational field of RXJ1314.4-2515 |

14:00 – 17:10

- | | |
|------------------|---|
| Alexie Leauthaud | Weak lensing in COSMOS: the halo masses of groups and clusters of galaxies |
| Bianca Poggianti | The build-up of galaxy populations over cosmic time and across environments |
| Graham Smith | LoCuSS - a multi-wavelength survey of galaxy clusters |
| David Wilman | The origin of the morphology-density relation |
| Roderik Overzier | The life cycle of massive cluster galaxies from the early Universe to the present |
| Casey Papovich | The search for distant galaxy clusters selected from galaxy overdensities |
| Piero Rosati | The baryonic and dark matter content of the most distant clusters |

6月30日(水)

9:20 – 12:30

- | | |
|------------------|--|
| Hans Boehringer | Studying galaxy clusters for precision cosmology applications |
| Neelima Sehgal | Sigma8 from Sunyaev-Zel'dovich galaxy clusters detected with the Atacama Cosmology Telescope |
| Michael Gladders | The statistics of cluster- and group-scale strong lensing in the SDSS and RCS2 |
| Masamune Oguri | The shape of massive dark matter halos from gravitational lensing |
| Eduardo Rozo | Precision cosmology with optical clusters: current constraints and future prospects |
| Daisuke Nagai | Impact of Cluster Physics on the Sunyaev-Zel'dovich Power Spectrum |

12:30 – 14:00

- Nobuhiro Okabe LoCuSS: Subaru weak lensing study of galaxy clusters
 Anja von der Linden Weighing the giants: X-ray and weak lensing studies of the most massive clusters
 Rene Fassbender Cluster assembly, mass estimates, and merger physics from an X-ray-optical-SZE-lensing-radio study of the amazing galaxy cluster XMMU J1230.3+1339 at $z = 1$
 Maria Pereira LoCuSS: dynamical mass estimates and substructure in a large sample of clusters with Hectospec/MMT

14:00 – 17:10

- Stefano Borgani Astrophysics and cosmology with clusters: a simulator's perspective
 Takashi Hamana Searching for clusters with weak lensing and HSC survey
 Massimo Meneghetti Weighing simulated galaxy clusters using lensing and X-ray
 Johan Richard Evolution of cluster scaling relations as seen with strong lensing

7月1日(木)

14:00 – 17:10

- Sudeep Das The CMB as a backlight
 Masayuki Tanaka The environmental dependence of galaxy properties at $z \sim 1.5$
 Mark Brodwin Properties of LIRGs and ULIRGs in ISCS galaxy clusters at $z=1-1.5$
 Paul Martini The evolution of AGN in groups and clusters of galaxies
 Ian McCarthy The case for AGN feedback in galaxy groups
 Yutaka Fujita High metallicity of the X-ray gas up to the virial radius of a binary cluster of galaxies: evidence of galactic superwinds at high-redshift
 David Sand The cluster supernova rate at $z \sim 0.1$: hostless supernovae, enrichment of the intra-cluster medium and the environmental dependence of the SNIa rate
 Lori Lubin The active galaxy population in a high-redshift supercluster

7月2日(金)

9:20 – 12:30

- Tadayuki Kodama Panoramic views of cluster evolution with Subaru
 Adam Muzzin The Gemini cluster astrophysics spectroscopic survey
 Gilbert Holder The physics and astrophysics of SZ surveys
 James Gunn Conference Highlight
 Fredrick William High Efficient optical follow-up to the first 21 galaxy clusters selected from the Sunyaev-Zeldovich effect by the South Pole Telescope
 Felipe Menanteau Massive SZ-clusters discovered with the Atacama Cosmology Telescope

12:45 – 13:45

- Yusei Koyama Hidden star formation activity around distant clusters at $z \sim 1$
 Renbin Yan RCS-SPEC: galaxy evolution in distant clusters
 Michael Hudson The star formation histories of cluster red- sequence galaxies
 Tiziano Valentini Massive compact galaxies in local and high- z galaxy clusters

14:00 – 15:40

Keiichi Umetsu AMiBA Sunyaev-Zel'dovich effect and multiwavelength study of galaxy clusters

Douglas Rudd Non-equilibrium electrons and the SZ effect at large radius

4.3 全国同時七夕講演会

日時：2010年7月7日(水)

場所：東京大学理学部1号館小柴ホール

プログラム

18:00 – 19:00

岡村 定矩 宇宙ってなんだか知っていますか？

4.4 ビッグバン宇宙国際研究センター第六回公開講演会：「暗黒エネルギーと宇宙の過去・現在・未来」

日時：2010年8月4日(水)

場所：東京大学本郷キャンパス理学部1号館西棟2階207号室

プログラム

10:30 – 15:00

横山 順一 宇宙をあやつる暗黒エネルギー

河野 孝太郎 観測により迫る宇宙の謎

坪野 公夫 重力波で宇宙を見るー検出実験の現状ー

4.5 第10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：2010年8月29日(日)–9月1日(水)

場所：高知県高知市「高知パレスホテル」(8月29、30日、9月1日)、高知工科大学(8月31日)

プログラム

8月29日(日)

13:20 – 15:30

牧島一夫 RESCEU 研究成果報告会オープニング

袁輪真 プロジェクト報告 (Tokyo axion helioscope)

岡村定矩 プロジェクト報告 (遠方銀河探査と宇宙の再電離)

河野孝太郎 プロジェクト報告 (サブミリ波による銀河探査プロジェクトの成果報告)

坪野公夫 プロジェクト報告 (重力波探査)

4.5. 第10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15

15:50 – 17:30

- 牧島一夫 プロジェクト報告 (「すざく」の成果と ASTRO-H への展望)
山本明 プロジェクト報告 (BESS-Polar 実験と観測結果解析の現状)
茂山俊和 非球対称超新星爆発の話題 (兼プロジェクト報告)
樽家篤史 Signature of primordial vector modes on large-scale structure(兼プロジェクト報告)
稲田直久 Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters

17:50 – 19:30

- 河原創 How to make a world map of a second Earth
藤井友香 Toward remote sensing of Earth-like exoplanets
高水裕一 Beyond delta-N formalism
鎌田耕平 Affleck-Dine baryogenesis and inhomogeneous reheating scenario
本橋隼人 Density fluctuation in $f(R)$ gravity with massive neutrinos

8月30日(月)

9:00 – 12:30

- Y.Suto DENET Summer School Opening Remarks
D.Huterer Lecture1 (Discovery of dark energy)
J.Martin Lecture1 (The accelerating Universe & the cosmological constant)
M.Meneghetti Lecture1 (An introduction on gravitational lensing)

13:30 – 14:30

- T.Eifler Weak Lensing with the Dark Energy Survey
T.Brandt The Ages of Type Ia Supernova Progenitors
E.Krause Tidal alignments as a contaminant of the galaxy bispectrum

8月31日(火)

9:00 – 12:30

- T. Sakuma Welcome Address
D.Huterer Lecture2 (Descriptions of dark energy)
A.Newman Mapping Dark Matter in Galaxy Clusters: From kpc to Mpc Scales
S.Hong 2d genus topology of the redshifted 21cm signal during the epoch of reionization
R.Saito Parametric amplification of primordial fluctuations during inflation

13:00 – 15:00

- J.Martin Lecture2 (Quintessence & high energy physics)
T.Kobayashi G-inflation
T.Nishimichi Halo Assembly Bias and Primordial Non-Gaussianities
M.Takada Dark matter halo formation in a mixed dark matter model

15:15 – 17:45

- M.Meneghetti Lecture2 (Unveiling the structure of galaxy clusters using lensing)
M.Nakashima CMB Polarization in Einstein-Aether Theory (presentation file will be here later)
T.Cheon Special Lecture (Quantum mechanics in 21st century)

9月1日(水)

8:30 – 12:05

D.Huterer	Lecture3 (Cosmological analysis: likelihood methods)
J.Martin	Lecture3 (Other models of dark energy)
M.Meneghetti	Lecture3 (Cosmology with lensing clusters)
J.Yokoyama	Concluding Remarks

4.6 Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010**日時**：2010年9月27日(月)–10月1日(金)**場所**：東京大学弥生講堂一条ホール、理学部1号館小柴ホール、等

当センターと数物連携宇宙連携機構の共催により、堀場国際会議：全世界宇宙論会議 COSMO/CosPA2010 を2010年9月27日から10月1日までの5日間に亘って、農学部弥生講堂一条ホールを主会場、小柴ホール他理学系研究科各教室をパラレルセッション会場として開催した。これは、欧州と米国でほぼ交互に毎年開かれてきた COSMO と、台湾に始まり、近年韓国、オーストラリアとアジア太平洋地区を巡回している CosPA という、宇宙論・素粒子天体物理学の二つの国際会議シリーズを一体的にホストして行った会議であり、世界全5大陸30ヶ国より294名の出席を得た。午前中は連日招待講演者による宇宙論とその周辺分野に関する全体講演、午後は日によってパラレルセッション(4セッション並行で延べ100講演)やビール片手に活発に議論がなされたポスターディスカッション、エクスカージョン、と盛りだくさんの日程で、現代宇宙論の三大テーマである、ダークエネルギー、ダークマターの起源、インフレーション的宇宙膨張の実現機構、などに関する活発な議論が行われた。本国際会議は堀場製作所最高顧問・堀場雅夫氏の篤志に基づく東京大学堀場国際会議制度からの多額の援助により実施された。あわせて、日本学術振興会先端研究拠点事業「暗黒エネルギー研究国際ネットワーク」及びアジア太平洋理論物理学センターの後援とグローバルCOEプログラム及び日本物理学会の協賛を受けた。堀場国際会議には「接遇に十分配慮し」、「人間的な接触を深め」、「永續する協力の基盤を築くこと」という、研究交流のみならず文化交流まで視野に入れた規定があるため、当センターが東京で開催する会議としてははじめて、3日目の午後半日を使ってエクスカージョンを実施した。行き先は、鎌倉の鶴岡八幡宮、建長寺、高德院鎌倉大仏と横浜中華街(夕食)であった。午前のセッション終了後車中にて昼食という慌ただしいスケジュールであったが、近畿日本ツーリスト社の見事な差配により、バス5台の大人数でありながらすべて時間通りに運ぶことができた。また4日目夕のバンケットは椿山荘で行い、箏と鼓の演奏の中供された純日本会席料理は、特に参加者の6割を占めた海外からの出席者からたいへん喜ばれた。(菜食主義者には特別テーブルを設け、豆腐料理等を供した。)それはさておき、本国際会議で特筆すべきことは、30名の全体講演者全員がすべて予定通り来日し、印刷したプログラムを一切変更せずに実施できたことである。これはこの規模の国際会議としてはまことに異例なことであった。会議の詳細はホームページ <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/symposium/cosmocospa2010/index.php> に掲載されているが、以下にプログラムと発表リストを示す。

プログラム**9月27日(月)**

9:30 – 12:50

Jun'ichi Yokoyama	Welcome
Petr Horava	General Covariance in Gravity at a Lifshitz Point
Wilfried Buchmuller	Some recent development in leptogenesis
Leszek Roszkowski	Dark Matter and Colliders
Rupak Mahapatra	Dark Matter Direct Detection Experiments

14:15 – 19:00

Parallel Sessions

Reception at the Sanjo Conference Hall, Lounge and Dining Hall

Parallel session A

He Xiao-Gang	Direct search and LHC detection of the simplest Dark Matter
Cirelli Marco	Gamma ray and cosmological constraints on Dark Matter with large annihilation cross section
Kyae Bumseok	PAMELA's cosmic positron from decaying LSP in SO(10) SUSY GUT
Petraki Kalliopi	Constraints on late-decaying dark-matter models
Saito Ryo	Primordial black holes as the boost factor
Kawanaka Norita	Cosmic Ray Electrons/Positrons from Nearby Pulsars and Their GeV-TeV Spectral Features
Grefe Michael	Neutrino Signals from Dark Matter Decay
Iocco Fabio	Dark Matter and Stars
Arina Chiara	Phenomenology of Spontaneously Broken Dark Matter Hidden Sector
Motz Holger	Status and Results of the ANTARES neutrino telescope
Kadastik Mario	Anti-deuteron as a possible DM detection channel
Ishihara Aya	Recent results from searches for high energy cosmic neutrinos with IceCube
Nonoyama Yoshiaki	Status of the OPERA experiment
Park Seongchan	Kaluza-Klein Dark Matter
Seto Osamu	Right-handed neutrino dark matter in the minimal gauged B-L model

Parallel session B

Vikman Alexander	Dust of Dark Energy
Wang Bin	Interaction between Dark Energy and Dark Matter
Suyama Teruaki	Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations
Sapone Domenico	Fingerprinting Dark Energy: observational tests
Ballesteros Guillermo	Dark energy with non-adiabatic sound speed
Calabrese Erminia	Probing the dark energy sound speed with lensing
Tretyakov Petr	Stability of dS and other cosmological regimes in high order gravity models
Motohashi Hayato	Matter density fluctuation and massive neutrinos in f(R) gravity
Gu Je-An	f(R) Modified Gravity and its Cosmological and Solar- System Tests
Bamba Kazuharu	Thermodynamics in modified gravity
Figueroa Daniel	New Aspects of Phase Transitions in the Early Universe
Tawfik Abdel Nasser	Thermodynamically Consistent Equations of State for Viscous Early Universe
Bo-ot Luis Maria	Two and Three-Dimensional Self-gravitating System with an Initial Singularity
Menegoni Eloisa	New Cosmological Constraints on Variation of Fundamental Constants
Maity Debaprasad	Cosmological Behavior of a Parity and Charge-Parity Violating Varying Alpha Theory

Parallel session C

Gong Jinn-Ouk	Loop corrections to the correlation functions
Rajantie Arttu	Non-Gaussianity from preheating
Chongchitnan Sirichai	High-Order Non-Gaussianity and its Effects on Cluster and Void Abundances
Flauger Raphael	Resonant Non-Gaussianity
Bartolo Nicola	Some novel results on non-Gaussianity from single- field inflation and on anisotropic features
Musso Marcello	Improved non-Gaussian Mass Functions for Halos and Voids
Nishimichi Takahiro	Effect of Non-Gaussianity from Multi-Field Models on the Large Scale Structure
Desjacques Vincent	Searching for local cubic-order non-Gaussianity with galaxy clustering
Pitrou Cyril	Non-Gaussianity from non-linear effects in CMB
Takahashi Tomo	Classifying Models of Large non-Gaussianity
Takamizu Yuichi	Beyond delta-N formalism for a single scalar field
Kobayashi Takeshi	Non-Gaussianity from Lifshitz Scalar
Watanabe Yuki	Primordial non-Gaussianity from multi-field inflation re-examined
Izumi Keisuke	Trispectrum from Ghost Inflation
Mizuno Shuntaro	Trispectrum estimator in equilateral type non- Gaussian models

Parallel session D

Kohri Kazunori	Long-lived charged SUSY particles and cosmology
Nakayama Kazunori	Inflation from a Supersymmetric Axion Model
Gumrukcuoglu Emir	Phenomenological signature from anisotropic inflation
Scardigli Fabio	Pre-inflation matter era and the CMB power spectrum
Chinone Yuji	Measurement of Cosmic Microwave Background Polarization Power Spectra from QUIET Q-Band Data
Zhan Hu	Rees-Sciama effect of super structures
Easson Damien	Fundamental physics of inflation and CMB
Finelli Fabio	CMB Constraints on a Stochastic Background of Primordial Magnetic Fields
Ng Kin-Wang	Towards understanding large-scale CMB anomalies
Melchiorri Alessandro	Constraining Fundamental Physics with Future CMB Experiments
Ringeval Christophe	First CMB constraints on the inflationary reheating temperature
Saikawa Ken'ichi	Gravitational waves from collapsing domain walls
Hiramatsu Takashi	Gravitational waves from Q-balls in gravity mediation
Kamada Kohei	Fate of Q balls in thermal potential
Yajnik Urjit	Cosmology with new symmetries at the TeV scale

9月28日(火)

9:00 – 12:50

Joanna Dunkley	Cosmology from ACT and WMAP
Masashi Hazumi	Probing Inflation with CMB Polarization Measurements - QUIET, POLAR-BEAR and beyond
Robert Brandenberger	New Observational Windows for Searching for Cosmic Strings
Michael Murphy	A new result on cosmological variation of the fine structure constant
Keiichi Umetsu	Probing the Distribution of Mass and Baryons in Clusters of Galaxies

14:10 – 17:20

- Francis Bernardeau The development of gravitational instabilities
 Leonardo Senatore Inflation and its signatures
 Nemanja Kaloper Large Field Inflation, Ignobly
 Eva Silverstein Comments on Tensor Modes from the Inflationary Era
 Poster Discussion over Beer

9月29日(水)

9:00 – 11:20

- Jihn E. Kim String compactification toward MSSM
 Ewan Stewart A minimal supersymmetric cosmological model
 Fuminobu Takahashi Higgs Chaotic Inflation with a Running Kinetic Term
 Hitoshi Murayama SuMIRe: a new window to the dark energy
 Excursion

9月30日(木)

9:00 – 12:50

- Pisin Chen The Cosmological Constant Problem and its Possible Solutions
 Satoshi Miyazaki Subaru wide field survey to probe dark matter distribution and nature of dark energy
 Alexei Starobinsky Cosmology with $f(R)$ gravity
 Zhi-Zhong Xing Neutrino Mixing and Cosmic Flavor Problems
 Pierre Sikivie Bose-Einstein condensation of dark matter axions

12:50 – 17:50

- Parallel Sessions
 Banquet

Parallel session E

- Geng Chao-Qiang Neutrino Masses, Leptogenesis and Decaying Dark Matter
 Kadota Kenji The effects of SUSY seesaw on the LHC and dark matter
 Chen Chuan-Ren The variant axion models at the LHC
 Drewes Marco Quantum Mechanics of Leptogenesis
 Sekiguchi Toyokazu Improved estimation of spectrum of axion radiation from cosmological axionic strings
 Inoue Yoshizumi Tokyo axion experiment
 Bell Nicole Dark Matter Annihilation with Electroweak Bremsstrahlung
 McDonald John Baryomorphosis: Relating the baryon asymmetry to the "WIMP Miracle"
 Choi Ki Young Three body decay of Gravitino and the indirect detection

Parallel session F

Sefusatti Emiliano	Testing the initial conditions with the large-scale structure
Natarajan Aravind	Distinguishing standard reionization from dark matter models
Pietroni Massimo	Halo bias and velocity dispersion via the Time Renormalization Group
Tashiro Hiroyuki	The cross-correlation between kSZ and 21 cm fluctuations from EoR
Namikawa Toshiya	Magnification effect on the galaxy-CMB lensing cross-correlation
Ichiki Kiyotomo	A spherical collapse model with massive neutrinos
Chang Feng-Yin	Landau Damping of Baryon Structure Formation in the Post Reionization Epoch
Schmidt Fabian	Clustering and velocities of dark matter halos with primordial non-Gaussianity
Taruya Atsushi	Baryon Acoustic Oscillations in 2D: modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory
Yoshida Naoki	New insight on the nature of dark matter from cosmological simulations

Parallel session G

Kinney William	Inflation, Cyclic Cosmology, and the Horizon
Martin Jerome	Collapse of small-scale density perturbations during reheating and generation of gravitational waves
Kobayashi Tsutomu	G-inflation
Antusch Stefan	Particle physics models of inflation in supergravity: New developments
Clesse Sebastien	Hybrid inflation along waterfall trajectories
Cluzel Emeline	Brane Bremsstrahlung in DBI Inflation
Seahra Sanjeev	Polymer inflation
Steinwachs Christian	The Higgs Field as an Inflation
Lerner Rose	Detectability of Higgs inflation and its variants
Germani Cristiano	New Higgs Inflation

Parallel session H

Volkas Raymond	The standard model plus gravity with classical scale invariance
Kim Sang Pyo	Effective Action for Gravity and Dark Energy
Mukohyama Shinji	Cosmological implications of gravity at a Lifshitz point
Peter Patrick	Cosmological Two-Stream Instability
Taanila Olli	The TeV-mass Curvaton
Pandolfi Stefania	Harrison-Z'eldovich primordial spectrum is consistent with observations
Naruko Atsushi	second order Boltzmann equation with polarization
Urakawa Yuko	Implications of genuine gauge-invariant perturbation
Gerstenlauer Mischa	Inflationary Infrared Divergences: Geometry of the Reheating Surface vs. δN Formalism
Padilla Antonio	Bigalileon theory

10月1日(金)

9:00 – 12:50

Hiroshi Ogawa	Status of XMASS experiment
Shoji Asai	The Latest status of LHC
Koichi Hamaguchi	Probing Reheating Temperature at the LHC with Long-Lived Staus
Esteban Roulet	Status of Ultra High Energy Cosmic Rays
Danny Marfatia	Dark matter and pulsar signals for PAMELA, Fermi and Atmospheric Cherenkov Telescopes

14:10 – 15:30

Laura Covi	Gravitino Dark Matter and the SUSY breaking spectrum
Gary Steigman	Big Bang Nucleosynthesis Confronts Cosmology And Particle Physics Conclusion

ポスター発表

Goto Hajime	Off-center CMB polarization anisotropy in the local void model
Inoue Kaiki Taro	Evidence of Quasi-linear Super-Structures in the Cosmic Microwave Background and Galaxy Distribution
Liu Guo Chin	CMB Polarization-assisted Correction for the Integrated Sachs-Wolfe Effect
Makiya Ryu	Contribution from star-forming galaxies to the cosmic gamma-ray background radiation
Nakashima Masahiro	CMB Polarization in Einstein-Aether Theory
Saito Keiki	Off-center CMB anisotropies in the local void model
Shiraishi Maresuke	The CMB bispectrum from vector-mode perturbations induced by primordial magnetic fields
Urrestilla Jon	Constraining cosmic defects with CMB
Yamauchi Daisuke	Analytical model for CMB temperature angular power spectrum from cosmic (super-)strings
Bulow Thomas Tram	Properties of Sommerfeld Enhanced DM
Kashiyama Kazumi	White Dwarf Pulsars as Possible Electron-Positron Factories
Nagata Natsumi	Gluon contribution to the dark matter direct detection
Park Jong-Chul	Dirac gaugino dark matter
Rydbeck Sara	Early search for supersymmetric dark matter at the LHC
Bjaelde Ole	Dark Energy and the Spherical Collapse; a Scale- dependent Approach
Ichinose Shoichi	Renormalization Group Flow and the Cosmological Constant Problem
Keum Yong-Yeon	Constraining Dark-Energy Models with SNe Ia and Gamma-Ray Burst data
Luo Ling-Wei	Determining the Free Parameters in Viable $f(R)$ Models
Martins Carlos	Probing dark energy with varying fundamental couplings
Morikawa Masahiro	Accelerations and dissipative reduction of vacuum energy in BEC cosmology
Nunes Nelson	Lumps in neutrino dark energy
Simpson Fergus	Dark Scattering

Sumitomo Yoske	Axion Monodromy Quintessence
Urban Federico	The QCD nature of Dark Energy: cosmological signatures and applications
Wakebe Ryo	Accelerating Cosmologies in Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Gravity in the String Frame
Bambi Cosimo	Testing the bound $a_* < 1$ for astrophysical black hole candidates
Darabi Farhad	An expanding 4D universe in a 5D Kaluza-Klein cosmology with higher dimensional matter
Ishidoshiro Koji	Observational Upper Limit on a Gravitational Wave Background at 0.2 Hz with a Torsion-bar Antenna
Jackson Mark	Observing Quantum Gravity in the Sky
Lee Chung-Chi	Cosmological evolution in exponential gravity
Lee Wolung	Primordial magnetic fields by cosmic acceleration
Mimoso Jose Pedro	Scalar-tensor cosmologies: attractor mechanisms and dualities
Minamitsuji Masato	Dynamical solutions in the Nishino-Salam-Sezgin model
Misonoh Yosuke	Horava-Lifshitz gravity, cosmology, singularity avoidance
Niu Yuezhen	Cosmological Restrictions deduced to avoid a Black Hole Paradox
Nozawa Masato	Black holes asymptotic to the Friedmann universe in fake supergravity
Reijonen Vappu	On stars in $f(R)$ gravity models
Tippett Benjamin K.	Quasinormal Modes in Braneworld Cosmology with A bulk black hole
Torii Takashi	Black Holes in Einstein-Gauss-Bonnet-Dilaton System
Wang Chih-Hung	Torsion effects in the early Universe
Yamada Yuta	Gravitational Collapse in Five-dimensional Spacetime
Akhshabi Siamak	Generalized Uncertainty Principle and Inflation Parameters
Baumann Jochen	Gauge Non-Singlet (GNS) Inflation in SUSY GUTs
Halter Sebastian	Matter Inflation and Heisenberg Symmetry in Heterotic String Theory
Koh Seoktae	Hybrid inflation with a non-minimally coupled scalar field
Kuehnel Florian	Large-Scale Suppression from Stochastic Inflation
Miyamoto Koichi	Kahler moduli double inflation
Rubio Javier	Preheating in Higgs-Dilaton inflation
Wang I-Chin	Trapping effect on inflation
Watanabe Masaaki	Anisotropic inflation and its imprints on the CMB
Amin Mustafa	Lumps and bumps in the early universe
Demozzi Vittoria	Magnetic fields from inflation?
Kinoshita Shunichiro	Non-equilibrium Condensation Process in a Holographic Superconductor
Kuroyanagi Sachiko	Possible determination of the reheating temperature by direct detection of the inflationary gravitational wave background
Nagao Hiroaki	Non-perturbative Corrections to Particle Production from Coherent Oscillation
No Jose Miguel	Bubble Growth and Energy Budget in Cosmological First order Phase Transitions
Rosas-Lopez Igmarr	Antisymmetric field in string gas cosmology
Sugimura Kazuyuki	The effect of multi-field interaction on false vacuum decay
Chantavat Teeraparab	Cosmological models constraint with galaxy power spectrum
Dai De-Chang	Bulk flow and supernova
Fukunaga Kensuke	Density Probability Distribution Function of SDSS
Hamann Jan	Supernova anisotropies

Kasuya Shinta	New observable for gravitational lensing effects during transits
Kayo Issha	Spherical Harmonics Analysis of the SDSS Galaxies
Marra Valerio	Stochastic modelling of weak lensing and parameter extraction from SNe catalogues
Masaki Shogo	Halo Occupation Distribution of Massive Galaxies since $z=1$
Mattsson Teppo	On the role of shear in cosmological averaging
Nishizawa Atsushi	Direct measurement of Hubble parameter with gravitational-waves
Saito Shun	Beyond Baryon Acoustic Oscillations from galaxy power spectrum
Skovbo Katrine	Analytical Approaches to Non-Linear Structure Formation
Valkenburg Wessel	Testing the Void against Cosmological data: fitting CMB, BAO, SN and H_0
Hirai Shiro	Non-Gaussianity and finite length inflation
Kim Soo A	Non-gaussianity in axion Nflation models
Lam Tsz Yan	Peculiar velocity PDF and the signature of primordial non-Gaussianity
Rangarajan Raghavan	Non-gaussian fluctuations of the inflaton and constancy of correlations of zeta
Rossi Graziano	Statistical techniques for detecting primordial non-Gaussianity
Takeuchi Yoshitaka	Constraints on primordial non-Gaussianity from galaxy-CMB lensing cross correlation
Yokoyama Shuichiro	Use of delta N formalism - Difficulties in generating large local-type non-Gaussianity during inflation
Bandyopadhyay Priyotosh	Displaced Higgs production in supersymmetric type III seesaw at the LHC
Ferrer Francesc	Astrophysical constraints on new dark gauge bosons
Ishida Hiroyuki	Flavour Mixing of Neutrinos and the Baryon Asymmetry of the Universe
Jeong Kwang Sik	Thermal inflation and baryogenesis in heavy gravitino scenario
Kiessig Clemens	Fermionic Quasiparticles in Leptogenesis
Lund Tina	Neutrino Signatures of the Supernova Standing Accretion Shock Instability
Sejersen Riis Anna	Detecting sterile neutrinos with KATRIN like experiments
Tuominen Kimmo	Cold and hot phases of Technicolor
Bastero-Gil Mar	Non-linear metric perturbation enhancement of primordial gravitational waves
Carney Daniel	Is the Bunch-Davies state necessary?
Dufaux Jean-Fran Mois	Gravitational Waves from Gauge Fields and Cosmic Strings at Preheating
Maeda Satoshi	The power spectrum of the magnetic fields generated by the second-order perturbations during the pre-recombination era
Matsuda Tomohiro	Dissipative curvatons and weak inflation
Nakamura Kouji	Second-order gauge-invariant cosmological perturbation theory — Recent development and
Ohsumi Yuji	Entanglement of the primordial fluctuation
Singh Naveen Kumar	Implication Of Scale Invariance In Cosmology

4.7 The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010

日時：2010年10月7日(木)–10月8日(金)

場所：カリフォルニア工科大学カーヒルセンター

プログラム

10月7日(木)

8:50 – 12:50

Richard Ellis	Welcome, logistics
Mark Sullivan	Dark Energy Constraints from Type Ia Supernova
Catherine Heymans	CFHTLenS: Recent progress by the CFHTLS Lensing Survey
David Weinberg	BOSS and BAO as Probes of Cosmic Acceleration
Tom Crawford	SPT cluster program
Neelima Sehgal	Cosmology from Sunyaev-Zel'dovich Galaxy Clusters Detected with ACT
Rich Kron	The Dark Energy Survey
Jason Rhodes	HALO: The High Altitude Lensing Observatory

14:00 – 17:45

Masahiro Takada	Science cases with SuMIRe HSC/PFS
Steve Kahn	Large Synoptic Survey Telescope (LSST)
David Schlegel	BigBOSS proposal at the Mayall Telescope
John Peacock	BAO and RSD with Subaru's PFS
	Panel discussion

10月8日(金)

9:00 – 12:00

Alexandre Refregier	The Euclid mission
Chris Hirata	JDEM-Omega post-Astro2010
Saul Perlmutter	SNe from WFIRST
Gary Bernstein	Achieving the potential of weak lensing surveys
	Panel Discussion on Space Programs

13:30 – 18:00

Hitoshi Murayama	Update of SuMIRe collaboration
1 Satoshi Miyazaki	Hyper Suprime-Cam Project Status
Mike Seiffert	PFS Design and Progress
Masami Ouchi	HSC Ultradeep Survey
Wako Aoki	Galactic archaeology with SuMIRE PFS
Masamune Oguri	Stacked cluster weak lensing
Jun'ichi Yokoyama	w_{eff} and m_{nu} in viable $f(R)$ gravity
Atsushi Taruya	Modeling and forecasting BAO from multipole expansion
Takahiko Matsubara	Biasing
Kazuhiro Yamamoto	Multipole power spectrum analysis and test of modified gravity

4.8 ビッグバン宇宙国際研究センター第七回公開講演会：「ビッグバンセンタークリスマス講演会」

日時：2010年12月22日(水)

場所：東京大学理学部1号館小柴ホール

プログラム

14:30 - 16:30

樽家 篤史 「宇宙のものさし、バリオン音響振動」

茂山 俊和 「地球と恒星の密接な関係」

平賀 純子 「X線で観る宇宙」

5 プレプリント・リスト

RESCEU-38/10

Submillimeter Array Identification of the Millimeter-selected Galaxy SSA22-AzTEC1: A Protoquasar in a Protocluster? Tamura, Y.; Iono, D.; Wilner, D. J.; Kajisawa, M.; Uchimoto, Y. K.; Alexander, D. M.; Chung, A.; Ezawa, H.; Hatsukade, B.; Hayashino, T.; Hughes, D. H.; Ichikawa, T.; Ikarashi, S.; Kawabe, R.; Kohno, K.; Lehmer, B. D.; Matsuda, Y.; Nakanishi, K.; Takata, T.; Wilson, G. W.; Yamada, T.; Yun, M. S. [arXiv:1010.1267 (astro-ph)]ApJ 724 (2010) 1270-1282

RESCEU-37/10

The AMANOGAWA-2SB Galactic Plane SurveyI. Data on the Galactic Equator Yoda, Takahiro; Handa, Toshihiro; Kohno, Kotaro; Nakajima, Taku; Kaiden, Masahiro; Yonekura, Yoshinori; Ogawa, Hideo; Morino, Jun-Ichi; Dobashi, Kazuhito; [arXiv:1101.3547 (astro-ph)]PASJ 62 (2010) 1277-1289

RESCEU-36/10

Breakdown of Kennicutt-Schmidt Law at Giant Molecular Cloud Scales in M33 Onodera, Sachiko; Kuno, Nario; Tosaki, Tomoka; Kohno, Kotaro; Nakanishi, Kouichiro; Sawada, Tsuyoshi; Muraoka, Kazuyuki; Komugi, Shinya; Miura, Rie; Kaneko, Hiroyuki; Hirota, Akihiko; Kawabe, Ryohei [arXiv:1009.1971 (astro-ph)]ApJ 722 (2010) L127-L131

RESCEU-35/10

Deep 1.1mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE - I. Source catalogue and number counts Scott, K. S.; Yun, M. S.; Wilson, G. W.; Austermann, J. E.; Aguilar, E.; Aretxaga, I.; Ezawa, H.; Ferrusca, D.; Hatsukade, B.; Hughes, D. H.; Iono, D.; Giavalisco, M.; Kawabe, R.; Kohno, K.; Mauskopf, P. D.; Oshima, T.; Perera, T. A.; Rand, J.; Tamura, Y.; Tosaki, T.; Velazquez, M.; Williams, C. C.; Zeballos, M. [arXiv:1003.1768 (astro-ph)]MNRAS 405 (2010) 2260-2278

RESCEU-34/10

The far-infrared/submillimeter properties of galaxies located behind the Bullet cluster Rex, M.; Rawle, T. D.; Egami, E.; P rez-Gonz lez, P. G.; Zemcov, M.; Aretxaga, I.; Chung, S. M.; Fadda, D.; Gonzalez, A. H.; Hughes, D. H.; Horellou, C.; Johansson, D.; Kneib, J.-P.; Richard, J.; Altieri, B.; Fiedler, A. K.; Pereira, M. J.; Rieke, G. H.; Smail, I.; Valtchanov, I.; Blain, A. W.; Bock, J. J.; Boone, F.; Bridge, C. R.; Clement, B.; Combes, F.; Dowell, C. D.; Dessauges-Zavadsky, M.; Ilbert, O.; Ivison, R. J.; Jauzac, M.; Lutz, D.; Omont, A.; Pell R., Rodighiero, G.; Schaerer, D.; Smith, G. P.; Walth, G. L.; van der Werf, P.; Werner, M. W.; Austermann, J. E.; Ezawa, H.; Kawabe, R.; Kohno, K.; Perera, T. A.; Scott, K. S.; Wilson, G. W.; Yun, M. S. [arXiv:1005.3821 (astro-ph)]A & A 518 (2010) L13

RESCEU-33/10

Dense and Warm Molecular Gas and Warm Dust in Nearby Galaxies Matsushita, Satoki; Kawabe, Ryohei; Kohno, Kotaro; Tosaki, Tomoka; Vila-Vilar , Baltasar [arXiv:1002.1853 (astro-ph)]PASJ 62 (2010) 409-421

RESCEU-32/10

Probing Explosion Geometry of Core-collapse Supernovae with Light Curves of the Shock Breakout Suzuki, Akihiro; Shigeyama, Toshikazu [arXiv:1006.1705 (astro-ph)]

RESCEU-31/10

Boron Synthesis in Type Ic Supernovae Nakamura, Ko; Yoshida, Takashi; Shigeyama, Toshikazu; Kajino, Toshitaka [arXiv:1007.0212 (astro-ph)]

RESCEU-30/10

CMB Polarization in Einstein-Aether Theory *Masahiro Nakashima and Tsutomu Kobayashi*

RESCEU-29/10

Improved estimation of radiated axions from cosmological axionic strings *T. Hiramatsu, M. Kawasaki, T. Sekiguchi, M. Yamaguchi, and J. Yokoyama*

RESCEU-28/10

Higgs G-inflation *Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-27/10

Tracing the redshift evolution of Hubble parameter with gravitational-wave standard sirens *A. Nishizawa, A. Taruya, and S. Saito [arXiv:1011.5000 (astro-ph)]*

RESCEU-26/10

Full nonlinear growing and decaying modes of superhorizon curvature perturbations *Yu-ichi Takamizu and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-25/10

Auxiliary fields representation for modified gravity models *D. C. Rodrigues, F. de O. Salles, I. L. Shapiro and A. A. Starobinsky*

RESCEU-24/10

Embedding $(R + R^2)$ -inflation into supergravity *S. V. Ketov and A. A. Starobinsky*

RESCEU-23/10

Cosmological constant from decoherence *C. Kiefer, F. Queisser and A. A. Starobinsky*

RESCEU-22/10

The effect of varying sound velocity on primordial curvature perturbations *M. Nakashima, R. Saito, Y. Takamizu and J. Yokoyama*

RESCEU-21/10

Probing dark energy and neutrino mass from upcoming lensing experiments of CMB and galaxies *Toshiya Namikawa, Shun Saito and Atsushi Taruya*

RESCEU-20/10

Primordial Black Hole as a Source of the Boost Factor *Ryo Saito and Satoshi Shirai*

RESCEU-19/10

Affleck-Dine baryogenesis with modulated reheating *Kohei Kamada, Kazunori Kohri and Shuichiro Yokoyama*

RESCEU-18/10

G-inflation: inflation driven by the Galileon field *Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1008.0603 (hep-th)]*

RESCEU-17/10

Fate of thermal log type Q balls *Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta Kasuya and Masahide Yamaguchi [arXiv:1007.4235 (hep-ph)]*

RESCEU-16/10

SDSS J094604.90+183541.8: A GRAVITATIONALLY LENSED QUASAR AT $z=4.8$ *Ian D. McGreer, Patrick B. Hall, Xiaohui Fan, Fuyan Bian, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Michael A. Strauss, Donald P. Schneider, and Kara Farnsworth [arXiv:1002.3832 (astro-ph)]* AJ, 140, 370

RESCEU-15/10

Baryon Acoustic Oscillations in 2D: Modeling Redshift-space Power Spectrum from Perturbation Theory *Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi, and Shun Saito [arXiv:1006.0699 (astro-ph)]* Phys.Rev.D

RESCEU-14/10

Neutrino Mass Constraint with SDSS LRG Power Spectrum and Perturbation Theory *Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya [arXiv:1006.4845 (astro-ph)]* Phys.Rev.Lett.

RESCEU-13/10

The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. IV. Statistical Lens Sample from the Fifth Data Release *Inada, Naohisa and the SDSS Quasar Lens Search team* [arXiv:1005.5570 (astro-ph)]AJ, 140, 403

RESCEU-12/10

Oscillating Universe in Horava-Lifshitz Gravity *Kei-ichi Maeda, Yosuke Misonoh, Tsutomu Kobayashi* [arXiv:1006.2739 (hep-th)]

RESCEU-9/10

Matter power spectrum in $f(R)$ gravity with massive neutrinos *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1005.1171 (astro-ph)]Prog.Theor.Phys.124:541-546,2010

RESCEU-8/10

Can a primordial black hole or wormhole grow as fast as the universe? *B.J. Carr, Tomohiro Harada, and Hideki Maeda*

RESCEU-7/10

Do evaporating 4D black holes form photospheres and/or chromospheres? *J.H. MacGibbon, B.J. Carr, and D.N. Page*

RESCEU-6/10

Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations beyond delta N formalism *Yu-ichi Takamizu, Shinji Mukohyama, Misao Sasaki and Yoshiharu Tanaka*

RESCEU-5/10

Phantom boundary crossing and anomalous growth index of fluctuations in viable $f(R)$ models of cosmic acceleration *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1002.1141 (astro-ph)]Prog.Theor.Phys.123:887-902,2010

RESCEU-4/10

Tokyo axion helioscope experiment *Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto, M. Minowa* [arXiv:1002.0468 (astro-ph)]PoS(idm2008)067

RESCEU-3/10

Phantom behaviour and growth index anomalous evolution in viable $f(R)$ gravity models *Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky and Jun'ichi Yokoyama* [arXiv:1002.0462 (astro-ph)]Proceedings of 19th Workshop in General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG19)

RESCEU-2/10

Multiple Main Sequence of Globular Clusters as a Result of Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis *T. Moriya and T. Shigeyama* [arXiv:1001.1790 (astro-ph)]Physical Review D in press

RESCEU-1/10

Analytic Description of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets: Cross-Correlation Method and Comparison with Simulated Data *T.Hirano, Y.Suto, A.Taruya, N.Narita, B.Sato, J.A.Johnson, and J.N.Winn* [arXiv:0910.2365 (astro-ph)]Astrophys. J. 709 (2010) 458-469

II

**2010年度
プロジェクト別
研究活動報告**

1 初期宇宙進化論

——基本法則に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (横山・須藤・樽家)

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

初期宇宙 相対論

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

観測的宇宙論

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。特に、われわれはダークエネルギーと太陽系外惑星を二つの大きなテーマとして研究に取り組んでいる。すなわち、すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、同時に太陽系外惑星探査の新たな地平を

切り開く研究を展開している。具体的には、ダークエネルギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の重力進化と銀河のクラスタリング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロ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

DBI インフレーションの確率過程による記述

超弦理論に基づくインフレーションモデルの一つである DBI インフレーションは、インフレーションを起こすスカラー場に対応する自由度が高次元空間でのブレインの位置という幾何学的な意味を持つため、その変域が有限領域に制限される。本研究ではこのような状況での stochastic inflation の定式化を行い、それに基づいてスカラー場の統計分布関数を求めた。[1]

超対称の破れに起因するインフレーション模型

素粒子標準模型を越えた物理として現在有望視されている超対称性理論は、暗黒物質の候補を与えるなど、宇宙論においても重要な役割を果たしうる。現象論的には、超対称粒子が未だ発見されていないことから、超対称は「隠れたセクター」において破れ、その効果が伝わることによって超対称粒子が電弱スケール程度の質量を獲得していると考えられている。現在まで多数の超対称の破れの模型が提案されているが、我々は、その中でも direct gauge mediation 模型と呼ばれる模型に注目し、この模型の中にインフレーションを起こす機構が含まれていることを発見した。そして、パラメータを適切に選べば、観測と矛盾しない宇宙の熱史が実現し、この場合グラビティーノが暗黒物質となることを示した。[2, 65]

アフレック・ダイン機構と Q ボール

超対称性理論に現れるスカラー場のポテンシャルの平坦方向のダイナミクスを利用したアフレック・ダイン機構は、宇宙の物質反物質非対称生成機構の有力候補のひとつであり、それに付随して生成される、Q ボールと呼ばれるスカラー場が空間的に局在した非位相的ソリトンは、宇宙論において様々な興味深い現象を提供する。我々は、熱的ポテンシャルでアフレック・ダイン機構が引き起こされ、Q ボールが生成される場合、今まで知られていなかったタイプ

の“thin-wall”タイプの Q ボールが現れることを数値的に確認した。[3, 41, 63, 64, 120, 134, 147, 148] この場合、 Q ボール生成時に放出される重力波の大きさは非常に小さく、重力波観測の将来計画においても観測は難しい。[133] また、インフレーション以外の宇宙の初期密度由来の起源として有望なメカニズムである modulated reheating scenario とアフレック・ダイン機構は大きなバリオン等曲率揺らぎをつくってしまいやすく観測と矛盾するという点で相性が悪いことが知られていたが、熱的ポテンシャルでアフレック・ダイン機構が引き起こされる場合にバリオン等曲率揺らぎを抑えることのできるパラメータ空間が存在することを示した。[4, 113]

膨張宇宙におけるアキシオンストリングの進化

膨張宇宙におけるグローバルストリングの進化を、複素スカラー場の運動方程式を格子上で直接解くことによって数値解析した。その結果、放射優勢宇宙においてストリングがスケール解に従って進化することを確認し、スケールパラメータの値を $\xi = 0.87 \pm 0.14$ になることを明らかにした。また、ストリングから放出されるアキシオンの運動量のスペクトルを解析し、かつて山口・横山が得た結果が正しいことをより大がかりなシミュレーションによって確認した。その結果、アキシオンのエネルギースケールに対する上限として $f_a \leq 3 \times 10^{11} \text{ GeV}$ という値を得た。[5]

ガリレオン場を用いたインフレーションモデルの提案

作用としては高階微分理論のようであるが、2階の場の方程式をもつスカラー場のことを(一般化された)ガリレオン場と呼ぶ。[121, 150] ガリレオン場によるインフレーションモデルを考案し、G-inflation と名付けた。[6, 66, 67, 114] このモデルは、これまで提案された単一場によるインフレーションモデルを含みながら、それらをさらに一般化したものにとらえることができる。G-inflation 模型においては素粒子標準模型のヒッグス粒子をインフラトンとするインフレーションを起こすことが可能である。[7] また、G-inflation 模型における揺らぎの非ガウス性の評価もおこなった。[8]

ホジャバ重力における振動宇宙

ホジャバ重力は、局所ローレンツ不変性を捨てる代わりに次数勘定繰り込み可能性を実現させた理論で、近年注目されている。この重力理論のもとで、宇宙論解の振る舞いを網羅的に調べ、振動宇宙解などの興味深い解が現れることを発見した。[9, 10]

インフレーション中の音速変化と揺らぎのスペクトル

現在宇宙に存在する揺らぎはすべてインフレーション中に生成されたと考えられている。インフレーション

を引き起こすスカラー場はインフラトンと呼ばれるが、インフラトンの運動項が canonical な場合、その揺らぎの伝搬する速度(音速)は一定で光速に等しい。ところが近年活発に議論されている超弦理論に基づくインフレーションモデルでは、しばしば non-canonical な運動項を持ったインフラトンが登場する。この場合、音速は光速とは異なる値を取り、さらに一般の場合には音速が一定ではなく、何らかの場の運動に応じて時間変化する可能性が生じる。われわれは、音速が変化する場合の揺らぎの発展を詳細に調べた。その結果、音速の変化が簡単な関数形で書ける場合には、生成される揺らぎの発展方程式を解析的に解くことができ、そのパワースペクトルに従来のものとは異なる振動が現れることを明らかにした [11, 74]。

アインシュタイン・エーテル理論と宇宙背景放射 B モード偏光

宇宙背景放射(CMB)の偏光、特にパリティが奇の成分として定義されるBモード偏光、は初期宇宙起源重力波の痕跡であるとして大変注目を集めている。しかしながら、Bモードを生成する理論としては重力波以外にはほとんど知られておらず、Bモード検出が間近に迫った現状を踏まえると、理論面では大変不満の残る状況である。ところで、CMBのBモード偏光を扱う理論はすでに完成しているが、その理論によると、重力波(テンソルモード)起源のものよりも、ベクトルモードを起源とする方がより大きな振幅のBモードが生成される。しかし、通常の一般相対性理論ではベクトルモードは宇宙の膨張に伴って減衰し、宇宙初期に存在していたとしても現在はほとんど観測できないほどの大きさになってしまったため、ベクトルモード起源のBモード変更はこれまであまり扱われてこなかった。

我々は、近年注目を集めつつある重力の修正理論として、重力セクターにベクトルの自由度を加えた「アインシュタイン・エーテル理論」に着目した。この理論では、エーテルと呼ばれるベクトル場の揺らぎが地平線を超えたスケールで成長するため、観測的には大変興味深い。我々はエーテルベクトルモード起源のBモードを解析的な手法と数値的な手法を駆使して詳細に調べ、適当な初期条件の下では初期重力波起源のBモードを凌駕する振幅が達成されることを確認した [44, 75, 76, 115, 135]。

重力波観測によるブラックホール暗黒物質の探索

原始ブラックホールは宇宙初期に存在した大振幅の密度揺らぎが重力崩壊を起こすことによって形成されたブラックホールである。原始ブラックホールはその形成時期によって幅広い範囲の質量を持つことが可能であり、いまだその起源のわかっていない暗黒物質や中間質量ブラックホールの起源であるとされている。前年度の研究では、原始ブラックホールを生成する初期密度揺らぎのスペクトルが非常に

鋭いピークを持っていると仮定して解析を行い、宇宙重力波干渉計やパルサータイミングの観測を用いて暗黒物質や中間質量ブラックホールの起源に迫ることができることを示した。今年度の研究では、この結果をスペクトル幅が広い場合にも拡張し、観測される重力波は振幅は小さくなるものの、依然として宇宙重力波干渉計などで観測可能なレベルであることを示した。[12, 57]

原始ブラックホールによる宇宙線陽電子超過の説明

近年の PAMELA 衛星の観測によって、予想を上回る量の宇宙線陽電子の飛来が報告されている。本研究では、この陽電子過剰が原始ブラックホールが WIMP と呼ばれる素粒子的暗黒物質を集積し、対消滅確率を増幅することによって説明可能であることを示した。さらに、この陽電子過剰を説明する原始ブラックホールがガンマ線の点源として観測可能かを調べ、WIMP の性質や原始ブラックホールの性質によっては将来の地上観測によって観測可能であることを示した。[13, 57, 79, 136]

重いスカラー場による初期密度揺らぎの増幅

観測されている宇宙背景放射の温度揺らぎスペクトルはほとんどスケール依存性を持たない初期密度揺らぎのスペクトルによってよく説明することができる。しかしながら、より微細な構造に着目すると、観測される温度揺らぎスペクトルには、スケール不変な初期密度揺らぎのスペクトルから予言される結果からの小さなずれが見つかっている。本研究では、重いスカラー場を導入し、インフレーション中に起きるその振動と初期密度揺らぎの間の共鳴現象によって生み出されるスペクトルの微細構造を調べた。今年度の研究では、共鳴現象によって生じるピークの形状を評価し、それと導入したスカラー場の質量、結合定数、崩壊率の関係を調べた。[45, 77, 78, 116, 123]

非ガウス性を大きく生み出すモデルの分類

最近の観測精度の向上に伴い、CMB 温度揺らぎの四点相関が観測的に意味を持ち始めてきており、にわかに四点相関の理論的および観測的研究が、活気づいている。そこで本研究では、局所型の非ガウス性に限って、これまでに知られている大きな非ガウス性を生み出すモデル全てに対して、網羅的に三点相関と四点相関を特徴付ける 3 個の非線型パラメータの表式を導き、3 パラメータ間に成り立つ関係式も導いた。その結果、異なるモデルは異なる関係式を満たすことが分かり、その関係式を使えば、初期宇宙のモデルを強く制限できることを示した。[14]

δN -formalism を超えた三点相関計算の新たな定式化

インフラトンの正体を探る上で、原始曲率揺らぎの Non-Gaussianity (非線形性) を探ることが重要であり、とくに宇宙の地平線を超える長波長揺らぎの非線形成長が鍵となる。世界中の研究者が現在用いている δN -formalism は、長波長展開の最低次の手法であるが、一般にインフレーション中に slow-roll 条件が破れと、長波長展開の次のオーダーで結果は劇的に変化する。そこでこの効果まで取り入れた長波長高次展開の非線形宇宙論的摂動論として我々は、Beyond- δN 手法という新たな定式化を完成させた。この手法が強力な点は従来扱うことができなかった揺らぎの時間発展をきちんと取り入れたことである。これによって、インフラトンの新たな情報としてポテンシャルのとびや、slow-roll 条件の破れといった物理を観測的に明らかにできる可能性が期待される。[15, 16, 17, 82, 83, 84, 104, 117, 137] とくに CMB の観測でみえているスペクトルの feature に関して、音速を変化させる理論モデルを提案した。[?]

$f(R)$ 重力理論による加速膨張宇宙モデル

標準宇宙論では現在の宇宙の加速膨張を担うダークエネルギーは宇宙定数によって説明される。しかし観測により制限されるダークエネルギーのエネルギー密度は、理論的に推定される値との間に 10^{120} もの隔たりがある。このような宇宙定数問題を回避するために、修正重力理論を用いて宇宙の加速膨張を説明する研究が近年活発化している。われわれは $f(R)$ 修正重力理論というモデルにおいて、実効的ダークエネルギーの状態方程式の時間変化と、物質密度揺らぎの時間およびスケール依存性を数値シミュレーションにより調べた。[18] また、物質密度揺らぎに対する $f(R)$ 重力理論の効果を考慮した場合、ニュートリノ質量の制限も変更を受けることを示した。[19, 43, 68, 69, 70, 71, 73, 103, 122, 151, 152, 153] さらに、実効的ダークエネルギーの状態方程式の時間発展の計算を進め、その将来的な振る舞いからモデルの分類を考察した。[42, 72, 127]

$f(R, G)$ 修正重力理論の研究

現在の宇宙の加速膨張は、長距離スケールで重力理論が一般相対論とは異なることに起因するという立場に基づいて、修正重力理論の研究を行なった。特に、一般共変性原理を保ち、尚且つスピン 2 のテンソルモードがゴースト的にならないという要請に基づいて構成された $f(R, G)$ 修正重力理論 (R はリッチスカラー、 G はガウス・ボンネスカラー) の枠組みで宇宙論的摂動論の研究を行なった。まず、 $f(R, G)$ 修正重力理論でのダークマターの揺らぎの線形成長を解析し、ダークマターが感じる有効重力定数が近距離になるほど小さくなることを導いた。この結果は、宇宙の大規模構造の観測を通して、 $f(R, G)$ 修正

重力理論を探ることができている可能性を示唆している。また、 $f(R, G)$ 修正重力理論での球対称時空の線形摂動解析を行なった。その結果、 $f(R, G)$ のヘッセ行列式が消えないモデルでは、モードの一つが必ずゴースト的になり、球対称時空は不安定になることを示した。フリードマン宇宙まわりでの摂動解析の結果も合わせると、これら一連の研究は理論的に整合性のとれた $f(R, G)$ 修正重力理論を構築するための強い制限を与えるものとなっている。[20, 21, 22]

スカラー場ダークエネルギーモデルの提唱

現在の宇宙の加速膨張は、宇宙初期インフレーション中に作られた軽いスカラー場の量子揺らぎに起因するという新しいシナリオを提唱した。このシナリオでは、現在のインフレーションと宇宙初期のインフレーションは密接に関連しており、現在のダークエネルギーの制限から、宇宙初期のインフレーションにも制限を課すことができるという点で非常に面白い。また、このシナリオは、宇宙初期のエネルギーが TeV 領域にあることを予言しており、今後の観測で検証可能なシナリオとなっている。[23, 80, 81, 156]

1.2 観測的宇宙論

銀河団の密度・温度揺らぎの解析モデルとスニャーエフ・ゼルドビッチ効果

従来用いられてきた銀河団のガス分布に関する解析モデルは、銀河団内ガスの密度・温度の平均的な動径分布は考慮しているものの、その平均値の周りに必然的に存在する揺らぎの効果は無視されている。我々は過去数年間、その揺らぎに対する半経験的解析モデルを構築してきた。今回は、そのモデルを銀河団のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果に適用した。X線衛星チャンドラと、電波干渉計の銀河団観測データを組み合わせた解析の結果から推定される宇宙の膨張率、ハッブル定数、の値は、現在信じられている値に比べて15パーセント程度系統的に小さくなることを示した。これは、まさに我々のモデルが予想する系統誤差の大きさと一致する。これは、銀河団内ガスの揺らぎの存在が銀河団を用いた宇宙論パラメータの推定にどのような影響を与えるかを具体的に示し、検証した初めての例である。[24]

バリオン音響振動の2次元モデル

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うまく利用することで、バリオン音響振動の精密測定から密度ゆらぎの成長率を決めることもでき、宇宙論的スケールでの重力理

論の検証にも非常に強力な手段になる。しかしながら、赤方偏移ゆがみの影響で、銀河のクラスタリングは見かけ上、非等方になり、バリオン音響振動は2次元面上で特徴づけなければならない。昨年度より、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、N体シミュレーションによる検証を経て、2次元モデルに基づく理論テンプレートから宇宙論的情報を引き出すための方法論の開発を行ってきた。本年度は、その方法論を現存する銀河カタログ SDSS DR7 に応用し、宇宙論的距離とゆらぎの成長率のロバストな推定について考察を進めるとともに、N体シミュレーションのハローカタログを用いて、銀河バイアスの影響についても調べ、さまざまな観点から2次元モデルの有効性を検証した。[26, 85, 109, 110, 124, 161, 166]

バリオン音響振動の多重極展開

赤方偏移ゆがみの影響を受けたバリオン音響振動は非等方になり、一般に2次元面上で特徴づけられるが、非等方性の度合いとしては多重極展開の低次モーメントのみでほぼ記述できる事がわかっている。本研究では、将来観測を踏まえて、低次モーメントにどれだけ宇宙論的情報が含まれるのか、どの次数までの多重極モーメントを観測から求める必要があるのかを、フィッシャー解析にもとづき調べた。その結果、ダークエネルギーの制限と重力理論の検証を同時に行う上で、 $\ell = 4$ の多重極モーメントまで求めれば、2次元面上の情報とほぼ等価な宇宙論的情報を引き出せることがわかった。[108, 111]

宇宙の大規模フィラメント構造の定量化と隠れたバリオン探査

我々の住む宇宙には、銀河団、フィラメント、ボイドといった豊かな構造が広がっており、これは宇宙の大規模構造として知られている。こういった構造を定量化し、観測により得られた銀河の分布と、及び、理論やシミュレーションによって予言される物質の分布を比較することで、宇宙の初期条件や進化の過程に関する様々な情報が得られるはずである。従来用いられてきた銀河の2点相関関数等の統計量ではなく、スケルトンと呼ばれる、より直接的に銀河団、フィラメント、ボイドといった個々の構造物を取り扱う数学的な方法論の開発を進めてきた。2点相関関数だけでは表現しきれない豊かな宇宙の構造を定量的に扱うことができ、さらに天文学的に独立な情報を引き出すことができ、さらに天文学的な応用も期待できる。離散データに対するスケルトンを用いたフィラメント抽出法を完成させ、N体シミュレーションとSDSS銀河サーベイの実データに適用可能であることを示した[29, 30]。またこの応用として、銀河大規模構造データとX線衛星「すざく」を用いて発見した新しい銀河群の大規模構造中での場所を、完成させたコードをもちいて解析し、フィラメントの交差点に対応していることを見いだした

[31]。さらに、SDSS 銀河分布にこのコードを適用して同定したフィラメントの交差点3点を、2011年度のすぎく衛星で観測提案し、計190ksecの観測時間が採択された。

有質量ニュートリノの重力非線形進化への影響

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

宇宙論的な観測からニュートリノの質量を制限できる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュートリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的なスケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在できず、重力を弱めるからである。

将来の大規模構造観測を念頭に置くと、重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこで我々は、摂動論的手法により非線形銀河バイアスの効果も考慮することによって、現存する銀河パワースペクトルのデータである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の Data-Release 7 (DR7) における銀河カタログのデータに我々の確立した手法を適用して、ニュートリノ質量に関するロバストな制限を得る試みを行った。WMAP5 と組み合わせることによって、 $\sum m_\nu < 0.81\text{eV}$ (95% C.L.) という WMAP5 のみに比べて約2倍厳しい制限を得た [32, 86, 87, 88, 89, 112, 163, 164]。この制限は有質量ニュートリノの効果を正確に取り扱った上で得られた初めての制限である。

標準音源として重力波を用いた宇宙膨張の測定

BBO や DECIGO など将来的に計画されている重力波干渉実験では、 10^6 個もの中性子星連星系からの重力波を高精度で検出できると考えられている。この中性子星連星系からの重力波は理論的によく理解されており、その振幅から光度距離を精度よく決定することができる。可視光観測での追観測により赤方偏移が決定できれば、重力波により赤方偏移と光度距離の関係を詳しく調べることで宇宙論的な情報を抜き出す事ができるのである。

我々は、この光度距離分布の非等方性、具体的には単極子と双極子成分を組み合わせることによって、ハッブルパラメータを赤方偏移の関数として決定し

うことを示した [33]。例えば3年間の DECIGO 観測を仮定すると、 $z = 1$ までのハッブルパラメータを1.5-8%程度の精度で決定できることを示した。重力波の標準音源による方法は、Ia型超新星による標準光源による方法と比較して、高赤方偏移まで観測できること、観測できる数が多いので統計誤差がおさえられることが主な利点である。

CMB レンズングと銀河の弱重力レンズを用いたダークエネルギー・ニュートリノ質量への制限

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

本研究では、その方法として特に銀河の弱重力レンズと CMB レンズングに着目し、次世代サーベイにおけるこれらの測定・検証可能性について見積もりを行った。特に次世代の CMB 観測として Planck、ACTPol、次世代の銀河の測光サーベイとして HSC を想定した。その結果、これらのサーベイから得られる弱重力レンズ効果を利用することで、DETF で見積もられている Stage-III クラスの他の観測と同程度の制限を得られることが分かった。さらに、決定精度が銀河の弱重力レンズのサーベイ時間、トモグラフィにおける赤方偏移ビンの個数にどのように依存するか調べ、ダークエネルギー・ニュートリノ質量を制限する上で最良のサーベイ・デザインについて示唆を与えた。

本研究より、ダークエネルギー・ニュートリノ質量の制限において、重力の非線形進化を正しく扱うことで、弱重力レンズサーベイは極めて有効な手段であるということが分かった [34, 138]。

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に従う。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 [90, 91, 92, 125, 139]。

CMB の弱重力レンズマップ再構築：勾配・カール成分の分離法

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) などによって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 観測において曲がり角を再構築できると考えられている。

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、相対論的な重力の高次摂動でも曲がり角にカール成分が生じるため、カール成分を無視した再構築の方法では曲がり角がバイアスされる可能性がある。

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 を想定した場合にこの手法で予想されるノイズを見積もり、勾配成分と同程度のノイズでカール成分を再構築できることを示した。[128, 167]。

SDSS 銀河の数密度分布関数

銀河分布のクラスタリングは、非線形重力進化によってガウスの初期条件でも、高密度側にテールがのびた特徴的な非ガウス分布になることが知られ

ている。本研究では、スローンデジタルスカイサーベイ (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) の銀河カタログを用いて、色・明るさ・形態に応じて分類した銀河の数密度分布関数のふるまいを調べた。N 体シミュレーションからダークマターのクラスタリング、赤方偏移ゆがみの影響を求め、それを下に、SDSS 銀河分布とダークマターのクラスタリングの違いを比較、非線形バイアスを用いてその違いを定量化した。その結果、銀河の数密度分布関数は大域的に対数正規分布でよく近似されるが、低密度側では非線形バイアス、特に 2 次の非線形性によって対数正規分布からずれることがわかった。この 2 次の非線形バイアスは、銀河 3 点相関関数から見積もられた非線形バイアスとほぼ一致し、その定性的なふるまいは、銀河の色・明るさ・形態による違いも含めてハローモデルでよく説明できる。[58, 97]

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。我々はこの結果を発展させて、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。今年度は観測領域が 2 割増えた SDSS DR7 を用いて、この結論をより精密に検証し、DR4 と同様の系統誤差が存在することを示した [132]。

1.3 太陽系外惑星

トランジット惑星系のロシター効果

ロシター効果とは、恒星の前面を惑星が通過して食を起こす（トランジット）太陽系外惑星系で食が起こる最中に星のスペクトルの吸収線に特有の変化が起こる現象である。ロシター効果を観測する事により惑星の軌道傾斜角 (λ) を測定する事ができ、これを理論的に予言される λ の統計的分布と比較する事で惑星形成理論に対する検証・制限を与える事で可能となる。昨年度はいくつかのトランジット系 (TrES-4, XO-4, HAT-P-11) に対してすばる望遠鏡を用いてロシター効果を観測し、惑星の軌道傾斜角 λ を測定した。特に惑星系 HAT-P-11 に対して行った観測で

は、海王星サイズの惑星に対して初めてロシター効果を検出する事に成功し、さらに結果として惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸は大きくずれている事が分かった。

一方、昨年度はロシター効果の理論的なモデル化に積極的に取り組んだ。これまで観測された視線速度の変動からロシター効果をモデル化するには、トランジット中に予想される星の模擬スペクトルを用いたシミュレーションを行う必要があり、シミュレーションには非常に多くの時間と手間がかかるという問題があった。我々の研究では、トランジット中の吸収線の形状を精密にモデル化する事によってロシター効果による視線速度変動を解析的に計算し、実際の観測データの解析にかかる時間を大幅に短縮する事に成功した。またロシター効果を解析的に書く事が出来るようになった事によって星の微分(差動)回転を取り入れるなど、更なる精密なモデル化が可能となった。本研究ではロシター効果を微分回転まで含めて記述し、将来の観測によって微分回転が観測可能であるかも含めて検討した [35]。

反射光による地球外系惑星の表層環境の探査

現在、目覚ましい速度で次々に系外惑星が発見されており、地球質量程度の惑星、さらにはハビタブルゾーン(水が惑星表面に液体として存在できる軌道の範囲)内の惑星の存在も今後数年で明らかになってきた。そこに生命の存在を探ることが、今後の大きな目標である。系外惑星の環境の詳細を観測的に知るための鍵として、系外惑星からくる反射光が注目されている。海や土壌、雪などの表面はそれぞれに固有の反射特性を示すが、特に植物の反射特性にはレッドエッジと呼ばれる著しい特徴があり、生命の存在を示す指標ともなりうる。これらをふまえて、私達は、反射光の多バンド測光観測から逆問題的に惑星表面を再構築する方法を開拓している。私たちはまず、実際の地球観測衛星のデータをもとに 10pc 彼方から見た雲の無い地球を模擬観測し、その結果をモデルでフィットすることで、海や陸、さらには植物の割合や分布が推定できることを示した [39]。また、EPOXI によって実際に観測された反射光の時系列を解析し、既知の物質の反射スペクトルをテンプレートとすれば、雲のある実際の場合でも地表面のおおまかな経度方向の分布が再構築できることが分かった。また、海、雲などの存在を推定するために必要な精度を見積もった [131, 144, 145]。

自転・公転を利用した系外惑星の 2 次元 Mapping

観測される系外惑星の反射光は表面の各部分からの寄与の総和であるが、反射光に寄与する惑星表面上の領域は、系外惑星—主星—観測者の位置関係によって変わる。このことと、惑星が自転しながら主星の周りを公転するという動きを考えると、その 2 成分の動きから系外惑星の 2 次元的な非一様性が再構築できる可能性がある。私たちはこのことを初め

て指摘し、雲がない地球を 10pc 彼方から観測するとしたときのシミュレーションからそれが可能であることを示した。また、同時に赤道傾斜角も推定できることを示した。[96, 119, 126]

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] L. Lorenz, J. Martin and J. Yokoyama, "Geometrically Consistent Approach to Stochastic DBI Inflation," *Phys. Rev. D* **82** (2010) 023515 [arXiv:1004.3734 [hep-th]].
- [2] Kohei Kamada, Yuichiro Nakai, and Manabu Sakai, "Inflation in Gauge Mediation and Gravitino Dark Matter," arXiv: 1103.5097 [hep-ph], *Prog. Theor. Phys.*, accepted.
- [3] Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta Kasuya, and Masahide Yamaguchi, "Fate of thermal log type Q balls", arXiv:1007.4235 [hep-ph], *Physical Review D*82:103534,2010.
- [4] Kohei Kamada, Kazunori Kohri and Shuichiro Yokoyama, "Affleck-Dine baryogenesis with modulated reheating," arXiv:1008.1450 [astro-ph.CO], *JCAP* **1101** (2011) 027.
- [5] T. Hiramatsu, M. Kawasaki, T. Sekiguchi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, arXiv:1012.5502 [hep-ph].
- [6] Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama "G-inflation: inflation driven by the Galileon field" *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 231302 [arXiv:1008.0603 [hep-th]]
- [7] Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama "Higgs G-inflation" *Phys. Rev. D*83 (2011) 083515 [arXiv:1012.4238 [astro-ph.CO]]
- [8] Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama "Primordial non-Gaussianity from G-inflation" arXiv:1103.1740 [hep-th] *Phys. Rev. D*, accepted
- [9] Kei-ichi Maeda, Yosuke Misonoh, and Tsutomu Kobayashi "Oscillating Universe in Horava-Lifshitz Gravity" *Phys. Rev. D*82 (2010) 064024 [arXiv:1006.2739 [hep-th]]
- [10] Yosuke Misonoh, Kei-ichi Maeda, Tsutomu Kobayashi "Oscillating Bianchi IX Universe in Horava-Lifshitz Gravity" arXiv:1104.3978 [hep-th]
- [11] M. Nakashima, R. Saito, Y. Takamizu and J. Yokoyama, "The effect of varying sound velocity on primordial curvature perturbation", *Prog. Theor. Phys.* **125** (2011) 1035.
- [12] R.Saito, J.Yokoyama, "Gravitational-Wave Constraints on the Abundance of Primordial Black Holes", *Prog. Theor. Phys.* **123**, 867-886 (2010).

- [13] R.Saito and S.Shirai, “Primordial Black Hole as a Source of the Boost Factor”, Phys. Lett. **B697**, 95-100 (2011).
- [14] T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi and S. Yokoyama, “On Classification of Models of Large Local-Type Non-Gaussianity,” JCAP **1012** (2010) 030.
- [15] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations beyond delta-N formalism” Journal of Cosmology and Astroparticle physics 06 (2010) 019.
- [16] Y. Takamizu, J. Yokoyama ”Full nonlinear growing and decaying modes of superhorizon curvature perturbations” Physical Review D **83** (2011) 043504.
- [17] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki, Y. Tanaka ”Beyond delta-N formalism for a single scalar field” Proceedings of the 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (2011).
- [18] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Phantom boundary crossing and anomalous growth index of fluctuations in viable $f(R)$ models of cosmic acceleration,” Prog. Theor. Phys. **123** 887-902 (2010)
- [19] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Matter power spectrum in $f(R)$ gravity with massive neutrinos,” Prog. Theor. Phys. **124** 541-546 (2010)
- [20] A. De Felice, J. M. Gerard and T. Suyama, “Cosmological perturbation in $f(R,G)$ theories with a perfect fluid,” Phys. Rev. D **82**, 063526 (2010).
- [21] A. De Felice and T. Suyama, “Linear growth of matter density perturbations in $f(R,G)$ theories,” Progress of Theoretical Physics, **125**, 603 (2011)
- [22] A. De Felice, T. Suyama and T. Tanaka, “Stability of Schwarzschild-like solutions in $f(R,G)$ gravity models,” arXiv:1102.1521 [gr-qc].
- [23] C. Ringeval, T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi and S. Yokoyama, “Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations,” Phys. Rev. Lett. **105**, 121301 (2010)
- [24] Erik Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Naomi Ota, Shin Sasaki & Yasushi Suto: “Impact of Chandra calibration uncertainties on galaxy cluster temperatures: application to the Hubble constant”, The Astrophysical Journal, **721** (2010) 653
- [25] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Tahahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, Shun Saito & Atsushi Taruya: “Non-Gaussian Error Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum”, The Astrophysical Journal, **726** (2011) id.7
- [26] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi & Shun Saito: “Baryon acoustic oscillations in 2D: Modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory”, Physical Review D, **82** (2010) id. 063522
- [27] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama & Cristiano Sabiu: “Scale dependence of halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions in cosmological N-body simulations”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, **07** (2010) 002
- [28] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya & Seiji Kawamura: “Cosmological test of gravity with polarizations of stochastic gravitational waves around 0.1-1 Hz”, Physical Review D, **81** (2010) id. 104043
- [29] Thierry Sousbie, 2010, MNRAS accepted
- [30] Thierry Sousbie, Christophe Pichon & Hajime Kawahara, 2010, MNRAS accepted
- [31] Hajime Kawahara, Hiroshi Yoshitake, Takahiro Nishimichi & Thierry Sousbie: “Suzaku Observation of a New Merging Group of Galaxies at a Filamentary Junction”, ApJ, **727** (2011) L38
- [32] Shun Saito, Masahiro Takada & Atsushi Taruya: “Neutrino mass constraint with the Sloan Digital Sky Survey power spectrum of luminous red galaxies and perturbation theory” Phys.Rev. D **83**, 043529 (2011).
- [33] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya & Shun Saito: “Tracing the redshift evolution of Hubble parameter with gravitational-wave standard sirens”, accepted for publication in Physical Review D (2011).
- [34] Toshiya Namikawa, Shun Saito and Atsushi Taruya “Probing dark energy and neutrino mass from upcoming lensing experiments of CMB and galaxies” JCAP **12** (2010) 027
- [35] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Avi Shporer, Bun’ei Sato, Wako Aoki, and Motohide Tamura: “A Possible Tilted Orbit of the Super-Neptune HAT-P-11b”, Publication of Astronomical Society of Japan, **63** (2011) in press (arXiv:1009.5677)
- [36] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Roberto Sanchis-Ojeda, Joshua N. Winn, Matthew J. Holman, Bun’ei Sato, Wako Aoki, and Motohide Tamura: “The Rossiter-McLaughlin Effect of the Transiting Exoplanet XO-4b”, Publication of Astronomical Society of Japan, **62** (2010) L61
- [37] Norio Narita, Bun’ei Sato, Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn, Wako Aoki, and Motohide Tamura: “Spin-Orbit Alignment of the TrES-4 Transiting Planetary System and Possible Additional Radial Velocity Variation”, Publication of Astronomical Society of Japan, **62** (2010) 653
- [38] Akihiko Fukui, Norio Narita, Paul J. Tristram, Takahiro Sumi, Fumio Abe, Yoshitaka Itow, Denis

- J. Sullivan, Ian A. Bond, Teruyuki Hirano, Motohide Tamura, David P. Bennett, Kei Furusawa, Fumiya Hayashi, John B. Hearnshaw, Shun Hosaka, Koki Kamiya, Shuhei Kobara, Aarno Korpela, Pam M. Kilmartin, Wei Lin, Cho Hong Ling, Shota Makita, Kimiaki Masuda, Yutaka Matsubara, Noriyuki Miyake, Yasushi Muraki, Maiko Nagaya, Kenta Nishimoto, Kouji Ohnishi, Kengo Omori, Yvette Perrott, Nicholas Rattenbury, Toshiharu Saito, Ljiljana Skuljan, Daisuke Suzuki, Winston L. Sweatman, Kohei Wada: “Measurements of Transit Timing Variations for WASP-5b”, Publication of Astronomical Society of Japan, **63** (2011) 287
- [39] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, & Edwin L. Turner: “Colors of a Second Earth: Estimating the Fractional Areas of Ocean, Land, and Vegetation of Earth-like Exoplanets”, *The Astrophysical Journal*, **715** (2010) 866
- [40] Hajime Kawahara & Yuka Fujii: “Global Mapping of Earth-like Exoplanets From Scattered Light Curves”, *The Astrophysical Journal*, **720** (2010) 1333
- (会議集録)
- [41] Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta Kasuya, and Masahide Yamaguchi, “Q balls in thermal logarithmic potential,” in *The Proceedings of the conference “The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20)”*
- [42] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Classification of Future Phantom-to-Normal Oscillations in $f(R)$ Gravity,” in *The Proceedings of the conference “The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20)”*
- [43] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ Gravity and its Cosmological Implications,” in *Proceedings of 2nd International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry*
- [44] M. Nakashima and T. Kobayashi, “CMB Polarization in Einstein-Aehter Theory”, in *The Proceedings of the conference “The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20)”*
- [45] R.Saito, M.Nakashima, Y.Takamizu, and J.Yokoyama, “Parametric amplification of the inflaton fluctuations induced by a heavy scalar field”, *The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- [46] T.Ohashi, Y.Ishisaki, Y.Ezoe, S.Sasaki, H.Kawahara, K.Mitsuda, N.Yamasaki, Y.Takei, M.Ishida, Y. Tawara, I.Sakurai, A.Furusawa, Y.Suto, K.Yoshikawa, N.Kawai, R.Fujimoto, T.G.Tsuru, K.Matsushita, and T.Kitayama: “DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects”, *SPIE*, 7732(2010)77321S
- [47] Yasushi Suto: “Unknowns and unknown unknowns: from dark sky to dark matter and dark energy”, *SPIE*, 7733(2010)773302
- (国内雑誌)
- [48] 小林努『もうひとつの一般相対論入門』(著/須藤靖) 書評数学セミナー 2011年5月号(日本評論社) p.86
- [49] 須藤 靖: “四月になれば駒場は”, 東京大学出版会 UP **450**(2010)38
- [50] 須藤 靖: “ポストク問題:大学の論理、企業の論理”, *日本物理学会誌* **65** (2010)272
- [51] 須藤 靖: “フレッシュマンのためのブックガイド”, *日経サイエンス* (2010) 5月号, p115
- [52] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その十一: 幸せ相対論”, 東京大学出版会 UP **452**(2010)26
- [53] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その十二: 大学教師をめぐる3つの誤解”, 東京大学出版会 UP **455**(2010)26
- [54] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その十三: ローの精神”, 東京大学出版会 UP **457**(2010)33
- [55] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その十四: 三日月とクロワッサン”, 東京大学出版会 UP **460**(2011)24
- (学位論文)
- [56] Kohei Kamada: “Cosmological consequences of flat directions in minimal supersymmetric standard model” (博士論文)
- [57] Ryo Saito: “Observational Signatures of Primordial Black Holes: Gravitational Waves and Cosmic Rays” (博士論文)
- [58] Kensuke Fukunaga: “Precise measurement of number-count distribution function of SDSS galaxies” (修士論文)
- (著書)
- [59] 須藤 靖: “人生一般二相対論”, 東京大学出版会 (2010年4月刊行)
- [60] 須藤 靖: “もうひとつの一般相対論入門”, 日本評論社 (2010年7月刊行)
- [61] 岡村定矩 編 吉田直紀・須藤 靖・田村元秀著: 数学セミナー 別冊 “宇宙はどこまでわかったか?”, 日本評論社 (2010年10月刊行、第二章執筆)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [62] J. Yokoyama and R. Saito “Gravitational wave constraints on the abundance of primordial black holes” 11th Asia Pacific Physics Conference, Shanghai, October 15, 2010
- [63] Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta Kasuya, and Masahide Yamaguchi, “Q balls in thermal logarithmic potential,” *The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University Kyoto, Japan, Sep. 21 - 25, 2010

- [64] Kohei Kamada, “Fate of Q balls in thermal potential, ” Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Sep. 27 - Oct. 1, 2010
- [65] Kohei Kamada, “Inflation from the supersymmetry breaking sector and the reheating of the universe, ” molecule-type workshop “Cosmological Perturbation and Cosmic Microwave Background”, Kyoto University, Kyoto, Japan, Mar 21-22, 2011
- [66] Tsutomu Kobayashi “G-inflation,” Summer Institute 2010 (Cosmology & String) (Seminar House “Fuji Calm”, Fuji-Yoshida, August, 2010)
- [67] Tsutomu Kobayashi “G-inflation,” Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Sep. 27 - Oct. 1, 2010
- [68] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Density fluctuation in $f(R)$ gravity with massive neutrinos” 10th RESCEU-DENET joint meeting & summer school ‘Dark Energy in the Universe’, Kouchi, Japan, Aug. 29 - Sep. 1, 2010
- [69] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Matter density fluctuation and massive neutrinos in $f(R)$ gravity” Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Sep. 27 - Oct. 1, 2010
- [70] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Matter power spectrum in $f(R)$ gravity with SDSS DR7” Extra-Dimension Probe by Cosmophysics, KEK (High Energy Accelerator Research Organisation), Tsukuba, Japan, Nov. 9 - 12, 2010
- [71] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama “Matter power spectrum in $f(R)$ gravity with massive neutrinos” Yukawa International Seminar 2010 (YKIS): Cosmology - The Next Generation -, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, Jun. 28 - Jul. 2, 2010
- [72] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Perturbation theory in $f(R)$ gravity” The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University Kyoto, Japan, Sep. 21 - 25, 2010
- [73] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ gravity and large scale structure” Essential Cosmology for the Next Generation, Puerto Vallarta, Mexico, Jan. 10 - 14, 2011
- [74] Masahiro Nakashima and Tsutomu Kobayashi: “The effect of varying sound velocity on primordial curvature perturbation”; Yukawa International Seminar (YKIS) 2010 “Cosmology - The Next Generation -”, (June 28 - July 2, 2010, YITP, Kyoto, Japan)
- [75] Masahiro Nakashima and Tsutomu Kobayashi: “CMB Polarization in Einstein-Aehter Theory”; The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20), (September 21 - 25, 2010, YITP, Kyoto, Japan)
- [76] Masahiro Nakashima and Tsutomu Kobayashi: “CMB Polarization in Einstein-Aehter Theory”; HORIBA INTERNATIONAL CONFERENCE “COSMO/CosPA 2010”, (September 27 - October 1, 2010, Tokyo, Japan)
- [77] R.Saito, M.Nakashima, Y.Takamizu, and J.Yokoyama, “Heavy field effect on primordial curvature perturbations”, Yukawa International Seminar 2010 “Cosmology –The Next Generation–”, (June, 2010, Kyoto)
- [78] R.Saito, M.Nakashima, Y.Takamizu, and J.Yokoyama, “Parametric amplification of the inflaton fluctuations induced by a heavy scalar field”, The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, (September, 2010, Kyoto)
- [79] R.Saito and S.Shirai, “Primordial Black Hole as Source of Boost Factor”, COSMO/CosPA2010, (September, 2010, Tokyo)
- [80] C. Ringeval, T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi and S. Yokoyama, “Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations,”; COSMO/CosPA 2010 (September 27-October 1, 2010, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan)
- [81] C. Ringeval, T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi and S. Yokoyama, “Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations,”; Cosmological Perturbation and Cosmic Microwave Background 2011 (March 13-Marcy 26, 2011, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan)
- [82] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations:Beyond δN -formalism” The non-Gaussian universe, 京都 2010 年 3 月 25 日
- [83] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations:Beyond δN -formalism” Particle Physics and Cosmology, イタリア 2010 年 7 月 14 日
- [84] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Beyond δN formalism for a single scalar field” COSMO/CosPA2010, 東京 2010 年 9 月 27 日
- [85] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D: Modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)
- [86] Shun Saito, Masahiro Takada & Atsushi Taruya: “Neutrino Mass Constraint from SDSS DR7 power spectrum with perturbation theory”; SDSS-III collaboration meeting (APC, France, September 2010).
- [87] Shun Saito: “Beyond 1D-BAOs through galaxy surveys”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)

- [88] Shun Saito: “Fruitful information beyond 1D BAOs through galaxy surveys”; Cosmology in Northern California (LBNL, U.S., November 2010).
- [89] Shun Saito: “2D BAO constraints based on perturbation theory”; Cosmology on the Beach (Puerto Vallarta, Mexico, January 2011).
- [90] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura & Atsushi Taruya: “Probing primordial non-gaussianity from magnification-lensing and magnification-ISW cross-correlations”; (Kochi, Japan, 8/29-9/1, 2010)
- [91] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura & Atsushi Taruya: “Magnification effect on galaxy-CMB lensing cross-correlation”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)
- [92] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura and Atsushi Taruya: “Impact of magnification effect on the detection of primordial non-Gaussianity from imaging survey of galaxies” DENET 2011 Subaru HSC Workshop (ASIAA, Taowa, March 2011)
- [93] Teruyuki Hirano: “The Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems: New Theory and Observation”; 2010 Sagan Exoplanet Summer Workshop (California Institute of Technology, July 2010)
- [94] Teruyuki Hirano: “New Analysis Routine for the Rossiter-McLaughlin Effect”; Detection and dynamics of transiting exoplanets (France, August 2010)
- [95] Teruyuki Hirano: “New Methods for Analyzing the Rossiter-McLaughlin Effect in Transiting Exoplanetary Systems”; The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution (Torino, October 2010)
- [96] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima and Edwin L. Turner: “Investigating Surfaces of Earth-like Exoplanets via Scattered Light”; 2010 Sagan Exoplanet Summer Workshop (California Institute of Technology, July 2010)
- [97] Kensuke Fukunaga: “Density Probability Distribution Function of SDSS”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/2-10/1, 2010)
- 招待講演
- [98] J. Yokoyama, “Phantom crossing and anomalous growth index of density fluctuations in $f(R)$ gravity” Hot topics in modern cosmology Cargese, France, May 10, 2010
- [99] J. Yokoyama, “Cosmological constraints on time variation of the fundamental constants” Fundamental Physics using Atoms 2010, Osaka University, August 8, 2010
- [100] J. Yokoyama, “ w_{eff} and m_ν in $f(R)$ gravity” The observational pursuit of dark energy after Astro2010, Pasadena, 10/7-8, 2010
- [101] J. Yokoyama, “Gravitational waves as a probe of the early Universe” Gravitational Waves 2010, University of Minnesota, October 15, 2010
- [102] J. Yokoyama, “G-inflation” Beyond Standard Models and Dark Sides of Our Universe, Shanghai, November 19, 2010
- [103] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ gravity and its cosmological implications” 2nd International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, Nov. 5 - 6, 2010
- [104] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki “Beyond δN formalism for a single scalar field” APCTP-Topical-Research-Program-2010, 韓国 2010 年 12 月 16 日
- [105] Yasushi Suto: “Unknowns and unknown unknowns: from dark sky to dark matter and dark energy”; invited plenary talk at SPIE meeting, (San Diego, June 2010)
- [106] Yasushi Suto: “DENET and Sumire collaboration”; DENET-Taiwan HSC collaboration meeting 2011 (ASIAA, Taipei, March 2011)
- [107] Yasushi Suto: “HSC: Subaru collaboration with Taiwan and Princeton”; Subaru User’s Meeting, (NAOJ, January 2010)
- [108] Atsushi Taruya: “Modeling and forecasting BAO from multipole expansion”; The observational pursuit of dark energy after Astro2010, (Pasadena, 10/7-8, 2010)
- [109] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D”; The 11th Asian Pacific Physics Conference (Shanghai, September 2010)
- [110] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D”; The 11th Asian Pacific Physics Conference (Shanghai, September, 2010)
- [111] Atsushi Taruya: “Modeling baryon acoustic oscillations: prospects and impact on cosmology”; PFS Science workshop (Mitaka, 12/9-10, 2010)
- [112] Shun Saito: “Redshift-space distortion/ Neutrino Masses-Perturbation Theory & Lesson from DR7-focusing on ‘nonlinear power spectrum’ on BAO scale”; BigBOSS collaboration meeting (LBNL, U.S.A., February 2011).
- (国内会議)
- 一般講演
- ・第 10 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 (高知、2010 年 9 月)
- [113] 鎌田 耕平 “Affleck-Dine baryogenesis and Inhomogeneous reheating scenario.”
- [114] 小林努: “G-inflation.”

- [115] 中島 正裕、小林 努: “CMB Polarization in Einstein-Aether Theory”
- [116] 齊藤 遼、中島 正裕、高水 裕一、横山 順一、
“parametric amplification of primordial fluctuations during inflation”,
- [117] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Beyond δN formalism for a single scalar field”
- [118] 樽家 篤史: “Signature of primordial vector modes on large-scale structure”
- [119] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “Toward remote sensing of Earth-like exoplanets”;
- ・日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大学、2010 年 9 月)
- [120] 鎌田 耕平, “熱的ポテンシャルによって生成される Q ボールの進化とその宇宙論的影響.”
- [121] 小林努、田代寛之、鈴木大地 “Galileon scalar-tensor models of dark energy,”
- [122] 本橋隼人, A. A. Starobinsky, 横山順一 「f(R) 重力理論における実効的ダークエネルギーの状態方程式」
- [123] 齊藤 遼、中島 正裕、高水 裕一、横山 順一”原始揺らぎに対する重い場による影響の研究”
- [124] 樽家 篤史: “非等方バリオン音響振動: 赤方偏移ゆがみの精密理論モデル”
- ・日本天文学会 2010 年秋季大会 (金沢大学、2010 年 9 月)
- [125] 並河 俊弥、岡村 雅晋、樽家 篤史: “CMB レンズングと銀河個数密度の相関量における増光効果の影響”;
- [126] 河原 創、藤井 友香: 「地球型系外惑星の世界地図: 反射光トモグラフィによる惑星表面マッピング」;
- ・日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月)
- [127] 本橋隼人, A. A. Starobinsky, 横山順一 「f(R) 重力理論における実効的ダークエネルギーの状態方程式」
- ・日本天文学会 2011 年春季大会 (筑波大学、2011 年 3 月)
- [128] 並河 俊弥、樽家 篤史: “CMB の弱重力レンズマップの再構築: 勾配・カール成分の分離法”;
- [129] 平野 照幸、成田 憲保、佐藤 文衛、須藤 靖、高橋 安大、Joshua N. Winn: 「傾いた惑星軌道は当たり前?: ロンター効果の観測と理論の現状」;
- [130] 平野 照幸、須藤 靖、樽家 篤史、Joshua N. Winn、成田 憲保、佐藤 文衛: 「トランジット惑星系のロンター効果を用いた星の差動回転の検出可能性」;
- [131] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: 「地球の多バンド測光観測からの表層環境の再構築」;
- [132] 柏木 俊哉、須藤 靖、樽家 篤史、矢幡 和浩: 「SDSS 銀河カタログを用いた SFD 減光マップの検証」;
- ・その他
- [133] 鎌田 耕平: “重力波と宇宙のバリオン数,” 第 8 回 DECIGO ワークショップ, (2010 年 6 月)
- [134] 鎌田 耕平: “Q ボールから放出される重力波とその観測可能性,” 第 23 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム, (2010 年 12 月).
- [135] 中島 正裕、小林 努: “CMB Polarization in Einstein-Aether Theory”; CMB ワークショップ 2010, (国立天文台, 2010 年 6 月)
- [136] 齊藤 遼、白井 智”原始ブラックホールによる宇宙線陽電子超過の説明” 第 23 回理論懇談会シンポジウム (京都, 2010 年 12 月)
- [137] Y. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki ”Beyond δN formalism for a single scalar field” 第 20 回「一般相対論と重力」研究会, 京都 2010 年 9 月 22 日
- [138] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市来 淨與: “高角度分解能 CMB 観測と弱重力レンズサーベイを想定した宇宙論パラメータの決定精度”; CMB ワークショップ (国立天文台, 6/7-6/9, 2010)
- [139] 並河 俊弥: “銀河の測光サーベイを用いた原始非ガウス性の探求: 増光効果の影響”; RA キャンプ (伊豆松の坊, 2/17-2/19, 2011)
- [140] 平野 照幸: 「すばる HDS を用いたトランジット惑星系のロンター効果の観測」; 日本における高分散分光の到達点と将来 (岡山市, 5/12, 2010)
- 招待講演
- [141] 須藤 靖: “天体宇宙物理分野”; 日本学術会議シンポジウム 学術の大型施設計画・大規模研究計画 (マスタープラン) に関する物理系シンポジウム (日本学術会議講堂, 1/31, 2011)
- [142] 須藤 靖: “惑星いろいろ、地球も色々? 第二の地球の色から表面地図を推測する?”, GCOE 「地球から地球たちへ」 駒場シンポジウム 科学方法論の開拓 (東京, 1/22, 2011)
- [143] 平野 照幸: “Latest Discoveries on Tilted Planetary Orbits Based on the Measurements of the Rossiter-McLaughlin Effect”; 第 7 回太陽系外惑星大研究会 (国立天文台三鷹, 3/9-3/11, 2011)
- [144] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: 「地球型惑星の反射光の解析と植物の検出」; ワークショップ 「ハビタブルプラネット」 (東京工業大学、12/28, 2010)
- [145] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “Scattered light as a probe of the surface environment of Earth-like exoplanets”; 第 7 回太陽系外惑星大研究会 (国立天文台三鷹, 3/9-3/11, 2011)
- (セミナー)
- [146] 横山順一 “ w_{eff} and m_ν in $f(R)$ gravity” 立教大学宇宙理論コロキウム (2010 年 12 月 14 日)
- [147] 鎌田 耕平 “Gravitational waves and Q-ball transformation,” 京都大学基礎物理学研究所 Long-term Workshop Gravity and Cosmology 2010 インフォーマルセミナー (2010 年 6 月 24 日)

- [148] Kohei Kamada “Thermal effect on the Q-balls and gravitational waves,” Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University GCOE seminar, Jul. 28, 2010.
- [149] 小林努 “Cosmic acceleration and consistent long-distance modification of gravity,” 東京工業大学 宇宙物理学理論グループ コロキウム (2010年5月11日)
- [150] 小林努 “Galileon scalar-tensor models of dark energy,” 京都大学基礎物理学研究所 Long-term Workshop Gravity and Cosmology 2010 インフォー マルセミナー (2010年6月15日)
- [151] H. Motohashi, “ $f(R)$ gravity and its implications for cosmology” LeCOSPA, National Taiwan University, Taiwan, Nov. 4, 2010
- [152] H. Motohashi, “Cosmological consequences of $f(R)$ gravity” KICP, The University of Chicago, USA, Jan. 6, 2011
- [153] H. Motohashi, “Cosmological imprints of $f(R)$ gravity” TCC, The University of Texas at Austin, USA, Jan. 19, 2011
- [154] 齊藤 遼, “重力波観測で探る暗黒物質の起源”; 早稲田大学前田研セミナー (2010年6月)
- [155] Ryo Saito, “PAMELA positron excess as a signal from the primordial black holes”; QMUL Relativity and Cosmology seminars, London (February, 2011)
- [156] 須山輝明: “Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations”; 弘前大学セミナー (2010年12月8日)
- [157] Yasushi Suto: “Colors of a second earth: towards exoplanetary remote-sensing”; JPL colloquium (Pasadena, USA, June 24, 2010)
- [158] Yasushi Suto: “Impact of Chandra calibration uncertainties on cluster temperatures: application to H_0 from the Sunyaev-Zel’dovich effect” Caltech astrophysics theory group seminar, Pasadena USA (June 25, 2010)
- [159] Atsushi Taruya: “Signature of primordial vector modes on large-scale structure”; LBNL seminar (Berkeley, 10/13, 2010)
- [160] Atsushi Taruya: “Halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions”; (Shanghai observatory, 11/15, 2010)
- [161] Atsushi Taruya: “Modeling baryon acoustic oscillations in 2D”; Cosmo-oenology seminar (Institut d’Astrophysique de Paris, 2/9, 2011)
- [162] Atsushi Taruya: “Cosmology from standard sirens”; Cosmo Journal club (Institut de Physique Theorique, 3/9, 2011)
- [163] Shun Saito: “Toward unlocking the full potential of BAO information through galaxy surveys”; INPA Journal Club (LBNL, U.S.A., November 2010).
- [164] Shun Saito: “Modeling of galaxy power spectrum in redshift space based on perturbation theory”; Cosmology Seminar (University of California, Davis, U.S.A., February 2011).
- [165] 須藤 靖: “惑星色色、宇宙もいろいろ?宇宙の色と第二の地球の色?”, 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 KMI セミナー (2010年2月8日)
- [166] 樽家 篤史: “銀河パワースペクトルから探る精密宇宙論と課題”; 理論物理学コロキウム (立教大学, 4/27, 2010)
- [167] 並河 俊弥: “CMB の弱重力レンズの再構築: 勾配・カール成分の分離法”; 宇宙論セミナー (東北大学, 2/24, 2011)
- (集中講義)
- [168] 横山順一: “宇宙の三大構成要素と場の理論” 早稲田大学理工学術院 2010年11-12月
- <プレスリリース>

アウトリーチ活動

- [169] 横山順一: “宇宙最大の謎 ダークエネルギー” 東京大学オープンキャンパス講演会 (2010年8月1日)
- [170] 横山順一: “重力波で探る宇宙” 日比谷高校 SSH 講演会 (2010年3月8日)
- [171] 須藤 靖: “夜空のムコウの世界を探る”, “宇宙の組成と宇宙の未来”, “宇宙における必然と偶然”, “太陽系外惑星とバイオマーカー” 第27回北軽井沢駿台天文講座 (2010年8月6日-9日)
- [172] 須藤 靖: “向陽の空ノムコウの世界”, 土佐中学高等学校 90周年記念講演会 (2010年11月18日)
- [173] 樽家 篤史: “宇宙のものさし、バリオン音響振動”; ビッグバン宇宙国際研究センタークリスマス講演会 (東京大学, 12/22, 2010)

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ことは宇宙初期の天体を観測していることとなる。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。このことは、おそらく我々の銀河で最初に生まれた星が超新星爆発をした時の状況さえ推測できる手がかりを含んでいることを示唆している。

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

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

2.1 銀河系

銀河初期における軽元素の起源

Ic型に分類される超新星の外層は炭素と酸素からできていて爆発直後に相対論的な速度までに加速され、星間物質中の水素やヘリウムと破碎反応を起こし、Li、Be、Bを生成する。最近、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ といった低金属量の星に ${}^6\text{Li}$ が検出され、その量はビッグバン元素合成で予想されるよりも何桁も多かった。そこで、その起源としてIc型超新星での ${}^6\text{Li}$ 合成を考えた。重元素をほとんど持たない高速で自転している大質量星の進化に関する最近の理論計算によると、自転に伴う物質混合の影響で外層が炭素過剰になり質量放出が激しく起こることが示唆されている。超新星爆発直前にはHe層をもほとんど失ったIc型超新星として爆発すると期待される。また、このような星の外層では酸素や炭素の他に窒素も過剰に存在する。すると、星の周りには大量のHeが存在するので、 $\text{N}+\text{He}$ や $\text{C}+\text{He}$ 、 $\text{O}+\text{He}$ の破碎反応の他に $\text{He}+\text{He}$ の核融合反応も起き、Li、Beを合成すると考えられる。そのような過程を計算した結果、観測された ${}^6\text{L}/\text{O}$ 、 Be/O を再現できることがわかった。[2, 5, 6, 7, 9]

2.2 超新星

衝撃波面でのコンプトン散乱による非熱的放射形成

超新星爆発時に内部で発生した衝撃波が星の表面を通過する直前にコンプトン散乱によって熱的放射の光の一部がエネルギーを与えられることで、スペクトルが黒体放射からずれ、高エネルギー側にテールが形成される。爆発時の流体力学的なモデルに自己相似解を用い、輻射輸送をモンテカルロ法で扱うことで、この現象を数値計算した。最近、たまたまこの現象がXRF 080109/SN 2008Dで観測された。観測されたスペクトルを再現するには衝撃波が光球を通過したときその速度が光速の40%ほどに達していたことが分かった。The Astrophysical Journalに発表。[3, 8, 10, 11, 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がどのような影響を与えるかを研究し始めた。磁場の影響を考慮した電子の熱伝導率を用い、単純化した燃焼反応のもと定常燃焼波の構造を数値計算し伝播速度をその固有値として求めた結果、爆発直前の白色矮星の中心の密度では 10^{12} G 以上の磁場があると磁場に垂直な方向には燃焼波が伝播しにくくなることがわかった。この成果をまとめた論文を投稿中である。[17]

非常に明るい Ia 型超新星の起源

ここ数年で Ia 型超新星にも非常に明るいものが見つかって来た。明るさの元になっている放射性元素 ^{56}Ni の質量が Chandrasekhar limit の $1.4 M_{\odot}$ を超えると言われるものまで発見された。これらの超新星はスペクトル線の幅が狭く、炭素の吸収線が観測されると言う特徴がある。これらの条件を満たす爆発モデルとして2つの白色矮星の合体によって爆轟波を起こして爆発するモデルを考えている。現在は球対称を仮定して、ある質量の白色矮星に与えられた降着率で壊れた白色矮星のガスが振ってくる定常降着流を初期状態として一次元流体計算により進化を追って、どのような降着率で爆轟波が発生するかを調べている。その結果質量降着率が毎秒 0.1 太陽質量を超えると爆轟派が発生し白色矮星のほとんどが ^{56}Ni になることがわかった。現在、 ^{56}Ni の質量が $1.4 M_{\odot}$ を超える爆発を起こすパラメータを探している。[14]

非球対称超新星での爆発的元素合成と矮小銀河の化学進化

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

デルの構築を目指す。非球対称爆発での中性子捕獲元素の合成も合わせて調べる。[7, 9]

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

超新星爆発の流体力学数値計算により、超新星として光り始めた直後の明るさの時間変化のしかたと爆発の非球対称性や視線方向の関係を経験式により結びつけた研究。The Astrophysical Journal に発表。[1, 18]

2.3 新星

新星からの非熱的放射の起源

最近、古典新星 V2491 Cygni から硬 X 線が検出された。そのスペクトルはエネルギーのベキ乗になっていた。我々は、これを新星爆発時に合成された ^{22}Na が崩壊した時に放出されるガンマ線が噴出物質中の電子に Compton 散乱されてエネルギーが失われていったものとして観測結果を再現した。ただし、必要な ^{22}Na と噴出物質の質量はともに従来のモデルで仮定されたものより一桁ほど多かった。

新星での爆発的元素合成

古典新星 V2491 Cygni に検出された硬 X 線を放射性元素 ^{22}Na の崩壊にともなうガンマ線が Compton 散乱によってエネルギーを失ったものとして解釈するのに必要な ^{22}Na の量が再現できるかどうかを新星爆発時の元素合成を数値計算することで確認する研究。この新星を起こした白色矮星が ONeMg から出来ている質量の比較的大きい星だとすると必要な量の放射性元素が合成可能であることを示すことができた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Probing Explosion Geometry of Core-Collapse Supernovae with Light Curves of the Shock Breakout", 2010, The Astrophysical Journal, 717, L154-L158
- [2] Nakamura, K., Yoshida, T., Shigeyama, T., & Kajino, T. "Boron Synthesis in Type Ic Supernovae", 2010, The Astrophysical Journal, 718, L137-L140
- [3] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Non-thermal Photon Production via Bulk Comptonization at Supernova Shock Breakout", 2010, The Astrophysical Journal, 719, Issue 1, pp. 881-889

- [4] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Compton Degradation of Gamma-ray Line Emission from Radioactive Isotopes in the Classical Nova V2491 Cygni", 2010, *The Astrophysical Journal*, 723, Issue 1, L84-L88

(会議抄録)

- [5] Nakamura, K., Yoshida, T., Shigeyama, T., & Kajino, T. "Lithium, beryllium, and boron production in core-collapse supernovae", *Light Elements in the Universe, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 268*, p. 463-468
- [6] Nakamura, K., Yoshida, T., Shigeyama, T., & Kajino, T. "Light elements from core-collapse supernovae: the neutrino-process and spallation reactions", *THE 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ORIGIN OF MATTER AND EVOLUTION OF GALAXIES: OMEG-2010. AIP Conference Proceedings, Volume 1269*, pp. 309-314
- [7] Shigeyama, T., Nakamura, K., Tsujimoto, T., Moriya, T., "GRB Nucleosynthesis in Dwarf Galaxies", *DECIPHERING THE ANCIENT UNIVERSE WITH GAMMA-RAY BURSTS. AIP Conference Proceedings, Volume 1279*, pp. 415-417
- [8] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Bulk Comptonization at the emergence of shock waves from stellar atmospheres", *DECIPHERING THE ANCIENT UNIVERSE WITH GAMMA-RAY BURSTS. AIP Conference Proceedings, Volume 1279*, pp. 424-426

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Shigeyama, T., Nakamura, K., Tsujimoto, T., Moriya, T., "GRB Nucleosynthesis in Dwarf Galaxies", *DECIPHERING THE ANCIENT UNIVERSE WITH GAMMA-RAY BURSTS*, April 19, 2010, (Poster)
- [10] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Bulk Comptonization at the emergence of shock waves from stellar atmospheres", *DECIPHERING THE ANCIENT UNIVERSE WITH GAMMA-RAY BURSTS*, April 19, 2010, (Poster)

(国内会議)

一般講演

- [11] 鈴木昭宏, 茂山俊和, "超新星 shock breakout からの非熱放射", 高エネルギー宇宙物理学研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2010年10月13日(口頭).

- [12] 茂山俊和, "超新星爆発", 第5回「天文台によるサイエンス」シンポジウム〜極限エネルギー宇宙物理から地球科学まで〜, JAXA 筑波宇宙センター, 2010年11月2日(口頭).

- [13] 鈴木昭宏, 茂山俊和, "コンパクト天体表面での核燃焼と核 γ 線放射", コンパクト天体で探る極限物理, 京都大学, 2011年2月17日(口頭).

- [14] 茂山俊和, "明るい Ia 型超新星の起源について", 「恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究-宇宙最初の星から太陽系形成まで」, 北海道大学, 2011年3月2日(口頭)

- [15] 鈴木昭宏, 茂山俊和, "超新星 shock breakout からの非熱放射", 超新星からのマルチメッセンジャー, 国立天文台, 2011年3月3日(口頭).

日本天文学会 2011年春季年会, 筑波大学 2011/3/16-19

- [16] 鈴木昭宏, 茂山俊和, "古典新星 V2491Cygni からの硬 X 線放射の起源", 2011年日本天文学会 春季年会, 筑波大学, J01a

日本天文学会 2010年秋季年会, 金沢大学 2010/9/22-24

- [17] 朽名正道, 茂山俊和: 磁場の影響による Ia 型超新星の非球対称性, K19a

- [18] 鈴木昭宏, 茂山俊和: "重力崩壊型超新星の shock breakout における非球対称爆発の効果", K23a

(セミナー)

(その他)

- [19] 茂山俊和, "宇宙の起源と進化 -星が作った多様な宇宙-", 第60回東レ科学振興会科学講演会「進化と起源の謎」, 東京有楽町朝日ホール, 2011年9月17日

- [20] 茂山俊和, "地球と恒星の密接な関係", ビッグバンセンタークリスマス講演会, 東京大学, 2011年12月22日

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)

3.0.1 宇宙及び系外銀河

$z \sim 7$ 銀河候補の可視分光観測

大内正己 (東京大学宇宙線研究所), Mauro Giavalisco (University of Massachusetts), 柏川伸成, 諸隈智貴 (国立天文台), Bahram Mobasher (University of California) らとの共同研究. Subaru Deep Field (SDF) と The Great Observatories Origins Deep Survey North (GOODS-N) Field で見つかった $z \sim 7$ の銀河候補 11 天体を Keck/DEIMOS で分光し, 解析の結果そのうち 2 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 $\text{Ly}\alpha$ だと結論づけた. 今後, ドロップアウト法で見つかった銀河のうち強い $\text{Ly}\alpha$ 輝線を放つ銀河の割合や, $\text{Ly}\alpha$ 輝線のプロファイルの解析を行ない, それらをより低赤方偏移での結果と比較することで, 当時の宇宙の中性度についての示唆が得られると期待される.

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

大内正己 (東京大学宇宙線研究所), James Dunlop (University of British Columbia), Duncan Farrah (Cornell University), Ross McLure (University of Edinburgh) らとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった $z = 5.7$ と 6.6 の LAEs の星の種族を調べた. SXDS による可視 (R, i', z'), UKIDSS の Ultra Deep Survey (UDS) による近赤外 (J, H, K), Spitzer public legacy survey of the UKIDSS/UDS (SpUDS) による中間赤外 ($3.6, 4.5, 5.8, 8.0\mu\text{m}$) の撮像データをもとに世界で初めて $z \sim 6-7$ にある LAEs の典型的なスペクトルエネルギー分布 (SEDs) を取得した. 銀河のモデル SEDs との比較から, 典型的な LAEs は星質量が $(3-10) \times 10^7 M_\odot$ 程度と軽く, 年齢は $\sim 1-3$ Myr と極めて若く, ダスト吸収はほとんど受けていないことがわかった. このことから, $z \sim 6-7$ にある典型的な LAEs は, より低赤方偏移にある一般的な銀河の部品 (building blocks) になったのではないかと推測される. さらに, 観測された SEDs を再現するのに必要な nebular emission の寄与をパラメータとして SED fit を行ない, LAEs からの電離光子離脱率の上限値を評価した. [9]

可視分光観測による $z \sim 2-7$ の LAEs の性質の解明

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

$z = 5.7$ の原始銀河団の研究

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 $z = 5.7$ の銀河数密度超過領域, すなわち原始銀河団候補の可視分光観測データの解析を進めている. SXDS の可視 ($R, i', NB816$) 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) のうち, 当該領域に属すると予想されるものが, Subaru/FOCAS と Keck/DEIMOS で分光観測され, 合計 36 天体の分光データが得られた. これらのデータを解析することにより, $z = 5.7$ という原始銀河団候補の中でも最遠方の 1 つについて, 銀河の数密度や銀河団の全質量等を見積もることができ, 銀河団や銀河の形成過程の理解が進むことが期待される.

ライマン・アルファ・ブロップの探査: $z = 3$ で見つかった巨大なブロップの形態 – 密度関係

松田有一 (Durham University), 山田亨, 林野友紀 (東北大学), 大内正己 (東京大学宇宙線研究所), 梅村雅之, 森正夫 (筑波大学) らとの共同研究. ライマン・アルファ・ブロップ (LABs) は 高赤方偏移に数多く見つかった $\text{Ly}\alpha$ 輝線で空間的に大きく広がった天体だ. 広がった $\text{Ly}\alpha$ 輝線の起源として, 冷たいガスの降着, 銀河風, 活動銀河核などが提唱されているが, まだ議論は決着していない. 特に, 大きく広がった LABs は銀河団の祖先である可能性が主張されており, その放射機構の解明は銀河進化を理解する上で重要だ. 我々はすばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam を用いて SSA22 原子銀河団領域の周辺など 2.1 平方度を探査し, 長軸直径が 100 kpc を超える巨大な LABs 14 個のサンプルを構築した. これらの LABs の形態と密度の関係の関係を調べたところ, フィラメンタリーな構造を持つ LABs は平均的な密

度環境に存在しているのに対し、サーキュラーな構造の LABs は平均的な密度環境にも高密度な環境にも存在していることがわかった。このことは、フィラメンタリーな LABs は周囲の銀河間物質からの冷たいガスの降着を起源とし、サーキュラーな LABs は激しい星形成や活動銀河中心核によるガスのアウトフローを起源とすることを示しているかもしれない。[16]

$z = 2.2$ のライマン・アルファ輝線銀河 (LAEs) の星の種族の解明

大内正己 (東京大学宇宙線研究所), James Dunlop (University of British Columbia), Duncan Farrah (Cornell University), Ross McLure (University of Edinburgh) らとの共同研究。Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった $z = 2.2$ の LAEs の星の種族を調べた。SXDS による可視 (B, V, R, i', z'), UKIDSS の Ultra Deep Survey (UDS) による近赤外 (J, H, K), Spitzer public legacy survey of the UKIDSS/UDS (SpUDS) による中間赤外 (3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μm) の撮像データをもとに $z = 2.2$ にある LAEs の典型的なスペクトルエネルギー分布 (SEDs) を取得した。今後、銀河のモデル SEDs との比較から、 $z = 2.2$ LAEs の星の種族が明らかとなり、これまでの研究と合わせることで $z \sim 2-7$ における LAEs の性質の進化の有無が検証できると期待される。[5]

$z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) の選択

Janice C. Lee (OCIW) らとの共同研究。2009 年 12 月, Subaru/Suprime-Cam に NB387 という独自の狭帯域フィルターを搭載し、観測を行った。このフィルターは $z = 2.2$ の LAEs を捕えるようにデザインされており、本研究では NB387 のデータから $z = 2.2$ の LAE サンプルを作り、統計的議論や近赤外の撮像、分光データを組み合わせることで、 $z \sim 2$ の LAEs の性質や、より高赤方偏移の LAEs からの進化などについて調べていくことを目標とする。我々はこの NB387 による観測を SXDS, COSMOS, GOODS-S, GOODS-N, そして SSA22 という様々な天域 (計 $\sim 1.5 \text{ deg}^2$) で行ってきており、cosmic variance の影響を排除した巨大な LAEs のサンプルを構築することができる。LAEs のサンプルは、U バンド (と B バンド) と NB387 の明るさの違いを利用して構築する。U バンドに比べ NB387 で明るい天体を選び出し、UV や X 線、電波のデータを併用することで近傍の輝線銀河や AGN を除くことができた。その結果、全体で 3,000 個以上もの LAE 候補天体を見つけることができた。今後このサンプルを活用して、様々な研究に発展させていく。[30]

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) の平均的な金属量と星形成率の推定

Janice C. Lee(OCIW) らとの共同研究。我々は NB387 観測により、 $z = 2.2$ の LAE 探査を行った。この赤方偏移では、物理量の推定に良く用いられる [OII] と $\text{H}\alpha$ 輝線がともに夜光の谷間に落ちるため、近赤外の狭帯域フィルター (それぞれ NB118 と NB209) を用いた撮像観測によって輝線をとらえることができる。我々は Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) 領域で見つかった LAEs に対して、NB118 および NB209 画像をスタッキングすることで LAEs の平均的な [OII] と $\text{H}\alpha$ 輝線の検出に初めて成功した。 $\text{H}\alpha$ 輝線強度から星形成率を推定したところ、 $6 M_{\odot}/\text{yr}$ を得た。また $\text{H}\alpha$ 輝線と [OII] 輝線の強度比から金属量を調べたところ、少なくとも $0.16 Z_{\odot}$ 程度という比較的高い金属量の値を持つことが分かった。

近赤外分光による $z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) の物理的性質の研究

Janice C. Lee(OCIW) らとの共同研究。 $z = 2.2$ のライマンアルファ輝線銀河 (LAEs) のより詳細な性質に迫ることを目的に、我々は近赤外分光観測を行ってきている。2011 年 2 月には、Keck/NIRSPEC を用いて COSMOS, GOODS-S, GOODS-N 天域で発見された明るい LAEs の近赤外分光観測を行った。現在、その解析を進めているところである。分光により、[OII], $\text{H}\beta$, [OIII], $\text{H}\alpha$ などの明るい輝線の強度や波長を正確に求めることができれば、LAEs の金属量や $\text{Ly}\alpha$ 輝線を強く放射できるメカニズムに制限をつけることができると期待される。

$z \sim 2.2$ LAEs の近赤外分光研究

大内正己 (東京大学宇宙線研究所), Janice C. Lee (OCIW), Michael Rauch(OCIW) らとの共同研究。LAE は遠方宇宙にあまねく存在する銀河種族の 1 つだ。他の遠方銀河では近赤外分光の結果を用いて詳細な性質が議論されている一方で、LAE は非常に暗いために、これまでわずか 4 天体でしか分光検出されておらず、未だに詳細が分かっていない。そこで SSA22, SXDS, CDFS で見つかった $z \sim 2.2$ LAE の内、可視分光同定されている天体、撮像において $\text{H}\alpha$, [OII] に excess の見られる天体などを、チリにある 6.5m マゼラン望遠鏡の多天体近赤外分光装置 MMIRS を用いて観測した。この結果、計 3 天体で nebular emission lines の検出に成功した。我々は、可視分光データのある 2 天体について、 $\text{Ly}\alpha$ の z と $\text{H}\alpha$ や [OII] から決まる系の z とのずれから $\text{Ly}\alpha$ の速度差を求め、他のサンプルと合わせることで、世界で初めて LAE の $\text{Ly}\alpha$ の速度差について統計的議論を行い他の遠方銀河種族との比較も行った。この議論の結果、これまでに無い観点から LAE と LBG との違いを浮き彫りにし、ISM の運動への制限を加えることに成功した。

すばる望遠鏡 Suprime-Cam を用いた Abell 851 銀河団の広視野 H α 輝線サーベイ

児玉忠恭, 仲田史明 (国立天文台) との共同研究. 我々はすばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam の狭帯域フィルター NB921(中心波長 9180Å) を用いて, 赤方偏移 0.41 の巨大銀河団 Abell 851 とその周辺領域を網羅する広視野 H α 輝線探査に成功した. 我々は, この赤方偏移 0.4 の H α 輝線が捉えられる NB921 フィルターに加え, BVRIz' バンドの撮像データを組み合わせ, 銀河団周囲の大規模構造に沿って 400 を超える H α 輝線銀河 (星形成率に換算しておよそ $0.1M_{\odot}/\text{yr}$ 以上をもつ) を同定した. なかでも我々は, 赤い色 ($B-I > 2$) を示す星形成銀河 (ダスト赤化を強く受けた星形成銀河と考えられる) に注目して解析を行い, このような赤い色を示す星形成銀河が, 銀河団から遠く離れた銀河群環境に集中して存在していることを発見した. 本研究の結果は, 銀河の性質が銀河団周辺の銀河群環境において大きく変化していることを示すものであり, 銀河の進化を理解するうえでの銀河団周辺環境の重要性を強く認識させられるものである. [19, 31]

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

但木謙一, 児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. 我々はすばる望遠鏡の近赤外線カメラ MOIRCS の狭帯域フィルター NB209 (中心波長 $2.09\mu\text{m}$) を用いて GOODS-North 領域における赤方偏移 2.2 の H α 輝線銀河探査を行った. 我々は, およそ 70 平方分角の観測視野内に星形成率にして $12M_{\odot}/\text{yr}$ – $60M_{\odot}/\text{yr}$ にわたる 11 個の H α 輝線銀河を同定し, そのうち 7 個の銀河については同じく MOIRCS の多天体分光モードによる分光追観測を行い, H α 輝線を確認することにも成功している. 我々は, 本研究によって構築された赤方偏移 2.2 のフィールド銀河の星形成活動を, その他の時代のさまざまな環境下の星形成銀河サンプルと比較したところ, 高密度環境ほど銀河の活動性 (ここでは星形成率の総和を星質量の総和で規格化した量を採用) が急速に低下していることを示した. 我々は現在, さらに多くのサンプルを構築し, この物理量を統一的指標として銀河の進化と質量および環境の関係を明らかにすべく, データの取得を進めている. [20]

XCS2215–1731 銀河団領域の [OII] 輝線銀河サーベイ

林将央, 児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. XCS2215 銀河団 (赤方偏移 1.46) は, 広がった X 線放射が確認されている銀河団としては, もっとも遠方に存在するものの一つである. 我々はこの XCS2215 銀河団について昨年度までに, すばる望遠鏡の狭帯域フィルター NB912 (中心波長 9139Å) を用いた [OII] 輝線の探査を行っているが, メンバー銀河の選出 (こ

こでは BzK 選択法) のために必須である近赤外線のデータが銀河団の中心付近に限られていたために, 銀河団の周辺部における銀河の星形成活動のようすを知ることができなかった. 我々は本年度, 英国赤外線望遠鏡 (UKIRT) の WFCAM を用いて Suprime-Cam の観測視野のほぼ全面にわたる K バンドのデータを取得し, 解析の領域を拡張したところ, 銀河団の周辺にフィラメント状に広がる [OII] 輝線銀河の大きな集団が見つかった. また, 銀河団中心部に見つかった [OII] 輝線銀河は, その他の環境の [OII] 輝線銀河に比べて赤い色を示すものが多く, これは AGN の存在によるものかもしれない. もしかすると, 銀河団銀河の形成の初期においては, AGN による星形成銀河の抑制 (フィードバック) が重要な役割を担っていた可能性もある. [4, 18, 31]

MAHALO-Subaru プロジェクトの推進

児玉忠恭, 林将央, 但木謙一, 田中壱 (国立天文台) らとの共同研究. 我々はおもに赤方偏移 0.4 ~ 1.5 の銀河団領域についてすばる望遠鏡の広い視野, および豊富な狭帯域フィルターセットを活用して, 銀河団とその周辺部の銀河の星形成活動探査を進めてきた. これまでの成果として, 赤方偏移 1 以下の宇宙においては, 銀河団銀河はそのほとんどが星形成を終了していることが示されたが, 一方で赤方偏移 1.5 程度まで時代を遡ると, 銀河団の中心付近でも活発に星形成を行う銀河が多く見られるようになることが分かってきた. そこで我々は, さらに遠方宇宙の一般フィールド/原始銀河団領域のそれぞれについて, 主にすばる望遠鏡の MOIRCS の狭帯域フィルター群を用いた輝線銀河探査の拡充を目指している. “MAHALO-Subaru” (MApping H-Alpha and Lines of Oxygen with Subaru) と名付けられたこのプロジェクトは, 2010 年度~2011 年度にかけて多くのデータが取得される予定であり, 完成すればこれまで開拓の難しかった赤方偏移~2 の宇宙における銀河の星形成活動について重要な知見が得られるであろう. [2, 3, 8, 31]

RXJ1716+6708 銀河団のフォローアップ観測

児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸 (IPMU) らとの共同研究. 我々はこれまでも重点的に探査を進めてきた RXJ1716 銀河団領域 (赤方偏移 0.8) について, さまざまな形でフォローアップ観測を行っている. まず, すばる望遠鏡の FOCAS を用いた可視光分光観測では, およそ 50 個の銀河団メンバーを新たに同定し, 特に測光データによって示唆されていた 10 メガパーセクスケールの大規模構造がたしかに赤方偏移 0.81 に存在する巨大フィラメントであることを確認した. また, RXJ1716 銀河団からの [OII] 輝線を捉えることができる, すばる望遠鏡の Suprime-Cam の狭帯域フィルター NA671 による撮像フォローアップからは, 上記 FOCAS のデータで明らかになった大規模構造よりさらに広い範囲にわたって星形成銀河の構造が存在している可能性も見えてきている. さらに, この RXJ1716 銀河団領域は, 2010 年度に運用

を開始したばかりのすばる望遠鏡の最新装置 FMOS によるパイロットサーベイの領域にも選ばれており、フルスペックには及ばないものの、およそ 200 天体について近赤外線分光データも取得しており、現在そのデータを解析中である。

かみのけ座銀河団の HST-ACS Treasury Program

小宮山裕 (国立天文台), D. Carter (Liverpool John Moores Univ.) らとの共同研究. HST の Cycle15 (2006-2007) の Treasury Program に採択されたかみのけ座銀河団撮像計画は、この銀河団の広い領域 (中心から約 1 度まで) にわたって HST-ACS の 82 視野 (740 平方分) を点在させ、F475W (青) と F814W (赤) の 2 色で撮像する計画であったが、2007 年 1 月に起きた ACS の故障により、25 視野 (274 平方分) しか観測できなかった。しかし高密度の銀河団中心部の約半分がカバーできている。観測された天域にある約 73000 個の天体の測光カタログが完成した。[14]

広がった H α 放射を伴うかみのけ座銀河団メンバー銀河の発見

八木雅文 (国立天文台), 吉田道利 (広島大学), D. Carter (Liverpool John Moores Univ.) 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 放射を伴う銀河が 14 個見つかった。それらはみな銀河団中心から 0.2 Mpc 以上離れた位置にあり、中心部にある青くて ($g-r < 0.5$) 明るい ($r < 17.8$ mag) の銀河の 57% を占める。それらはまた、メンバー銀河の赤方偏移分布の赤い端あるいは青い端に位置する。これらの銀河はごく最近に銀河団へ落ち込み始め、ガスが剥ぎ取られつつある状態を見ていると推測される。[15]

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。Hyper-z コードを用いて SED fitting を行い、SED タイプ、年齢等の性質を調べている。

宇宙の星形成史に基づくハビタブルな惑星系の個数の評価

観測された宇宙の星形成史と構造形成論をもとに、宇宙の恒星の個数密度の過去から未来にわたる時間変化を質量ごとに調べた。そして、生命の存在する唯一の例である地球をもとに、生命が存在可能な惑星系の条件についての簡単な仮定を置き、その個数密度の時間変化を見積もった。また、生命が存在できる惑星の個数が十分存在する期間として Cosmic Habitable Time という量を導入し、それを太陽系の存在期間と比較した。現在までに宇宙は、生涯に作る星の 90% 以上を作り終えており、今後生まれる恒星の数は宇宙のスケールファクターの -3 乗で単調に減少していくことが予想される。同時に、太陽系は生命の存在可能な惑星の数がピークを迎える時期に存在していることもわかった。今後太陽系外惑星の研究が進めば、より詳細な議論ができるだろう。

IAU Division VIII triennial report の作成

国際天文学連合の Division VIII (Galaxies and the Universe) の President として triennial report を作成した。[29]

3.0.2 太陽及び太陽系

スリットレス分光による小惑星の分類

吉田二美, 八木雅文, 小宮山裕, 仲田史明, 古澤久徳 (国立天文台), 中村士 (帝京平成大学) との共同研究. すばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam 用のグリズムを用いて、小惑星のスペクトル分類の研究を行っている。暗黒星雲を、背景の星と銀河を遮る遮光カーテンとして使い、グリズムによる撮像データから、太陽系小天体 (主に小惑星と太陽系外縁天体) のスペクトル分類を行うものである。2009 年 5 月に行われた 1 晩の試験観測データを解析し、良質なスペクトルの得られた $R < 23$ mag の 37 個の小惑星を 4 つのタイプ (S, Q, D, C) に分類した。メインベルトの中に多くの Q 型小惑星があることがわかった。[28]

スローン・デジタル・スカイ・サーベイのデータを用いた重力レンズクエーサー探索

SDSS 重力レンズ探索チームとの共同研究. スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の撮像および分光データ ([24] など参照) を用いて重力レンズクエーサー探索を行った。すでに開発済み (詳細な検証済み) の重力レンズ探索アルゴリズムを SDSS のデータにあてはめ、得られた候補天体をハワイ大学 2.2m 望遠鏡などを用いて追加観測し、合計 9 個の新しい重力レンズクエーサーの発見を報告した [23, 25]。中でも、SDSS J0946+1835 と名付けられた重力レンズクエー

サーは、重力レンズ現象を受けているクエーサーの赤方偏移が4.8と高く、これまでに見つかった中で“最遠”の重力レンズクエーサーを発見することに成功している。これらの新しい発見とこれまでの成果を合わせることで、SDSSの全データ(SDSS-IおよびSDSS-II)に対する重力レンズクエーサー探索を完了し、その70を同定し、さらにそれらのうちの36,287個のクエーサーから発見された19個の重力レンズクエーサーについては“統計的な”扱いが可能となっている)をカタログとして公表した[26]。このカタログ(統計カタログ)を用いた宇宙論検証により、平坦な宇宙に対して $\Omega_{\Lambda} = 0.84^{+0.06}_{-0.08}(\text{stat.})^{+0.09}_{-0.07}(\text{syst.})$ という制限を得ている。また、上記に加え、SDSS J1029+2623と呼ばれる重力レンズクエーサー(この天体はこれまでの中で最も分離角が大きいものとして興味深い)に対してVLAによる高解像度の電波観測を行い、この天体を説明するためには重力レンズ現象を起こしている銀河団のポテンシャルが複雑なものでなければならないことを示した[27]。

可視光とX線のデータを用いた銀河団進化の探索

川原田円(ISAS/JAXA)、高橋芳太(理研)、小波さおり(東京理科大学/理研)との共同研究。銀河団に対して最もよく知られている観測結果の1つに、「銀河間の高温プラズマガスがメンバー銀河の分布や暗黒物質の分布よりも広がっている(すなわち $\beta < 1$)」というものがある。また、それに加えて、高温プラズマガス中の重元素の分布もメンバー銀河の分布より広がっている、という事実も知られつつあり、我々は、これらを総合して「銀河団中では、メンバー銀河は運動エネルギーを高温プラズマガスへ受け渡し、宇宙年齢程度の時間をかけて徐々にポテンシャル中心へ落下しているのではないか」、という仮説をたてている。この仮説を実証するために、現在、(多数の銀河団を用いて)銀河団中のプラズマガスの質量分布に対するメンバー銀河の表面輝度分布の赤方偏移進化を調べる、という研究を推進している。これまでにSDSSとXMM-Newton衛星のアーカイブデータを用いて6つの銀河団($z = 0.07 \sim 0.28$)について調べ、いずれの銀河団においてもプラズマガスが銀河の表面輝度分布よりも広がっていること、および、その傾向が低赤方偏移ほど顕著であること(すなわち上記の仮説が見えつつあること)を示した[51]。さらに、より高赤方偏移の銀河団について調べるために(可視光のデータをより強化するために)ハワイ大学2.2m望遠鏡を用いて追加観測を行い、例えば $z = 0.55$ の銀河団MS0451.6-0305への拡張を行った[53]。その結果においても、まだ準備的な段階ではあるが、総じて「我々の仮説が見えつつある」ことが確認されている。

<受賞>

- [1] 嶋作一大, 岡村定矩 (他 15 名): 日本天文学会 2010 年度欧文研究報告論文賞 (2011/3) “Ly α Emitters at $z = 5.7$ in the Subaru Deep Field”, *PASJ*, **58**, 313, 2006.

<報文>

(原著論文)

- [2] Koyama, Y. & Kodama, T. 2009, “Unveiling the Hidden Star Formation Activity in and around Distant Clusters of Galaxies with AKARI”, *ASP Conf. Series*, **418**, 251
- [3] Lee, M.G., Lee H.M., Im, M., Hwang, H.S., Hwang, N., Lim, S., Lee, J.C., Kim, S.J., Seo, H.J., Ko, J., Shim, H., Matsuhara, H., Takagi, T., Nakagawa, T., Wada, T., Kodama, T., Koyama, Y., Goto, T. 2009, “An Infrared View of Clusters of Galaxies: CLEVL”, *ASP Conf. Series*, **418**, 241
- [4] Hayashi, M., Kodama, T., Koyama, Y., Tanaka, I., Shimasaku, K. and Okamura, S. 2010, “High star formation activity in the central region of a distant cluster at $z = 1.46$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1980
- [5] Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Dunlop, J., Farrah, D., Lee, J. C., McLure, R., Okamura, S., Yoshida, M. 2010, “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z = 3 - 4$ Based on Deep Large Area Surveys in the Subaru-SXDS/UKIDSS-UDS Field”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1580-1598.
- [6] Matsuda, Y., Richard, J., Smail, I., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Frye, B. L., Yamada, T., Nakamura, Y., Hayashino, T., Fujii, T., 2010, “A search for galaxies in and around an HI overdense region at $z = 5$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **403**, L54-L58
- [7] Goto, T., Koyama, Y., Wada, T., Pearson, C., Matsuhara, H., Takagi, T., Shim, H., Im, M., Lee, M. G., Inami, H., Malkan, M., Okamura, S., Takeuchi, T. T., Serjeant, S., Kodama, T., Nakagawa, T., Oyabu, S., Ohyama, Y., Lee, H. M., Hwang, N., Hanami, H., Imai, K. and Ishigaki, T. 2010, “Environmental dependence of $8\mu\text{m}$ luminosity functions of galaxies at $z \sim 0.8$: Comparison between RXJ1716.4+6708 and the AKARI NEP deep field”, *Astron. Astrophys.*, 514, 7.
- [8] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Hayashi, M., Okamura, S., Tanaka, I. and Tokoku, C. 2010, “Panoramic H α and mid-infrared mapping of star formation in a $z = 0.8$ cluster”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **403**, 1611.
- [9] Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Dunlop, J., Farrah, D., McLure, R., Okamura, S. 2010, “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z \sim 6 - 7$: Constraints on the Escape Fraction of Ionizing Photons from Galaxy Building Blocks”, *Astrophys. J.*, **724**, 1524-1535
- [10] Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Ouchi, M., Totani, T., Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., Harayama, A., Kodaka, N., Morokuma, T., Furusawa, H., Tajitsu, A., Hattori, T., 2010, “Ly α Emitters at $z = 7$ in the

- Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field: Photometric Candidates and Luminosity Functions”, *Astrophys. J.*, **722**, 803-811
- [11] Ota, K., Ly, C., Malkan, M. A., Motohara, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Morokuma, T., Iye, M., Kashikawa, N., Hattori, T., 2010, “Spitzer Space Telescope Constraint on the Stellar Mass of a $z = 6.96$ Ly α Emitter”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, 1167-1175
- [12] Ouchi, M., Shimasaku, K., Furusawa, H., Saito, T., Yoshida, M., Akiyama, M., Ono, Y., Yamada, T., Ota, K., Kashikawa, N., Iye, M., Kodama, T., Okamura, S., Simpson, C., Yoshida, M. 2010, “Statistics of 207 Ly α Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on Reionization and Galaxy Formation Models”, *Astrophys. J.*, **723**, 869-894
- [13] Yuma, S., Ohta, K., Yabe, K., Shimasaku, K., Yoshida, M., Ouchi, M., Iwata, I., Sawicki, M., 2010, “Stellar Populations of Ly α Emitters at $z = 4.86$: A Comparison to $z \sim 5$ Lyman Break Galaxies”, *Astrophys. J.*, **720**, 1016-1029
- [14] Hammer, D. et al. (49 authors including Okamura, S.) 2010, “The HST/ACS Coma Cluster Survey. II. Data Description and Source Catalogs”, *Astrophys. J. Suppl.*, **191**, 143-159
- [15] Yagi, M., Yoshida, M., Komiyama, Y., Kashikawa, N., Furusawa, H., Okamura, S., Graham, A. W., Miller, N. A., Carter, D., Mobasher, B., Jogee, S. 2010, “A Dozen New Galaxies Caught in the Act: Gas Stripping and Extended Emission Line Regions in the Coma Cluster”, *Astron. J.*, **140**, 1814-1829
- [16] Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Kousai, K., Nakamura, E., Horie, M., Fujii, T., Umemura, M., Mori, M. 2011, “The Subaru Ly-alpha blob survey: A sample of 100 kpc Ly-alpha blobs at $z = 3$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **410**, L13-L17.
- [17] Furusawa, J., Sekiguchi, K., Takata, T., Furusawa, H., Shimasaku, K., Simpson, C., Akiyama, M., 2011, “The Mass-dependent Clustering History of K-selected Galaxies at $z < 4$ in the SXDS/UDS Field”, *Astrophys. J.*, **727**, 111-123.
- [18] Hayashi, M., Kodama, T., Koyama, Y., Tadaki, K., Tanaka, I., 2011, “Properties of star-forming galaxies in a cluster and its surrounding structure at $z = 1.46$ ”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, in press.
- [19] 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.*, in press.
- [20] Tadaki, K., Kodama, T., Koyama, Y., Hayashi, M., Tanaka, I., Tokoku, C., 2011, “Cosmic Star Formation Activity at $z = 2.2$ Probed by H α Emission Line Galaxies”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press.
- [21] Ikarashi, S. et al. (43 authors including Shimasaku, K.), 2010, “Detection of an ultra-bright submillimeter galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, submitted.
- [22] Kashikawa, N., Shimasaku, K., Matsuda, Y., Egami, E., Jiang, L., Nagao, T., Ouchi, M., Malkan, M. A., Hattori, T., Ota, K., Taniguchi, Y., Okamura, S., Ly, C., Iye, M., Furusawa, H., Shioya, Y., Shibuya, T., Ishizaki, Y., Toshikawa, J., 2011, “Completing the Census of Ly α Emitters at the Reionization Epoch”, *Astrophys. J.*, submitted.
- [23] Kayo, I., Inada, N., Oguri, M., Morokuma, T., Hall, P. B., Kochanek, C. S., Schneider, D. P. 2010, “Eight New Quasar Lenses from the Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search”, *Astron. J.*, **139**, 1614-1621.
- [24] Schneider, D. P. et al. (47 coauthors including Inada, N.) 2010, “The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release”, *Astron. J.*, **139**, 2360-2373.
- [25] McGreer, I. D., Hall, P. B., Fan, X., Bian, F., Inada, N., Oguri, M., Strauss, M. A., Schneider, D. P., Farnsworth, K. 2010, “SDSS J094604.90+183541.8: A Gravitationally Lensed Quasar at $z=4.8$ ”, *Astron. J.*, **140**, 370-378.
- [26] Inada, N. et al. (22 coauthors) 2010, “The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. IV. Statistical Lens Sample from the Fifth Data Release”, *Astron. J.*, **140**, 403-415.
- [27] Kratzer, R. M., Richards, G. T., Goldberg, D. M., Oguri, M., Kochanek, C. S., Hodge, J. A., Becker, R. H., Inada, N. 2011, “Analyzing the Flux Anomalies of the Large-separation Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, *Astrophys. J. (Letters)*, **728**, L18
- (会議集録)
- [28] Yoshida, F., Yagi, M., Komiyama, Y., Nakata, F., Furusawa, H., Ohno, T., Okamura, S., Nakamura, T. 2010, “Slitless Spectroscopy of Small Solar System Bodies on a Dark Cloud Curtain”, 41st Lunar and Planetary Science Conference, held March 1-5, 2010 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1533, p.1290.
- [29] Okamura, S, Sadler, E., Bertola, F., Birkinshaw, M., Combes, F., Davies, R. L., Padmanabhan, T., Webster, R. 2010, “Division VIII: Galaxies and the Universe”, *Transactions of the IAU*, Volume 6, Issue T27, p. 223-224.
- (国内雑誌)

(学位論文)

- [30] 中島王彦 “Multi-Emission-Line Study of Lyman Alpha Emitters at $z=2.2$ ” (修士論文)
- [31] 小山佑世 “Galaxy Evolution in Growing Clusters” (博士論文)

(著書)

- [32] 「光科学研究の最前線 2」, 岡村定矩 (「光・赤外線天文学」分担執筆), 強光子場科学研究懇談会
- [33] 「宇宙はどこまでわかったか?」, 岡村定矩編著 (吉田, 須藤, 田村), 数学セミナー別冊, 日本評論社
- [34] 「理科年表」2011, 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

- [35] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Hayashi, M., Okamura, S., Tanaka, I., Tokoku, C., Tanaka, M. & Nakata, F.: “Hidden Star Formation Activity around Distant Clusters at $z \sim 1$ ”, *CLJ2010: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy, an IPMU/DENET international conference on galaxy clusters*, IPMU, Kashiwa, Japan, 2010/6/28-7/2.
- [36] Nakajima, K., Okamura, S., Ito, N., Nakada Y., Nishiura, S., Sarugaku, T., Shimasaku, K., & Soyano, T.: “Deep Imaging of Diffuse Intracluster Light in the Coma cluster”, *CLJ2010: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy, an IPMU/DENET international conference on galaxy clusters*, IPMU, Kashiwa, Japan, 2010/6/28-7/2.

(国内会議)

一般講演

- [37] 岡村定矩: “宇宙再電離期近くの銀河探査と環境効果の検証”, 「第 10 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, RESCEU/DENET サマースクール, 高知パレスホテル, 2010/8/29-9/1.
- [38] 岡村定矩: “技術シンポジウムの 30 年—光赤外天文学の技術進歩—”, 天文学に関する技術シンポジウム第 30 回記念講演, 木曾建設会館, 長野県木曾町, 2010/9/8-10
- [39] 嶋作一大: “PFS による銀河進化”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台, 2011/1/19.
- [40] 小山佑世: “銀河団環境とダスティー銀河”, Galshop 2010 銀河の激進化期 ($1 < z < 3$) を探る, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2010/8/6.
- [41] 小山佑世: “SPICA で究める遠方銀河団・銀河群・大規模構造”, SPICA サイエンスワークショップ 2010 (宇宙圏研究会), 国立天文台, 東京都三鷹市, 2010/12/16-17.

- [42] 小山佑世: “MAHALO-Subaru: A Panoramic H α Imaging Survey for the Abell851 Cluster at $z = 0.4$ ”, Subaru Users' meeting 2010, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2011/1/19-20.

- [43] 小野宜昭, “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z = 6 - 7$ ”, 2010 年度 天文・天体物理 若手の会 夏の学校. ホテル日航豊橋, 愛知県豊橋市, 2010/8/2.

- [44] 小野宜昭, “LAEs の性質: SED fitting からの示唆”, Galaxy Workshop Subaru 2010 「銀河の激進化期 ($1 < z < 3$) を探る」, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2010/8/6.

- [45] 中島王彦: “First Unbiased Estimates of the Metallicity and Star-Formation Activity of Lyman Alpha Emitters”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台三鷹, 2011/1/19-20.

- [46] 篠木新吾 “遠方と近傍の星形成銀河の形態比較”, 2010 年度天文・天体物理若手の会夏の学校, ホテル日航豊橋, 愛知県豊橋市, 2010/8/2-5.

- [47] 橋本 拓也, “The Properties of Lyman α Emitters(LAEs)”, 2010 年度天文・天体物理若手の会夏の学校, ホテル日航豊橋, 愛知県豊橋市, 2010/8/2-5.

(学会発表)

日本天文学会 2010 年秋季年会, 金沢大学 (2010/09/22-24)

- [48] 小山佑世, 嶋作一大, 岡村定矩, CL0939+4708 銀河団 ($z = 0.41$) の広視野 H α 輝線銀河サーベイ, X23a.

- [49] 小野宜昭, 嶋作一大, 岡村定矩: Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z = 6 - 7$, X2a.

- [50] 中島王彦, 嶋作一大, 小野宜昭: Successful Detections of [OII] and H α Emission Lines from Typical LAEs, X17a.

- [51] 稲田直久, 川原田円 (ISAS/JAXA), 高橋芳太 (理研), 小波さおり (東京理科大学/理研), 牧島一夫: Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters, T06a

日本天文学会 2011 年春季年会, 筑波大学 (2011/03/16-19; 東日本大震災のため中止)

- [52] 橋本拓也, 嶋作一大, 小野宜昭, 中島王彦: 近赤外分光による $z \sim 2.2$ LAE の nebular emission lines の検出, X28a.

- [53] 稲田直久, 川原田円 (ISAS/JAXA), 高橋芳太 (理研), 小波さおり (東京理科大学/理研), 牧島一夫: Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters. II., 2011 年日本天文学会春季年会予稿集

(その他)

一般講演

- [54] Yusei Koyama: “MAHALO-Subaru I: Panoramic H α Imaging Survey for Intermediate-Redshift Clusters”, Subaru Seminar, Hilo, Hawaii, U.S.A., 2010/6/24.

- [55] Yusei Koyama: “Panoramic mapping of star formation in and around distant clusters of galaxies”, IPMU ACP seminar, Kashiwa, Japan, 2011/2/24
- [56] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 第1回浴永講座, 山口県防府市, 2010/4/25
- [57] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 全国同時七夕講演会. 東京大学小柴ホール, 2010/7/7
- [58] 岡村定矩: 「宇宙の姿ーわかったこととわからないことー」, 工学院大学サイエンスカフェ, 工学院大学, 2010/10/8
- [59] 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, 2010/10/23
- [60] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 「新しい科学」編集委員会基調講演, 東京書籍(株)関西支社, 大阪市, 2010/11/14, 11/20.
- [61] 岡村定矩: 「天文学者の見る宇宙」, 東京大学駒場祭, 2010/11/23.
- [62] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 足立区花畑地域学習センター, 2010/12/19.
- [63] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか?」, 第2回浴永講座, 山口県防府市, 2011/3/27.

新聞記者発表

- [64] 八木雅文, 岡村定矩他: 「すばる望遠鏡、かみのけ座銀河団に広がった電離水素ガス雲を多数発見ー銀河団に引きずり込まれガスを剥がされる銀河たちー」, 2010年11月9日, 国立天文台プレスリリース
http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2010/11/09/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 星形成から惑星系形成に至る物質進化の研究

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。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程の多面的に研究している。

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

【ALMA (アルマ) に向けて】近年、ミリ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低雑音ヘテロダイン受信機の実現がその背景にある。我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開している。しかし、感度、分解能はまだ不十分である。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA は、南米チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波望遠鏡（電波干渉計）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、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。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには C^+ , N^+ などの原子スペクトル線の他、 CH , H_2D^+ , HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、上で述べた星・惑星系形成における物質進化の要を押さえることができる。世界的には 2009 年 5 月に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測のフロンティアが開かれつつある。本研究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指しており、2011 年度に、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うことを計画している。本研究室は、1998 年から 2005 年までの間、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

4.1.2 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、電波観測により大きな進歩を遂げつつある。その結果、低質量星近傍の分子組成が天体によって大きく異なることがわかってきた。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低質量星（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と見られる。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、星形成を探る新しい手段として注目されている。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、低質量星形領域を中心に幅広く研究を進めている。

L1527 における CH_3D の検出

メタン (CH_4) は、星間空間において最も基本的な有機分子であり、星間塵氷層の主要な構成物質でもある。しかし、回転遷移が禁制であることから、低温星間分子雲での存在は確認されてこなかった。このような状況にあって、我々は、メタンの重水素化物である CH_3D に着目し、アリゾナ大学の SMT 10 m 望遠鏡を用いて、おうし座の L1527 原始星方向で

その回転遷移輝線 ($J_K = 1_0 - 0_0$; 232.6 GHz) の探索を行った。60 時間に及ぶ観測の結果、そのスペクトル線を検出に初めて成功した。L1527 は、代表的 WCCC 天体であり、 CH_4 の蒸発をきっかけとして炭素鎖分子が形成されていると考えられている。今回の CH_3D 検出は、我々が提案した WCCC のメカニズムを支持する結果と言える。

TMC-1A の高励起スペクトル線

上で述べたように、同じ進化段階 (Class 0) にある低質量原始星でも分子組成は大きく異なる。そこで、次に問題となるのが、「この分子組成の多様性が惑星系形成に向けてどのように進化していくのか」という点である。そこで、我々は、L1527 と同じ領域にある Class I 天体 TMC-1A において、野辺山 45 m 望遠鏡や IRAM 30 m 望遠鏡を用いて様々な炭素鎖分子のスペクトル線観測を行った。その結果、高励起スペクトル線において、低励起のスペクトル線 (6.3 km s^{-1}) とは異なる視線速度 (5.8 km s^{-1}) の成分を検出した。この 5.8 km s^{-1} 成分は、原始星方向に集中していることが確認でき、TMC-1A が L1527 の進化したものに相当する天体である可能性が高まった。今後、化学的多様性の進化を理解するにあたり、Class I の WCCC 天体を発見できたことは非常に大きな成果と言える。

Lupus-1A の発見

我々は、最近、炭素鎖分子のスペクトル線が全天で最も明るい天体 Lupus-1A を発見した。アメリカ国立天文台の 100 m 電波望遠鏡による観測で、Lupus-1A には C_6H や C_8H 、 HC_9N など長い炭素鎖を持つ分子が豊富に存在していることがわかった。1976 年に TMC-1 という炭素鎖分子が豊富な星なしコアが発見されて以来、これを凌ぐ天体は見つかってこなかった。しかし、南天のおおかみ座の Lupus-1A は、炭素鎖分子の存在量が TMC-1 とほぼ同じであり、「第二の TMC-1」とも言うべき特異な天体であることがわかった。そればかりか、TMC-1 でも検出されていない C_4H^- などの負イオンも検出することができた。Lupus-1A の発見により、炭素鎖化学の理解や未知の分子の探査に大きな進展をもたらすであろう。

低質量星形成領域の重水素濃縮

低温の星間分子雲では、重水素は分子に濃縮される。宇宙における重水素の存在比は $\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$ であるが、星間分子雲中の分子における比は $0.01 - 0.1$ と高い (重水素濃縮)。原始星が誕生すると、その近傍の温度が上がり、この比が低くなることが期待される。しかし、その時間スケールは分子イオンでは 100 yr 程度と短い、中性分子では $10^4 - 10^5 \text{ yr}$ と長い。従って分子イオンの重水素濃縮度は原始星方向で下がるが、中性種の重水素濃縮度は原始星誕生

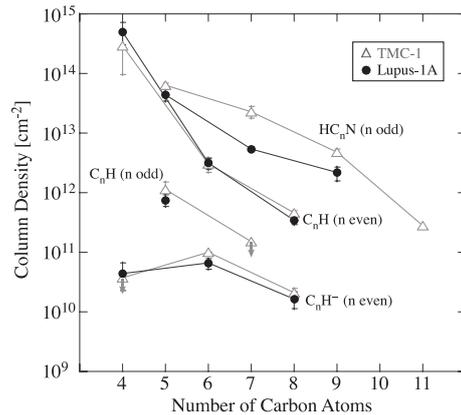


図 4.1: Column densities of carbon-chain molecules in TMC-1 and Lupus-1A

直前の状態を保持すると期待される。そこで、低質量 class 0 原始星 IRAS16293-2422 と L1551 について、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて観測を行った。その結果、 $\text{DCO}^+/\text{H}^{13}\text{CO}^+$ 比は原始星方向で確かに減少していることがわかった。一方、 $\text{DNC}/\text{HN}^{13}\text{C}$ については変化がなく、分子種によって重水素濃縮度の変化の違いがあることが確かめられた。

系外銀河の GMC スケールでの分子組成

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。その探求にはこれまで GMC の物理状態や運動を直接調べるアプローチがとられてきたが、GMC が置かれている環境が分子組成に及ぼす影響を調べる手法も、相補的に有効と考えられる。しかし、活動銀河核や爆発的星形成領域などの極限的環境下にある分子ガスを除き、GMC スケールでの分子組成の系統的研究はほとんどない。我々は、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、近傍円盤銀河 M51 の渦状腕に付随する GMC について 90 GHz 帯のスペクトル線サーベイを行った。観測の結果、 CCH 、 HNCO 、 CH_3OH 、 CS 、 C^{18}O 、 ^{13}CO を検出した。系外銀河の渦状腕において、これほど多くの分子が同時に検出されたのは初めてである。この結果は、GMC スケールの構造の形成・進化の研究に対しても、分子組成からの探究が可能であることを示している。

4.1.3 スペクトル線サーベイ観測

国立天文台野辺山観測所のレガシープロジェクトの一つとして、45 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 L1157 B1 と低質量星形成領域 L1527(WCCC 天体) のスペ

クトル線サーベイ、および ASTE 10 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 BHR71 と星形成領域 (IRAS15398-3359, RCrA IRS7B, G28.34) のスペクトル線サーベイを推進している。ある周波数範囲のスペクトル線をくまなく観測することで、それぞれの分子組成の全貌を先入観なく明らかにしつつある。

低質量星形成領域 L1527

L1527 (距離 140 pc) における WCCC の全貌を明らかにする目的で、波長 3 mm 帯のスペクトル線サーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。この天体ではスペクトル線幅が狭いので (~ 0.5 km/s)、一度に観測できる周波数範囲に限られる。それにもかかわらず、これまでの 4 年間の観測で、83-92 GHz の範囲をノイズレベル 5 mK 以下の高感度でサーベイし、様々な炭素鎖分子やそれらの重水素同位体種・ ^{13}C 同位体種のスペクトル線を検出した。また、多くの未同定線も見出された。一方で、 HCOOCH_3 や CH_3OCH_3 など、IRAS16293-2422 を始めとするホットコリノ天体で豊富に存在する大型飽和有機分子は検出されなかった。L1527 におけるラインサーベイの結果は、WCCC の機構の理解を進めるだけでなく、他の低質量星形成領域の分子組成を理解する上でも大いに役立つと期待される。

衝撃波領域 L1157 B1

宇宙空間では、星形成領域、超新星残骸、銀河中心など、至る所に衝撃波現象が見られる。我々は、衝撃波領域の化学過程を明らかにするため、L1157 B1 のラインサーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。L1157 B1 は、低質量原始星 IRAS 20386+6751 (距離 440 pc) から吹き出した双極分子流が周辺ガスに衝突して生じた衝撃波領域である。昨年までに 81.5-94.5 GHz、96.3-97.5 GHz の範囲が観測されており、本年度は新しい自己相関型分光計を用いてさらに 94.5-96.3 GHz、97.5-115.5 GHz 帯の観測を進めた。その結果、28 種類の分子 (同位体種を除く) の 120 本の輝線を検出し、L1157 B1 の分子組成のほぼ全容を捉えることができた。

本年度の第 1 の成果は、炭素鎖分子 $\text{CCS}(J_N = 9_8 - 8_7, 8_9 - 7_8, 8_7 - 7_6, 7_6 - 6_5)$ の検出である。炭素鎖分子は、これまで星なしコアなどの冷たい分子雲でよく観測されるが、衝撃波領域では注目されてこなかった。我々が検出した輝線は速度幅が 5 km s^{-1} 程度あり、 CCS のような炭素鎖分子が周辺ガス中ではなく、衝撃波領域に主に存在していることを示している。 CCS の生成と衝撃波がどのような関わりを持つのかは謎であり、今後の課題である。

第 2 の成果は PN の検出である (図 4.2)。PN は星間分子雲で知られる唯一のリンを含む分子であり、これまで Sgr B2、Ori KL、W51 といった大質量星形成領域でのみ検出されてきた。しかし、これらの領域は大規模かつ複雑であるため、PN の生成過程の観測的理解に結びつかなかった。今回、我々は、PN

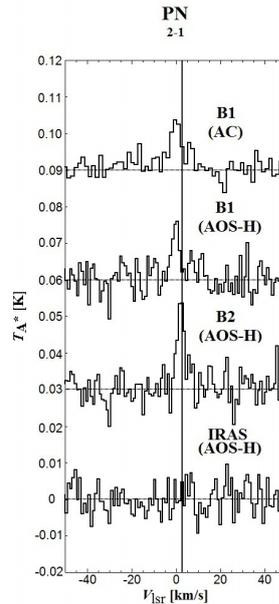


図 4.2: The PN($J = 2-1$) spectra observed toward the B1, B2, and protostar positions in L1157

($J = 2-1$) の輝線を L1157 B1、L1157 B2 の 2 つの衝撃波領域で検出した。一方、L1157 原始星方向では検出できなかったことから、PN の生成に衝撃波が何らかの役割を果たしていることがわかった。

70 GHz 帯 2SB 受信機の開発

野辺山 45 m 望遠鏡によるスペクトル線サーベイ観測を 70 GHz 帯まで拡張する目的で、2SB 型の SIS 受信機を製作した。70 GHz 帯には多くの分子の重水素化物や、 CH_2 、NS などの基本的分子のスペクトル線が存在する。スペクトル線サーベイの観測領域としては重要であるにもかかわらず、80-115 GHz 帯に比べて世界的にも観測的空白域となっている。本年度、製作した受信機を野辺山 45 m 望遠鏡の旧ビーム系に搭載し、試験観測を行った。72 GHz での受信機雑音は 300 K 程度であり、これまでの受信機 (S80) の $1/2$ である。直交 2 偏波が同時観測できることを考えると、8 倍の観測効率の向上が見込まれる。

ASTE によるラインサーベイ

チリに設置した ASTE 10 m 鏡を使い 345 GHz 帯のスペクトル線サーベイを、6 つの天体に対して行った。観測天体は、低質量 class 0 原始星でホットコリノ候補天体の R CrA IRS7B、WCCC 天体 IRAS 15398-3359、赤外線暗黒星雲 G28.34 (MM1、MM4、MM9)、および低質量原始星 BHR71 に付随する衝撃波領域である。R CrA IRS7B については、332 - 364 GHz の範囲を r.m.s 雑音温度 (T_{MB}) で 11-21 mK と

いう高い感度で観測した(図 4.3)。その結果、17 の基本的な分子及び重水素化合物を含む 16 の同位体分子を検出した。これらの分子は 3 個以下の重い原子を含む分子であり、より複雑な有機分子は検出されなかった。R CrA IRS7B は、これまで H_2CO や CH_3OH のスペクトル強度からホットコリノ天体であると考えられてきた。しかし、本観測から CN や CCH 等が典型的なホットコリノ天体である IRAS 16293-2422 よりも多いことがわかり、ホットコリノと WCCC の中間的な性質を持つ可能性が示された。

さらに、本サーベイでは複数の天体で同じ周波数領域の分子輝線スペクトルが得られたため、先入観なく天体ごとの分子組成をスペクトルパターンとして比較可能である。例えば、大質量星形成領域の赤外線暗黒星雲 G28.34 のパターンは、衝撃波領域の BHR71 のパターンに類似しているためと考えられる。このような「化学分析」は、天体の構造と進化を探る新しい手法となると期待される。

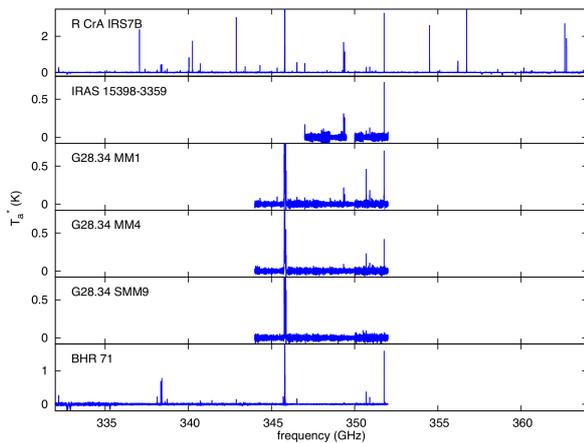


図 4.3: Spectral line survey with ASTE

4.1.4 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器(ヘテロダイナミック)の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS ミクサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb(ニオブ)を超伝導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による損失が増大するため、急激に性能が低下する。

そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ(HEB)ミクサ素子の開発を行っている。HEB ミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」〈中間周波信号〉に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、

超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1)熱電子の拡散によって電極に逃がす方法(拡散冷却)と、(2)フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法(格子冷却)の2つがある。我々は、主に NbTiN や NbN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。

HEB ミクサーの開発と評価

本研究室では 800 GHz 帯、1.5 THz 帯の超伝導 HEB ミクサを開発している。それには数 nm の膜厚の超伝導薄膜を用いる。しかし、高い超伝導転移温度を維持したまま超伝導物質を数 nm 厚に成膜することは技術的に難しい。超伝導素材としては、世界的に NbTiN、NbN が用いられている。NbTiN はどんな基板に成膜してもある程度高い転移温度を示すため、本研究室でも当初 NbTiN を用いて開発を進めてきた。一方、NbN は高い転移温度を得るためには、基板の種類が限られる。我々の目指す宇宙観測应用到に最適な導波管型 HEB ミクサには石英基板が必須である。そのため、NbN を用いた素子の製作は事実上不可能であった。しかし、昨年度、NbN と石英基板の間に AlN 緩衝層を導入することで高い転移温度をもつ NbN 薄膜が得られることを見出した。そこで現在、NbTiN、NbN+AlN 薄膜を用いた 2 種類の HEB ミクサを開発している。

宇宙からの微弱な信号を捉えるために、HEB ミクサは低雑音である必要がある。我々は雑音性能が素子のインピーダンス、つまり、マイクロブリッジのサイズに依存すると考え、様々なサイズのマイクロブリッジをもつ素子を作成、測定した。その結果、NbTiN 素子では 800 GHz 帯で受信機雑音温度 470 K、1.5 THz 帯では 570 K という低雑音化に成功した。また、NbN+AlN 素子でもそれぞれ 450 K、1100 K を達成した。これらの性能は実際の観測に用いるに十分な性能である。特に 1.5 THz 帯の NbTiN 素子の 570 K は量子雑音の約 8 倍にあたり、現在報告されている中では世界最高性能である。

ASTE 搭載用受信機的设计、製作

チリのアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載する受信機カートリッジを製作した。観測周波数帯は 900 GHz/1.3-1.5 THz 帯である。これらの周波数帯には基本的な原子、分子の出す回転スペクトルが含まれ、それらの観測により、星間分子雲の物質進化の「要」を捉えることができる。受信機はこの 2 つのバンドをカバーする。主鏡から導かれたビームはワイヤグリッドで直交 2 偏波に分けられ、デュワー外から準光学的に導入された局部発振信号と結合した後に導波管型 HEB ミクサに導かれる。ASTE 望遠鏡の口径は 10 m であるが、本観測では鏡面精度のよい内側約 7 m のみを使用する。それでも主鏡径 3 m の Herschel 宇宙望遠鏡の 2 倍以上の空間分

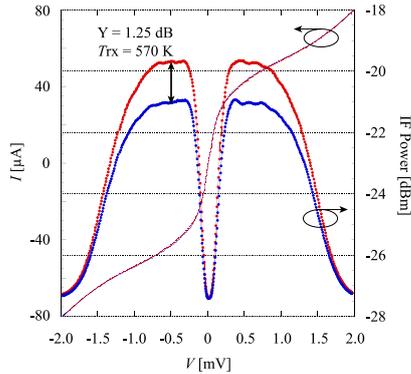


図 4.4: I-V curve and the RF response of the 1.5 THz waveguide HEB mixer

解能をもつ。2011 年度の試験観測に向けて、組み上げと性能評価が進行中である。

加熱成膜を取り入れた HEB ミクサの製作

HEB ミクサの IF 帯域を広げるためには、数 nm 厚の超伝導薄膜が必要である。超伝導薄膜の高品質化に効果的と考えられているのが成膜時に基板を高温に加熱する「基板加熱」である。基板を高温にすることで、高い結晶性を持つ膜を成膜できると期待される。本研究室では昨年 NbTiN 膜の成膜装置に赤外線ランプを用いた基板加熱機構を導入しており、これを用いて基板加熱が与える影響を調べた。その結果、400 °C に加熱して成膜をした場合、厚さ 8 nm の NbTiN 膜で T_c が 6.8 K から 10.1 K への上昇が見られた。また昨年報告した AlN による緩衝層を入れる方法と併用すると T_c は 13.3 K まで上昇した。これは基板加熱による上昇分と緩衝層による上昇分の和と同程度の値である。

基板加熱による膜質の向上が確かめられたため、これを HEB ミクサの製作工程に取り入れる方法について検討した。これまでのプロセスでは有機レジストを用いたリフトオフ用いているので、基板を加熱するとレジストが焦げ付いてしまう問題があった。これを解決する方法として、有機レジストのパターンを一旦アルミニウムに転写し、エッチングにより目的の形に超伝導膜を加工するという方法を考案した。この方法を用いて基板加熱過程を取り入れた HEB ミクサ製作を行ったところ、必要な加工精度は確保でき、超伝導転移も確認された。この方法の最適化を進め、HEB ミクサの性能向上を図りたい。

準光学 HEB ミクサの製作

1.9 THz 以上の高周波 HEB ミクサの開発では、特に細線の微細化と薄膜化の改良に取り組んだ。まず幅 1 μm 、長さ 0.2 μm 、厚み 6 nm の NbTiN 超伝導

細線を作成し、これを準光学型 2 次元平面アンテナに集積して、4K パルス管冷凍機で冷却を行った。その結果、強い超伝導電流が観測され、1.9 THz 帯の CW 発振信号 (数 μW) を照射しても、十分に細線を励起できないほどであった。このため、NbTiN の製膜プロセスの最適化を行いながら、細線長 0.1-0.15 μm 、厚み 3-5 nm の超薄膜化の条件出しを進めた。さらに細線の経年劣化の抑制と、IF 広帯域化を目的とし、細線の上に AlN 膜をスパッタするプロセスについてもテストした。本研究は、名古屋大学大学院理学研究科の福井康雄教授・前澤裕之助教授らとの共同開発により推進している。

3 THz 帯量子カスケードレーザーの開発

2 THz を超える高い周波数帯域では、局部発振器として満足な光源を入手することが難しい。そこで、量子カスケードレーザー (QCL) に着目し、情報通信研究機構 (NICT) 寶迫グループとの共同で開発を行った。製作プロセス条件の最適化、特にドライエッチングの導入により、導波路幅の小さな素子を製作できるようになった。その結果、発振周波数 3.1 THz において連続発振に国内ではじめて成功した。出力は最大で 34 μW であり、連続発振における最高動作温度は 74 K であった。

上述のように開発した QCL を局部発振器として用い、本研究室で開発した準光学型 HEB ミクサによる 3 THz 帯ヘテロダイン受信機を構築した。QCL と HEB ミクサはそれぞれ別々の液体 He デュワーに搭載し、ビームスプリッターにはワイヤグリッドを用いた。位相敏感検波を利用した Y-factor 法で雑音温度の測定を行ったところ、受信機雑音温度 5600 K (DSB) を得た。この値は、光学系による損失を考慮すると 2100 K となる。これは 3 THz 帯の HEB ミクサ受信機としてほぼ世界的な水準である。これにより、我々が開発してきた THz QCL が局部発振器として十分使用に耐えることが確かめられた。また、THz 帯 HEB ミクサには一般に NbN 薄膜が用いられているが、NbTiN 薄膜を用いてもほぼ同等な性能を得られることがわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, "A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-mass Star Formation", *Astrophys. J.*, **714**, 1658 (2010).
- [2] N. Sakai, T. Shiino, T. Hirota, T. Sakai, and S. Yamamoto, "Long Carbon-chain Molecules and Their Anions in the Starless Core, Lupus-1A", *Astrophys. J.*, **718**, L85 (2010).
- [3] T. Hirota, N. Sakai, and S. Yamamoto, "Depletion of CCS in a Candidate Warm-carbon-chain-chemistry Source L483", *Astrophys. J.*, **720**, 1370 (2010).

- [4] N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, "Distribution of Carbon-Chain Molecules in L1527", *Astrophys. J.*, **722**, 1633 (2010).
- [5] Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., and Habe, A., "Refined molecular gas mass and star-formation efficiency in NGC 3627", *MNRAS*, **411**, 1409-1417 (2011).
- [6] 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 (2011).
- [7] 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 B1 Shocked Region", *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [8] H. Maezawa, T. Yamakura, T. Shiino, S. Yamamoto, S. Shiba, N. Sakai, Y. Irimajiri, L. Jiang, N. Nakai, M. Seta, A. Mizuno, T. Nagahama, and Y. Fukui, "Stability of a Quasi-Optical Superconducting NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer at 1.5 THz Frequency Band", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, in press.
- (国内雑誌)
- [9] 坂井 南美、「化学の目で見た星形成：星形成領域の多様性」、*日本惑星科学会誌*、Vol. 20, No. 1, 2011
- (学位論文)
- [10] 芝祥一、「Development of Terahertz Quantum Cascade Lasers and Application to Heterodyne Receivers for Astronomical Observations」, 博士論文 (2011年3月)
- [11] 山口貴弘、「星形成領域 L1157 における衝撃波化学」、修士論文 (2011年3月)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Sakai, N. "Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions", *The Early Phase of Star Formation EPoS 2010*, Castle Ringberg, Germany, June 2010.
- [13] Sakai, N. "Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, Sep. 2010.
- [14] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J., Jorgensen, J., Bisschop, S., and Yamamoto, S., "Line survey of RCrA IRAS7B in the 345GHz window with ASTE", *Workshop on Interstellar Matter 2010*, Sapporo, Japan, September 13 -15, 2010
- [15] Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., and Tosaki, T., "Molecular Gas and Star Formation in Barred Spiral Galaxy NGC 3627", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, September, 2010
- [16] T. Yamaguchi, M. Sugimura, N. Sakai, T. Sakai, T. Umemoto, S. Takano, S. Yamamoto, H. Nomura, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, S. Takakuwa, T.J. Millar, and NRO 45 m Line Survey Group, "Line Survey of L1157 B1 Shocked Region", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, September 2010.
- [17] S. Shiba, N. Sekine, Y. Irimajiri, I. Hosako, T. Koyama, H. Maezawa, and S. Yamamoto, "Development of THz Coherent Sources Using Quantum Cascade Lasers," *Progress in Electromagnetics Research Symposium 1P9-36*(poster), Marrakesh, Morocco, March 2011
- 招待講演
- [18] N. Sakai, "Recent Progress of Carbon-Chain Chemistry in Molecular Clouds", *Workshop for Interstellar Matter 2010*, ILTS, Hokkaido University, Sapporo, Japan, Sep. 2010.
- [19] S. Yamamoto, "Chemical Evolution of Low-Mass Star Forming Regions", *2010 Western Pacific Geophysics Meeting*, Taipei, Taiwan, June, 2010.
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 坂井 南美、山本 智: 「星間分子雲における炭素鎖分子の ^{13}C 同位体異常」、分子分光研究会、東京工業大学、2010年5月
- [21] 椎野竜哉、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「原始星近傍での CCS、HC₃N 分子の大局的分布」、日本天文学会秋期年会 P27b、金沢大学、2010年9月
- [22] 坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、ラインサーベイチーム、「野辺山45m鏡レガシープロジェクト：L1527のラインサーベイ観測」、日本天文学会秋期年会 Q29c、金沢大学、2010年9月
- [23] 山口貴弘、杉村美佳、坂井南美、酒井剛、梅本智文、高野秀路、山本智、野村英子、相川祐理、平野尚美、Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, 高桑繁久、他 NRO 45 m ラインサーベイグループ、「L1157の衝撃波領域におけるラインサーベイ」、日本天文学会秋季年会 Q30c、金沢大学、2010年9月
- [24] 入交芳久、芝祥一、関根徳彦、寶迫巖、小山知記、前澤裕之、山本智、「局部発振器用 THz-QCL の開発」、ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム研究会(電子情報通信学会 電子デバイス研究会)、東北大学、2010年12月
- 招待講演
- [25] 坂井 南美 「Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions」、地球惑星連合大会、幕張メッセ、2010年5月
- [26] 坂井 南美 「星の誕生と化学進化」、第40回天文・天体物理夏の学校、ホテル日航豊橋、2010年8月

4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究

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

こうした、ダストに隠された星形成活動を検出する決定打となるのが、ミリ波・サブミリ波帯の連続波観測である。爆発的星形成で放射される強烈な紫外光を吸収し、数10Kに熱せられたダストの熱放射は、約100 μ m付近にピークを持ち、そのRayleigh-Jeans側にあたるミリ波サブミリ波帯で観測されるダスト熱放射は、 $S_\nu \propto \nu^{3\sim 4}$ もの強い傾きを持つ。これが、赤方偏移によって長波長側へシフトしてくるため、結果として、この波長帯では、ダスト放射のみかけのフラックスが、赤方偏移が大きくなってもほとんど変化しないという特徴を示す (Blain et al. 2002, Physics Reports, 369, 111)。これは、高赤方偏移になるほど急速に暗く見える可視光・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 SSA22 領域の中心部で発見された、原始クエーサー・フェイズにあるサブミリ波銀河

口径10m級のミリ波サブミリ波単一望遠鏡を使った掃天観測で検出される銀河(サブミリ波銀河)は、非常に多量のダストを持ち、かつ、非常に激しい、極限的な星形成(星形成率SFR \sim 数100-数1000 M_\odot)を起こしていることが示唆されており、初期宇宙で観測される若い銀河の中でも、特に質量の大きい星形成銀河種族ではないかと考えられている。現時点での標準的な構造形成・銀河形成モデルによれば、このような大質量星形成銀河は、質量の大きい暗黒物質ハローの中で形成されると期待される。

我々は、ASTE搭載AzTECカメラによる、原始銀河団領域SSA22で発見されている、 $z=3.1$ 付近のLyman α 輝線銀河(LAEs)の集中領域において、明るいサブミリ波銀河が多数密集して検出されていることを発見し、さらに、サブミリ波銀河とLAEsとの

2体相互相関関数を調べることにより、明るいサブミリ波銀河が、LAEsでトレースされる大規模構造、特にその中心部に付随していることを示した (Tamura et al. 2009, Nature, 459, 61)。この中で、最も明るいサブミリ波銀河SSA22-AzTEC1をサブミリ波干渉計SMAで観測し、波長860 μ mで高い位置精度($< 0''.3$)での位置決定を行い、多波長対応天体の同定を行った。この結果、SSA22-AzTEC1は可視光域はおろかKバンドでも極めて暗く($K_S = 25.08 \text{ mag}_{AB}$, 2σ)、IRACバンドでも非常に赤い天体であることがわかった。波長20cmの電波領域から中間赤外線に至るバンドでSED fittingを行ったところ、測光的赤方偏移は3.2であり、確かにこの最も明るいサブミリ波銀河がSSA22原始銀河団に付随しているものであることが示唆された。さらに興味深いことに、このサブミリ波銀河には、Chandra衛星で検出された微弱な、しかし非常に硬いスペクトルを示すX線源が付随していた。そのX線源は、 $N_H \sim 1 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ にも及ぶ強い吸収を受けており、ほとんどCompton-thickである。これらの考察の結果、SSA22-AzTEC1は、星形成率 $\sim 4 \times 10^3 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ にも及ぶ極めて激しい爆発的星形成銀河であるが、大量のダストに深く隠された巨大ブラックホールが存在し(ブラックホールと銀河の質量比 $M_{BH}/M_{Gal} \sim 1.4 - 3.5 \times 10^{-3}$)、極めて強い吸収を受けているがintrinsicには明るい($L_X \sim 3 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$)AGNを持つ天体、すなわち、原始クエーサー・フェイズにある天体であることがわかった。

このような、大規模構造の中心付近に付随して今まさに成長・進化途上にある原始クエーサー的なサブミリ波銀河が発見・同定されたのは、今回が初めてであり、現在の宇宙において、銀河団の中心に存在する大質量楕円銀河が、爆発的星形成銀河からクエーサー・フェイズを経て、巨大楕円銀河へと進化していくとする進化仮説を観測的に検証していく上で、非常に重要な実例になると考えられる。[6]

ダストに隠された爆発的星形成銀河の銀河計数と宇宙星形成史に占める割合への制限

われわれは、南米アタカマに設置したサブミリ波望遠鏡ASTEと波長1.1mm帯のカメラAzTECを使って、AKARI Deep Field South(ADF-S)と呼ばれる天域の中心付近、約1000平方分の領域を深い感度($\sigma \sim 0.4 - 0.8 \text{ mJy}$)で撮像した。この領域は、南黄極付近にあり、全天で最も赤外域での拡散放射光の影響が小さい領域として知られており、宇宙科学研究所の赤外線天文衛星「あかり」により、重点的な深撮像観測が行われた天域の一つとして、ADF-Sと呼ばれている。

このデータの詳しい解析の結果、198個のサブミリ波銀河を新たに検出した。世界有数の空の良さ、高い装置性能、大気の影響を除去する新しい解析手法などの成果である。さらに「あかり」衛星による遠赤外線(波長90 μ m)での深い画像と比較し、銀河の放射モデルと突き合わせた結果、198個のうち、ほぼ全て(196個)が、80億年以上遡った初期の宇宙

($z > 1$) に存在する、星間塵に覆い隠された爆発的星形成銀河であると判明した。可視光や赤外線での銀河探査では、一般に、距離の近い銀河の割合が大きいが、今回、ほとんど 100 発 100 中 (198 発 196 中!?) の高打率で初期宇宙の銀河を検出できたことは、サブミリ波帯における銀河探査の威力を如実に示したものと言えるであろう。

今回発見された銀河は、その 1 個 1 個が、我々の住む天の川銀河と比較して数 100 倍から数 1000 倍もの驚異的な勢いで大質量星を作り出す「怪物」的な種族であると考えられる。検出された銀河の個数を明るさごとに数え上げ、さらに、AzTEC で取得された他の blank field (SXDF、GOODS-S など) でのデータも同様に解析して、現在までに知られる最も精密な銀河計数を作成した。さらに、これらのサブミリ波銀河の赤方偏移分布を仮定して、この銀河種族が示す埋もれた星形成率密度の赤方偏移進化を見積もったところ、約 100 億年前の宇宙では、可視光や近赤外線測定された星形成活動に対して、約 50 大きな割合を占め得ることもわかった。

この成果は、プレスリリースとしても発表され、地方紙あわせて 32 件の掲載があった。[8][48][3]

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。[13]

Subaru/XMM-Newton Deep Field における $1100\mu\text{m}$ 選択サブミリ波銀河の他波長での対応天体同定

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 での空間分解能は 30 秒角であり、検出した SMGs の他の波長での性質を調べるには、より正確な位置を特定する必要がある。そこで空間分解能が高い中間赤外線や 1.4GHz 帯電波での SMGs の性質を用いて、これらの波長において SMG に対応すると考えられる天体を見出すことにより、検出した SMGs の正確な位置決めを行った。すなわち、SMGs の赤外線光度は極めて明るい ($L_{\text{FIR}} \sim 10^{12\text{--}13} L_{\odot}$) ため、K 補正の効果で高赤方偏移の天体ではみかけの flux が急速に暗くなる電波 (波長 20cm 帯) や中間赤外線 (たとえば波長 $24\mu\text{m}$) であっても、赤方偏移が 2~3 より手前の天体であれば、深い撮像データを用いることで、それらの波長での SMG の対応天体を見出すことが可能である。

電波の深い VLA のデータ ($1\sigma \sim 7\mu\text{Jy}$) と Spitzer 宇宙望遠鏡の MIPS $24\mu\text{m}$ の深い撮像データを用いて検出した $1100\mu\text{m}$ -selected SMGs の対応天体の同定を行った。なおこの解析では Spitzer 宇宙望遠鏡の IRAC による中間赤外線での色 (3.6, 4.5, 5.8, $8\mu\text{m}$) も併用し、SMGs の対応天体同定の精度を向上させた。その結果 96 個の SMGs の対応天体を VLA、MIPS のデータで同定することができた。さらに電波や $24\mu\text{m}$ のデータでは感度的に厳しい赤方偏移 $z > 3$ での SMGs の対応天体の同定のために phot-z と IRAC のデータを用いた $z > 3$ に特化した SMGs の対応天体の同定法を開発し、さらに 28 個の SMGs を独立に同定することができた。これらの結果を用いて、波長 $1100\mu\text{m}$ でセレクトされたサブミリ波銀河種族が、どのような赤方偏移分布を持つか、について検討した。その結果、これまで SCUBA の観測によって得られていたサブミリ波銀河の赤方偏移分布

に見られる赤方偏移3付近のカットオフは観測の感度等によるバイアスであり、実際には、赤方偏移3を超えるダストに埋もれた爆発的星形成銀河は従来の知見よりも有意に多い可能性を示唆することがわかった。

この成果は、五十嵐 創の修士論文としてまとめられた。[15]

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、Ly α や H α 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 H α 輝線銀河 (H α 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 $\sim 1000 - 3000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 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。今後、これらの 1.1mm 源が、実際に 4C23.56 周辺の原始銀河団領域に付随しているのか、あるいは、その手前や背後にある銀河なのか、を切り分けるため、1.1mm 連続波源の多波長同定を進めると同時に、CO 輝線の検出による赤方偏移の決定を進めていく。また、原始銀河団における AzTEC/ASTE サーベイサンプルを増やすとともに、低密度環境における星形成銀河との比較から、銀河種族と星形成の環境依存性を調べていく予定である。[32]

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 1068 における C₂H、Cyclic-C₃H₂、および H¹³CN 輝線の初検出

我々は野辺山 45 m ミリ波望遠鏡を使った、活動的な銀河の中心領域におけるスペクトル線サーベイ観測を行っている。45 m 鏡に搭載された 3 mm 帯の超伝導受信機 (Nakajima et al. 2008) を用いて、特徴的ないくつかの銀河に対して周波数方向に無バイアスの観測を行い、銀河の分子組成と物理的性質との関連を調べることを目指している。特に、活動銀河核の存在が、その周囲のガスの分子組成や励起状態にどのような影響を及ぼすのか、また、それは、爆発的星形成 (スターバースト) におけるガスの性質と、どのような差異があるのかどうか、を定量的に明らかにするため、距離の近い、代表的なセイファート銀河である NGC 1068 をメインターゲットにして、85GHz 帯から 116GHz までの範囲をカバーする観測を行っている。また、その比較のため、さらに距離が近く、代表的なスターバースト銀河として知られる NGC 253 および IC342 でも同様の観測を行っている。

まず 85.1–98.4 GHz のうち 7.5 GHz 幅の観測を先行して実施し、その結果、活動銀河核 NGC 1068 における C₂H、Cyclic-C₃H₂、および H¹³CN 輝線の初検出に成功した。今回初めて検出された分子のうち、特に炭素を含む基本的な分子である C₂H、cyclic-C₃H₂ について詳細な解析を行った。その結果、C₂H の柱密度は NGC 1068 で $3.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 、NGC 253 で $1.8 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 、cyclic-C₃H₂ は、それぞれ $1.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 、 $4.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ と求められた。さらに我々の

観測結果と Bayet et al. (2009) の結果から求めた CS の柱密度を用いて、両分子の存在量を規格化して NGC 1068 と NGC 253 とで比較したところ、二つの銀河間で存在比に有意な差は見られなかった。従って、これらの炭素を含む分子については活動銀河核の影響を受けにくい、あるいは中心付近では存在量が少なく、より離れた低温のガス中に豊富に存在している可能性が考えられる。[10][33][46]

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、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 ボロメーター(超伝導遷移端における、フォトン入射に対する急峻な抵抗値の変化を読み出す超伝導熱検出器)のアレイを採用した。複数の波長での同時観測は、ミリ波サブミリ波帯のダイクロミック素子を用いて実現する。読み出しは超伝導量子干渉計デバイス SQUID を用い、さらに、周波数分割方式により 1 本の読み出し系統で 8 画素の信号を多重に読み出すことで多画素を効率的に読み出すシステムである。

今年度は、これまでの設計・検討の結果を受けて、(1)光学系素子(フィードホーン、ミラー、フィルター等の各種光学デバイス、および、それらの保持システム)の製作、(2)TES ボロメーターアレイの製作、(3)SQUID の評価を含む読み出し系の実装と評価を進めた。そして、既に評価試験が先行して進んでいた冷却系等とあわせ、1.1mm および 0.87mm 帯の 2 色同時観測を実現する、合計 400 画素のカメラシステムの組み上げを進めた。これらの開発は、国立天文台野辺山の島が中心となり、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。このほか、観測制御法および解析ソフトウェアの検討も進められた。田村と大友は、感度を制限する低周波雑音(大気・装置起源)に対する耐性を高め、かつ視野内の感度分布を一様に得るため、望遠鏡ポインティングのスキャン方法とボロメータ出力の雑音評価方法の開発を行った。計算機上での疑似観測シミュレーションを行った結果、新しく考案した多葉曲線状のスキャンパターンのノイズ耐性・感度一様性がすぐれていることがわかった。[41]

ASTE 望遠鏡への ALMA band 8 QM 受信機の搭載と試験観測の成功

Band 8 QM 受信機は ALMA Band 8 (385-500 GHz) 受信機の Qualification Model として開発されたカートリッジタイプの受信機である。Band 8 の周波数帯には中性炭素原子輝線 ([CI] 輝線; 492 GHz) などがあり非常に興味深い周波数帯であるが、口径 10m クラスの望遠鏡での大規模なサーベイ観測はこれまでにほとんど行われていない。酒井・塚越らは、この Band 8 QM 受信機を 2010 年 9 月に ASTE 望遠鏡に搭載した。2010 年 10 月末まで、副鏡位置合わせ、ポインティング、能率などの立ち上げ測定を行い、2010 年 11 月前半から 2 週間程度サイエンス観測を行うことができた。システム雑音温度の典型値は 700 K (at 460 GHz)、1200 K (at 492 GHz) であった。本受信機を用い Orion 分子雲などかつてない規模で [CI] 輝線 (492 GHz) の観測を行うことができた。[42]

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 ± 2 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、感度の良いミク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、SIS 雑音源のミリ波帯における有効性を調査するために必要な、SIS 雑音源、評価用受信機、光学系を設計し、その製作を行った。今後、設計製作したこれらのコンポーネントを用いて、まずは SIS 雑音源から出力される雑音の詳細な特性評価を行う。評価すべきパラメータとしては周波数特性、バイアス依存性、物理温度依存性等がある。SIS 雑音源の特性評価の後、従来から問題となっている SIS ミクサの応答の非線形性や飽和の効果についての詳細な調査を行う。ミリ波帯での SIS 雑音源の有効性

が確認されれば、on-chip 型の SIS 雑音源の設計・製作・評価に取り組む予定である。[20][31]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Matsushita, S., Kawabe, R., Kohno, K., Tosaki, T., and Vila-Vilaro, B., “Dense and Warm Molecular Gas and Warm Dust in Nearby Galaxies”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 62, 409-421 (2010)
- [2] Rex, M., Rawle, T. D., Egami, E., Perez-Gonzalez, P. G., Zemcov, M., Aretxaga, I., Chung, S. M., Fadda, D., Gonzalez, A. H., Hughes, D. H., Horellou, C., Johansson, D., Kneib, J.-P., Richard, J., Altieri, B., Fiedler, A. K., Pereira, M. J., Rieke, G. H., Smail, I., Valtchanov, I., Blain, A. W., Bock, J. J., Boone, F., Bridge, C. R., Clement, B., Combes, F., Dowell, C. D., Dessauges-Zavadsky, M., Ilbert, O., Ivison, R. J., Jauzac, M., Lutz, D., Omont, A., Pello, R., Rodighiero, G., Schaerer, D., Smith, G. P., Walth, G. L., van der Werf, P., Werner, M. W., Austermann, J. E., Ezawa, H., Kawabe, R., Kohno, K., Perera, T. A., Scott, K. S., Wilson, G. W., and Yun, M. S., “The far-infrared/submillimeter properties of galaxies located behind the Bullet cluster”, *Astronomy and Astrophysics*, 518, id.L13 (2010)
- [3] Scott, K. S., Yun, M. S., Wilson, G. W., Austermann, J. E., Aguilar, E., Aretxaga, I., Ezawa, H., Ferrusca, D., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Giavalisco, M., Kawabe, R., Kohno, K., Mauskopf, P. D., Oshima, T., Perera, T. A., Rand, J., Tamura, Y., Tosaki, T., Velazquez, M., Williams, C. C., and Zeballos, M., “Deep 1.1mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE - I. Source catalogue and number counts”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405, 2260-2278 (2010)
- [4] Onodera, S., Kuno, N., Tosaki, T., Kohno, K., Nakanishi, K., Sawada, T., Muraoka, K., Komugi, S., Miura, R., Kaneko, H., Hirota, A., and Kawabe, R., “Breakdown of Kennicutt-Schmidt Law at Giant Molecular Cloud Scales in M33”, *The Astrophysical Journal Letters*, 722, L127-L131 (2010)
- [5] Yoda, T., Handa, T., Kohno, K., Nakajima, T., Kaiden, M., Yonekura, Y., Ogawa, H., Morino, J., and Dobashi, K., “The AMANOGAWA-2SB Galactic Plane Survey-I. Data on the Galactic Equator”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 62, 1277-1289 (2010)
- [6] Tamura, Y., Iono, D., Wilner, D. J., Kajisawa, M., Uchimoto, Y. K., Alexander, D. M., Chung, A., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hayashino, T., Hughes, D. H., Ichikawa, T., Ikarashi, S., Kawabe, R., Kohno, K., Lehmer, B. D., Matsuda, Y., Nakanishi, K., Takata, T., Wilson, G. W., Yamada, T., and Yun, M. S., “Submillimeter Array Identification of the Millimeter-selected Galaxy SSA22-AzTEC1: A Protoquasar in a Protocluster?”, *The Astrophysical Journal*, 724, 1270-1282 (2010)
- [7] Tsukagoshi, T., Saito, M., Kitamura, Y., Momose, M., Shimajiri, Y., Hiramatsu, M., Ikeda, N., Kamegai, K., Wilson, G. W., Yun, M. S., Scott, K., Austermann, J., Perera, T., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Mauskopf, P., Ezawa, H., Kohno, K., and Kawabe, R., “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?”, *The Astrophysical Journal*, 726, article id.45 (2011)
- [8] 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., and Yun, M. S., “AzTEC/ASTE 1.1-mm Survey of the AKARI Deep Field Southsource catalogue and number counts”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411, 102-116 (2011)
- [9] Shimajiri, Y., Kawabe, R., Takakuwa, S., Saito, M., Tsukagoshi, T., Momose, M., Ikeda, N., Akiyama, E., Austermann, J. E., Ezawa, H., Fukue, K., Hiramatsu, M., Hughes, D., Kitamura, Y., Kohno, K., Kurono, Y., Scott, K. S., Wilson, G., Yoshida, A., and Yun, M. S., “New Panoramic View of 12CO and 1.1 mm Continuum Emission in the Orion A Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, 105-123 (2011)
- [10] Nakajima, T., Takano, S., Kohno, K., Inoue, H., “Detections of C₂H, Cyclic-C₃H₂, and H¹³CN in NGC 1068”, *The Astrophysical Journal*, 728, article id.L38 (2011)
- [11] Komugi, S., Yasui, C., Kobayashi, N., Hatsukade, B., Kohno, K., Sofue, Y., and Kyu, S., “Deep CO Observations and the CO-to-H₂ Conversion Factor in DDO 154, a Low Metallicity Dwarf Irregular Galaxy”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, L1-L5 (2011)
- [12] Minamidani, T., Tanaka, T., Mizuno, Y., Mizuno, N., Kawamura, A., Onishi, T., Hasegawa, T., Tatematsu, K., Takekoshi, T., Sorai, K., Moribe, N., Torii, K., Sakai, T., Muraoka, K., Tanaka, K., Ezawa, H., Kohno, K., Kim, S., Rubio, M., and Fukui, Y., “Dense Clumps in Giant Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud: Density and Temperature Derived from 13CO(J = 3-2) Observations”, *The Astronomical Journal*, 141, article id. 73, (2011)
- [13] 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., Maudkopf, 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 ultra-bright submillimeter galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press (2011)
- (会議抄録)
- [14] Kohno, K., “Dusty extreme starburst galaxies in the early universe”, proceeding of the 5th Zermatt symposium on ISM, in press (2011)
- (学位論文)
- [15] 五十嵐 創, “Multi-wavelength properties of 1100 μ m selected submillimeter galaxies” 修士論文, 2011 年 2 月
- (その他)
- [16] 河野孝太郎, 「サブミリ波銀河」、東京大学理学系研究科・理学部ニュース、2010 年 9 月号、p16
- [17] 廿日出文洋、河野孝太郎, 「星間塵に隠された爆発的星形成」、東京大学理学系研究科・理学部ニュース、2011 年 1 月号、p12
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [18] K. Kohno, “Millimeter/Submillimeter Studies of High-redshift Galaxies”, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-ray Bursts, Kyoto, Japan, April 19-23, 2010
- [19] K. Kohno, “Dusty extreme starburst in the early universe”, The 5th Zermatt ISM Symposium Conditions and impact of star formation: New results with Herschel and beyond, Zermatt, Switzerland, September 19-24, 2010 (Review)
- 一般講演
- [20] Inoue, H., Kohno, K., Noguchi, T., (NAOJ) : “SIS junction using as a microwave noise source”, 2010 Applied Superconductivity Conference, Washington, D. C., U.S.A., August 1-5, 2010
- [21] Hatsukade, B., Kohno, K., et al., “AzTEC/ASTE 1.1 mm Deep Surveys: Number Counts and Clustering of Millimeter-bright Galaxies”, The 5th Zermatt ISM Symposium Conditions and impact of star formation: New results with Herschel and beyond, Zermatt, Switzerland, September 19-24, 2010
- [22] K. Kohno, “ASTE and TAO: results and future”, The Submillimeter Universe: The CCAT View, Ithaca, New York, U.S.A., November 12-13, 2010
- [23] Kohno, K., “ASTE future plan and ALMA”, NRO workshop high-z 2010, Akishima, Japan January 21-22, 2011
- [24] Kohno, K., “Formation and evolution of galaxies explored by SAFARI/SPICA and ALMA”, SAFARI/SPICA consortium meeting, Utrecht, Netherland, March 9, 2011
- (セミナー)
- [25] Kohno, K., “AzTEC/ASTE deep surveys and beyond”, Cardiff University, Cardiff, UK, October 15, 2010
- [26] Kohno, K., “ASTE project: current status and future”, University of Arizona, Tucson, U.S.A., November 11, 2010
- [27] Kohno, K., “Recent scientific highlights on extragalactic astronomy with mm/submm arrays and prospects for ALMA”, East-Asia Interferometry winter school, Mitaka, Japan, February 8-11, 2011
- (国内会議)
- 一般講演
- [28] 河野孝太郎, 「Submillimeter galaxies」CMB ワークショップ 2010、国立天文台三鷹、2010 年 6 月 8 日
- [29] 河野孝太郎, 「ASTE による (sub)mm deep survey と FMOS/ALMA-ES に向けた展望」Galaxy workshop Subaru 銀河の激進化期 ($1 < z < 3$) を探る、国立天文台三鷹、2010 年 8 月 6 日
- [30] 河野孝太郎, 「サブミリ波による銀河探査プロジェクトの成果報告」、第 10 回 宇宙における時空・物質・構造の進化 研究会、高知パレスホテル (高知)、2010 年 8 月 29 日
- [31] 井上裕文、河野孝太郎 (東京大学)、野口 卓 (国立天文台)、「超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波帯雑音源の開発」16a-T-11、平成 22 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日
- [32] 鈴木賢太、河野孝太郎、井上裕文、五十嵐創、梅畑豪紀 (東大)、中西康一郎、田村陽一、廿日出文洋 (NRO)、児玉忠恭、田中壺 (NAOJ)、鍛冶澤賢 (愛媛大)、Rob Ivison (University of Edinburgh)、Grant Wilson、Min Yun (UMASS)、David Hughes、Itziar Aretxaga、Milagros Zeballos (INAOE) 「AzTEC/ASTE による電波銀河 4C 23.56 周囲の星形成銀河サーベイ」日本天文学会 2010 年秋季年会、金沢大学、2010 年 9 月 22 日
- [33] 中島 拓、高野 秀路 (国立天文台 野辺山)、井上 裕文、河野 孝太郎 (東京大学 理)、ラインサーベイチーム「野辺山 45 m 鏡レガシープロジェクト: 銀河のラインサーベイ観測 II」日本天文学会 2010 年秋季年会、金沢大学、2010 年 9 月 23 日

- [34] 久野成夫、高野秀路、伊王野大介、中島 拓、岩下浩幸、半田一幸、川辺良平 (国立天文台)、ほか 45m 鏡運用グループ、河野孝太郎 (東京大学)、小川英夫ほか大阪府立大グループ、川口則幸ほか VERA グループ (国立天文台) 「野辺山 45m 鏡用新観測システムの開発 III」日本天文学会 2010 年秋季年会、金沢大学、2010 年 9 月 23 日
- [35] 中島 拓、岩下 浩幸、宮澤 千栄子、久野 成夫、川辺良平 (国立天文台 野辺山)、酒井 剛、河野 孝太郎 (東京大学 理)、片瀬 徹也、西村 淳、木村 公洋、小川 英夫 (大阪府立大学 理)、浅山 信一郎 (国立天文台 ALMA)、田村 友範、野口 卓 (国立天文台 ATC) 「野辺山 45 m 鏡用 100 GHz 帯 2SB 受信機開発の進捗 III」日本天文学会 2010 年秋季年会、金沢大学、2010 年 9 月 23 日
- [36] 酒井剛 (東大)、藤井由美、野口卓 (国立天文台)、井上裕文、河野孝太郎 (東大)、ほか ASTE チーム 「ASTE 350 GHz 帯受信機の性能向上」日本天文学会 2010 年秋季年会、金沢大学、2010 年 9 月 24 日
- [37] 河野孝太郎、「ALMA で探る $z > 3$ の銀河」ALMA-Subaru Workshop 2010 (宇宙・銀河・星・惑星・生命の誕生)、国立天文台三鷹、2010 年 9 月 30 日
- [38] 河野孝太郎、「ALMA と TMT の連携 (銀河ほか)」、TMT で切り拓く 2020 年代の新しい天文学、国立天文台三鷹、2010 年 10 月 5 日
- [39] 河野孝太郎、「Formation and evolution of galaxies explored with SPICA and ALMA」、SPICA サイエンスワークショップ (宇宙圏研究会)、国立天文台三鷹 (三鷹)、2010 年 12 月 16 日
- [40] 河野孝太郎、「SPICA による系外銀河研究」、第 11 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所 (相模原)、2011 年 1 月 6 日
- [41] 大友雄造、河野孝太郎 (東大)、田村陽一、廣田晶彦、大島泰、川辺良平 (国立天文台野辺山)、「ASTE 望遠鏡搭載多色連続波カメラの観測におけるスキャンパターンの考察」、日本天文学会 2011 年春季年会
- [42] 酒井剛、塚越崇、井上裕文、河野孝太郎、山本智 (東京大学)、岩下浩幸、田村陽一、廿日出文洋、島尻芳人、大島泰、川辺良平、佐藤直久、飯塚吉三、関本裕太郎、田村友範、野口卓、小笠原隆亮 (国立天文台)、他 ASTE チーム、「Band 8 QM 受信機の ASTE 望遠鏡への搭載」、日本天文学会 2011 年春季年会
- [43] 中島 拓、岩下 浩幸、宮澤 千栄子、小野寺 幸子、米津 朋尚、久野 成夫、川辺 良平 (国立天文台)、酒井 剛、河野 孝太郎 (東京大学)、片瀬 徹也、西村 淳、木村 公洋、小川 英夫 (大阪府立大学)、井上 裕文、浅山 信一郎、田村 友範、野口 卓 (国立天文台)、「野辺山 45 m 鏡用 100 GHz 帯 2SB 受信機開発の進捗 IV」、日本天文学会 2011 年春季年会
- [44] 酒井剛 (東京大学)、岩下浩幸、中島拓、伊王野大介、高野秀路、久野成夫、川辺良平 (国立天文台)、河野孝太郎、山本智 (東京大学)、「野辺山 45m 望遠鏡 100 GHz 帯受信機の IF 広帯域化」、日本天文学会 2011 年春季年会
- [45] 梅畑豪紀、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、廿日出文洋、伊王野大介、田村陽一 (国立天文台)、「多波長同定で探る SSA22 領域におけるサブミリ波銀河の性質：I. 多波長同定」、日本天文学会 2011 年春季年会
- [46] 中島 拓、高野 秀路 (国立天文台 野辺山)、井上 裕文、河野 孝太郎 (東京大学 理)、ラインサーベイチーム、「銀河のラインサーベイ観測 III：AGN 周辺の炭素を含む分子の存在比」、日本天文学会 2011 年春季年会 (その他講演 (アウトリーチ活動))
- [47] 河野孝太郎、「観測により迫る宇宙の謎」、東京大学理学部オープンキャンパス、東京大学理学部 1 号館、2010 年 8 月 4 日 (プレスリリース)
- [48] 廿日出文洋、河野孝太郎、川邊良平、松浦周二「初期宇宙に大量のモンスター銀河を発見」、2010 年 9 月 29 日 <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2010/39.html>

5 重力波探査

——重力波によるビッグバン宇宙の探査—— ——(坪野)

日本の重力波研究の長年の目標計画であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 LCGT プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。これ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。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いる。われわれは、日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。[3, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 57, 59]

5.0.4 地上レーザー干渉計重力波検出器

スタートした大型レーザー干渉計 LCGT プロジェクト

日本の重力波研究者グループの悲願であった LCGT (Large-scale Gravitational Wave Telescope) 計画が、ついに 2010 年 10 月から最先端研究基盤事業としてスタートすることが認められた。LCGT 計画は、基線長 3 km のレーザー干渉計型重力波検出器を神岡地下のサイトに建設するものである。この重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を 20 K の低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実現される。それによって、連星合体からの重力波については約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1 年に 10 回程度の頻度で重力波イベントを観測できることが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGT によって十分観測可能である。[19, 43, 49, 56, 58]

LCGT の主干渉計設計

当研究室では LCGT 主干渉計の設計チームリーダーである麻生を中心として、LCGT の光学設計及び制御方法の設計を行なっている。LCGT は RSE と呼ばれる干渉計方式を採用するが、この方式では制御すべき鏡の自由度が第一世代干渉計と比較して増

える。従って、新しい制御方法の開発が必要となる。また、この制御方法では、主干渉計の雑音を増加させないように、低雑音な誤差信号取得方法を用いなければならない。そのため、主干渉計の様々なパラメータを最適化する必要がある。我々は、干渉計シミュレーションツールを用いた詳細な検討を行ない、主干渉計の各種パラメータ及び、制御信号取得方法を決定した。[42]

5.0.5 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO, DPF

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

DECIGO 計画では、その前に 2 つの前哨衛星を打ち上げ、技術成熟度を段階的に向上させていくロードマップが立てられている。DECIGO パスファインダー (DPF) はその最初の前哨衛星であり、高度 500 km の地球周回軌道に投入される 350 kg 級の小型衛星として設計が進められている。DPF では、中間質量ブラックホール合体からの重力波をターゲットとしており、我々の銀河内のイベントを観測できるだけの感度を持っている。また、地球重力場観測や、宇宙空間での精密計測のための先進科学技術の実現など幅広い成果が期待できる。

DPF は、JAXA が進めている小型科学衛星シリーズの候補の 1 つになっており、衛星システム検討と基本サブシステムの試作と性能評価が進められている。[2, 9, 26, 37, 38, 45, 46, 55]

DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験

DPF には鏡をとりつけた 2 つの試験質量からなる Fabry-Perot 共振器、モノリシックな入射光学系、そして全体を囲う熱シールドからなる干渉計モジュールが搭載される。Fabry-Perot 共振器はドラッグフリー制御によって非接触保持された 2 つの鏡で構成され、共振器長は 30 cm となっている。DPF ではこの共振器長の変動から 0.1-1 Hz の周波数帯域における重力波観測や、地球重力場観測を行う。

2010 年度は BBM 向けに製作された部品が全て揃い、共振器長と 2 つの鏡の pitch と yaw それぞれの姿勢制御に成功した。Fabry-Perot 共振器の全 5 自由度の制御ができ、干渉計制御の動作確認ができたことになる。実験では懸架された 2 つのアルミ製試

験マスから成る Fabry-Perot 共振器と、低膨張率ガラス基板に光学素子をシリケートボンディングして作られた入射光学系を用い、制御用アクチュエータとしてはコイル-マグネット型のものを用いた。また制御には SWIM _{$\mu\nu$} の気球実験で用いられた FPGA ボードを使い、衛星向けを意識したデジタル制御を行った。[20, 25, 28, 39, 48]

DPF を利用した地球重力場観測

DPF は、重力波の為の技術検証、及び重力波観測を目的とするだけでなく、地球の微細な重力場構造を観測する事も重要な科学的目的の一つと位置付けている。DPF による地球重力場の測定は、海流の流量の変化や、地下水量の変化、南極の氷の厚さなどといった情報を提供する事ができ、有用な地球環境モニターとして期待されている。

測定方法としては、衛星軌道を観測する事で地球の重力場を観測する Satellite-Satellite Tracking in the high-low mode (SST-hl) という方法と、重力勾配を測定する事で地球重力場の構造を観測する Satellite Gravity Gradiometry (SGG) という2つの方法が検討されている。

SGG は、Fabry-Perot 干渉計の2つの鏡にかかる力の差が、干渉計の腕の長さの変化に現れる事を利用して重力勾配を測定する方法である。

一方、地球を周回する衛星の軌道は、基本的には地球の重力場で決定されるため、衛星軌道を GPS によって測定すれば重力場も算出する事ができるというのが SST-hl の考え方である。ただし実際は、太陽風や空気抵抗などといった衛星軌道に影響を及ぼす外乱が衛星には働いている。そこで外乱の分だけ衛星軌道を補正する為、外乱量を測定する装置として加速度計が衛星に搭載される予定である。

この加速度計は、重力波検出に使用される Fabry-Perot 干渉計の鏡をマウントしているテストマスを衛星と非接触に置き、衛星に追従するように制御する。制御の際に衛星とテストマスの相対位置を検出するセンサーとして、テストマスに接着された鏡と共に差動マイケルソン干渉計を構築するレーザーセンサーを使用する。本研究ではそのレーザーセンサーの感度を評価し、GPS の精度で制限されるより十分良い精度を持ったセンサーである事を示した。同時に、動作点が非常に狭く、衛星内での扱いが難しいと予想されるなどといった問題点も明らかにした。

更に、この2つの方法によって、地球重力場を球面調和関数に展開した時にそれらの各次数をどれだけの精度で観測できるかを見積もった。その結果、SGG の方法では約 120 次以下の低次数の球面調和関数の係数は、過去の重力場観測衛星を超える精度で観測する事が可能である事が明らかになった。また、SST-hl の方法でも、SGG の方法や過去の観測結果より精度は悪いものの、50 次以下の係数では有意義な結果が得られるであろうという結果を得た。これらの見積もりにより、DPF を用いる事によって海流や地下水量などといった環境を1年を通してモニターする事が可能になり、更には国外の他の重力場観測

衛星ミッションと協力する事によって更に良い精度の測定ができると期待できるという事を示す事ができた。[21, 29, 31, 32]

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。

残留ガスによる外力とねじれ振り子の回転のダンピング係数は揺動散逸定理によって関係づけられる。そのため、ねじれ振り子の腕に取り付けられた長方形型試験マスとその周りに配置された壁との間の距離を変えていきダンピング係数の変化を測定することで Squeeze film damping の効果を評価することができる。Squeeze film damping の効果がモンテカルロシミュレーションと一致することは過去の実験ですでに検証されており、今回行った実験でも誤差の範囲で一致していた。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 2 mm 間隔で細長い穴をあけて楕円形にした壁を用いてダンピング測定をした結果、試験マスと壁との距離が 1mm 程度の距離で Squeeze film damping による残留ガス雑音が 1/4 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円形にすることで 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。[40, 47]

SWIM _{$\mu\nu$}

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持った汎用小型演算処理・制御システムである。JAXA(宇宙航空研究開発機構)が開発した小型実証衛星 (SDS-1) に搭載され、2009 年 1 月 23 日に打ち上げ・軌道投入が成功裏に行われ、2010 年 9 月に運用を終了(衛星が停波)した。

SWIM の超小型宇宙実験プラットフォーム開発の一環として、我々は超小型重力波検出器 (SWIM _{$\mu\nu$}) を開発し、その運用を行った。SWIM _{$\mu\nu$} は、80mm 立方程度の大きさのねじれ型重力波アンテナモジュール 2 つと制御用基板で構成されている。これは小型であるために、地上の大型重力波検出器に匹敵する感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な宇宙空間重力波検出器のための実証試験をする最初のステップとなる。

今年度の約半年間の運用で、「宇宙空間に存在する検出器」として初めての重力波観測運転を実施した。その際には地上設置型ねじれ型重力波アンテナと観測時間を合わせることで、地上-宇宙の同時重力波観測測定も加えて実施した。これらの測定により、(1) 衛星搭載のため、慣性系に対して回転する重力

波検出器による周波数変換、(2) 衛星検出器-地上検出器による相対位置関係が変化する同時重力波観測、という2点について独自の測定ができたことになる。これは、重力波源の位置の特定、偏波の分離など、これまででない新たな解析手法研究の基礎データとなる。また、(3) 小型衛星上の振動環境の測定、についても工学的に重要なデータとなる可能性があり、これらについてデータ検討と解析の準備を進めた。[5, 16, 22, 23, 27, 30, 41, 54]

5.0.6 磁気浮上重力波検出器

背景重力波のデータ解析

磁気浮上重力波検出器とは、新しいタイプの地上重力波検出器 Torsion-bar Antenna (TOBA) のプロトタイプである。TOBA は、重力波からの潮汐力によるねじれ振子の回転を読み取る事で、重力波を検出するものである。従来のレーザー干渉計型のような重力波検出器は感度を約 100 Hz 以上の高周波数帯域にしか持たないのに対し、TOBA は 1 Hz 以下の低周波の重力波を観測する事ができるのが大きな特色である。1 Hz 以下の低周波重力波には、宇宙背景重力波や巨大ブラックホール連星からの重力波などといった、宇宙論的に非常に興味深い現象が存在すると期待されており、天文学・物理学双方の観点から、その検出が強く望まれている。1 Hz 以下の低周波重力波を観測する手段としては、他にも LISA や DECIGO のように、宇宙空間にレーザー干渉計型重力波検出器を構成する計画も進められているが、TOBA は地上で観測ができる為、比較的安価で建設が可能、ノイズ対策やアップデートが可能であるなどといった利点がある。

現在は、この検出器を用いて TOBA で初めての同時観測・相関解析の研究が進められている。磁気浮上重力波検出器は、東京大学と京都大学の2か所に設置されており、それを用いて約5時間の同時観測を行い、背景重力波をターゲットに相関解析を行っている。これによって、0.1 - 1.0 Hz 帯の背景重力波に対して新たな上限値を設ける事ができるとの見積もりがされており、現在詳細な解析を進めている最中である。

この研究によって、背景重力波は検出こそされないと思われるものの、TOBA を用いた同時観測・相関解析の検証のみならず、将来の背景重力波検出の可能性を示す結果となっている。[1, 4, 6, 7, 24, 35, 50]

重力波データに対する擬似雑音時系列の生成

磁気浮上重力波検出器を用いた背景重力波探査に向けた研究を行っている。特に、 $SWIM_{\mu\nu}$ とのコインシデンス解析を行う際、データ解析パイプラインのチューニングを行うには、バックグラウンドデータが大量に必要な。しかし、 $SWIM_{\mu\nu}$ の観測時間は短いため、十分なバックグラウンドデータが得られない。そこで、 $SWIM_{\mu\nu}$ と同じスペクトルを持つ擬

似データを計算機上で生成する研究を本年度冬学期の学生実験として行なった。まずは元となるデータのパワースペクトルを精度よくポール/ゼロでフィットする。その後、白色雑音を種として、得られたポール/ゼロと同じ形のスペクトルを持つ擬似データを生成する。結果、バックグラウンドスタディに必要な擬似データを任意の長さで生成することが可能になった。

5.0.7 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、共役な物理量の揺らぎが等しく、かつその一方は対称的な量子限界よりも小さくなっている状態である。我々の実験では、直交位相振幅の揺らぎの一方を小さくした直交位相振幅スクイ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り、そのために非線形光学効果を用いる。具体的には、2次の非線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振器の中で行う OPO (Optical Parametric Oscillator) を作成し、スクイ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が目指している。2010 年度には、SHG, OPO を作成し、OPO においてパラメトリック増幅によるダウンコンバージョンを確認した。

今後はホモダイン測定によるスクイーズド光の観測を行い、小型のプロトタイプ重力波検出器の量子雑音の低減を目指す。[18, 34, 51]

5.0.8 超高安定レーザー光源の開発

低温光共振器を用いた超高安定光源

高安定なレーザー光源の開発は、光原子時計のプロ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、さらなる周波数安定化のために、冷却した光共振器の開発を行っている。

現在、低温で高い機械的 Q 値を持ち、かつ熱膨張率が低い素材として、単結晶シリコンを用いた光共振器の研究を行っている。シリコンは、低温において極めて高い機械的 Q 値と高い熱伝導率を持つため、共振器の素材として有望である。また、18K 付

近に熱伝導率のゼロ点があることが報告されており、この温度を用いれば ULE ガラス同様に温度揺らぎによる共振器長変動を取り除くことができる。今年度は実験装置全体の概念設計と、共振器、冷却系のデザインを行なった。[33]

光共振器支持法の研究

地面振動が本研究で用いる光共振器に伝わると、共振器の弾性変形によって共振器長が変動してしまう。これは超高安定な光共振器を作る上で大きな問題となる。この効果は共振器を対称性良く支持することによって、大部分はキャンセル可能であることが知られている。これまで、等方弾性体として扱える ULE 製光共振器において様々な支持方法が提案されてきた。我々は結晶であるシリコンを用いるため、それに応じた最適な支持方法を探索している。そのため、有限要素法で立方晶の弾性行列を用いて弾性変形の計算を行なった。材料モデルの妥当性は、以前に当研究室で測定した円筒形単結晶シリコンの共振周波数と、このモデルを用いて有限要素法で計算した結果を照合することで確認した。今後は、支持方法を変化させながら、長さ変動が最小になる点を探す予定である。[53]

冷却系のデザイン

光共振器を冷却するために用いる冷凍機は、低振動であることが求められる。一般に低振動とされるパルス管冷凍機を用いても、コールドヘッドが圧力脈動で振動する効果が無視できない。そこで、我々は最近開発されたヘリウム再凝縮型冷凍機を利用することを計画している。この方式では、冷凍機がヘリウムガスで満たされたチェンバーで覆われている。コールドヘッドでヘリウムが液化され、このチェンバーの底部には液体ヘリウムが溜まっている。この底面と光共振器をヒートリンクで繋ぐことによって、共振器を冷却する。底面は振動するコールドヘッドとは機械的な接触を持たないため、振動伝達を大幅に抑えることができる。また、ヘリウム圧力を安定化することで、液体ヘリウムの温度も安定化することができる。パルス管のコールドヘッドはパルス周波数で脈動することが知られているので、それを回避する有効な対策となる。今年度は冷却系の概念設計を完了し、現在メーカーと詳細設計を詰めている段階である。[60]

5.0.9 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

ある種の超弦理論によれば、重力の逆二乗則は厳密には成立せず、サブミリメートル領域でそのずれ

を検証可能であると言われている。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を使ってこの検証を行っている。これはねじれ振動子が高い Q 値と低い共振周波数をもつため重力信号の S/N 比を高くすることが可能だからである。具体的な測定法としてはねじれ振動子の底面にある深さ 5 mm 程度の窪み (missing-mass) の下でアルミ円盤に 12 回対称に穴を開けたもの (attractor) をモーターで回転させ、ねじれ振動子に働くトルクを測定することによって重力を測定する。

2010 年度はこのための予備実験として制作したねじれ振動子の感度評価、変調重力場を発生させるモーターの周波数制御を中心に行った。感度評価ではねじれ振動子の感度が $1 \times 10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、室温のブラウン運動を十分に測定できる感度であることが確認でき、数値計算で得られた重力信号の大きさに対して十分な感度をもっていることが確認できた。モーターの周波数制御では PLL 制御を用いて、モーターの回転周波数の揺らぎを 0.1% に抑えることに成功した。

今後はねじれ振動子による重力信号の測定および本格的な重力の逆二乗則の検証を行っていく予定である。[36, 52]

分子の分光による重力法則検証実験

Newton によって示された重力逆二乗則の検証は、階層性問題の解決への道筋を含む興味深いテーマである。我々は京都大学の量子光学研究室と共同で、 Yb_2 分子の分光を用いて nm スケールの重力逆二乗則を検証する研究に取り組んでいる。

分子間ポテンシャルの測定には二光子光会合という技術を用いている。解離極限付近での分子の束縛エネルギーはおよそ 100 MHz 程度であるが、これに等しい周波数差を持つ 2 本のレーザーを原子集団に照射することで原子集団から分子が生成されることを利用している。ここで重要なのは 2 本の光の周波数差であり、周波数の絶対値はそれほど問題とならない。100 MHz 程度の周波数差は GPS にロックされたシンセサイザと AOM を用いれば 7 桁程度の精度で実現することができ、本研究に必要とされる高精度のエネルギー測定を可能にしている。また、本研究においては 10nK 程度に冷却された原子集団が必要とされるが、これも光磁気トラップや蒸発冷却法を用いた冷却により達成されている。

現状では、既に京都大学の装置を用いたデータの測定を終え、補正項 α の解析を開始している。[44]

<受賞>

- [1] 正田亜八香: Best Student Poster Award at the Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop (University of Wisconsin-Milwaukee, Jan. 26, 2011).

<報文>

(原著論文)

- [2] Seiji Kawamura, Masaki Ando, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, and the DECIGO working group: The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO, *Class. Quantum Grav.* **28** (2011) 094011.
- [3] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar, *Physical Review D*, **83**, 042001, 2011.
- [4] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hirotaka 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.* (2011) (in press).
- [5] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple iodine reference at 1064 nm for absolute laser frequency determination in space applications, *Applied Optics*, **49**, 6264-6267 (2010).
- [6] K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, K. Okada, K. Tsubono: Gravitational-wave detector realized by a superconductor, *Physica C* **470** (2010) 1841-1844.
- [7] Masaki Ando, Koji Ishidoshiro, Kazuhiro Yamamoto, Kent Yagi, Wataru Kokuyama, Kimio Tsubono, and Akiteru Takamori: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 161101.
- [8] J. Abadie, et al., Calibration of the LIGO gravitational wave detectors in the fifth science run Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, **624**, 223, 2010.
- [9] M. Ando, S. Kawamura, N. Seto, et al., DECIGO and DECIGO pathfinder Classical and Quantum Gravity, **27** 084010, 2010.
- [10] J. Abadie, et al., First search for gravitational waves from the youngest known neutron star *Astrophysical Journal*, **722** 1504, 2010.
- [11] J. Abadie, et al., Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors *Classical and Quantum Gravity*, **27** 173001, 2010.
- [12] . Abadie, et al., All-sky search for gravitational-wave bursts in the first joint LIGO-GEO-Virgo run *Physical Review D*, **81** 102001, 2010.
- [13] B. Abbott, et al., Search for gravitational-wave bursts associated with gamma-ray bursts using data from ligo science run 5 and virgo science run 1 *Astrophysical Journal*, **715** 1438, 2010.
- [14] J. Abadie, et al., Search for gravitational-wave inspiral signals associated with short gamma-ray bursts during ligo's fifth and virgo's first science run *Astrophysical Journal*, **715** 1453, 2010.
- [15] B. Abbott, et al., Searches for gravitational waves from known pulsars with science run 5 LIGO data *Astrophysical Journal*, **713** 671, 2010.
- (国内雑誌)
- [16] 安東正樹、穀山渉、坪野公夫:はじめての宇宙実験—超小型重力波検出器 SWIM $\mu\nu$ 、*日本物理学会誌* **65-12** (2010) 987-990.
- [17] 坪野公夫: 理学の匠「重力波の計測」、*理学系研究科・理学部ニュース* **42-2** (2010) 10.
- (学位論文)
- [18] 松本伸之: 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、*修士論文*、2011年.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] Yoichi Aso, Measuring Coating Thermal Noise with Cryogenic Sapphire Cavities, 2010 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Kyoto, May 2010.
- [20] Yuta Michimura, Yoichi Aso, Koji Ishidoshiro, Shuichi Sato, Masaki Ando, Akitoshi Ueda, Seiji Kawamura, Kimio Tsubono: *Development of the interferometer module for DECIGO Pathfinder*, The 8th International LISA Symposium (July 2010, California, USA).
- [21] A. Shoda, Y. Michimura, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono, M. Ando, A. Araya, S. Sato, Sensitivity Estimates for the Observation of the Earth's gravity field by DECIGO Pathfinder, 8th LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [22] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Takeshi Takashima, et al.: In-orbit operation of a compact torsion-bar gravitational wave detector: SWIM $\mu\nu$, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [23] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple Iodine Wavemeter for LISA, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [24] A Shoda, K Okada, K Ishidoshiro, M Ando, Y Aso, K Tsubono, Search for a Stochastic Gravitational Wave Background with Torsion-bar Antenna, Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop, (January 26th, 2011, University of Wisconsin-Milwaukee).
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] 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11回宇宙科学シンポジウム (2011年1月, 宇宙科学研究本部).

- [26] 穀山渉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫
DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用
- 惑星重力場観測衛星- 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日, JAXA/ISAS).
- [27] 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, 若林野花: SDS-1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日, JAXA/ISAS).
- [28] 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 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月, 宇宙科学研究本部).
- [29] 穀山渉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫
DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用
- 惑星重力場観測衛星-, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日, JAXA/ISAS).
- [30] 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, 若林野花: SDS-1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日, JAXA/ISAS).
- [31] 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, 佐藤修一, DECIGO pathfinder における地球重力場測定の感度評価, 宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日, 宇宙科学研究本部) .
- [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, 佐藤修一, DECIGO pathfinder における地球重力場測定の感度評価, 小型衛星衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日, 宇宙科学研究本部) .
- [33] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 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, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [34] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 IV, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [35] 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 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [36] 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 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [37] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 船木一幸, 横山順一, 神田展行, 田中貴浩, 沼田健司, 高島健, 井岡邦仁, 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, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和夫, 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 (30): 設計・計画, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [38] 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, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 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 (2), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [39] 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 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [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 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [41] 穀山渉, 安東正樹, 高島健, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 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 (データ解析), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [42] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 辰巳大輔, 山本博章, 安東正樹, 山元一広, 新井宏二, 我妻一博, 西田恵里奈, LCGT Collaboration, LCGT の干渉計制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [43] 大石奈緒子, 宮川治, 麻生洋一, 和泉究, 三代木伸二, 斎藤陽紀, 道村唯太, LCGT Collaboration, LCGT デジタルシステムの構築 (I), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .

- [44] 高橋走, 山田裕貴, 菊地悠, 高須洋介, 榎本勝成, 安東正樹, 高橋義朗, イッテルビウム原子の光会合分光による重力逆二乗則の検証実験, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [45] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 船木一幸, 中村卓史, 坪野公夫, 横山順一, 沼田健司, 神田展行, 高島健, 田中貴浩, 井岡邦仁, 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, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子/, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 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, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宣典, 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, 蓑泰志, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (27): 設計・計画, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [46] 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, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 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 (1), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [47] 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [48] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 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 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [49] 梶田隆章, 黒田和明, 中谷一郎, 大橋正健, 藤本真克, 川村静児, 齋藤芳男, 鈴木敏一, 坪野公夫, 三尾典克, 神田展行, 中村卓史, 安東正樹, その他 LCGT Collaboration Members, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XIII, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [50] 正田亜八香, 岡田健志, 穀山涉, 安東正樹, 石徹白晃治, 西澤篤志, 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [51] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 III, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [52] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [53] 麻生洋一, 穀山涉, 坪野公夫, 高本将男, 香取秀俊, 低温サファイア共振器を用いた超高安定レーザーの開発 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [54] 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, 榎戸輝輝, 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 IX (軌道上運用 2), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [55] 阿久津智忠, 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 麻生洋一, 上田暁俊, 新谷昌人, 道村唯太, 穀山涉, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 鳥居泰男, DECIGO pathfinder の信号処理系の開発, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [56] 宮川治, 麻生洋一, Stefan Ballmer, 辰巳大輔, 斎藤陽紀, 大石奈緒子, 三代木伸二, CLIO Collaboration, 低温レーザー干渉計 CLIO(30) デジタル制御 (IV), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [57] 坪野公夫, 重力波で宇宙を見る - 検出実験の現状 - , 理学部オープンキャンパス 2010 講演会 (2010 年 8 月, 理学部 1 号館、東大).
- 招待講演
- [58] 麻生洋一, The LCGT Collaboration, 超高感度重力波検出器のための光学設計と制御第 58 回応用物理学学会学術講演会, シンポジウム「ついに始まった重力波観測用巨大干渉計の建設」.
- [59] 坪野公夫, 重力波をとらえる、河合塾エンリッチ講座 (2010 年 10 月, 河合塾本郷校、東京).
- (セミナー)
- [60] 麻生洋一, 低温光共振器を用いた超高安定レーザー, 先端的極低温冷却技術調査研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2011/3/11.

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——
(蓑輪・井上)

6.1 蓑輪 研究室

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

6.1.1 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター

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

IAEA (国際原子力機関) は、NPT (核不拡散条約) 締約国の原子力活動に対し、平和的利用から核兵器製造等の軍事的目的に転用されないことを確保するための保障措置システムとしての監視装置を必要としている。この監視装置は、その信頼性確保のために、当該原子炉の運転者側の提供する情報に一切依拠しないで、独立かつ自己完結的モニターであることが必要とされる。その意味で、ニュートリノによる原子炉運転モニターは大変有効な監視装置で、IAEA は最近の報告書の中で、日本を含む締約国に対して、ニュートリノによる原子炉運転モニターの feasibility study を提案している。本研究では、このようなニュートリノ検出器による原子炉運転モニターを開発しようとするものである。

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

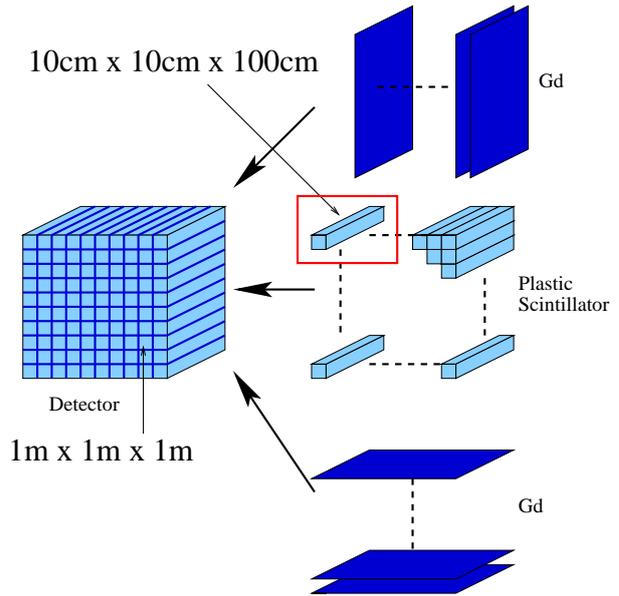


図 6.1: 検出器のおおまかな構造

2つの (陽電子と中性子の) 信号をシンチレータで捉え、遅延同時計測法を用いてニュートリノ信号として検出する。

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

平成 22 年度は、主に昨年度作成した 16 本のモジュールからなるプロトタイプ (lesser PANDA) の改良を行った。大きく分けると、検出器全体を保持する構造物の改良、エネルギーキャリブレーション方法の改良、遠隔地における無人測定にむけてのモニタリングシステムの導入の3点である。

まず、検出器の可搬性を向上するため、検出器の構造を見直した。移動用のキャスターを設置し、さらにトラックでの移動時にかかる負荷に対する耐久性を向上させるため PMT 抑え機構の改良を行った。また、検出器のエネルギー較正を行う際に標準線源を挿入するためのスリットをシンチレータ間に設けた。その後、データ転送速度に関するデータ取得系の改良も行った。その結果として測定の live time が向上した。

lesser PANDA の各モジュールのエネルギー較正に関しては、当初下から一段ずつ組み立てつつ較正のための測定を行う方法を採用していたが、この方法では組み立て後には容易に較正を行えない点が問題となる。そこで組み立て後にエネルギー較正を行うことができる手法として、モジュール間に 6mm 程度の隙間を明け、そこに線源を挿入しコンプトン後方散乱を利用して各モジュールの較正を行う方法を



図 6.2: トラックに積み込んだ状態のプロトタイプ検出器

検討した。

モニタリングシステムは、測定中のデータや温度などの状況をリアルタイムに表示する機能と、非常時に緊急事態を連絡をする機能から構成される。どちらもインターネットを利用しており、原子力発電所に駐車しているのトラック内からはドコモの通信端末を利用して通信を行っている。リアルタイムの表示は、発電所内の PC において簡単な解析を行った後に、Web として公開している。これにより検出器のトリガーレートやエネルギースペクトル、温度湿度変化などを確認することができる。アラートシステムは、Web で公開されている情報を元に判断を行い、異常事態の場合には決められた連絡先にメールを送信する。また、ディスクの容量が溢れたり、ドコモによる通信が途絶えたりなど PC やネットワークの異常時にも警告メールを送信するように設計している。

lesser PANDA の改良後、実際に 2t トラックに積み込み、2 日間にわたり、屋外におけるバックグラウンド測定試験を行った (図 6.2)。屋外における試験を通じて、実際にトラックで測定する場合に生じる問題を洗い出し、温度湿度の変化する屋外環境下で測定が行えること、室内と屋外でバックグラウンドとなる環境放射線の成分が異なることが分かった。

年度末より中部電力浜岡原子力発電所にて、プロトタイプ lesser PANDA による測定を開始した。プロトタイプは、現在メンテナンスで停止中の 3 号炉から約 40m の距離に設置しており、3 号炉の起動前と起動後のニュートリノ量の変化を測定する予定である。

6.1.2 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験

強い相互作用の理論である量子色力学 (QCD) には実験事実と反して CP 対称性を破ってしまう問題、

強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion) 模型はこの問題を解決するものとして期待されているが、それには模型が予言する擬南部ゴールドストーンボソンであるアクシオンの発見が不可欠である。しかし、今のところこの素粒子はいかなる実験、観測によっても発見されていない。アクシオンは小さい質量を持った中性擬スカラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互作用しないと考えられている。予想される質量範囲はまだ広いが、もし 1 eV オーダーであれば太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の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アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。また、磁場領域に He ガスを導入することで質量を持ったアクシオンに対して感度を持たせることができる。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 (図 6.3)。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。

昨年はまず、磁場領域中に He ガスを導入する為の He ガス管中で、温度差が発生する問題を解決するための配管改修に取り組んだ。ガスに温度差が発生するとアクシオンに対する感度が保てないため、温度差をなくすことはこの実験を行う上で必要不可欠である。配管の改修を行った後は実験装置の真空性能検査を行っていたが、その途中で He ガス管に取り付けている X 線窓が破損してしまった。その後予備の X 線窓を取り付けて装置の冷却まで準備を進めたが、冷却の途中で予備の X 線窓まで破損してしまい、実験の中断を余儀なくされた。ほぼ同時期に超伝導磁石を冷却する GM 冷凍機の不具合にも見舞われ、X 線窓と冷凍機の修理を行った。これらの修理が完了した後は冷却を再開し、超伝導磁石の励磁を行い、測定準備を行っている。

なお、欧州原子核研究機構 (CERN) において同じ仕組みで大規模な装置を用いた CAST グループも 2002 年より探索実験を始めており、我々の後にアクシオン模型が予想する領域に到達している。その後も探索質量範囲を拡大しているが、彼らの実験装置では 1.2 eV 以上の質量を持つ太陽アクシオン探索は行われない。我々の実験ではそれよりも大きい質量の太陽アクシオン探索を計画しており、Sumico 実験の強みとなっている。

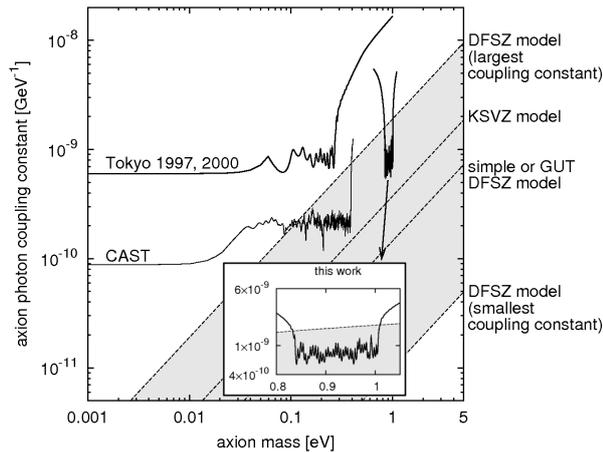


図 6.3: 太陽アクシオンに対する制限

6.1.3 太陽 hidden sector photon 探索実験

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 sector photon が挙げられる。hidden sector 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 $m_{\gamma'}$ 、走行距離、エネルギー、媒質密度、hidden sector photon と光子の混合角 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 sector 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 sector 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 sector photon の探索実験を検討し hidden sector photon 検出装置の設計、製作を行ってきた。hidden sector photon 検出装置は hidden sector 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、測定の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アクシオン望遠鏡に本検出装置を搭載し、アクシオン望遠鏡の太陽追尾システムを利用する手段を用いた (図 6.4 参照)。本年度は hidden sector photon 検出用に設計、製作した検出装置を用いてエネルギー数 eV の太陽 hidden sector photon の探索実験を行った。また、次期測定を行う際に更に感度の高い測定を行うための検討を行ってきた。以下に本年度の研究実績をまとめる。

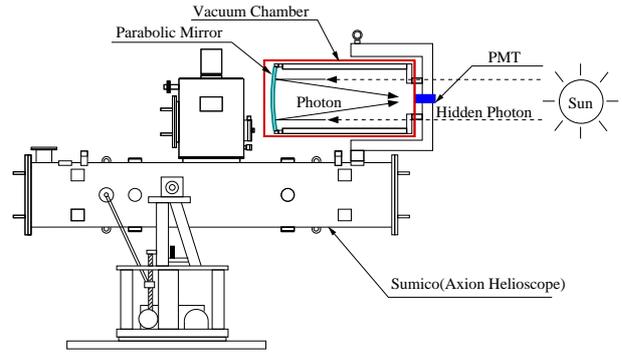


図 6.4: hidden sector photon 探索装置の模式図

エネルギー数 eV の太陽 hidden sector photon の探索実験

hidden sector photon 検出装置の組み立て、検出装置のアクシオン望遠鏡への取り付け、光軸の方向を決定するための測量等の準備の後、22 日間にわたる測定実験を行った (図 6.5 参照)。測定期間中、太陽追尾測定は日の出、日の入り前後に 1 日当たり合計約 10 時間行い、それ以外の時間帯にバックグラウンド測定を行った。

解析の際には hidden sector photon イベントレートを求めるために太陽追尾データとバックグラウンドデータのダークカウントレートの差を調べる手法を用いた。ただし、PMT のダークカウントレートは温度の影響を受けるため温度変化の影響を取り除く必要がある。測定期間中、平日には実験室の換気状況の変化に伴う激しい温度変化がみられたので解析には休日のデータのみ用い、 0.1°C の温度幅ごとにデータを分けて考察することにより温度変化の影響を取り除いた。そして、宇宙線の影響、PMT のゲイン変動の影響、ダークカウントレートの長期的減衰の影響等を系統誤差として考慮し、測定結果から hidden sector photon イベントレートを求めたが有意に大きなイベントレートは得られなかった。そこで、hidden sector photon イベントレートの上限値を決定し、このイベントレート上限値と光検出器の検出効率、転換長、転換領域の有効面積等の測定条件を考慮することにより hidden sector photon と光子の混合角 χ の上限値の決定を行った。混合角 χ の上限値は hidden sector photon 質量 $m_{\gamma'}$ の関数の形で決定され、図 6.6 実線の通りである。

本結果において、質量数 meV の領域において世界でもっとも厳しい上限値をつけることに成功した。また hidden sector photon の質量が meV 領域の前後の場合、hidden sector photon が宇宙初期に大量に生成された可能性があるが、この検証の一部を行ったことになる。

この実験は、太陽 hidden sector photon 専用探索実験で世界ではじめて有意な結果を出した実験である。

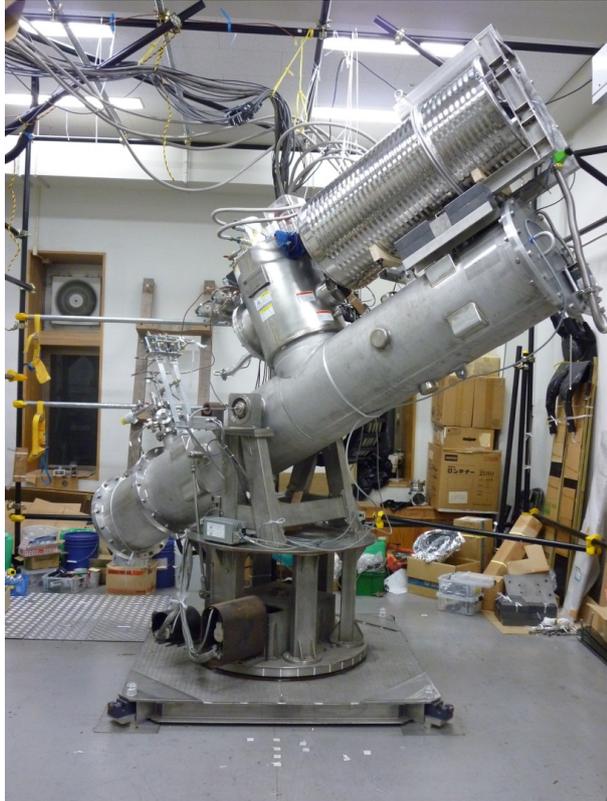


図 6.5: Sumico の上に載せられた hidden sector photon 探索装置

次期測定に向けての更なる感度向上のための検討

hidden sector photon 探索実験において更なる検出感度の向上のための検討を行った。特に、PMT は温度を下げることでよりダークカウントレートを減少させることができるので PMT を冷却し、かつダークカウントレートが安定するように PMT の温度を安定化させることは重要である。そこでスターリング冷凍機、断熱容器、温度調節器等で構成される PMT 冷却用の装置を製作し、PMT 冷却試験を行った。PMT 冷却中は PMT の結露を防ぐために断熱容器内部を乾燥窒素で満たしている。長期間の冷却試験の結果、PMT の温度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度の精度で制御することができ、 -20°C まで冷却することにより常温の場合に比べてダークカウントレートを 1Hz 程度減らすことができた。

また、現在使用している PMT 以外の検出器の導入の検討を行った。特に非常に高価ではあるが CCD 検出器の中には可視光領域において 100% 近い高量子効率、低バックグラウンドのものがありこれを用いて測定することにより大幅な測定感度の向上が期待できる。今後、次期測定に向け最適な検出感度向上の手法の検討を引き続き行っていく予定である。

<報文>

(原著論文)

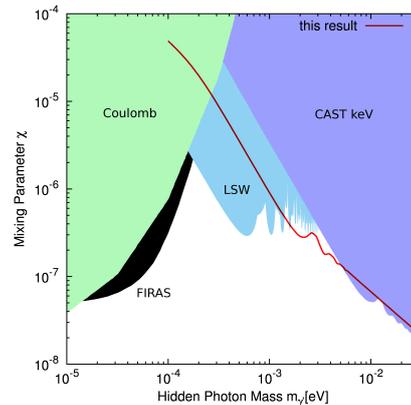


図 6.6: 本測定により得られた χ の上限値 (実線、preliminary)。塗りつぶし領域は他グループの実験結果、考察結果によって否定された領域。

- [1] Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa: Development of a Compact Resonance Ionization Mass Spectrometer for Trace Element Analysis of Potassium, arXiv:1010.5902v2 [physics.atom-ph].
- [2] S. Oguri, Y. Inoue, M. Minowa: Pulse-shape discrimination of $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A **662** (2010), 588–591, arXiv:1007.4750v2 [physics.ins-det].

(会議抄録)

- [3] R. Ohta, M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Prospects of Search for Solar Axions with Mass over 1 eV and Hidden Sector Photons, Proceedings of the 5th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Eds. Joerg Jaeckel, Axel Lindner and Javier Redondo (Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron), pp.82-85, RESCEU-50/09, arXiv:0911.0738 [astro-ph.IM].
- [4] Makoto Minowa: Tokyo Axion Helioscope, AXIONS 2010, Proceedings of the International Conference, Eds. David B. Tanner and K. A. van Bibber, AIP conference proceedings 1274, pp. 133–137, arXiv:1004.1308v1 [astro-ph.IM].

(学位論文)

- [5] 水本哲矢: Experimental search for solar hidden sector photons in the eV energy range using kinetic mixing with photons、平成 23 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。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] S. Oguri: PANDA – a mobile reactor neutrino monitor, AAP2010, Sendai, Japan, 3–5 August 2010.
- [7] Y.Kuroda, S.Oguri¹, Y.Kato, C.Ito, Y.Inoue, M.Minowa: PANDA - a mobile reactor neutrino monitor, poster session at International Neutrino Summer School 2010, Tokai, Ibaraki, 30 August 2010.
- [8] Y. Inoue: Tokyo axion helioscope, Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan, 27 September–1 October 2010.

招待講演

- [9] Y. Inoue: Tokyo axion helioscope experiment and other axion experiments, The XLVIth Rencontres de Moriond (Electroweak Interactions and Unified Theories), La Thuile, Aosta Valley, Italy, 13–20 March 2011.

(国内会議)

一般講演

- [10] 蓑輪 眞: Tokyo Axion Helioscope, Hidden photon search and Anti-neutrino monitor of reactor operations, RESCEU・DENET 共催夏の研究会・サマースクール、「第 10 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、高知県高知市「高知パレスホテル」、2010 年 8 月 29 日.
- [11] 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 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日.
- [12] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索実験 2、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日.
- [13] 堀江友樹: Hidden Photon 探索実験のための PMT 冷却システムの開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日.
- [14] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[1] 原子炉近傍に於ける予備実験、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日.
- [15] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[2] 新しいエネルギー較正手法の検討、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日.
- [16] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[3] 原子炉ニュートリノの測定、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 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、GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 5 回 RA キャンプ、静岡県伊豆の国市 2011 年 2 月 18 日.
- [18] 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 年第 66 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).

- [19] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索実験 3、日本物理学会 2011 年第 66 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).
- [20] 堀江友樹: Hidden Photon 探索実験のための PMT 冷却システムの開発 2、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).
- [21] 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] 測定器の無人稼働中の制御について、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).
- [22] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] エネルギー較正について、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).
- [23] 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予備実験、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学 (中止: 講演資料公開).

セミナー

- [24] 蓑輪 眞: 原子炉ニュートリノモニター、若狭湾エネルギー研究センター、2010 年 6 月 23 日.
- [25] 蓑輪 眞: 原子炉ニュートリノモニター、第 4 回 Nuclear Salon Fuji-ie & 理研懇談会、理化学研究所 仁科加速器研究センター 2010 年 7 月 26 日.
- [26] 蓑輪 眞: 低エネルギーニュートリノ実験の方法、グローバル COE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」、第 5 回 RA キャンプ、静岡県伊豆の国市長岡、2011 年 2 月 17 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

○ 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5年目に入ったが、搭載されたX線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と硬X線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、順調に稼働を続けている。我々は本年度も、衛星および硬X線検出器 (HXD) の運用を支援するとともに、山田らを中心に、HXDの軌道上較正をさらに進めた。京都大学で学位を取得した内山秀樹が、今年度より学振PDとして牧島中澤研究室に加わり、HXDとXISの連携が強化された。

2011年3月11日に発生した東日本大震災の後、JAXA宇宙科学研究所の相模原キャンパスは、たびたび計画停電に見舞われたため、「すざく」の運用にも多少の制約が発生した。

○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

全天X線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は2009年7月16日、スペースシャトルにより打ち上げられ、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の曝露部に搭載された。MAXIは現在、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。狭い視野を深く見る「すざく」に対し、MAXIは全天を浅く見わたす装置で、両機は良い相補性をもつ。ビッグバンセンターとしてMAXIに直接には参加していないが、牧島が2010年3月で理研・宇宙放射線研究室の兼務主任を定年退職し、今年度からは理研・基幹研究所・宇宙観測実験連携研究グループのグループディレクター、およびそこに所属するMAXIチームのチームリーダーを、非常勤で兼務することにより、MAXIと「すざく」との連携を支援している [19, 89, 105]。

東日本大震災のさい、JAXAつくばキャンパスでは電源系や建屋にかなりの地震被害が発生し、MAXIとの通信も1週間ほど失われたが、幸いこの間、MAXIは自律制御により動作し、障害は発生しなかった。またこの間の観測データはアメリカNASAで受信・保存されていたため、のちに再生復活することができ、全天監視データに実質的な欠損は生じなかった。

7.1.2 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、静止質量エネルギーの $\sim 10\%$ が外界に放射される。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 [13, 30, 29, 55]。

○ 恒星質量ブラックホール

「はくちょう座 X-1」 (Cyg X-1) は、1970年代半ばに小田稔らの観測にもとづき、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、山田らは昨年に続き、「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。この間、Cyg X-1は「Low/Hard状態」にあり、BHの近傍 (シュワルツシルドの ~ 100 倍以内) では降着物質は幾何学的に厚く光学的に薄いコロナを形成し、イオンは自由落下温度 (~ 100 MeV) に近く、電子はコンプトン冷却により ~ 100 keVの温度をもつと考えられる。

図7.1は鳥井らが導いた、X線ランダム変動のパワースペクトルで、 $1/f$ ノイズに似た形を示し、質量降着率が高まるにつれ、折れ曲がりが高周波へ移動することが、従来の観測に比べて格段に明らかになった。これは、変動の源であるコンプトンコロナが徐々に縮小し、やがて幾何学的に薄く光学的に厚い標準降着円盤に遷移することを示唆する重要な結果である [57, 71, 88]。

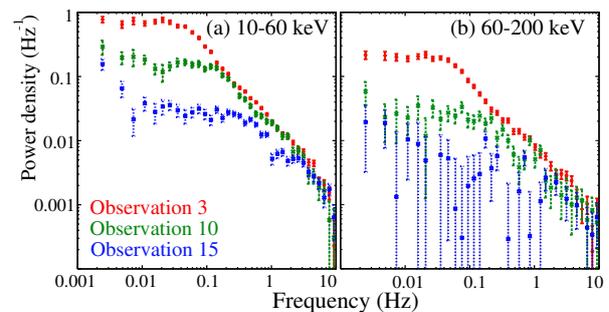


図7.1: Power-density spectra of the 10–60 keV (panel a) and 60–200 keV (panel b) X-ray signals from Cyg X-1, measured on 3 occasions with the Hard X-ray Detector onboard *Suzaku*. The mass accretion rate increases from Observation 3, through 10, to 15 [57, 71].

Low/Hard状態のBHBでは、円盤からの軟X線光子がコロナで熱的コンプトン散乱され、強い硬X線を形成すると考えられる。山田は博士論文で、図7.1のような変動に伴う広帯域スペクトルの変化を研究し、図7.2の結果を得た [38, 32, 87]。すなわち:

1. コロナの乱流などでX線強度が ~ 1 秒で激しく変化する際も、 < 2 keVでは変動振幅が激減する。これは、安定な円盤からの軟X線放射が直接に見えていることを意味する。
2. 質量降着率が変わり、X線強度が長時間 ($>$ 数週間) で変動する際は、3 keV以下で特に変動

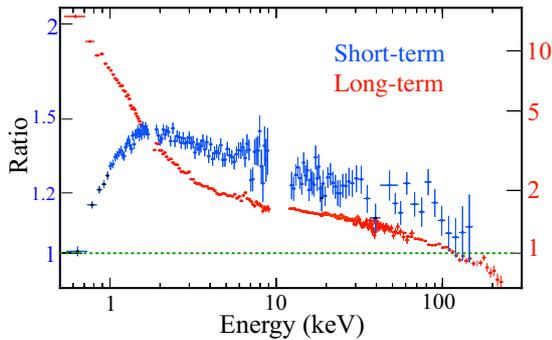


図 7.2: Amplitudes of spectral changes of Cyg X-1, measured with *Suzaku*. Black data points are spectral ratios when the source flickers on a time scale of 1 sec, while gray points are ratios between two observations (separated by a few years) with different mass accretion rates [38].

振幅が大きくなる。これはコロナが非一様で、 y パラメータの小さい成分 (soft Compton) が卓越してくることを示す。

3. これらは牧島、山田らが導いた、Low/Hard 状態の統一描像 (2008) を、全面的に強化する結果で、「すぎく」の快挙の一つである。

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。AGN と BHB とは類似性が強く、シュワルツシルド半径で規格化するなら、ほぼ同じ物理現象が起きると長年にわたり論じられてきた。しかし現実には、AGN のスペクトル連続成分は単一のべき関数でモデル化され、図 7.2 に見られるような、コンプトンコロナの非一様性などは、考慮されて来なかった。そこで野田らは昨年(2014)に続き、「すぎく」で得たセイファート銀河 MCG-6-30-15 のデータを解析した結果、スペクトルの 20–40 keV 付近に、連続成分とは独立した変動成分があること、それは光学的厚みの大きい熱的コンプトン放射と考えられること、またこの成分の存在を考えると、「鉄の K_{α} 線が異常に幅広く、この AGN は極端 Kerr BH である」とする、一部の外国研究者の主張は根拠を失うことを示した [15, 56, 70]。

野田らはまた、「すぎく」AO5 で観測した吸収の少ないセイファート銀河 Mkn 509 のデータ解析に着手した結果、図 7.3 に示すように、変動に伴うスペクトルの比は明らかに下に凸であり、Cyg X-1 と同様コロナの非一様性の効果が効いている証拠を得た。これらは AGN の研究に、大きな突破口を開くと期待される。

7.1.3 さまざまな磁場強度の中性子星

○ 磁場の弱い中性子星

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、

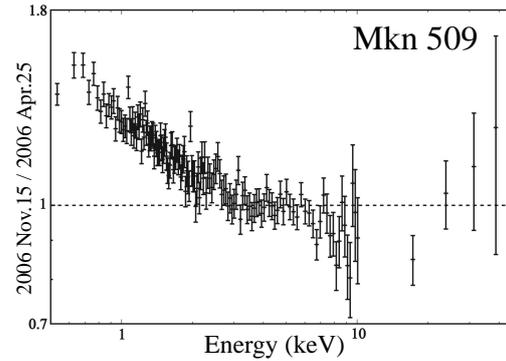


図 7.3: Ratios between two *Suzaku* spectra of the Seyfert galaxy Mkn 509, obtained on different occasions. Like in the long-term behavior of Cyg X-1 in Fig.7.2, the ratios are concave, suggesting the presence of multiple Comptonization components with different y -parameters.

LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。降着流の振舞いは BH の場合に似ており、質量降着率がエディントン限界の数%以上の場合 High/Soft 状態、それ以下では Low/Hard 状態が実現すると考えられているが、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。さらに NS の質量が BH に比べて $\sim 1/10$ であることから、LMXB のエディントン限界光度も BHB の場合の $\sim 1/10$ であり、よってその Low/Hard 状態はかなり暗く、かつ放射が硬 X 線域にわたるため、観測が難しかった。

LMXB の Low/Hard 状態を研究するには、ときおり X 線で明るくなるトランジェント LMXB が適している。桜井らは、そうした天体 Aquila X-1 の「すぎく」公開データを解析した結果、図 7.4 のように、2つの状態の違いを捉えることに成功し、High/Soft スペクトルは 1980 年代から知られていたように、標準降着円盤からの多温度黒体放射と、NS 表面 (赤道付近の帯状部分) からの黒体放射との和であることを示した。さらに Low/Hard 状態では、円盤は NS 半径の約 2 倍の距離で高温 (30–50 keV) コロナへと遷移し、それが NS 表面にほぼ球対称に衝突して作る黒体放射がコロナで強くコンプトン化される結果、エネルギー ~ 100 keV まで続く強い硬 X 線が作られることが、初めて明らかにされた [59, 91, 127]。

○ 降着型 X 線パルサー

前項で述べた弱磁場 NS に対し、 $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ NS も多数、存在する。牧島はそうした NS の強い磁場が、中性子の核磁気モーメント整列による強磁性の発現である可能性を論じている [46, 149]。このような NS が連星をなし相手の星からガスを獲得すると、降着型パルサーとなり、それらの X 線スペクトル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、NS の磁場計測の切り札となる。

MAXI の打ち上げ直後に、図 7.5 に示すように、再帰型 Be トランジェント天体 GX304-1 が 28 年ぶりに X 線で明るくなったことが検出された。牧島らは理研 MAXI チームなどと協力し、2010 年 8 月 13

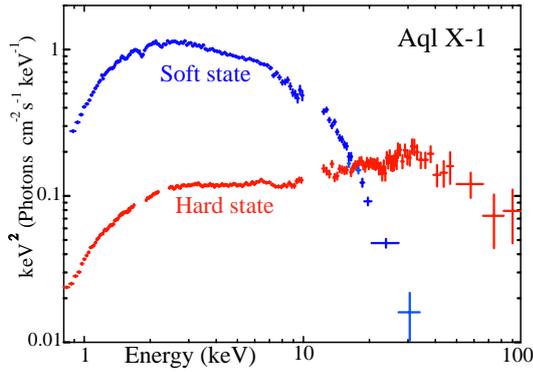


図 7.4: *Suzaku* spectra (in the νF_ν form) of the recurrent transient Aquila X-1, obtained in the High/Soft state (gray; 2007 September 28) and the Low/Hard state (black; 2007 October 30).

日に「すぎく」による緊急観測を実施した。その結果スペクトルの ~ 54 keV に、電子サイクロトロン吸収線を発見し、磁場を 4.7×10^{12} G と決定することに成功した [19]。これは過去にこの手法で直接測定された NS 磁場のうち、最強の部類である。

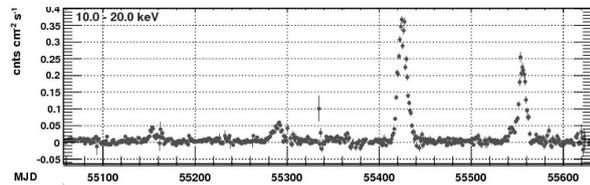


図 7.5: A 10–20 keV light curve of the recurrent transient X-ray pulsar GX304–1, obtained with MAXI over a period of 2009 August 14 through 2011 March 11. Flares synchronized with the 130-day orbital period are observed [19].

○ SFXT 天体

近年、SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる一群の硬 X 線天体が注目を集めている。これらは名前の通り、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、数十分から数時間の間に強度が 2 \sim 3 桁も増加するなど激しい変動を示す。数百秒から数千秒と、ひじょうに長いパルス周期をもつものも多い。変動の生成機構としては、主星からの星風の濃い部分に NS が突入したとき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 SFXT のフレア機構を探るため、「すぎく」で観測された数例の SFXT のうち、強度の高い IGR 16195–4945 の公開データを解析し、図 7.6 に示すように、約 2 時間にわたる強いフレアを検出した。フレア時にはスペクトルの吸収は有意に増加せず、静穏時に見えていた中性の蛍光鉄輝線も（等価幅で言って）弱くなり、かつ広がる気配が得られた [58, 90, 128]。これは非一様星風説の予言とは矛盾す

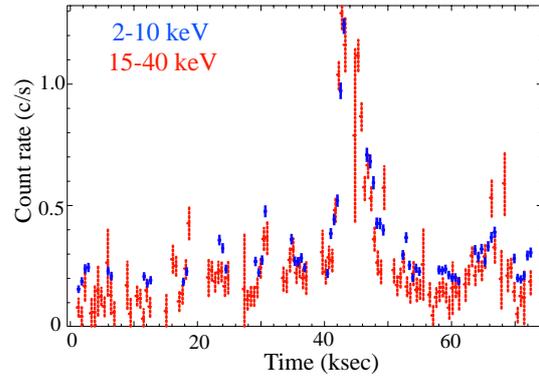


図 7.6: Soft and hard X-ray light curves of the SFXT, IGR J16195–4945, observed with the *Suzaku* XIS and HXD, respectively [58, 90].

る一方で、NS が $\sim 10^{13}$ の磁場をもつと考えると、スペクトルの変化や、遅い自転、激しい変動などは、「磁氣的ししおどし」説で統一的に説明できそうである。すなわち SFXT は磁場強度でいうと、前項で述べた X 線パルサーと次項で述べるマグネターの中間的な天体かもしれない [48, 102]。

○ マグネター天体

銀河系やマゼラン雲にある 20 個ほどの X 線源は、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。西岡、牧島らはスタンフォード大の榎戸輝揚、理研の中川友進らと協力し、「すぎく」第 4 期公募観測 (2009 年度) に採択されたキープロジェクト「マグネター大研究」の後半部分 (合計 210 ksec) を遂行し、SGR 0501+4516 と 1RXJ 1708–40 の 2 天体、および関連天体である X 線パルサー GX 1+4 を観測するとともに [46, 48, 92, 102, 144, 149]、これまでの成果を一連の論文として公表した [3, 6, 9, 18]。2010 年 3 月 27 日には、新たに発生したマグネター SGR 1833–0832 を「すぎく」で緊急観測し、そのデータを解析した西岡らは、黒体放射的な軟 X 線成分に加え、マグネターの特徴である、硬い硬 X 線成分の気配を検出した [93]。

図 7.7 は、こうして得られた代表的なマグネターの νF_ν スペクトルを、2 keV で規格化して示したものである。どれも軟成分と硬成分の 2 成分から成る特徴的なスペクトルを示すこと、老齢な天体ほどハード成分の強度が下がるが、その傾きは硬くなること、などが見取れる。このハード成分は、シンクロトロン過程など通常の非熱的放射では説明できないほど硬い。そこで我々は山形大の柴田晋平らと協力し、奇妙なハード成分は電子陽電子対消滅線などのガンマ線光子が、強い磁場中で「二光子分裂」を繰り返して、低エネルギー側に落ちて来た結果だとする可能性を追求している [6, 46, 48, 102, 149]。この仮説によれば、老齢なマグネターほど磁場が弱く、二光子分裂がわりに高いエネルギーで止まってしまうため、より硬いスペクトルになると説明できる。

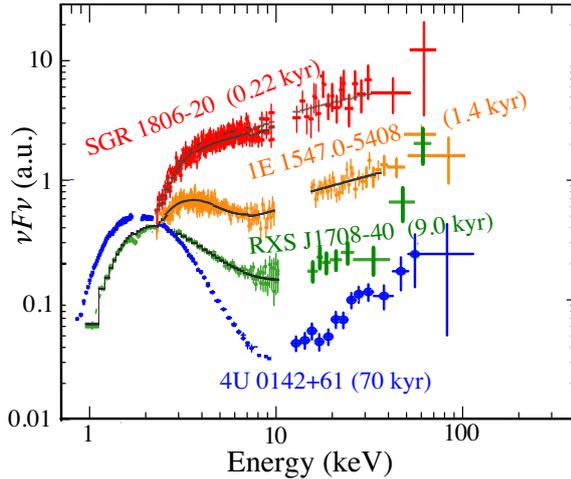


図 7.7: Wide-band νF_ν spectra of representative magnetars, observed with *Suzaku* [6, 46, 48]. The spectral properties are seen to depend strongly on the characteristic age which is indicated in the parentheses.

7.1.4 星間空間における高エネルギー現象

○ マグネターに付随する超新星残骸の観測

中性子星やブラックホールは、大質量星が重力崩壊型超新星生成されると考えられ、マグネターも例外ではない。実際、20 例ほどのマグネターのうち数例は、超新星残骸 (SNR) の中に存在する。これら SNR の診断を通じ、マグネターがどのような超新星爆発で生成されたか、探求できると期待される。

そこで我々は、中野、平賀らを中心に、CTB109 と呼ばれる SNR に注目した。この SNR は図 7.8 (左) に示す奇妙な半月状の形をもち、中心にマグネター 1E2259+586 を擁する。「すぎく」Key Project の一貫としてこのマグネターを観測した際、CTB109 も部分的に XIS の視野に入った。中野らがそのデータを解析した結果、図 7.8 (右) のように、スペクトルは温度 0.26 keV (星間物質) と温度 0.57 keV (イジェクタ) のプラズマ放射の和で再現でき、高温成分の重元素組成は太陽組成の 1~3 倍程度で、 $15 M_\odot$ の星の重力崩壊から期待される値とほぼ一致した [61, 94, 102, 129]。セドフの相似則を適用して推定した爆発エネルギーは、 $(1.5-7) \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ となった。こうした結果を見る限り、CTB109 は平均的な重力崩壊型 SNR と、目立った違いは無い。

この研究の過程で、マグネターと SNR との年齢の不一致も浮上して来た。パルス周期とその伸び率から決まる 1E2259+586 の特性年齢が、約 7 万年であるのに対し (図 7.7)、CTB109 の年齢は他の SNR と同様、1~2 万年を超えない。そこで我々は、マグネターの磁場は時間とともに減衰する結果、形式的に求めた特性年齢は過大評価になると考えている。

○ 超新星残骸の観測

平賀は理研の吉井、山口、玉川らと協力し、超新星残骸の研究を継続した。我々に最も近い超新星残骸 Vela では、メインシエルより外側にイジェクタが

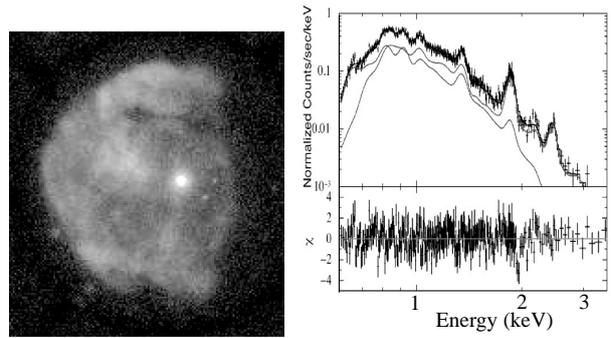


図 7.8: (left) A soft X-ray image of the SNR CTB109, obtained with *ROSAT* (from *Skyview* Web site). The magnetar 1E2259+586 is seen at its center. The scale is about $40'$ across. (right) An X-ray spectrum of a part of CTB109 obtained with the *Suzaku* XIS, fitted with a two-temperature plasma emission model [61].

弾丸のように飛ばされた破片状構造の存在が知られている。そのうち、破片 E に於いて、「すぎく」によるスペクトル解析の結果、破片のテイル部分は O、Ne、Mg の組成量が多く、親星からのイジェクタであることが判ったことに加え、破片の先端部分から光子指数 2.3 の広がった非熱的成分が発見された。非熱的成分が Vela 超新星残骸に付随した成分であった場合、爆発後 1 万年以上も経過した超新星残骸で非熱的成分を発見したのは初めてである [62]。

○ 広がった銀河面 X 線放射の起源とスペクトル分解

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、Si、S 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、温度として少くとも $\sim 1 \text{ keV}$ と $\sim 7 \text{ keV}$ の 2 温度が必要で、さらに硬 X 線領域まで、非熱的とも見えるスペクトルで延びることも知られていた。この現象の起源は 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、さまざまな解釈が提案され、論争が続いていた。近年ロシアグループにより、GRXE の表面輝度が恒星の分布と酷似することが指摘され、「暗い点源」説が有力となりつつあった。さらに *Chandra* 衛星による銀河中心付近の深い観測で、GRXE の 8 割が暗い点源に分解され、その多くは、白色わい星連星であろうと考えられた。

湯浅は「すぎく」を用い、この問題に二段階で挑戦した [39]。まず彼は近傍の白色わい星 (WD) 連星のうち、中程度の磁場強度 ($\sim 10^6 \text{ G}$) をもつ激変星 20 個ほどを、自らの提案などにより「すぎく」で観測し、その 3-50 keV のスペクトルを、WD 磁極の降着円筒からの多温度プラズマ放射として、定量的に再現することに成功した [14]。図 7.9(上) はその一例である。この激変星放射モデルは WD の質量をパラメータとしており、20 個の平均質量は $\sim 0.88 M_\odot$ と得られた。次いで湯浅は、「すぎく」で 5 年間に大量 ($\sim 10^6$ 秒) に集積された銀河中心付近の XIS および HXD のデータを慎重に解析した結果、図 7.9(下)

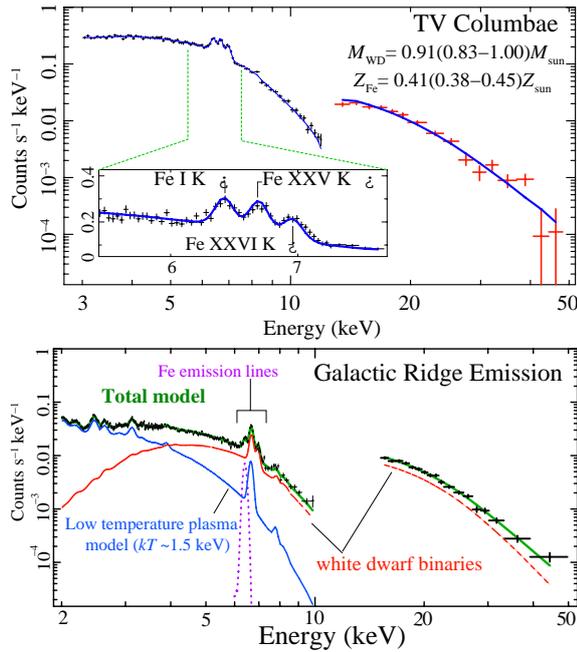


図 7.9: (Top) Broad-band X-ray spectra of the intermediate polar TV Columbae measured with *Suzaku*, shown without removing the instrumental responses. They are fitted with a white-dwarf emission model of which the best-fit parameters are given in the figure [14]. (Bottom) Broad-band spectra of the Galactic Ridge X-ray Emission measured with *Suzaku*, fitted with the white-dwarf emission model and a low-temperature plasma component [39]. The systematic model deficit in > 10 keV is due to contributions from the Cosmic X-ray Background.

に示すように、上で求めた激変星の放射モデルと、より低温 (~ 1.5 keV) のプラズマ放射 (おそらく星のコロナ) を加えることにより、銀河面X線放射の広帯域スペクトルみごとに再現することに成功した [39, 113]。放射を説明するに必要なWD連星の数も妥当であり、これで銀河面X線放射の硬X線部分は、おもにWD連星からの放射の総和であることが確定し、長年の謎に終止符が打たれた。この功績により湯浅は、研究科奨励賞 (博士の部) を受賞した [2]。

○ 銀河中心付近の研究

内山らは京都大学と協力し、銀河中心近くにある未同定 TeV ガンマ線天体のうち、最も暗いもの一つである HESS J1741-302 を、「すぎく」で探査した。その結果、その近傍で X 線天体 *Suzaku* J174035.6-301416 を発見し、撮像分光や時間変動の解析により、これが HESS 天体と無関係な、強磁場激変星であることを突き止めた [16, 86]。これは、前項で述べた GRXE を構成する多数の激変星のうち、とくに明るいものが個別に検出されたものと考えられる。HESSJ1741-302 からの X 線放射に対しては、厳しい上限値をつけ、これがガンマ線以外での対応天体をもたない、「暗黒加速源」であると結論

づけた。このガンマ線源はおそらく古い超新星残骸で、加速された陽子による π^0 崩壊ガンマ線が出る一方で、電子はすでに放射冷却されたものと考えられる。

内山らはまた「すぎく」による銀河中心領域の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、広がった熱的 X 線の表面輝度や、そこに含まれる高電離鉄輝線の強度の、空間分布を測定した [143]。近赤外観測にもとづく恒星の質量分布と比較した結果、単位恒星質量あたりの高電離鉄輝線の強度が、銀河面に比べて中心領域では、4-19 倍も大きいことを明らかにした。よって上に述べた GRXE とは異なり、銀河中心領域では、真にディフューズな熱的 X 線が広がっている可能性が示唆される。

7.1.5 銀河団および銀河群の研究 [4, 5, 11, 17, 73, 109]

○ 非熱的硬X線と超高温成分

「すぎく」が Abell 3667 銀河団から検出した超高温 (> 20 keV) の高温プラズマ成分は、銀河団同士の正面衝突の瞬間を示す証拠と考えられる。中島、中澤らは、「すぎく」による銀河団からの超高温成分の探査を続けている。みなみのさんかく座銀河団、かみのけ座銀河団、Abell 2319 銀河団など、近傍の高温の銀河団の「すぎく」データを系統的に解析したところ、Abell 3667 以外からは、20 keV を超える超高温成分は有意に検出されなかった。このことから、超高温成分の出現は衝突後の短い時間に限られること、そして Abell 3667 はまさにその段階にあると解釈される。この銀河団は最も明るい巨大電波源を持っており、両者には深い関係があると考えられる [47, 126]。

「すぎく」による Abell 3667 の観測結果のもう一つ重要な点は、その北西方向の広がった巨大電波源での磁場の値である。シンクロトロン電波のフラックスと、逆コンプトン X 線の上限値の比較から、この領域での磁場の値は $2 \mu\text{G}$ 以上と求まった。よって磁場と高エネルギー電子のもつ圧力は、ガスの熱的圧力の $10 \sim 20\%$ 以上に達しており、銀河団のガス分布に与える磁場の影響が無視できないことがわかる。中澤は、首都大学の赤松弘規らと協力して、この領域の希薄なガスの温度分布を調べており、衝突に伴う衝撃波加熱が生じている証拠を捉えた [83]。本内容にもとづき、中澤はフランス・ニースにおいて招待講演を行なった [47]。将来は、分光能力と広帯域の観測感度に優れる *ASTRO-H* 衛星を用いることで、衝突、非熱的圧力、そして銀河団中でのエネルギー解放のメカニズムの理解が進むと期待される。

○ 銀河団の質量分布

質量分布は、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-Fenk-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、牧

島は、全重力質量が中心銀河と全銀河団という、階層構造をもつという主張を固めてきた。じっさい中国・上海交通大学の顧力意らと協力して Abell 1795 銀河団の公開データを解析したところ、プラズマ温度構造のモデル化の方法によらず、中心から積分した全重力質量は図 7.10 のように、明らかな階層構造をもつことが明らかになった [112]。中心銀河に付随する質量成分は、おそらく星などのバリオンが寄与する結果と思われる。

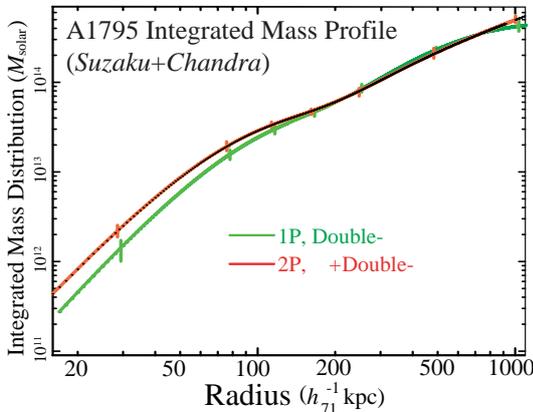


図 7.10: A spherically integrated profile of the total gravitating mass in the Abell 1795 cluster of galaxies. Effects of different modelings of the plasma temperature are indicated by black and gray curves [112].

○ 磁気流体的な描像

牧島らは 10 年来の X 線観測にもとづき、銀河団の磁気流体的な描像を追求している [141]。上海交通大学の顧力意らと協力し、「すざく」、*XMM-Newton*、および *Chandra* 衛星で観測した、Abell 1795 銀河団のデータを総合解析した結果、この銀河団の中心 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を立証できた [112]。これは昨年度、高橋勲によって得られたケンタウルス座銀河団の結果とひじょうに良く一致しており、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。さらに Abell 1795 では、低温成分の多い領域で、重元素アバundance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発見された [112]。

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、Abell 1795 と対照的に、プラズマは 4-5 keV で等温であり、元素組成もほぼ一定であることを確認した [85, 111]。

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、銀河は抵抗を受けて中心に落下し、プラズマは加熱されると考えられる。この落下の証拠を探るため昨年度に引き続き、稲田直久を中心に、理研の小波さおり、宇宙研の川原田円らと協力し、近傍から遠方までの銀河団に対し、可視光で決めた銀河団のメンバー銀河の空間分布を、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。サンプルはまだ少ないものの、遠方では近傍に比べ、銀河がよりプラズマの中に広く分布する徴候が得られつつある [84, 110]。

7.1.6 ASTRO-H 衛星計画

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置 [25]

ASTRO-H 衛星は、HIIA ロケットによる 2014 年の打ち上げを目指して開発が進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、長さ 14 m、重さ 2.5 t と日本最大の科学衛星である。この衛星は、X 線マイクロカロリメータを搭載し、6 keV の X 線に対して、4-7 eV という世界最高精度の分光能力により、コンパクト天体の重力ドップラー効果なども測定できる。また 5-80 keV で集光できる硬 X 線望遠鏡 (HXT) が 2 台と、その焦点面には 1 分角の撮像分光を行う硬 X 線イメージャ (HXI) を搭載し、厚いガスに隠された天体や、広がった加速源などを、高感度で撮像分光できる。HXT は名古屋大学が中心となって開発しており、多層膜スーパーミラーにより硬 X 線を集光撮像する。さらに広視野の X 線 CCD カメラ 1 台と、60-600 keV で最高感度の観測を行う軟ガンマ線検出器 (SGD) 2 台が搭載される。これらの装置の協力により、*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が期待される。

本プロジェクトでは、JAXA ほか国内の大学研究機関に加え、米国スタンフォード大および MIT、またフランス CEA と共同し、HXI、SGD、および SXI の開発に全面的に参加している。2014 年の打ち上げへ向けて、今年度はこれら搭載装置の試作品を製作し、その性能を実証すること、解析や要素部の評価によって衛星搭載品を設計し、検証することを進めて来た。2011 年の半ばには Critical Design Review (CDR) が予定され、ここで衛星搭載品の最終設計を決める。

○ SXI 装置

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。2010 年度は製造メーカーである三菱重工と協力し、SXI 全体の詳細設計を進め、年度末に設計図面の確認を終了した。2011 年度月上旬にプロトタイプを製造し、機能試験、H-II ロケットでの打ち上げを考慮した振動試験などの検証に臨む。SXI には大阪大学、国立天文台を中心に浜松ホトニクス社と共同開発してきた厚空乏層の大型素子が搭載される。平賀、片倉 (横浜国大からの委託院生) らが当センターに SXI 用開発用素子のテスト駆動システムを構築した [44, 108]。2011 年度に製造される EM 素子の動作試験、基礎性能評価を実施する見込みである。また、河野 (横浜国大からの委託院生)、平賀らが大阪大学と協力し、SXI 用デジタル信号処理ボードの FPGA ロジック開発を進め、BBM を用いた機能の検証を行った [45]。

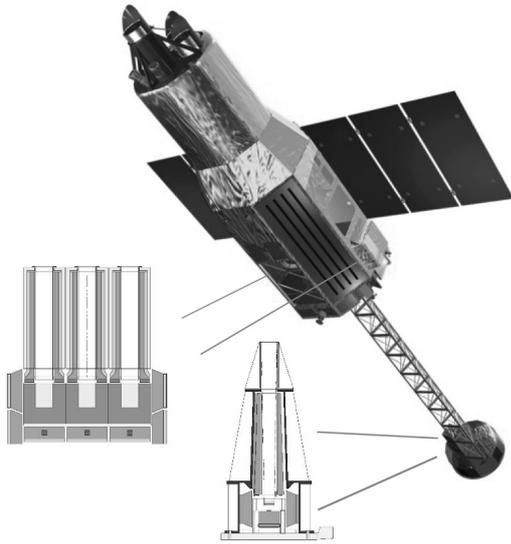


図 7.11: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2014. The overall length is 14 m, and the weight is 2.5 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

○ HXI 装置と SGD 装置 [12, 23, 26, 78, 95, 106, 107, 120, 131, 133]

HXT の焦点面に置かれる 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、かつエネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。HXI は図 7.11 に示すように、井戸型に組み上げた 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、これまでの検出器より 2 桁近く高い感度を実現すると期待される。

SGD は図 7.11 のように、3×2 台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む 25×2 個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラは、半導体パッド検出器（シリコンおよび CdTe）を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するもので、60–600 keV の帯域で動作し、数度の角度分解能を持つ。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを極限まで除去し、「すぎく」HXD より感度を一桁上げる。

○ BGO 結晶シンチレータの支持構造の開発 [41, 96]

中島、中野、中澤らは、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの構造開発を進めた。HXI や SGD では、内部の主検出器が大きく、「すぎく」HXD で用いられたように結晶を接着して支持する技法では、ユニットサイズが 10 kg を越えてしまい、取り扱いが困難となる。そこで、CFRP とネジを使った全く新しい概念の固定方法を開発し、BaSO₄ 粉の反射材塗料を経由して接着固定することで、比較的小型の BGO ユニットの、コンパクトかつ高密度に

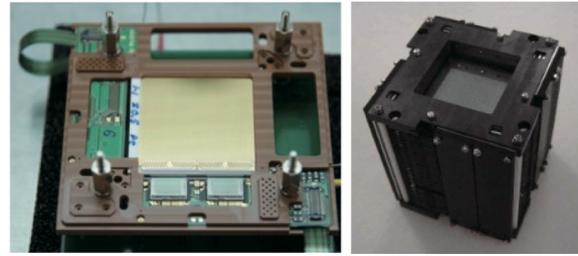


図 7.12: (left) A bread-board model for an HXI CdTe imager. (right) A mechanical model for an SGD Si-CdTe Compton Camera.

実装する方法を開発している。2010 年度はこの接着部の強度を高め、予想される振動レベルに対する安全率を確保する開発を行った。塗料の溶剤を変更することで、強度を 2 倍以上に強化することに成功した。この開発を受けて、三菱重工とともに BGO ユニットの製造方法の確立を図ると同時に、HXI および SGD の全体構造（ハウジング構造他）の構造検討を進めている [41]。シンチレーション光の読み出しにあたっては、軽く小さく省電力な Avalanche Photo Diode (APD) を全面的に採用した。

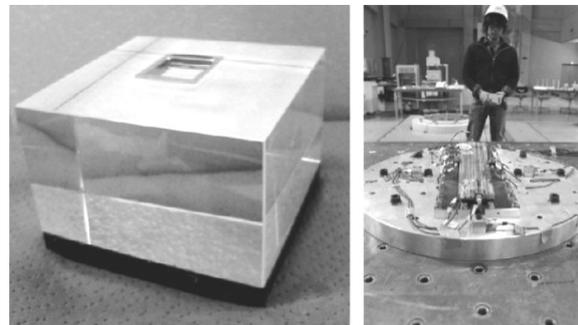


図 7.13: (left) A mechanical model for a BGO crystal to be used in the active shields for the HIX. (right) Vibration tests of a BGO crystal for the SGD, performed at ISAS/JAXA on 2010 January 13-14.

○ 結晶シンチレータの集光効率の研究 [42, 135]

西岡、笹野らは、HXI や SGD の極めてタイトな構造上の制約の中で、BGO アクティブシールドで検出できるガンマ線の最低エネルギーを改善する研究を進めてきた。BGO 結晶は屈折率が 2.15 と極めて高く、シンチレーション光をいかに小面積の APD へ導くか、また反射材などの構造で失う光量をいかに減らすかが大きな課題である。さまざまな形状を持つ数 kg 規模の BGO シンチレータを、APD などのコンパクトな半導体光学素子で読むというアイデアは、HXI や SGD が最初である。10 種類を越える形状の BGO 結晶の光量を系統的に測定することで、光量と結晶形状との関係について経験的な式を得た（投稿準備中 [42]）。この経験式を、BGO や APD の温度依存性と組み合わせ、さらに反射材などの艱装を考慮することで、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。

○ HXI および SGD の熱設計 [43, 97, 132]

HXI や SGD は、主検出部には Si や CdTe、シールド部には APD など、多くの半導体素子を使用し、それらはいずれも -20°C 前後で最適性能を得られるため、検出器の放射冷却が必要である。ところが SGD の半導体コンプトンカメラは、12 cm 立方の狭い空間に 1 万 3000 もの読み出しチャンネルを含み、6 W もの発熱があり、対流が働かない真空中でこれを有効に逃がす必要がある。加えて HXI も SGD も、衛星構体の外に搭載せざるをえず、そのため日光や地球赤外線、直接に浴びることになる。したがって両装置とも、慎重な熱設計が極めて重要である。

野田らは、名古屋大の田島教授、JAXA 小川教授らと協力し、熱伝導素子としてのグラファイトシートや銅製の柱を注意深く配置することで、コンプトンカメラ内の温度勾配を 5°C 以内にできることを計算と実験によって示した [43]。HXI と SGD の全体の支持構造体（ハウジング）は、強度、重量、熱膨張率などを考慮して CFRP で製作されるが、アルミなどと比較して、熱伝導率が低い。太陽の直射などの影響を考えると、熱的に環境が非常に厳しいことから、ここでも注意深い熱設計を続けている。

○ HXI における反同時計数の実証 [40, 137, 76]

鳥井、内山らを中心として、APD で読み出される複数の BGO シールド結晶に囲まれた環境において、半導体検出器をどのように反同時計数すればバックグラウンドを最も効率よく低減できるか、実証的な研究を進めた。この結果、反同時計数のゲートを設定するさい、APD の信号処理における波形整形時間の長さ ($\sim 2 - 3 \mu\text{s}$)、半導体検出器そのもののトリガー検知時間 ($\sim 0.6 \mu\text{s}$)、スペクトル処理用の波形整形時間 ($3 \sim 5 \mu\text{s}$)、という 3 種類のタイミングを考慮すべきことがわかった。さらに検出レイトが高い時には、反同時計数に独特の不感時間が発生することが確認された [40]。これらの知見は、衛星搭載品の開発に反映される。

○ スペースワイヤ (SpaceWire) 通信技術の開発 [51, 98, 53, 54]

SpaceWire は、次世代の衛星搭載用の標準的なシリアル通信規格であり、可変な通信速度をもち、ロジックがコンパクトで、リモートノードのバスに直接アクセスする機能 (RMAP 機能) が実装されるなどの特徴があり、次世代の衛星内通信の標準規格の一つとなっている。ASTRO-H ではこの SpaceWire に基づく情報処理系が採用され、ハードウェアによるデータ処理、CPU によるデータ処理ともに、これを前提にした新しいシステムを開発している。湯浅、桜井らは、この開発を中心となって進めている。2010 年度は、CPU による処理の OS 部の開発が進められてきた。これを受けて、科学的データの処理のソースコードの検討や開発を進めている。

7.2 BESS 気球実験

7.2.1 はじめに

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目的としている (図 7.14)。また、太陽活動の変化による宇宙線変調効果に着目しつつ、大気上空における宇宙線精密観測を系統的に推進している。東京大学、KEK、ISAS/JAXA、NASA、メリランド大、デンバー大による日米協力実験として研究を推進している。太陽活動極小期にあたる平成 18 年度に、南極周回気球による長時間宇宙線観測実験 (第二回) を実現し、高度 34 38 km の南極周回軌道において 24.5 日間に亘る宇宙線観測に成功した。周回軌道一周半に亘る観測後、南極点から約 1,000 km の高地雪原に着地し観測データが無事回収された。宇宙線観測、実データサイズは、第一回観測 (2004 年) の 6.2 倍となる 13.5 TB に達し、宇宙線観測イベントは、5 倍を上回る 47 億イベントに達している。なお、スペクトロメータ本体は、2 年後の平成 21 年度に、健全な形で回収された。

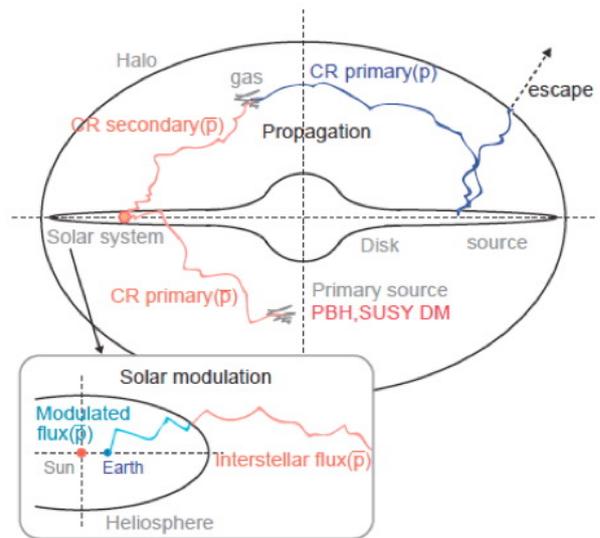


図 7.14: Cosmic-ray antiproton production and the propagation in the universe..

平成 22 年度は、前年度に引き続き、BESS-Polar II 実験のデータ解析を進めた。前回の太陽活動極小期 (平成 7~9 年) に、低エネルギー領域 ($< 1 \text{ GeV}$) において観測された、モデル計算よりも平坦なスペクトルが、平成 18 年度に迎えた太陽活動極小期に、高い統計精度で再現されるか大きな焦点となっていた。

表 7.2 a: Low energy antiproton measurements with BESS.

Year	Energy range range (GeV)	Events observed
BESS-93	0.18 - 0.5	6
BESS-94	0.18 - 0.5	2
BESS-95*	0.18 - 1.5	43
BESS-97*	0.18 - 3.6	415
BESS-98	0.18 - 4.2	384
BESS-99	0.18 - 4.2	668
BESS-00	0.18 - 4.2	558
BESS-02 (TeV)	0.18 - 4.2	166
BESS-04 (Polar-I)	0.10 - 4.2	1,520
BESS-07*(Polar-II)	0.17 - 3.5	7,886

* Observation at solar minimum period.

7.2.2 BESS-Polar II のデータ解析

太陽活動極小期である 2007 年 12 月から 2008 年 1 月にかけて実施された南極周回飛行実験 BESS-Polar II では、高度約 36km で 24.5 日間の連続観測を実現でき、47 億宇宙線事象を記録する事に成功した。フライト中、飛跡検出器の動作が不規則に時間変動する問題が発生したが、観測後のデータ解析のなかで、適正な較正方法を開発する事で、期待する性能を獲得している。表 7.2 a に BESS-Polar II 実験における反陽子観測数を、それまでの観測と比較し、進展を示す。

低エネルギー反陽子流束の精密観測

質量同定による明解な解析結果として、総数 7886 個の反陽子検出に成功し、2007-2008 年太陽活動極小期における流束 (図 7.15) が得られた。BESS-Polar II 反陽子流束は、1GeV 以下の領域において、前回太陽活動極小期のデータ (BESS'95+'97) の約 14 倍の統計量に匹敵する。BESS-Polar II 反陽子流束の観測結果をもとに、二次起源、一次起源反陽子について考察を深めた。二次起源反陽子のモデル計算は、一次宇宙線である陽子が、銀河磁場による拡散、対流、星間ガスによる加速を受けながら、衝突反応により反陽子生成をする過程 (宇宙線伝播モデル) と、太陽圏内における太陽磁場の擾乱による変調 (太陽変調モデル) の効果をかけ合わせたものとなる。図 7.15 から、BESS-Polar II 反陽子流束観測結果が、二次起源反陽子流束の様々なモデル計算と全体として良く整合する事が分かる。さらに、二次起源反陽子モデル計算の比較において、流束形状の違いに着目し、宇宙線伝播モデルの違いについて考察を進めた。太陽活動極小期の宇宙線反陽子に対する太陽磁場の擾乱の効果が非常に小さい事を確認したうえでの考察において、二次起源反陽子モデルの中でも、低エネルギー反陽子の副次的な過剰成分を含まないモデル

が観測結果とさらに良い整合性を有する事を示した。その具体例として、非弾性散乱によるエネルギー損失により、二次起源反陽子の低エネルギー成分を増加させる反応 (Tertiary 反応) を抑制しているモデルが BESS-Polar II 実験結果とより良い整合性を持つ事を明らかにした。

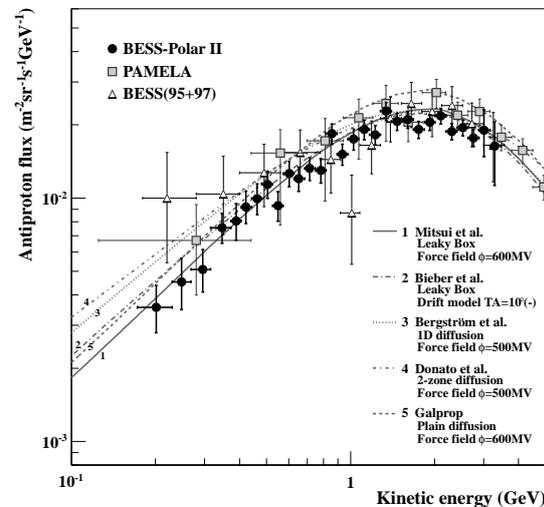


図 7.15: Antiproton flux observed in the BESS-Polar II experiment, compared with the previous flights at solar minimum (95+97) and various secondary p-bar model calculations.

宇宙起源反粒子探索のバックグラウンドとなる二次起源は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 PBH 起源の反陽子流束の評価を行った。BESS-Polar II 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 の上限値を計算した。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、PBH の蒸発率 R の上限値を求めた。その一例を、図 7.16 に示す。蒸発率 R の確率密度関数を確認することで、以下の結論に到達した。BESS'95+'97 の低エネルギー反陽子流束の過剰を説明できるレベル、即ち、蒸発率 $R \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{ pc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ で蒸発する PBH を起源とする一次起源反陽子は観測されず、この結果、統計精度を一桁以上高めた BESS-Polar II 実験から精度を高めた結果として、 $R \sim 1.0^{-3} \text{ pc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (90% C.L.) を上限値とする結果を得た。

反ヘリウムの探索

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。全フライトを通したヘリウム流束の統計は 4×10^7 イベントに達し、反ヘリウムは観測されず、BESS のこれまでの全フライトの統計量から、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値 6.9×10^{-8} を得た (図 7.17)。これは、BESS 実験以前のデータに対して、探索感度を二桁以上高める上限値を達成した。

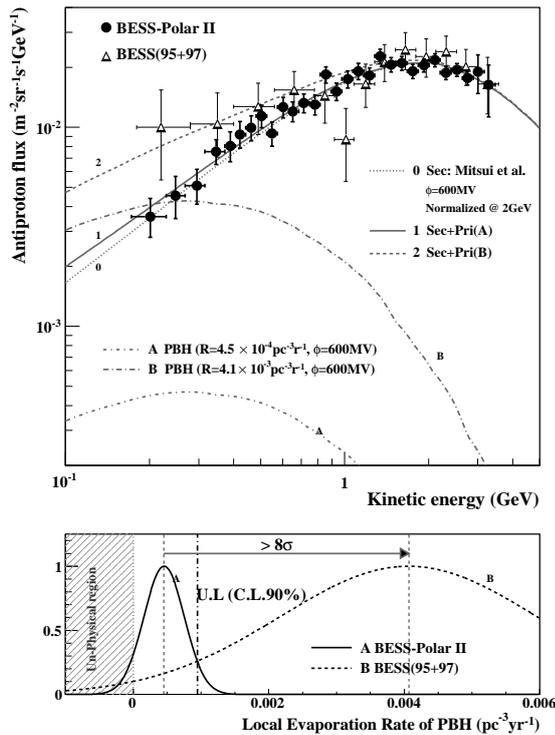


図 7.16: Primary antiproton fluxes from evaporating PBHs expected by fitting with BESS-Polar II and BESS95&97 observation respectively (top). Distribution of the explosion rate of PBH (R) calculated with Mitsui secondary antiproton flux (top), for BESS-Polar II and BESS95&97 (bottom).

7.2.3 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力実験として 1993 年に第一回観測を実現して以来、18 年に亘る歴史を重ねた。このなかで、南極での観測 2 回を含み、合計 11 回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。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。その集大成として、平成 19 年度の第二回南極周回気球実験では、南極周回軌道、高度 34~38km において 24.5 日間に亘る観測を実現し、宇宙線観測総数、47 億イベントの観測量を得た。平成 20~22 年度に観測データの解析が進み、太陽活動極小期における反陽子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。また、BESS のこれまでの全フライトの統計量から、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値 6.9×10^{-8} を導く成果を得た。

まとめとして、BESS-Polar II 実験では圧倒的な統計精度で低エネルギー反陽子スペクトルを決定し、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ことに貢献した。

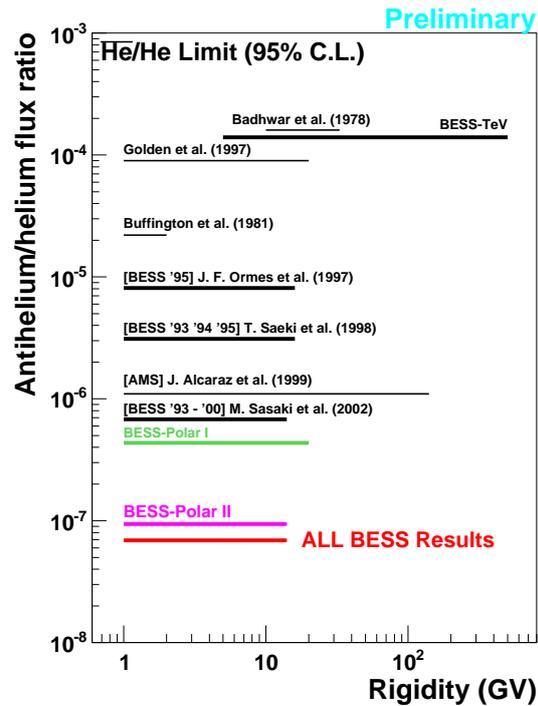


図 7.17: Progress in upper limits of Anti-helium/helium flux ratio with BESS-Polar II and all BESS experiments.

<受賞>

- [1] 坂井賢一、理学系研究科研究奨励賞、東京大学、2011 年 2 月
- [2] 湯浅孝行、理学系研究科研究奨励賞、東京大学、2011 年 2 月

<報文>

(原著論文)

- [3] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Sakamoto, T., Esposito, P., Götz, D., Hurley, K., Israel, G. L., Kokubun, M., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Stellar, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., Yamaoka, H., Yoshida, A. & Zane, S.: “Wide-Band *Suzaku* Analysis of the Persistent Emission from SGR 0501+4516 during the 2008 Outburst”, *Astrophys. J.*, **715**, Issue 1, 665–670, 2010
- [4] Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., Takizawa, M., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hamana, T., Miyazaki, S., Nakazawa, K., & Ohashi, T.: “*Suzaku* Observation of A1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-scale Structure”, *The Astrophysical Journal*, **714**, Issue 1, 423–44, 2010
- [5] Finoguenov, A., Sarazin, C., L., Nakazawa, K., Wik, D., R. & Clarke, T., E.: “XMM-Newton Observation of the Northwest Radio Relic Region in

- A3667”, *The Astrophysical Journal*, **715**, Issue 2, 1143–1151, 2010
- [6] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K. & Shibata, S.: “Broadband Study with *Suzaku* of the Magnetar Class”, *The Astrophysical Journal Letters*, **722**, Issue 2, L162–167, 2010
- [7] Hayato, A., Yamaguchi, H., Tamagawa, T., Katsuda, S., Hwang, U., Hughes, J., P., Ozawa, M., Bamba, A., Kinugasa, K., Terada, Y., Furuzawa, A., Kunieda, H., & Makishima, K.: “Expansion Velocity of Ejecta in Tycho’s Supernova Remnant Measured by Doppler Broadened X-ray Line Emission” *The Astrophysical Journal*, **725**, Issue 1, 894–903
- [8] Kubota, K., Ueda, Y., Kawai, N., Kotani, T., Namiki, M., Kinugasa, K., Ozaki, S., Iijima, T., Fabrika, S., Yuasa, T., Yamada, S. & Makishima, K.: “*Suzaku* and Optical Spectroscopic Observations of SS 433 in the 2006 April Multiwavelength Campaign”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, Issue 2, 323–333, 2010
- [9] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: “*Suzaku* Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0–5408 during its 2009 Activity”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, Issue 2, 475–485, 2010
- [10] Konami, S., Matsushita, K., Nagino, R., Tashiro, M., Tamagawa, T., Makishima, K.: “Abundance Patterns in the Interstellar Medium of the S0 Galaxy NGC 1316 (Fornax A) Revealed with *Suzaku*” *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, Issue 6, 1435–1443, 2010
- [11] Sato, K., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Matsushita, K., Ishisaki, Y., Yamasaki, N., Y. & Ohashi, T.: “Metallicity of the Fossil Group NGC 1550 Observed with *Suzaku*”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, Issue 6, 1445–1454, 2010
- [12] Kokubun, M., Watanabe, S., Nakazawa, K., Tajima, H., Fukazawa, Y., Takahashi, T., Kataoka, J., Kamae, T., Katagiri, H., Madejski, G. M., Makishima, K., Mizuno, T., Ohno, M., Sato, R., Takahashi, H., Tanaka, T., Tashiro, M., Terada, Y., Yamaoka, K., & the HXI/SGD team: “Hard X-ray and gamma-ray detector for *ASTRO-H* based on Si and CdTe imaging sensors”, *Nucl. Inst. Meth. Phys. A*, **623**, Issue 1, 425–427, 2010
- [13] Gandhi, P., Dhillon, V. S., Durant, M., Fabian, A. C., Kubota, A., Makishima, K. (他 6 名) et al.: “Rapid Optical and X-ray Timing Observations of GX339–4: Multicomponent Optical Variability in the Low/Hard State”, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, **407**, Issue 4, 2166–2192, 2010
- [14] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Saitou, K., Ishida, M., Ebisawa, K., Mori, H. & Yamada, S.: “White dwarf masses in intermediate polars observed with the *Suzaku* satellite”, *Astron. Astrophys.* **520**, A25, 2010
- [15] 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**, in press, 2011
- [16] Uchiyama, H., Koyama, K., Matsumoto, H., Tibolla, O., Kaufmann, S., & Wagner, S.: “No X-Ray Excess from the HESS J1741–302 Region except a New Intermediate Polar Candidate”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [17] Watanabe, E., Takizawa, M., Nakazawa, K., Okabe, N., Kawaharada, M., Babul, A., Finoguenov, A., Smith, G., P. & Taylor, J., E.: “*Suzaku* X-ray Follow-up Observation of Weak-lensing-detected Halos in the Field around ZwCl0823.2+0425”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [18] Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. & Shibasaki, N.: “Soft and Hard X-Ray Emissions from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with *Suzaku*”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [19] 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”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [20] Tsuchiya, H., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Kato, H., Okano, M. & Makishima, K.: “Long-duration gamma-ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms”, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, in press, 2011
- (会議抄録)
- Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Arnaud, Monique; Murray, Stephen S.; Takahashi, Tadayuki. Proceedings of the SPIE, **7732**, 2010
- [21] Mizuno, T., Hiragi, K., Fukazawa, Y., Umeki, Y., Odaka, H., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakajima, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakahira, S., Terada, Y., Tajima, H.: “Monte Carlo simulation study of in-orbit background for the soft gamma-ray detector on-board *ASTRO-H*”
- [22] Hanabata, Y., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., Tajima, H., Kataoka, J., Nakazawa, K., Takahashi, H., Mizuno, T., Ohno, M., Kokubun, M., Takahashi, T., Watanabe, S., Tashiro, M., Terada, Y., Sasaki, C., Nakajima, K., Mizushima, T.: “Development of BGO active shield for the *ASTRO-H* soft gamma-ray detector”

- [23] Nishino, S., Fukazawa, Y., Mizuno, T., Takahashi, H., Hayashi, K., Hiragi, K., Mizuno, M., Yamada, S., Kawaharada, M., Kokubun, M., Nakazawa, K., Watanabe, S., Tanaka, T., Terada, Y.: “On-orbit calibration status of the hard x-ray detector (HXD) onboard *Suzaku*”
- [24] Nakazawa, K., Takahashi, T., Limousin, O., Kokubun, M., Watanabe, S., Laurent, P., Arnaud, M., Tajima, H.: “The hard x-ray imager onboard IXO”
- [25] Takahashi, T. et al. (計 177 名) including Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H.: “The *ASTRO-H* Mission”
- [26] Tajima, H. et al. (計 29 名) including Makishima, K., Nakazawa, K.: “Soft gamma-ray detector for the *ASTRO-H* Mission”
- [27] Ozaki, M., Terada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., Ishisaki, Y. et al., “The Monte Carlo simulation framework of the *ASTRO-H* X-ray Observatory”
- その他会議抄録
- [28] Iwakiri, W., Ohno, M., Kamae, T., Nakagawa, Y. E., Terada, Y., Tashiro, M. S., Yoshida, A., Yamaoka, K., Makishima, K.: “Timing Analysis of Unusual GRB 090709A Observed by *Suzaku* Wideband All sky Monitor”, *Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts. AIP Conference Proceedings*, **1279**, 89–92, 2010
- [29] Hurley, K., Yamaoka, K., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Tashiro, M., Terada, Y., Murakami, T., Makishima, K., et al.: “The Third Interplanetary Network”, *ibid.*, 330–333, 2010
- [30] Gandhi, P., Dhillon, V. S., Durant, M., Fabian, A. C., Makishima, K., Marsh, T. R., Miller, J. M.; Shahbaz, T., Spruit, H. C.: Rapid timing studies of black hole binaries in Optical and X-rays: correlated and non-linear variability *X-ray Astronomy 2009; Present Status, Multi-Wavelength Approach and Future Perspectives: Proceedings of the International Conference; AIP Conference Proceedings*, **1248**, 119–122, 2010
- [31] Terada, Y., Harayama, A., Morigami, K., Ishida, M., Bamba, A., Dotani, T., Hayashi, T., Okada, S., Nakamura, R., ; Makishima, K., Mukai, K., Naik, S.: Systematic surveys of the non thermal emission from white dwarfs with *Suzaku* and *INTEGRAL*, *ibid.*, **1248**, 215–216, 2010
- [32] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H., Takahashi, H., Dotani, T., Kubota, A.; Ebisawa, K., Ueda, Y., Done, C.: “*Suzaku* wide-band observations of black-hole binaries and AGNs: continuum and Fe-K lines” *ibid.*, **1248**, 317–320, 2010
- [33] Konami, S., Matsushita, K., Sato, K., Nagino, R., Isobe, N., Tashiro, M. S., Seta, H., Matsuta, K., Tamagawa, T., Makishima, K.: “*Suzaku* Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 1316” *Highlights of Astronomy, Proceedings of the International Astronomical Union*, **15**, 286–286, 2010
- [34] Yamamoto, A. et al.: “Search for primordial antiparticle with BESS”, *Adv. Space Res.*, in press (2011).
- (国内雑誌)
- [35] 吉村 浩司 他: 「BESS-Polar II 測定器回収ミッション報告」、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 (2010)
- [36] 坂井 賢一 他: 「BESS-Polar II 成果報告 反陽子流束測定と反ヘリウム探索」、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 (2010)
- (学位論文)
- [37] Ken'ichi Sakai: “Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum at solar minimum with a long-duration balloon flight in Antarctica”, 博士学位論文 (物理学専攻)
- [38] Shin'ya, Yamada: “X-ray Studies of the Black Hole Binary Cygnus X-1 with *Suzaku*”, 博士学位論文 (物理学専攻)
- [39] Takayuki, Yuasa, “*Suzaku* Studies of White Dwarf Stars and the Galactic X-ray Background Emission”, 博士学位論文 (物理学専攻)
- [40] 鳥井俊輔, 「*ASTRO-H* 衛星搭載用の硬 X 線撮像検出器アクティブシールド機能の最適化」、修士学位論文 (物理学専攻)
- [41] 中島健太, “Mechanical design of the Hard X-ray Imager and the Soft γ -ray Detector onboard the *ASTRO-H* observatory”, 修士学位論文 (物理学専攻)
- [42] 西岡博之, “Studies of APD readout of BGO crystal scintillators for the *ASTRO-H* mission”, 修士学位論文 (物理学専攻)
- [43] 野田博文, “Thermal design of the Soft Gamma-ray Detector for the next astronomical satellite *ASTRO-H*”, 修士学位論文 (天文学専攻)
- [44] 片倉勇人 (横浜国立大学大学院: 東京大学受託学生): 「X 線用 P チャンネルの CCD 駆動システムの構築」修士学位論文
- [45] 河野秀紀 (横浜国立大学大学院: 東京大学受託学生): 「Astro-H 衛星搭載 X 専用 CCD 駆動システムのブレッドボードモデルの開発」修士学位論文
- <学術講演>
- (国際会議招待講演)
- Yoshimura, K., Yamamoto, A., & Mitchell, J. W.: “Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS”, *The 38th COSPAR Scientific Assembly* (2010 July 2010, Bremen).
- [46] Makishima, K.: “Wide-Band X-ray Observations of Magnetars”, *Physics in Intense Fields* (2010 November 15-18; KEK, Tsukuba)

- [47] Nakazawa, K. et al., “Non-thermal phenomena in merging clusters of galaxies as observed with *Suzaku* and to be with *ASTRO-H*”, *Non-thermal phenomena in colliding galaxy clusters 2010* (2010 November 15-18; Nice, France)
- [48] Makishima, K., Sasano, M., Nakajima, K., Nakano, T., Nishioka, H., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, K., Hiraga, J., S., Enoto, T., Nakagawa, Y., E., Mihara, T., Bamba, A., Sato, T., Terada, Y., Kohzu, T., & Yasuda, T., “Magnetars, X-ray Pulsars, and Related Objects”, *The first year of MAXI: Monitoring variable X-ray sources 4th International MAXI Workshop* (2010 November 30-December 2; Tokyo, Aoyama Gakuin University)
- [49] Yoshimura, K., Yamamoto, A. et al.: “Precision Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum and Search for Antimatter with BESS”, 10th international conference on Low Energy Antiproton Physics (2011, Canada).
- [50] Yamamoto, A.: “Search for Cosmic-Ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS”, The 20th European Space Agency Symposium (2011, Hyeres).
- (国際会議一般講演)
- SpaceWire Conference 2010 (2010 June 22-24; St. Petersburg, Russian Federation)
- [51] Yuasa, T., Kokuyama, W., Makishima, K., Nakazawa, K., Nomachi, M., Odaka, H., Kokubun, M., Takashima, T., Takahashi, T., Fujishiro, I., and Hodoshima, F., “SpaceWire/RMAP-Based Data Acquisition Framework For Scientific Instruments: Overview, Application and Recent Updates”
- [52] Fujinaga, T., Yuasa, T. et al., “Development of SpaceWire Based Data Acquisition System for the X-Ray CCD Camera on Board *ASTRO-H*”
- [53] Kouzu, T., Yuasa, T. et al., “Verification of High Resolution Timing System with SpaceWire Network Onboard *ASTRO-H*”
- [54] Ozaki, M., Yuasa, T. et al., “SpaceWire Driven Architecture for the *ASTRO-H* Satellite”
- The first year of MAXI: Monitoring variable X-ray sources 4th International MAXI Workshop (2010 November 30-December 2; Tokyo, Aoyama Gakuin University)
- [55] Gandhi, P., Makishima, K., Kubota, A., et al, “Constraining accretion from coordinated multi-wavelength rapid timing observations of X-ray binaries”
- [56] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K., “Interpreting the *Suzaku* Spectra of MCG-6-30-15 without Invoking a High Black-Hole Spin”
- [57] Torii, S., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K.: “Revealing the spectral/temporal evolution of Cyg X-1 under *Suzaku* & MAXI collaboration”
- [58] Sasano, M., Makishima, K., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, K., Nakajima, K., “Studies of SFXTs with MAXI and *Suzaku*”
- [59] Sakurai, S., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K., “LMXBs in their hard state: studies with *Suzaku*, MAXI, and *ASTRO-H*”
- [60] M. Ohno, Nakazawa, K., Makishima, K. et al., “All-sky Observations with *Suzaku* Wide-band All-sky Monitor and MAXI”
- [61] Nakano, T., Nishioka, H., Uchiyama, H., Hiraga, J., S., Nakazawa, K., & Makishima, K., “Attempts toward Understanding the Formation of Magnetars”
- The 38th COSPAR Scientific Assembly 2010: (2010 July 18 – 25; Bremen, Germany)
- [62] Yoshii, R., Yamaguchi, H., Katsuta, S., Tamagawa, T., & Hiraga, S. J.: “Discovery of non-thermal X-ray emission from Vela Shrapnel E with *Suzaku* and XMM-Newton” (poster),
- [63] Yoshimura, K., Yamamoto, A., and Mitchell, J.W.: “Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS”
- [64] Sakai, K.: “Search for Antihelium with BESS-Polar II”
- [65] Sakai, K.: “Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum at solar minimum with the BESS-Polar II flight in Antarctica”
- [66] Kim, K. C.: “Measurements of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium Isotopes with BESS-Polar I”
- [67] Hams, T.: “The BESS-Polar Proton & Helium flux measurements”
- [68] Hams, T.: “The balloon-borne experiment with a superconducting spectrometer (BESS) program”
- [69] Sakai, K.: “Detector performances of the BESS-Polar II instrument during the second long-duration balloon flight over Antarctica”
- その他一般講演
- [70] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K., “*Suzaku* Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG-6-30-15”, High Energy View of Accreting Objects: AGN and X-ray Binaries (2010 October 4-15; Crete, Greece)
- [71] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., “Geometrical Configuration of Accretion Flows in Cyg X-1 in the Low/Hard State with *Suzaku*”, *ibid.*
- (国内会議/一般講演)
- 日本物理学会・秋季大会 (2010年9月11~14日、九州工業大学)

- [72] 坂井 賢一: 「BESS Polar-II 実験 反陽子流束解析報告 (5)」
- [73] 川原田円, 岡部信広, 梅津敬一, 滝沢元和, 松下恭子, 深沢泰司, 浜名崇, 宮崎聡, 中澤知洋, 大橋隆哉: 「Abell1689 銀河団周辺部の高温ガスの観測的研究」、11aSG-2
- [74] 高橋弘充, 水野恒史, 深沢泰司, 湯浅孝行, 柳田健之, ほか: 「PoGOLite 気球実験のパスファインダーフライト (1): 大気中性子モニター」、11pSG-1
- [75] 松岡正之, 高橋弘充, 水野恒史, 深沢泰司, 湯浅孝行, ほか: 「PoGOLite 気球実験のパスファインダーフライト (2): データ取得システム」、11pSG-2
- [76] 佐藤有, 大野雅功, 渡辺伸, 川原田円, 太田方之, 田中康之, 小高裕和, 福山太郎, 齋藤新也, 佐々木智香子, 萩野浩一, 国分紀秀, 高橋忠幸, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 水野恒史, 平木一至, 林克洋, 西野翔, 道津匡平, 朴寅春, 中澤知洋, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 野田博文, 鳥井俊輔, 牧島一夫, 片岡淳, 吉野将生, 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるアクティブシールドの効果の評価」、11pSG-3
- [77] 平木一至, 水野恒史, 深沢泰司, 小高裕和, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, 下浦亨, 中平聡志, 寺田幸功, 田島宏康, 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 半導体コンプトンカメラの放射化バックグラウンド・モンテカルロシミュレータの開発とその評価」、11pSG-4
- [78] 萩野浩一, 渡辺伸, 川原田円, 石川真之介, 福山太郎, 齋藤新也, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, 山田真也, 湯浅孝行, 鳥井俊輔, 中島健太, 西岡博之, 野田博文, 牧島一夫, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 林克洋, 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャープロトタイプのパフォーマンス評価」、11pSG-5
- [79] 岩橋孝典, 玉川徹, 阿佐美ふみ, 早藤麻美, 小波さおり, 吉川瑛文, 牧島一夫, Jean Swank, Keith Jahoda ほか GEMS Collaboration: 「宇宙 X 線偏光観測衛星 GEMS 搭載用偏光計のバックグラウンドシミュレーション」、11aSG-9
- [80] 大野雅功, 佐藤有, 渡辺伸, 川原田円, 太田方之, 田中康之, 小高裕和, 齋藤新也, 佐々木智香子, 福山太郎, 萩野浩一, 国分紀秀, 高橋忠幸, 田島宏康, 田中孝明, 榎戸輝揚, 深沢泰司, 高橋弘充, 花畑義隆, 中澤知, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 牧島一夫, 山岡和貴, 片岡淳, 吉野将生, 米徳大輔, 寺田幸功, 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 搭載半導体コンプトンカメラシステムのトリガーロジック及び信号処理ファームウェアの開発」、12pSL-12
- [81] 川村静児 ほか (計 146 名) 中澤和洋含む 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (27): 設計・計画」、13pSH-1
- [82] 穀山渉, 中澤知洋, 国分紀秀, 湯浅孝行, 榎戸輝揚, ほか: 「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 IX (軌道上運用 2)」、14pSH-13
- 日本天文学会・秋季年会 (2010 年 9 月 22 日~24 日、金沢大学)
- [83] 赤松弘規, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 中澤知洋: 「衝突銀河団 Abell 3667 の温度構造と merger shock による電波レリク」、T03a
- [84] 稲田直久, 川原田円, 高橋芳太, 小波さおり, 牧島一夫: 「Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters」、T06a
- [85] Ozden Sengul, Kazuo Makishima: 「A study on Thermal Conditions at the Central Regions of non-cD Clusters of Galaxies」、T07a
- [86] 内山秀樹, 湯浅孝行, 牧島一夫, 小山勝二, 松本浩典: 「『すざく』による強磁場激変星候補天体 Suzaku J 1740.5-3014 の発見」、J19a
- [87] 山田真也, 牧島一夫, 根来均, 中澤知洋, 鳥井俊輔: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星 Cyg X-1 の広帯域ショット解析」、J25a
- [88] 鳥井俊輔, 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋 「『すざく』で迫る Low/Hard State における Cyg X-1 の降着流の幾何」、J26a
- [89] 山岡和貴, 中平聡志, 小谷太郎, 吉田篤正, 山田真也, 牧島一夫, 上田佳宏, 根来均, 高橋弘充, 他すざく+MAXI チーム 「『すざく』と MAXI によるブラックホール新星 XTE J1752-223 の連携観測」、J27a
- [90] 笹野理, 牧島一夫, 湯浅孝行, 中澤知洋, 榎戸輝揚: 「『すざく』を用いた IGRJ16195-4945 における短時間増光の広帯域観測」、J29a
- [91] 櫻井壮希, 山田真也, 高橋弘充, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 牧島一夫: 「『すざく』による Aql X-1 のソフト/ハード状態の検証」、J31a
- [92] 中川友進, 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 坂本貴紀, 吉田篤正, 山岡和貴: 「マグネターのバースト/X 線定常放射の広帯域スペクトルの研究」、J61a
- [93] 西岡博之, 榎戸輝揚, 坂本貴紀, 中川友進, 中澤知洋, 牧島一夫: 「新発見のマグネター SGR 1833-0832 の『すざく』ToO 観測」、J64a
- [94] 中野俊男, 牧島一夫, 中澤知洋, 内山秀樹, 平賀純子: 「マグネターに付随する超新星残骸 CTB109 の『すざく』による観測」、Q24a
- [95] 渡辺伸, 国分紀秀, 川原田円, 佐藤悟朗, 大野雅功, 田中康之, 太田方之, 高橋忠幸, 中澤知洋, 牧島一夫, 片岡淳, 中森健之, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 水野恒史, 高橋弘充, 谷津陽一, Limousin Olivier, Philippe Laurent, Francois Lebrun, ほか ASTRO-H HXI チーム 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャー (HXI) の開発の現状 (V)」、W08a
- [96] 中島健太, 中澤知洋, 中野俊男, 西岡博之, 牧島一夫, 花畑義隆, 高橋弘充, 水野恒史, 深沢泰司, 山岡和貴, 田島宏康, 片岡淳, 大野雅功, 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田代信, 寺田幸功, ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星硬 X 線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの機構開発」、W09a
- [97] 野田博文, 中澤知洋, 牧島一夫, 田島宏康, 田中孝明, 高橋忠幸, 国分紀秀, 渡辺伸, 深沢泰司, 他 SGD チーム: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載の軟 γ 線検出器コンプトンカメラの熱設計」、W20a

- [98] 湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、能町正治、小高裕和、高橋忠幸、尾崎正伸、国分紀秀、高島健: 「簡単に使用可能な高速 SpaceWire I/F の開発:SpaceWire-to-GigabitEther」、W31a
- [99] 神田展行 ほか (計 144 名) 中澤和洋含む: 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (17)」、W54a
- 大気球シンポジウム (2010 年 10 月、JAXA 宇宙科学研究所)
- [100] 吉村 浩司: 「BESS-Polar II 測定器回収ミッション報告」
- [101] 坂井 賢一: 「BESS-Polar II 成果報告 反陽子流束測定と反ヘリウム探索」
- 宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日~7 日、宇宙科学研究所)
- [102] 牧島一夫、榎戸輝揚、西岡博之、中澤知洋、平賀純子、内山秀樹、湯浅孝行、山田真也、中島健太、笹野 理、中野俊男、中川友進、三原建弘、山本堂之、中島基樹、古関 優、国分紀秀: 「『すざく』で見たマグネターとその関連天体」、ポスター P1-023
- [103] 大野雅功、高橋忠幸ほか: 「すざく衛星広帯域全天モニタ (WAM) による軟ガンマ線全天観測の現状」、ポスター P1-02B
- [104] 大杉節、深沢泰司、水野恒史ほか: 「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 2 年目の成果」、ポスター P1-120
- [105] 山岡 和貴、中平 聡志、吉田 篤正ほか: MAXI とすざくによるブラックホール候補天体 XTE J1752-223 の X 線観測
- [106] 国分紀秀、渡辺伸、川原田円、太田方之、大野雅之、佐藤悟朗、森國城、高橋忠幸、中澤知洋、内山秀樹、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、ポスター P2-011
- [107] 田島宏康ほか: 「ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector (軟ガンマ線検出器)」、ポスター P2-018
- [108] あべ松高志、片倉勇人、河野秀紀、高橋俊輔、西村和真、中村正吾、平賀純子、常深博: 「X 線天文衛星搭載用 CCD 素子評価システムの構築」、ポスター P7-009
- 日本天文学会・春季年会 (2011 年 3 月 16 日~19 日、筑波大学、震災のため予稿集のみ)
- [109] 市川和也、松下恭子、岡部信広、梅津敬一、太田直美、大橋隆哉、川原田円、田村隆幸、佐藤浩介、滝沢元和、中澤知洋、深沢泰司、藤田裕: 「『すざく』衛星による Abell 1835 銀河団の外縁部の研究」、T01a
- [110] 稲田直久、川原田円、高橋芳太、小波さおり、牧島一夫: 「Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters. II.」、T05a
- [111] Ozden Sengul, Kazuo Makishima: 「A Study on Thermal Conditions at the Central Regions of non-cD Clusters of Galaxies (2)」、T08a
- [112] Gu Liyi, Kazuo Makishima, Xu Haiguang: 「Two-Phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies Abell 1795: A Joint Chandra, XMM-Newton, and Suzaku View」、T09a
- [113] 湯浅孝行、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫: 「『すざく』による銀河 X 線背景放射 (GRXE) の広帯域スペクトル分解」、Q26a
- [114] 山本堂之、三原建弘、杉崎睦、中島基樹、山岡和貴、松岡勝、森井幹雄、牧島一夫、ほか MAXI チーム: 「X 線連星パルサー GX 304-1 からのサイクロトロン共鳴吸収線の発見」、J22a
- [115] 神頭知美、寺田幸功、田代信、湯浅孝行、山田真也、牧島一夫: 「『すざく』衛星搭載 HXD による Crab の変動追跡」、J45a
- [116] 阿久津智忠 ほか (146 名) 中澤知洋 含む: 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (18): 設計・計画・サイエンス」、W26a
- [117] 玉川徹、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川英文、Jean Swank、Keith Jahoda、早藤麻美、田原譲、高橋忠幸、牧島一夫、ほか GEMS collaboration: 「X 線偏光観測衛星 GEMS の現状と偏光計テストユニット試験」、W33a
- [118] 澤田真理、信川正順、鶴剛、内山秀樹、他 XIS チーム: 「すざく衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS のエネルギースケール軌道上校正の現状」、W38b
- [119] 松岡正之、高橋弘充、花畑義隆、深沢泰司、大野雅功、国分紀秀、高橋忠幸、湯浅孝行、中澤知洋、吉野将生、齋藤龍彦、中森健之、片岡淳、田島宏康、ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器/軟ガンマ線検出器のアクティブシールド部におけるデジタルフィルタの開発」、W51b
- [120] 萩野浩一、福山太郎、渡辺伸、佐藤有、齋藤新也、石川真之介、川原田円、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、深沢泰司、ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器用両面ストリップ検出器の性能評価」、W62a
- [121] 佐藤有、大野雅功、太田方之、渡辺伸、川原田円、小高裕和、古関優、福山太郎、齋藤新也、萩野浩一、国分紀秀、高橋忠幸、水野恒史、平木一至、林克洋、西野翔、道津匡平、朴寅春、深沢泰司、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、中澤知洋、内山秀樹、湯浅孝之、鳥井俊輔、西岡博之、櫻井壮希、笹野理、中野俊男、牧島一夫、片岡淳、吉野将生、ほか HXI/SGD チーム: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 CdTe 半導体検出器における放射化バックグラウンドの評価」、W63a
- [122] 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、高橋忠幸、森國城、西岡博之、笹野理、中澤知洋、牧島一夫、川上孝介、谷津陽一、松岡正之、花畑義隆、高橋弘充、深沢泰司、田島宏康、ほか HXI/SGD チーム: 「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」、W65a
- 日本物理学会・春季大会 (2011 年 3 月 25~28 日、新潟大学、震災のため講演概要集のみ)
- [123] 坂井賢一: 「BESS-Polar II BESS Polar-II 実験 反陽子流束解析報告 (6)」

- [124] 杉田聡司, 山岡和貴, 田代信, 寺田幸功, 岩切渉, 高原一紀, 安田哲也, 玉川徹, 芹野素子, 中川友進, 洪秀敏, 国分紀秀, 大野雅功, 高橋忠幸, 深沢泰司, 高橋拓也, 上原岳士, 花畑義隆, 中澤知洋, 牧島一夫, 浦田裕次, Patrick P Tsai, 山内誠, 大森法輔, 大休寺新, 西岡祐介, Nicolas Vasquez, 榎戸輝揚, 村上敏夫, 田島宏康, 他「すざく」WAM チーム: 「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 (VII)」, 25pGS-11
- [125] 土屋晴文, 日比野欣也, 川田和正, 堀田直己, 立山暢人, 大西宗博, 瀧田正人, 陳鼎, 黄晶, 宮坂浩正, 近藤一郎, 高橋恵美子, 霜田進, 山田豊, 宗像一起, 牧島一夫: 「チベットでの雷や雷雲に由来する放射線の観測 II」, 25pGX-4
- [126] 中澤知洋, 中島健太, 牧島一夫, 深沢泰司, 西野翔, 滝沢元和, 川原田円: 「『すざく』による銀河団からの硬 X 線探査」, 26aGS-7
- [127] 櫻井壮希, 山田真也, 高橋弘充, 中澤知洋, 牧島一夫: 「『すざく』による弱磁場の中性子星連星 Aql X-1 のソフト/ハード状態の検証」, 26aGS-9
- [128] 笹野理, 中島健太, 湯浅孝行, 山田真也, 中澤知洋, 牧島一夫: 「『すざく』を用いた強磁場中性子星の短時間増光の観測」, 26aGS-10
- [129] 中野俊男, 牧島一夫, 中澤知洋, 平賀純子, 内山秀樹: 「マグネターに付随する超新星残骸の『すざく』による観測的研究」, 26aGS-12
- [130] 神頭知美, 岩瀬かほり, 寺田幸功, 三嶋勇紀, 田代信, 石崎欣尚, 湯浅孝行, 能町正治, 高橋忠幸, 国分紀秀, 尾崎正伸, *ASTRO-H Collaborations*: 「*ASTRO-H* 衛星の時刻配信における時刻精度の定量化 (2)」, 27pGS-7
- [131] 田中孝明, 内山泰伸, 榎戸輝揚, 太田方之, 大野雅功, 片岡淳, 川原田円, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田島宏康, 田代信, 寺田幸功, 中澤知洋, 中森健之, 深沢泰司, Roger Blandford, 牧島一夫, Grzegorz Madejski, 水野恒史, 森國城, 谷津陽一, 山岡和貴, Philippe Laurent, Olivier Limousin, Francois Lebrun, 渡辺伸, 他 *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」, 27pGS-8
- [132] 野田博文, 牧島一夫, 中澤知洋, 櫻井壮希, 笹野理, 中野俊男, 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, 他 SGD チーム: 「次期 X 線衛星 *ASTRO-H* 搭載の軟 X 線検出器コンプトンカメラ熱設計」, 27pGS-9
- [133] 朴寅春, 道津匡平, 深沢泰司, 水野恒史, 高橋弘充, 西野翔, 林克洋, 田島宏康, 田中孝明, 榎戸輝揚, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 太田方之, 福山太郎, 中澤知洋, 他 HXI/SGD チーム: 「次期 X 線観測衛星 *ASTRO-H* 搭載軟ガンマ線検出器用 Si-Pad 検出器の性能評価」, 27pGS-10
- [134] 中島健太, 中野俊男, 中澤知洋, 牧島一夫, 花畑義隆, 深沢泰司, 山岡和貴, 田島宏康, 片岡淳, 高橋弘充, 水野恒史, 大野雅功, 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田代信, 寺田幸功, ほか HXI/SGD チーム: 「*ASTRO-H* 衛星硬 X 線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの構造設計」, 27pGS-11
- [135] 西岡博之, 笹野理, 湯浅孝行, 山田真也, 中澤知洋, 牧島一夫, 深沢泰司, 齋藤龍彦, 吉野将生, 中森健之, 片岡淳, 谷津陽一: 「次期 X 線衛星 *ASTRO-H* へ向けた BGO 結晶シンチレータの APD 読み出しによる光収集効率の研究」, 27pGS-12
- [136] 齋藤龍彦, 吉野将生, 中森健之, 片岡淳, 国分紀秀, 渡辺伸, 大野雅功, 高橋忠幸, 森國城, 西岡博之, 笹野理, 中澤知洋, 牧島一夫, 谷津陽一, 松岡正之, 高橋弘充, 深沢泰司, 田島宏康, ほか HXI/SGD チーム: 「*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」, 27pGS-13
- [137] 鳥井俊輔, 中澤知洋, 内山秀樹, 湯浅孝之, 西岡博之, 櫻井壮希, 笹野理, 中野俊男, 牧島一夫, 深沢泰司, 国分紀秀, 渡辺伸, 高橋忠幸, 斎藤新也, 福山太郎, 佐藤有, 萩野浩一, 大野雅功, 田島宏康, 榎戸輝揚, 片岡淳, 中森健之, 谷津陽一, ほか HXI/SGD チーム: 「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」, 27pGS-14
- [138] 大野雅功, 川原田円, 国分紀秀, 榎戸輝揚, 深沢泰司, 高橋弘充, 中澤知洋, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 牧島一夫, 寺田幸功, ほか: 「*ASTRO-H* 衛星搭載軟ガンマ線検出器によるガンマ線バーストの観測」, 28aGN-10
- [139] 川村静児 ほか (計 146 名) 中澤和洋含む「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (30): 設計・計画」, 28aGS-1
- [140] 穀山渉, 中澤知洋, 国分紀秀, 小高裕和, 湯浅孝行, 榎戸輝揚, ほか: 「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 (データ解析)」, 28aGS-11
- その他一般講演
- [141] 牧島一夫: 「『すざく』衛星で探る宇宙高温プラズマ」, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会 3 学会合同プラズマ物理セッション I (2010 年 5 月 23 日, 幕張メッセ)
- [142] 牧島一夫: 「科学衛星と 30 年」, DECIGO ワークショップ (2010 年 6 月 14 日, 東京大学小柴ホール)
- [143] 内山秀樹: 「『すざく』による銀河中心 $5^\circ \times 2^\circ$ 領域における星間吸収分布の測定」, 国立天文台研究集会「銀河中心 Sgr A* の観測的ブラックホール時空研究」 (2011 年 3 月 7 日~9 日, 東京大学)
- (セミナー、一般向け講演)
- [144] 「すざくによる超強磁場天体マグネターの観測」, 宇宙線研究所セミナー (2010 年 6 月 4 日)
- [145] 牧島一夫: 「宇宙をグラフにしよう」, 東大付属中野高校講演会 (2010 年 7 月 20 日)
- [146] 牧島一夫: 「X 線で見える宇宙」, リバネス社主催・中高教員向け講演会 (2010 年 9 月 1 日)
- [147] 平賀純子: 「見えない X 線で観る宇宙」, 「東大理学部で考える女子中高生の未来」, (2010 年 9 月 26 日, 東京大学理学部 小柴ホール)
- [148] 牧島一夫: 「科学衛星で探る宇宙のブラックホール」, 駒場祭公開講座 (2010 年 11 月 23 日)
- [149] 牧島一夫: 「X 線で探る宇宙の最強磁場」, 物理学教室ランチトーク (2011 年 4 月 8 日)