

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

## Annual Report

2014

平成26年度 年次研究報告



東京大学大学院理学系研究科附属  
ビッグバン宇宙国際研究センター

平成 27 年 10 月 22 日版

Copyright ©ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 2015

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

## ご挨拶

東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター (Research Center for the Early Universe; RESCEU) の 2014 年度年次報告をお届けいたします。

本センターは、科研費 COE 形成基礎研究の実行母体「初期宇宙研究センター」を前身として、理学系研究科の附属施設として 1999 年度に設置されました。ビッグバン宇宙の創生から、天体諸階層の形成と進化、さらには現在の宇宙をみたく暗黒エネルギーの解明に至る宇宙史の解明が本センターのミッションです。

この年次報告に記載されている個々の研究活動に加えて、7 月 31 日～8 月 4 日に長野県松本市にて RESCEU APCosPA サマースクールを実施しました。全学オープンキャンパスでは、8 月 6 日と同 7 日に細川助教、大栗助教と中澤講師が 2 回ずつ、濱口幸一准教授が 1 回、物理学専攻と共催で、講演を行いました。また、来たる重力波検出の時代に向けた KAGRA データ解析スクールを 4 月 18 日～4 月 19 日に開催しました。また、理研、IPMU と本センターで 3 月 3 日～3 月 4 日に合同セミナーを行ないました。

本年度のメンバーの異動は以下の通りです。4 月 1 日づけで須田拓馬さんが本センター特任助教に、5 月 16 日づけで大栗真宗さんが本センター助教に着任しました。一方、10 月 15 日づけで本センター特任研究員の顧力意 (Gu Liyi) さんが本センターからオランダ宇宙研究機関 (SRON) に、3 月 31 日づけで本センター助教の平賀純子さんが准教授として関西学院大学に、それぞれ異動されました。

国際交流に関しては、2014 年 10 月より 2015 年 3 月まで Thierry Sousbie 氏が客員共同研究員として、2014 年 10 月から 11 月にかけて Alexei Starobinsky 氏が招聘教授として、それぞれ滞在し共同研究を行いました。

また本年度は、須山輝明助教が日本物理学会第 9 回若手奨励賞を、牧島一夫センター長が「X線観測による中性子星の強磁場の研究」で第 105 回 日本学士院を受賞されました。さらに、元センター長であった佐藤勝彦名誉教授が文化功労者の顕彰を受けました。この場を借りて、お祝いの意を表させていただきますと思います。

2001 年度から 2002 年度、さらに 2007 年度から 2014 年度にわたり、本センター長をつとめられた牧島一夫教授が、本年度末に物理学専攻および同センターを退職され、理化学研究所に異動されました。その後任として物理学専攻の私がセンター長を併任することとなりました。本センターでは、現在 8 つの研究プロジェクトが進行していますが、国内外の研究の趨勢と本センターの将来像を考慮し、そのプロジェクトの再編を行っているところです。今後ともどうぞよろしくお願い致します。

2015 年 9 月 センター長 須藤 靖

# 目次

<b>I</b>	<b>2014年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 全般に関する報告</b>	<b>5</b>
1	受賞	7
2	教員, 職員, および研究員	9
3	シンポジウム・研究会	11
3.1	KAGRA 重力波データ解析スクール @ RESCEU 2014	11
3.2	宇宙科学探査ロードマップと各分野の将来計画	11
3.3	RESCEU APCosPA サマースクール	12
3.4	高校生のための東京大学オープンキャンパス 2014	14
3.5	RIKEN-RESCEU-IPMU Joint Meeting 2015	14
4	プレプリント・リスト	16
<b>II</b>	<b>2014年度 プロジェクト別 研究活動報告</b>	<b>21</b>
1	初期宇宙進化論	23
1.1	初期宇宙・相対論	23
1.2	観測的宇宙論	28
1.2.1	星形成	32
2	銀河と星の共進化論	42
2.1	宇宙及び系外銀河	42
2.2	銀河系及び近傍矮小銀河	42
2.3	新星	44
2.4	超新星	44
2.4.1	ガンマ線バースト	45
3	光赤外線による観測的宇宙論	49
3.1	宇宙及び系外銀河	49
4	地上サブミリ波観測	55
4.1	星形成から惑星系形成に至る物質進化の研究	55
4.1.1	はじめに	55
4.1.2	星形成の観測研究	55
4.1.3	系外銀河の分子組成	57
4.1.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	58
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	61
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	61
4.2.2	ミリ波サブミリ波帯分光観測に基づく銀河の活動性の研究	63
4.2.3	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	64
5	重力波探査	68
5.1	大型重力波検出器 KAGRA	68
5.1.1	主干渉計制御系の設計開発	68
5.1.2	入射光学系の設計開発	68
5.2	宇宙空間レーザー干渉計	69
5.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	69
5.3.1	Phase-II TOBA の開発	69

5.4	中間質量ブラックホール連星の探査	69
5.4.1	背景重力波探査	70
5.5	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	70
5.5.1	光共振器の防振	70
5.5.2	温度安定化	70
5.6	相対論・量子光学精密実験	71
5.6.1	巨視系における量子輻射圧変動の測定	71
5.6.2	光リング共振器を用いた光速の等方性検証	71
5.6.3	光学浮上鏡を用いた量子測定	71
<b>6</b>	<b>宇宙素粒子物理学</b>	<b>74</b>
6.1	Sumico, Tokyo Axion Helioscope	74
6.2	原子炉ニュートリノモニター	74
6.3	Hidden photon ダークマター探索	75
6.3.1	概要	75
6.3.2	光学領域	76
6.3.3	電波領域	76
<b>7</b>	<b>飛翔体によるX線観測</b>	<b>78</b>
7.1	はじめに	78
7.2	科学衛星の運用と稼働状況	78
7.3	強磁場中性子星の研究	78
7.4	質量降着する弱磁場中性子星	79
7.5	超新星残骸の研究	80
7.6	質量降着するブラックホール	81
7.7	銀河団の研究	82
7.8	雷雲ガンマ線の研究	83
7.9	ASTRO-H 衛星	83
7.10	将来計画	84
<b>8</b>	<b>太陽系外惑星</b>	<b>91</b>
8.1	星震学とロシター効果を用いたスピン軌道角の3次元決定	91
8.2	重力減光を用いたホットジュピターのスピン軌道角測定と軌道の長期進化	92
8.3	トランジット光度曲線の時間変化性を利用した系外惑星系PTFO8-8695のパラメータ推定	92
8.4	系外惑星および惑星形成現場の直接観測サーベイの完了	92
8.5	原始惑星系円盤および残骸円盤の直接撮像観測	93



I

**2014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

## 佐藤 勝彦元センター長が文化功労者の顕彰を受けました。

本センター元センター長（現在は自然科学研究機構長）の佐藤勝彦名誉教授が2014年度の文化功労者の顕彰を受けました。佐藤元センター長は1968年 京都大学理学部物理学科を卒業後、同大学院、助手を経て1982年に本学理学部助教授に就任、1990年に同教授に昇任したのち、本センターの創設と共にセンター長に就任、その後本学理学部長・大学院理学系研究科長、日本物理学会会長等の要職を歴任しています。

佐藤名誉教授は、素粒子物理学を天体物理宇宙論に応用した世界的な先駆者です。まず、重力崩壊型超新星爆発においてニュートリノが10秒間程度中心部に閉じ込められることを示し、これは後に超新星1987Aによって実証されました。また、宇宙論・天体物理からニュートリノ質量や世代数をはじめとする各種素粒子の性質を制限し、今日の素粒子論的宇宙物理学の方法論を確立しました。さらに、相互作用の大統一理論に基づき、真空の相転移にともなって、宇宙が何十桁も指数関数的に膨張することを示し、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生成可能なこと、磁気モノポール問題が解決可能であること、また急激な宇宙膨張によって因果関係をもち得る宇宙の地平線が十分広がることにより、大きな領域にわた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、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す。これらの研究成果によって、1989年第五回井上學術賞、1990年第三十六回仁科記念賞を受賞、2002年には紫綬褒章を受章し、2010年には日本学士院賞を受賞すると共に、2013年より学士院会員を務めています。

## 牧島一夫前センター長が日本学士院賞を受賞しました。

牧島一夫前センター長が、「X線観測による中性子星の強磁場の研究」により2014年度日本学士院賞を受賞しました。半径10 kmあまり、つまり山手線の範囲ほどの中に、太陽一個分の重さが閉じ込められている中性子星は、重力で圧縮された核物質の塊りです。これがどのような性質を持っているのかを牧島前センター長は宇宙X線観測の立場から研究してきました。

中性子星は、星の最期の大爆発の中で生まれます。親星の何もかもを圧縮して誕生する中で、磁場もまた激しく圧縮され、 $10^8 \sim 10^{12}$  Tにも達する場合があります。ここに周囲からガスが落ちてくると、磁場の力で磁極に集中して降り積もり、中性子星の表面に衝突して激しく加熱し、強いX線を出します。このX線に現れる特徴的な波長を用いて中性子星の表面磁場を測る技法は、牧島教授が世界を先導してきました。

この磁場は、超伝導電流で作られるのか、核物質のスピンで作られるのか、観測データが足りずまだ決着していません。牧島教授はこの問題に取り組み続け、最近中性子星の自転に現れる「自由歳差運動」の観測から、その形状の歪みを捉えることに成功しました。これは、中性子星の内部に隠された磁場を推定する全く新しい技法で、これまでの不可能を可能にしたすばらしいアイデアです。

## 須山輝明助教が日本物理学会第9回若手奨励賞を受賞

本センターの須山輝明助教が、「原始密度ゆらぎ生成機構の峻別法の発見」の研究業績に関して、物理学の将来を担う優秀な若手研究者を奨励するための賞である、日本物理学会第9回若手奨励賞（宇宙線・宇宙物理領域）を受賞しました。インフレーション宇宙シナリオは、宇宙論の諸問題を一挙に解決する魅力的なアイデアですが、それを実現する具体的なモデルは多数存在します。モデルが異なると、作られるべき原始密度揺らぎの空間パターンが異なるので、その情報を担う宇宙マイクロ波背景放射などの観測データを詳しく解析すると、どのインフレーションモデルが正しいか、検証が可能となります。須山氏は、山口昌英氏（東京工業大学教授）と共同で、揺らぎの高次相関関数に関する理論研究を行いました。その結果、1) 複数の軽いスカラー場が原始密度揺らぎに関与すると、揺らぎの非ガウス性が増大するとともに、原始重力波の生成が相対的に抑制されること、2) 揺らぎの非ガウス性を表す相関関数の2つの係数の間に、ある一般的不等式が成り立つこと、を見いだしました。特に後者は、不等式が等号になるか不等号になるかで、揺らぎに寄与する場の数

が1成分なのか多成分なのかが判別できるため、インフレーション模型を絞り込む上で有用であり、宇宙背景放射や宇宙大規模構造の観測に適用されつつあります。

## 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) 2015年3月に物理学専攻教授および同センター長を定年退職し、理化学研究所に異動しました。後任として物理学専攻の須藤靖教授がセンター長(併任)に就任されました。
横山 順一	(教授)
茂山 俊和	(准教授)
須山 輝明	(助教)
平賀 純子	(助教、2015年3月31日付で辞職し関西学院大学に准教授として異動)
細川 隆史	(助教)
大栗 真宗	(助教)
坂井 南美	(助教、2015年3月31日付で辞職し理化学研究所へ異動)
Starobinsky, Alexei A.	(外国人客員教授; 2014/11/1 - 11/30, 2015/2/25-3/26)
伊藤 洋介	(特任助教)
須田 拓馬	(特任助教)
顧 力意	(特任研究員; 2014年10月15日付でオランダ宇宙研究所へ異動)
渡辺 悠貴	(学振特別研究員)
山内 大介	(学振特別研究員)
小宮 悠	(科研費研究員)
Jonathan White	(科研費研究員)
永野 早百合	(事務補佐員)
南澤 三恵子	(事務補佐員)

### 研究プロジェクトおよび担当者

(無印はセンター固有の教員、上添字付は研究協力者)

初期宇宙進化論	横山 順一、大栗 真宗、須藤 靖 <sup>1,†</sup> 、吉田 直紀 <sup>1</sup> 、細川 隆史、須山 輝明、伊藤 洋介
銀河進化理論	茂山 俊和、戸谷 友則 <sup>3</sup> 、須田拓馬
銀河と宇宙構造の進化	土居 守 <sup>2</sup> 、嶋作 一大 <sup>3</sup>
サブミリ波観測	山本 智 <sup>1</sup> 、河野 孝太郎 <sup>2</sup> 、坂井 南美
重力波探査	安東 正樹 <sup>1</sup> 、麻生 洋一 <sup>1</sup>
暗黒物質・太陽アクシオン直接検出	蓑輪 眞 <sup>1</sup> 、井上 慶純 <sup>4</sup>
飛翔体による宇宙観測	牧島 一夫 <sup>1</sup> 、中澤 知洋 <sup>1</sup> 、平賀 純子、顧 力意
太陽系外惑星	田村 元秀 <sup>3</sup> 、須藤 靖 <sup>1,†</sup>

<sup>1</sup> 物理学専攻、<sup>2</sup> 天文学教育研究センター、<sup>3</sup> 天文学専攻、<sup>4</sup> 素粒子物理国際研究センター  
† 初期宇宙進化論・太陽系外惑星を兼任

## 3 シンポジウム・研究会

### 3.1 KAGRA 重力波データ解析スクール @ RESCEU 2014

日時：2014年4月18日(金) - 7日(土)

場所：東京大学本郷キャンパス理学部1号館2階207号室・理学部4号館3階1320号室・理学部4号館2階1220号室

プログラム

4月18日(金) 午前：理学部1号館207号室

9:30-10:00 受付  
 10:00-10:00 田越秀行 挨拶  
 10:00-10:10 伊藤洋介 事務連絡等  
 10:10-12:10 横山順一 「一般相対論入門」

4月18日(金) 午後：理学部4号館3階1320号室

13:30-14:30 大原謙一 「重力波天文学」  
 14:30-14:45 休憩  
 14:45-16:45 柴田大 「数値相対論」  
 16:45-17:00 休憩  
 17:00-18:00 神田展行 「重力波データ解析手法」  
 18:30-20:30 懇談会

4月19日(土) 午後：理学部4号館2階1220号室

9:00-11:00 川村静児 「重力波検出の原理と世界の検出器」  
 11:00-11:20 休憩  
 11:20-12:30 端山和大・高橋弘毅・伊藤洋介 「Linux・octave練習」  
 13:30-14:30 端山和大・高橋弘毅・伊藤洋介 「重力波データ解析演習1」  
 14:30-17:00 田越秀行 「重力波データ解析演習2」

### 3.2 宇宙科学探査ロードマップと各分野の将来計画

日時：2014年5月8日(木)

場所：東京大学本郷キャンパス理学部4号館2階1220号室

プログラム

1. はじめに

13:00-13:05 シンポジウムの開催趣旨 (牧島宇宙理学委員長)

2. イプシロンを用いた小型計画の今後について (座長:久保田工学委員 会幹事)

13:05-13:20 イプシロンロケットの将来計画 (徳留准教授)

13:20-13:45 小型衛星による探査の将来計画 (今村准教授)

13:45-13:55 質疑応答

## 3. 宇宙理学分野の将来計画 (座長:海老沢理学委員会幹事)

- 13:55-14:15 X 線ガンマ線天文学 (玉川高宇連運営委員長)
- 14:15-14:35 光赤外線天文学 (山田宇宙理学委員)
- 14:35-14:55 宇宙電波 (山本宇宙理学委員)
- 14:55-15:10 惑星間プラズマ (藤本宇宙理学委員)
- 15:10-15:25 惑星探査 (渡邊宇宙理学委員)
- 15:25-15:45 太陽 (原宇宙理学委員)

15:45-16:00 休憩

(座長:上野理学委員会幹事)

- 16:00-16:20 宇宙での基礎物理学 (野崎宇宙理学委員)
- 16:20-16:40 宇宙生物学 (山岸宇宙理学委員)

## 4. 宇宙工学分野の将来計画 (座長:小川工学委員会幹事)

- 16:40-17:10 宇宙輸送・航行工学 (森田宇宙工学委員)
- 17:10-17:40 宇宙機システム工学 (橋本宇宙工学委員)

## 5. 宇宙工学分野の将来計画 (座長:小川工学委員会幹事)

- 17:40-18:00 宇宙環境利用科学 (稲富宇宙環境利用科学委員会幹事)

## 6. 全体討論 (司会:牧島理学委員長、山川工学委員長)

18:00-19:00

テーマ: 「戦略的に実施する中型計画」、イプシロンを駆使する「公募型小型計画」、「多様な小規模プロジェクト群」をいかに使い分けるか?

## 7. まとめ (常田所長)

### 3.3 RESCEU APCosPA サマースクール

日時: 2014年7月31日(木)~8月4日(月) 15:00 - 18:50

場所: 長野県松本市浅間温泉

#### プログラム

##### 7月31日 宇宙における時空・物質・構造の進化研究会

- 14:20-14:30 牧島 一夫 ”RESCEU 研究成果報告会 オープニング”
- 14:30-15:00 牧島 一夫 ”プロジェクト7報告”
- 15:00-15:30 河野 孝太郎 ”プロジェクト4/サブプロジェクト2の報告”
- 15:30-16:00 土居 守 ”Extra-galactic studies with wide-field optical imaging observations”
- 16:00-16:20 break
- 16:20-16:50 戸谷 友則 ”FRB updates / probing reionization by GRB 130606A”
- 16:50-17:20 須藤 靖 ”Spin-orbit angles of transiting planets”
- 17:20-17:50 細川 隆史 ”Forming the First Stars in 3D”
- 17:50-18:20 井上 慶純 ”Hidden photon dark matter”

**8月1日 RESCEU APCosPA summer school**

8:55-9:00	Jun'ichi Yokoyama	"opening talk"
9:00-10:00	Bernard J. Carr (I)	
10:00-10:15	break	
10:15-11:15	Bernard J. Carr (II)	
11:15-11:30	break	
11:45-12:00	Lu-Hsing Tsai	"Cosmic rays from decaying of multi-component dark matter"
12:00-12:15	Shi-Hao Wang	"Feasibility of determining diffuse ultra-high energy cosmic neutrino flavor ratio through ARA neutrino observatory"
12:15-13:45	lunch	
13:45-14:45	David Polarski (I)	
14:45-15:00	break	
15:00-16:00	David Polarski (II)	
16:00-16:30	break	
16:30-16:45	Tomohiro Nakama	"Scalar perturbations induced by the second-order effects of primordial gravitational waves"
16:45-17:00	Chih-Pan Wu	"Neutrinos and Dark Matter Detection via Atomic Ionizations at sub-keV Sensitivities"
17:00-17:15	Rebecca Leane	"Leptophilic Dark Matter with Z' Interactions"
17:15-17:30	Ling-Wei Luo	"Teleparallel Gravity in Five Dimensional Theories"
17:30-17:45	Takuma Suda	"Origin of the most iron-poor stars in the Galaxy"
17:45-18:00	Gen Chiaki	"Hydrodynamic simulations of collapsing gas clouds with low metallicities"

**8月2日**

9:00-10:00	David Polarski (III)
10:00-10:15	break
10:15-11:15	Bernard J. Carr (III)
11:15-11:30	break
11:30-12:30	Christophe Ringeval (I)
12:30-14:00	lunch
14:00-	excursion
19:30-	dinner

**8月3日**

9:00-10:00	Christophe Ringeval (II)	
10:00-10:15	break	
10:15-11:15	Christophe Ringeval (III)	
11:15-11:30	break	
11:30-11:45	Yuki Watanabe	"Self-production of scalar gravitons after Starobinsky inflation"
11:45-12:00	Jackson Wu	" $U(1)_{B-L}$ extra-natural inflation with Standard Model on a brane"
12:00-12:15	Ippei Obata	"Magneto-genesis from Higgs Inflation"
12:15-13:45	lunch	
13:45-14:45	Kiyotomo Ichiki (I)	
14:45-15:00	break	
15:00-15:30	Motohide Tamura	"SEEDS: Direct Imaging of Exoplanets and Disks "
15:30-16:00	Masaki Ando	"DECIGO: Space Gravitational-wave Antenna"
16:00-16:30	break	
16:30-16:45	Atsuhisa Ota	"CMB $\mu$ distortion from primordial gravitational waves"
16:45-17:00	Daisuke Yamauchi	"Constraining non-Gaussianity with multi-tracer technique"
17:00-17:15	Hsu-Wen Chiang	"A new method to determine large scale structure from the luminosity distance"
17:15-17:30	Tomohiro Fujita	"Tensoron: spectator scalar field inducing gravitational waves during inflation"
17:30-17:45	Chung-Chi Lee	"Matter Power Spectrum in Exponential Gravity with Massive Neutrino"
17:45-18:00	Masaki Yamada	"Gravitational waves as a probe of supersymmetric scale"

#### 8月4日

9:00-10:00	Kiyotomo Ichiki (II)
10:00-	End of the school

### 3.4 高校生のための東京大学オープンキャンパス 2014

日時：2014年8月6日(水) - 7日(木)

場所：東京大学理学部1号館

#### プログラム

##### 8月6日(水)：理学部1号館207号室

13:30-14:10	大栗真宗	すばる望遠鏡で「見る」暗黒宇宙
14:30-15:10	中澤知洋	宇宙 X 線衛星「すざく」で見るブラックホールと銀河団

##### 8月7日(木)：理学部1号館207号室

13:30-14:10	大栗真宗	すばる望遠鏡で「見る」暗黒宇宙
14:30-15:10	中澤知洋	宇宙 X 線衛星「すざく」で見るブラックホールと銀河団

### 3.5 RIKEN-RESCEU-IPMU Joint Meeting 2015

日時：2015年3月3日(火) - 4日(水)

場所：東京大学理学部4号館ビッグバン宇宙国際研究センター



## プログラム

3月3日

10:20-10:30	Opening Remarks	
10:30-11:10	Robert Quimby (IPMU)	Unusually Bright Supernovae
11:10-11:50	Maria Dainotti (RIKEN)	GRB Cosmology
11:50-12:30	Maxim Barkov (RIKEN)	GRB Engine and Relativistic Flow
12:30-14:00	Lunch	
14:00-14:40	Jin Matsumoto (RIKEN)	Relativistic MHD/HD Flow for GRB Jets
14:40-15:20	Toshikazu Shigeyama (RESCEU)	r-process enrichment by Neutron star mergers
15:20-16:00	Shinya Wanajo (RIKEN)	r-process nucleosynthesis
16:00-16:30	Coffee Break	
16:30-17:10	Yu Komiya (RESCEU)	Chemical evolution of r-process elements in hierarchical galaxy formation models
17:10-17:50	Miho Ishigaki (IPMU)	Chemical abundances in extremely metal-poor stars in the Milky Way halo and in dwarf satellite galaxies
18:15-20:15	Banquet (at Hirosawa Club in Campus)	

3月4日

9:00-9:40	Tomoya Takiwaki	(NAOJ -j, RIKEN): Explosion Mechanism of CC-SNe
9:40-10:20	Hiroki Sato (U. of Tokyo)	SPH simulation of double white dwarf merger
10:20-11:00	Shiu-Hang Lee (JAXA/RIKEN)	Supernova Remnants
11:00-11:30	Coffee Break	
11:30-12:10	Alexey Tolstov (IPMU/RIKEN)	Simulations of supernova light curves and spectra using multigroup radiation hydrodynamics
12:00-12:50	Yukari Ohtani (RESCEU)	Theoretical expectation of supernova shock breakout in the relativistic limit
12:50-14:00	Lunch	
14:00-14:40	Yasunobu Uchiyama (Rikkyo)	Review of Gamma-Ray Observations for Galactic Sources
14:40-15:20	Nozomu Tominaga(Konan/IPMU)	Development of a multidimensional relativistic radiative transfer code
15:20-15:40	Coffee Break	
15:40-16:20	Hiroataka Ito (RIKEN)	Photospheric Emission in GRBs
16:20-17:00	Yuto Teraki (RIKEN)	Wiggler Radiation in Langmuir turbulence; a possible emission mechanism of GRB
17:00-17:10	Closing Remarks	

## 4 プレプリント・リスト

RESCEU-59/14

*Carbon-enhanced Metal-poor Stars in SDSS/SEGUE. II. Comparison of CEMP-star Frequencies with Binary Population-synthesis Models*, Y.-S. Lee, T. Suda, T. C. Beers and R. J. Stancliffe [arXiv:1310.3277 (astro-ph)] *Astrophys. J.*, 788 (2014) 131

RESCEU-58/14

*Distributions of molecules in the circumnuclear disk and surrounding starburst ring in the Seyfert galaxy NGC 1068 observed with ALMA*, S. Takano, T. Nakajima, K. Kohno, N. Harada, E. Herbst, Y. Tamura, T. Izumi, A. Taniguchi, T. Tosaki [arXiv:1406.0782 (astro-ph)] *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66 (2014) id.75

RESCEU-57/14

*Two  $\gamma$ -ray bursts from dusty regions with little molecular gas*, B. Hatsukade, K. Ohta, A. Endo, K. Nakanishi, Y. Tamura, T. Hashimoto, K. Kohno [arXiv:1406.3071 (astro-ph)] *Nature*, 510 (2014) 247-249

RESCEU-56/14

*AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies*, H. Umehata, Y. Tamura, K. Kohno, B. Hatsukade, K. S. Scott, M. Kubo, T. Yamada, R. J. Ivison, R. Cybulski, I. Aretxaga, and 15 coauthors [arXiv:1403.2725 (astro-ph)] *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 440 (2014) 3462-3478

RESCEU-55/14

*Evidence for a Gas-rich Major Merger in a Proto-cluster at  $z = 2.5$* , K. Tadaki, T. Kodama, Y. Tamura, M. Hayashi, Y. Koyama, R. Shimakawa, I. Tanaka, K. Kohno, B. Hatsukade, K. Suzuki [arXiv:1403.0040 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 788 (2014) L23

RESCEU-54/14

*Enhancement of  $CO(3-2)/CO(1-0)$  Ratios and Star Formation Efficiencies in Supergiant H II Regions*, R. E. Miura, K. Kohno, T. Tosaki, A. Hirota, S. Komugi, S. K. Okumura, N. Kuno, K. Muraoka, S. Onodera, and 6 coauthors [arXiv:1405.1629 (astro-ph)] *Astrophys. J.* 788 (2014) id.167

RESCEU-53/14

*Constraining Primordial Non-Gaussianity via a Multitracer Technique with Surveys by Euclid and the Square Kilometre Array*, Daisuke Yamauchi, Keitaro Takahashi, and Masamune Oguri [arXiv:1407.5453 (astro-ph)] *Physical Review D* 90 (2014) 083520 (2014)

RESCEU-52/14

*Effects of thermal fluctuations on thermal inflation*, Takashi Hiramatsu, Yuhei Miyamoto, and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1412.7814 (hep-ph)] *JCAP* 03 (2015) 024

RESCEU-51/14

*Inflation with a constant rate of roll* Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, Jun'ichi Yokoyama, [arXiv:1411.5021 (astro-ph)] *JCAP* 1509 (2015) 09, 018

RESCEU-50/14

*Can a spectator scalar field enhance inflationary tensor mode?*, Tomohiro Fujita, Jun'ichi Yokoyama, Shuichiro Yokoyama [arXiv:1411.3658 (astro-ph)] *PTEP* 2015 (2015) 043E01

RESCEU-49/14

*Reheating processes after Starobinsky inflation in old-minimal supergravity*, T. Terada, Y. Watanabe, Y. Yamada, and J. Yokoyama [arXiv:1411.6746 (hep-th)] *JHEP* 1502 (2015) 105

RESCEU-48/14

*Third-order equations of motion and the Ostrogradsky instability*, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama  
Physical Review D 91 (2015) 085009

RESCEU-47/14

*Vainshtein mechanism in scalar-tensor theories beyond Horndeski*, T. Kobayashi, Y. Watanabe, and  
D. Yamauchi [arXiv:1411.4130 (gr-qc)] Physical Review D 91 (2015) 064013

RESCEU-46/14

*Future detectability of gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments*,  
Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi, and Atsushi Taruya [arXiv:1411.7427 (astro-ph)] Physical  
Review D 91 (2015) 043531

RESCEU-45/14

*Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic*,  
Jun'ichi Yokoyama Proceedings of the Japan Academy, Ser. B 90 (2014) No. 10 422-432

RESCEU-44/14

*Prospects of determination of reheating temperature after inflation by DECIGO*, S. Kuroyanagi, K.  
Nakayama, and J. Yokoyama [arXiv:1410.6618 (astro-ph)] PTEP 2015 (2015) 1, 013E02

RESCEU-43/14

*Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings*, Daisuke Yamauchi and Matthew J.  
Lake [arXiv:1410.6267 (hep-ph)] JCAP 1506 (2015) 06, 023

RESCEU-42/14

*Resolving the Clumpy Structure of the Outflow Winds in the Gravitationally Lensed Quasar SDSS  
J1029+2623*, Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Poshak Gandhi, Takashi Horiuchi,  
Suzuka Koyamada, and Rina Okamoto [arXiv:1410.0791 (astro-ph)] Astrophysical J. 794 (2014) L20

RESCEU-41/14

*Gravitational waves as a probe of dark matter mini spikes*, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Sachiko  
Kuroyanagi, and Joseph Silk [arXiv:1408.3534 (gr-qc)] Phys. Rev. D 91, 044045 (2015)

RESCEU-40/14

*Adaptive optics observations of the gravitationally lensed quasar SDSS J1405+0959*, Cristian E.  
Rusu, Masamune Oguri, Yosuke Minowa, Masanori Iye, Anupreeta More, Naohisa Inada, Shin Oya  
[arXiv:1408.1425 (astro-ph)] Mon. Not. R. Astron. Soc. 444 (2014) 2561-2570

RESCEU-39/14

*The double formation of primordial black holes*, T. Nakama [arXiv:1408.0955 (gr-qc)] JCAP 1410  
(2014) 10, 040

RESCEU-38/14

*A Cluster Finding Algorithm Based on the Multiband Identification of Red Sequence Galaxies*,  
Masamune Oguri [arXiv:1407.4693 (astro-ph)] Mon. Not. R. Astron. Soc. 444 (2014) 147-161

RESCEU-37/14

*Detection of the Gravitational Lens Magnifying a Type Ia Supernova*, Robert M. Quimby, Masamune  
Oguri, Anupreeta More, Surhud More, Takashi J. Moriya, Marcus C. Werner, Masayuki Tanaka,  
Gaston Folatelli, Melina C. Bersten, Keiichi Maeda, and Ken'ichi Nomoto [arXiv:1404.6014 (astro-  
ph)] Science, 344, 396-399 (2014)

RESCEU-36/14

*Effects of cosmic strings with delayed scaling on CMB anisotropy*, Kohei Kamada, Yuhei Miyamoto,  
Daisuke Yamauchi, and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1407.2951 (astro-ph)] Phys.Rev. D 90 (2014)  
083502

RESCEU-35/14

*Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas*, Kazunari Eda, Ayaka Shoda,  
Yousuke Itoh and Masaki Ando [arXiv:1406.7059 (gr-qc)] Phys. Rev. D 90, 064039 (2014)

RESCEU-34/14

*Fine Feature in the Primordial Power Spectrum from Wrapped Brane Inflation*, Takeshi Kobayashi and Jun'ichi Yokoyama JPS Conf.Proc. 1 (2014) 013114

RESCEU-33/14

*Inflation: 1980-201X*, Jun'ichi Yokoyama PTEP 2014 (2014) 06B103

RESCEU-32/14

*A Solution to the Graceful Exit Problem in Higgs G-Inflation*, K.Kamada, T.Kobayashi, T.Kunimitsu, M.Yamaguchi and J.Yokoyama JPS Conf.Proc. 1 (2014) 013113

RESCEU-31/14

*Origin of Ne Emission Line of Very Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158744*, Y. Ohtani, M. Morii, and T. Shigeyama [arXiv:1404.4121 (astro-ph)] Astrophys. J. 787 (2014) id.165

RESCEU-30/14

*Enrichment history of r-process elements shaped by a merger of neutron star pairs*, T. Tsujimoto and T. Shigeyama [arXiv:1405.1443 (astro-ph)] Astronomy & Astrophysics, 565 (2014) id.L5

RESCEU-29/14

*An investigation into surface temperature distributions of high-magnetic-field pulsars*, N. Yasutake, K. Kotake, M. Kutsuna, and T. Shigeyama [arXiv:1401.2723 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan, 66 (2014) id.50

RESCEU-28/14

*On the subclasses in Swift long gamma-ray bursts: A clue to different central engines*, R. Tsutsui and T. Shigeyama [arXiv:1311.1295 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan, 66 (2014) id.42

RESCEU-27/14

*Joint XMM-Newton and Chandra Observations of NGC 1407/1400 Complex: A Tail of an Early-Type Galaxy and a Tale of a Nearby Merging Group*, Su, Y., Gu, L., White, R. and Irwin, J. [arXiv:1403.6416 (astro-ph)] Astrophys. J. 786, id.152 (2014)

RESCEU-26/14

*Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System*, Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al. [arXiv:1404.0134 (astro-ph)] Astrophys. J. 786, id. 127 (2014)

RESCEU-25/14

*Discriminating the Progenitor Type of Supernova Remnants with Iron K-shell Emission*, Yamaguchi, H., Badenes, C., Petre, R., Nakano, T., Castro, D., Enoto, T., Hiraga, J. S., et al. [arXiv:1403.5154 (astro-ph)] Astrophys. J. Lett. 785, id L27 (2014)

RESCEU-24/14

*Suzaku studies of luminosity-dependent changes in the low-mass X-ray binary Aquila X-1*, Sakurai, S., Torii, S., Noda, H., Zhang, Z., Ono, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S. and Matsuoka, M. [arXiv:1308.6091 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 66, Art. No. 66 (2014)

RESCEU-23/14

*Precursors and outbursts of A 0535+26 in 2009-2011 observed by the MAXI/GSC and the Swift/BAT*, Nakajima, M., Mihara, T., Sugizaki, M., Serino, M., Matsuoka, M., Kawai, N., and Makishima, K. [arXiv:1308.5498 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 66, Art., No. 9 (2014)

RESCEU-22/14

*Discovery of an Outstanding Disk in the cD Galaxy of the Hydra A Cluster*, Fujita, Y. Okabe, N., Sato, K., Tamura, T., Matsushita, S., Hirashita, H., Nakamura, M., Matsushita, K., Nakazawa, K. and Takizawa, M. [arXiv:1310.3349 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 65, Art., No.L15 (2014)

RESCEU-21/14

*Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61*, Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. and Murakami, H. [arXiv:1404.3705 (astro-ph)] Phys. Rev. Lett. 112, id.171102 (2014)

RESCEU-20/14

*Firm Detection of a Cyclotron Resonance Feature with Suzaku in the X-ray Spectrum of GRO J1008-57 during a Giant Outburst in 2012*, Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. and Sasano, M. [arXiv:1401.4535 (astro-ph)] Pub. Astron. Soc. Japan, 66 (2014) id.59

RESCEU-19/14

*Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822-37*, Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. and Enoto, T. [arXiv:1311.4618 (astro-ph)] Publ. Astron. Soc. Japan 66 (2014) id.35

RESCEU-18/14

*Primordial black holes from temporally enhanced curvature perturbation*, Teruaki Suyama, Yi-Peng Wu and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1406.0249 (astro-ph)] Phys.Rev. D90 (2014) 4, 043514

RESCEU-17/14

*DECIGO Pathfinder*, Masaki Ando Int.J.Mod.Phys.D22 (2013) 1341002

RESCEU-16/14

*Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors*, J. Harms, BJJ. Slagmolen, RX. Adhikari, MC. Miller, M. Evans, YB. Chen, H. Muller, M. Ando [arXiv:1308.2074 (gr-qc)] Physical Review D 88 (2013) 122003

RESCEU-15/14

*Optical cavity limits on higher order Lorentz violation*, Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando [arXiv:1310.1952 (gr-qc)] Physical Review D 88 (2013) 111101

RESCEU-14/14

*New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity*, Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono [arXiv:1303.6709 (gr-qc)] Physical Review Letters 110 (2013) 200401

RESCEU-13/14

*Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector*, Y. Aso, Y. Michimura, et al. [arXiv:1306.6747 (gr-qc)] Physical Review D 8 (2013) 043007

RESCEU-12/14

*Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas*, A. Shoda, M.Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono [arXiv:1311.4273 (gr-qc)] Physical Review D 89 (2014) 027101

RESCEU-11/14

*Topological inflation from the Starobinsky model in supergravity*, Kohei Kamada, Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1405.6732 (hep-th)] Phys.Rev. D90 (2014) 10, 103520

RESCEU-10/14

*No quasi-stable scalaron lump forms after  $R^2$  inflation*, Naoyuki Takeda and Yuki Watanabe [arXiv:1405.3830 (astro-ph)] Physical Review D 90 (2014) 023519

RESCEU-9/14

*Testing scenarios of primordial black holes being the seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos and CMB  $\mu$ -distortions*, Kazunori Kohri, Tomohiro Nakama and Teruaki Suyama [arXiv:1405.5990 (astro-ph)] Physical Review D 90 (2014) 083514

RESCEU-8/14

*Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data*, Cristiano Germani, Yuki Watanabe and Nico Wintergerst [arXiv:1403.5766 (hep-ph)] JCAP 1412 (2014) 12, 009

RESCEU-7/14

*Reheating the universe once more - the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales*, Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1403.5407 (astro-ph)] Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 061302

RESCEU-6/14

*Cosmology of the proxy theory to massive gravity*, Lavinia Heisenberg, Rampei Kimura, and Kazuhiro Yamamoto [arXiv:1403.2049 (hep-th)] Physical Review D 89 (2014) 103008

RESCEU-5/14

*Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector*, Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi and Teruaki Suyama [arXiv:1402.6740 (gr-qc)] Physical Review D 89 (2014) 084042

RESCEU-4/14

*Investigating formation condition of primordial black holes for generalized initial perturbation profiles*, Tomohiro Nakama, Tomohiro Harada, A. G. Polnarev, Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1401.7740 (gr-qc)]

RESCEU-3/14

*Self acceleration with Quasidilaton*, G. Gabadadze, R. Kimura, and D. Pirtskhalava [arXiv:1401.5403 (hep-th)] Physical Review D 90 (2014) 024029

RESCEU-2/14

*Is there supercurvature mode of massive vector field in open inflation?*, Daisuke Yamauchi, Tomohiro Fujita, Shinji Mukohyama [arXiv:1402.2784 (astro-ph)] JCAP 1403 (2014) 031

RESCEU-1/14

*Loop contribution to inflationary magnetic field*, Hayato Motohashi and Teruaki Suyama [arXiv:1401.1260 (astro-ph)]

## II

# 2014年度 プロジェクト別 研究活動報告





# 1 初期宇宙進化論

## ——基本法則に基づいた宇宙の創生進化と構造形成の理論的研究—— (横山・須藤・吉田・大栗・須山・細川・伊藤)

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

### 初期宇宙 相対論

われわれの住むこの宇宙は、今から 138 億年の昔、インフレーションという急速な膨張期を経験したことによって古典的な時空構造として生まれ、そのエネルギーが解放されて灼熱の状態となり、フリードマン的な膨張を開始した。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され、豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいつか始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、インフレーション宇宙論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の創生・進化の研究を目的としている。具体的には、観測と整合的なインフレーションモデルの構築、密度揺らぎの生成機構の解明、揺らぎの進化や非線形性の理解、バリオン・ダークマター・ダークエネルギーという宇宙のエネルギー組成の起源、などを中心に研究を進めている。

さらに、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の稼働を控え、重力波データ解析の基礎研究、また重力波を用いた宇宙論の研究を行っている。

### 観測的宇宙論

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築す

ることが「観測的宇宙論」の目的である。

特に、われわれはダークエネルギーを一大テーマとして研究に取り組んでいる。すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を用いて、ダークエネルギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の重力進化と銀河のクラスタリング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、などを行っている。さらに既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検証など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

### 星形成

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

## 1.1 初期宇宙・相対論

### 高次スカラー揺らぎによるテンソル揺らぎの生成可能性

BICEP2 の観測に動機づけられ、インフレーション中にインフラトン以外のスカラー場の高次摂動効果によって大振幅のテンソル揺らぎを生成する可能性を検討した。その結果、テンソル揺らぎが大きくなる場合には、つねにそれ以上に曲率揺らぎができてしまい、うまくいかないことを明らかにした。[3]

### 超重重力理論におけるトポロジカルインフレーション

近年超重重力理論においてスカラー曲率の高次項を持った理論が取り扱えるようになり、それに基づいたインフレーションモデルも議論されている。ここでは、トポロジカルインフレーションの機構を用いてこのような理論におけるインフレーションの新たな可能性を見出した [4]。

### 高階の微分を含むスカラー場からの原始ブラックホール

インフレーション宇宙における正準的でない高階の微分を含むスカラー場のダイナミクスを解析した

[5]. この場合、スカラー場の値によって場の状態方程式が宇宙定数に対応するものから、堅い物質に対応するものまで連続的に変化することを見出した。また、状態方程式の時間的遷移に伴って、大振幅を持つ曲率揺らぎが一時的に生成することを示した。モデルのパラメータによっては、曲率揺らぎから原始ブラックホールが大量に作られ、そのブラックホールのホーキング蒸発によって、宇宙の再加熱が実現されることも明らかにした。また、このシナリオは将来の宇宙重力波干渉計 DECIGO で検出されるレベルの背景重力波を予言することも示した。

### Ostrogradsky の定理の拡張

高階微分を含む非縮退なラグランジアンは、必ずゴーストを含むことが知られている。これは、Ostrogradsky の定理として知られている。一方、Euler-Lagrange 方程式が高々 3 階の微分方程式となるようなラグランジアンは、縮退したラグランジアンであるため、Ostrogradsky の定理は適用できず、ゴーストが存在するかどうかは知られていなかった。論文 [6] では、そのような場合でもゴーストは一般に存在することを示した。

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

Germani-Kehagias の提案したニューヒッグス・インフレーションモデルはプランク衛星と BICEP2 の観測データと良く一致することを示した。さらに、ニューヒッグスモデルは負のスペクトル指数スケール依存性を持ち、プランクと BICEP2 のデータ間のテンションを取り除きうる。このモデルは宇宙進化の過程において常にユニタリ性を保っている。インフレーション中に、ヒッグス自己相互作用とヒッグス・重力子相互作用は背景依存する大きなカットオフスケールを持つ。このとき  $W$ ,  $Z$  ボソンは大きな質量を獲得し、脱結合する。もし  $W$ ,  $Z$  ボソンがヒッグス場と非ミナルに結合すると、それらの有効質量がおおいに減少し、脱結合しない。インフレーション後、ニューヒッグスモデルは繰り込み可能なポテンシャルを有する 4 次ガリレオンモデルで良く近似される。これはインフレーションがユニタリ性を保ったまま始まりうることを示唆している [7, 78, 79, 80, 189]。

### $R^2$ インフレーション後のパラメタ共振による時空揺らぎの成長

最も単純な重力理論の拡張である  $R^2$  インフレーションモデルが、観測値の中心を指し示している。したがって、このモデルは近年急速に国際的な注目を浴びている。このモデルでのインフレーション後の宇宙再加熱期において、パラメタ共振現象による時空揺らぎ

の成長について詳細に調べた。その結果、ミンコフスキー時空の場合と異なり、フリードマン宇宙の中では揺らぎがあまり成長せず、局在するようなソリトンは生成されないことを明らかにした [8, 77, 78, 189]。

### 超重力 $R^2$ インフレーション後の再加熱過程

$R^2$  インフレーションモデルを超重力理論へと拡張したモデルについて、宇宙再加熱過程がどのように起こるか調べた。その結果、主なインフラトンの崩壊チャンネルは量子アノマリーによって引き起こされることを明らかにした。さらにはグラビティーノ質量についても許容される範囲を示した [9]。

### 重力的な宇宙再加熱

プランク天文衛星の CMB 観測により、非ミナル重力結合を持つインフレーションモデルが支持されている。我々はこの結合を持つ一般的な複数場インフレーションモデルにおいて、重力相互作用によりユニバーサルに宇宙再加熱が起こることを示した。また、ヒッグス凝縮場が再加熱時に非自明な値を持てば、変調再加熱を引き起こし、非ガウス性密度揺らぎを生成する可能性を指摘した [10, 132]。

### 宇宙論的揺らぎの離形変換不変性と複数場への拡張

時空揺らぎの離形変換 (disformal transformation) 不変性を宇宙論の枠組みで調べた。スカラー場による離形変換において、等スカラー場曲面上の非線形曲率揺らぎと重力波揺らぎが不変であることを示した。次に空間的勾配展開の下では非線形な揺らぎの時間発展について、特に離形変換の下で二通りの見方ができることを示した。一つ目は物理的な不変性で、もう一つは見かけ上の因果構造の変化である。最後に複数スカラー場による新しいタイプの離形変換について議論した [11]。

### 初期相関長が長い宇宙ひもが CMB 非等方性に与える影響の研究

初期宇宙の相転移で生成されるひも状の位相欠陥は宇宙ひもと呼ばれ、観測的に初期宇宙を探る上で有用である。中でも近年精密観測が可能になった宇宙マイクロ波背景放射の非等方性に与える影響について多くの研究がなされてきた。これまで研究されてきた宇宙ひもは生成後にスケーリング則を満たすとされ、初期配置にほとんど依存しない予言が可能である。しかし、例えばインフレーション中の相転移で生成される宇宙ひもには初期宇宙ではスケーリング則を適用できず、CMB 非等方性への影響は明らかでない。我々はこのようなシナリオのもとで数値計算を行い、CMB 非等方性に与える寄与を評価し

た。その結果、小スケールゆらぎの観測により課せられる宇宙ひもパラメータの制限が緩和されることを示し、最新の観測結果の解釈についても考察した。[12]

### 高次元時空に埋め込まれた宇宙ひもの振る舞いについて

スーパーstring理論の重要なプローブとして、高次元時空に存在する宇宙ひもが考えられる。特に、4次元以外の余剰次元方向に巻きついているような場合には、4次元時空から見ると実効的に超伝導電流を持つように見えることが指摘されている。しかし、これをエネルギー運動量テンソルの言葉で取り扱った例はなく、本研究ではその定式化を行った。特異な性質として、宇宙弦の高次元への埋め込み方がある条件を満たすときにはエネルギー密度は値を持つにも関わらず、張力がゼロになる場合が存在することを見出した [13, 133]。

### 一般的なスカラー・テンソル理論におけるスクリーニング機構について

これまでホルンデスキー理論と呼ばれる模型が最も一般的なスカラー・テンソル理論だと考えられてきたが、近年になってこの理論にはさらなる一般化が許容されることが明らかとなった。修正重力理論において、観測による重力のテストを満たすことは最低条件として挙げられる。一般的に、スカラー自由度の非線形相互作用によって、スカラー自由度自身が実効的に誘起されなくなる遮蔽機構の存在がこれを保障している。本研究では、一般化された理論が遮蔽機構の適切に働きうるかについて探った。ホルンデスキー理論においては常に遮蔽機構が働くのに対し、一般化された理論においては密度勾配が存在する領域においては一般相対論からのズレの効果が大きくなり、遮蔽機構が部分的に破れるという特異な性質があることを発見した [14, 191]。この振る舞いを用いて一般化された重力理論を制限することが可能になる。実際にこれを星の構造の進化に応用し、これが修正重力に対して鋭敏であることを見出した [15]。

### 熱的インフレーションにおける熱的揺動効果の研究

超対称性理論のモデルの中には、熱的インフレーションと呼ばれる機構を利用することで矛盾のない宇宙論的帰結を得ることができるものがある。熱的インフレーションは原始インフレーションの後に起こる一時的で短い加速膨張期のことで、flaton と呼ばれるスカラー場によって引き起こされる。それゆえ熱的インフレーションは再加熱後などの熱い宇宙で起こる現象であり、flaton は熱浴中の場との相互作用を通じてそのポテンシャルに有限温度補正を受け

る。我々は有限温度効果の揺動効果も取り入れて熱的インフレーションを再考し、その終了が cross over 型の相転移になることを発見した。[16, 136, 83, 59]

### 原始ブラックホールで探る初期宇宙

大振幅の密度ゆらぎが初期宇宙に存在していたとして、それが自己重力によって崩壊すると、原始ブラックホール (Primordial black hole, PBH) が形成され得る。ある種のインフレーションモデルでは、大振幅の曲率ゆらぎが生成され PBH が形成される。PBH の存在量を理論的に計算すれば、観測的な制限と比較することで、インフレーションモデルに対する知見が得られる。そこで、PBH の存在量を予言するために PBH 形成過程を数値シミュレーションで調べることが必要となる。短波長の大振幅ゆらぎが長波長の大振幅ゆらぎの上に存在している場合、まず短波長ゆらぎがホライズンに入った直後に重力崩壊を起こし PBH を形成し、その後長波長ゆらぎがホライズンに入った直後に重力崩壊を起こし、小さい PBH を巻き込みながら大質量の PBH が形成する。この PBH 二重形成を初めて数値的に調べ、さらに、短波長ゆらぎが長波長ゆらぎによる PBH 形成にどのような影響を与えるかについても調べ、短波長ゆらぎは長波長ゆらぎの PBH 形成を促進することを明らかにした [17]。

インフレーション中に生成された曲率ゆらぎは超ホライズンスケールに引き伸ばされ、その後の放射優勢期などに再びホライズンの中に入る。ゆらぎが超ホライズンスケールにある間は、アインシュタイン方程式を近似的に解くことでゆらぎの時間発展を調べられる。この近似解を様々な座標条件に一般化し、さらに長波長ゆらぎ中に存在する短波長ゆらぎによる PBH 形成条件を議論した [18]。

また、インフレーション理論では様々な波長の重力波が生成されると予言されるが、そのうち短波長の重力波の振幅が大きいと、重力波の二次の効果により密度ゆらぎが生成する。密度ゆらぎの振幅が十分大きいと PBH が形成する。しかし PBH は観測的に見つかっていないので、PBH が大量に形成してしまうほど大振幅の短波長重力波は棄却されることになる。このような考察から得られるインフレーション起源の短波長重力波への制限は、ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景放射から得られる制限よりも厳しいことを明らかにした [137, 138, 86, 87, 84, 85]。

### 超巨大ブラックホールの起源としての原始ブラックホール

比較的初期の宇宙に超巨大ブラックホールが存在したことが、高赤方偏移のクエーサーの観測から強く示唆されている。観測されたような初期宇宙までにどのように巨大なブラックホールが形成したのかはよくわかっていない。初期宇宙の超巨大ブラックホールの起源の候補として、PBH がある。しかし、初期ゆらぎがガウス統計に従うという仮定のもとでは、

超巨大ブラックホールを説明するほど多くのPBHが初期宇宙で形成した場合には、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルが観測と矛盾するほどプランク分布から大きくずれてしまうことを指摘した。また、PBH形成には多数の小質量暗黒物質ハローの形成も付随し、それらのハローを構成する暗黒物質粒子の対消滅から観測と矛盾する程の強度の宇宙線が飛来する可能性がある。これらの考察から超巨大ブラックホールの起源としてのPBHが強く制限される可能性があることを示した [19, 58]。

### 一般化ガリレオン理論における場の変位と整合性

初期宇宙のインフレーションは重力波の生成を预言するが、これが宇宙マイクロ波背景放射において観測されるためにはインフレーションを引き起こすインフラトンの場の値の変位がプランクスケールを超えていなければならない。本研究では、インフレーションの最も一般的な枠組みである一般化ガリレオン理論において、観測可能な重力波を生成しながら場の値の変位を小さくすることができることを示した。また、それがどのような物理的に状況において意味を持つのかを理論の強結合領域を求めることにより明らかにし、それを実現するようなモデルを考えた際に量子補正等の効果により内部整合性が壊されないかについて研究を進めた [88, 89, 90, 139, 192]。

### $f(R)$ 重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式の研究

$f(R)$  重力理論は一般相対論の最も簡単な一般化の一つであり、太陽系など局所スケールの実験からの制限を満たしつつ現在の宇宙の加速膨張を説明することができる。この理論をダークエネルギーモデルと見なすと、実効的な状態方程式パラメータ  $w$  は一般相対論の場合の  $-1$  からずれる。このずれの大きさに制限を与えることは、モデルの峻別を行う手がかりの一つになる。先行研究 P. Brax et al. (2008) では、局所スケールの情報から  $w$  が実質的に  $-1$  になるモデルしか許されないという主張を行った。しかし  $w$  が宇宙の背景量であることを考えると、局所的な情報のみから制限がつくことは物理的に極めて不自然である。本研究では、先行研究では考慮されていなかった、系の時間依存性を取り入れて場の方程式を再解析した。また、構成した解が  $w \neq -1$  の場合にも観測的制限を満たし得ることを示し、先行研究による制限が誤りであることを明らかにした [20]。

### 原始磁場形成理論における Schwinger 効果の影響

GeV/TeV 領域のガンマ線の観測によって、銀河間の領域にも非常に弱い磁場が存在する可能性 (A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)) が示唆されている。現在のところ、大スケールの宇宙磁場の起源は明らかにされていないが、インフレーション

中の電磁場の量子論的なゆらぎから、大スケール磁場の種となる磁場を生成するという試みが以前よりなされてきた。このような原始磁場形成理論においては、磁場ではなく電場ばかりが生成してしまうという状況が広く生じることが知られており、このことは、インフレーション原始磁場形成理論の困難の一つであるとされてきた。しかし、これまでの議論では、QED にもとづく荷電粒子から電磁場へのバックリアクションは考慮されてこなかった。強い背景電場の存在下では、Schwinger 効果として知られる荷電粒子対生成が顕著になり、電磁場自身へのバックリアクションをもたらし、強い電場は安定に存在できないため、原始磁場形成理論における困難を克服できる可能性があることに着目した。この可能性を探るため、de Sitter 時空上でのスカラー QED を考え、一様な背景電場から誘起される電流の期待値の評価を行った。本研究では、4次の断熱正則化を行うことで、このような非物理的な振る舞いが取り除けることを示した。また、この正則化のもとで、インフレーション中に安定に存在できる一様背景電場の強さに上限を与え、荷電粒子の質量が小さい場合には、強い制限になりうることを示した [63, 143]。

### DECIGO による宇宙再加熱史の決定精度

CMB の B モード変更の観測によってインフレーションのエネルギースケールが確定すると、DECIGO によってインフレーション後の再加熱温度をどの程度決定できるかを計算できることになる。ここでは、フィッシャーマトリックスを用いてそれを計算し、測定可能な再加熱温度の範囲を求めた [21]。

### ねじれアンテナの方向決定精度

ねじれ振り子型重力波検出器 (TOrtion Bar Antenna: TOBA) は、現在主流となっているレーザー干渉計型重力波検出器とは異なる原理によって重力波を検出する。従来の検出器が1台の検出器ごとに1つの独立な出力を持つのに対して、1台のTOBAは、3つの独立な出力を持ち、これによって重力波の偏極を求めることができる。このことを利用して、枝、正田、伊藤、安東は論文 [22, 71, 72, 130] においてTOBAは1台のみでバースト性の重力波であっても、その方向を決定することができることを示した。

### ダークマター探査

Zhao, Silk, Bertone らは中間質量ブラックホールがダークマターミニハローをまとっている可能性が指摘した (Zhao & Silk, Phys. Rev. Lett. 95, 011301 (2005); Bertone et al., Phys. Rev. D 72, 103517 (2005))。星質量のコンパクト星が中間質量ブラックホールに捕獲されると、重力波を放射しながら、次第に中間質量ブラックホールに近づいていき、最終的には両者は合体する。欧州宇宙機関の evolved Laser

Interferometric Space Antenna は中間質量ブラックホールと星質量ブラックホールからなる連星からの重力波を検出できる。枝、伊藤、黒柳、Silk は論文 [23, 183] において中間質量ブラックホールの周囲に存在するダークマターミニハローを検出し、さらにその動径方向の分布の様子を研究することができることを示した。

### 単独パルサーの質量決定

中性子星は原子核密度を超える超高密度物質をその内部に含む天体であり、その状態方程式は未だよくわかっていない。中性子星が持ちうる最大の質量は、中性子星の状態方程式に依存するため、多くの中性子星の質量を観測によって決定することによって原子核物理学に寄与することができる。中性子星の質量は、現状では連星系において精度良く決定されており、単独の中性子星の質量を決定したという報告は、中性子星大気モデルを介した一例があるのみである。小野、枝、伊藤は論文 [24, 74, 185] において、アインシュタイン望遠鏡を用いれば単独パルサーの質量を決定できることを示した。ここで用いた方法は、パルサーからの重力波が自身のクーロンの重力場によって位相ずれを起こすことを利用したものであり、我々が指摘するまで全く気づかれていなかった効果である。宇宙線研究所大橋研究室の小野氏はこの研究を修士論文としてまとめ、修士号を取得した。

### 重力波データ解析における非ガウスノイズ

重力波検出器に作用するノイズがガウス統計に従う場合は、線形マッチトフィルター法が S/N 比が最大になるような量を与える。しかし、一般に重力波検出器には非ガウスノイズが働くので、その影響を正しく取り入れることが効率的な信号検出には重要である。本研究では、さまざまな非ガウスノイズに対して Locally optimal statistic を定式化した。非ガウス性が弱い場合にはエッジワース展開によって、強い場合には新規開発したガウシアンマッピングの方法によってこれを行い、t 分布の場合に厳密解と比較した。その結果後者は非ガウス性の強い場合も適用可能であることが示された [25]。

### データ解析システムの構築

伊藤は、国内外の KAGRA 重力波データ解析メンバーが利用するデータ解析開発システムを構築し、運用を始めた [115, 73, 131]。バージョン管理システムに git、issue tracking システムに redmine、Continuous Integration ツールに jenkins を導入した。Jenkins においては、nightly build とコード片重複検出ツール、静的解析ツール (cppcheck)、自動文書生成ツール doxygen を導入した。2015 年 12 月の iKAGRA 観測 run に備えて、RAID6 の 80TB (4TB\*24 slots,

2slots はホットスワップ) データ保存サーバーを導入した。また、GPGPU による高速化の可能性を検討したところ、現状の実装ではたかだか 2-3 倍程度の高速化しか望めず、GPGPU の導入コストを考えると、残念ながら費用対効果の面では採用に否定的な結果が得られた。

### 多出力ねじれ振り子型重力波検出器によるパラメーター推定精度の向上

ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) は低周波数帯の観測を目的とする地上重力波検出器である。TOBA は二本の直交する棒状のテストマスから構成され、重力波入射により引き起こされる検出器平面上の二本のマスの角度変動から重力波信号が読み取られる。従来の TOBA では、検出器平面上のテストマスの運動のみを監視していた。この場合、重力波に対して不感の方向を持つほか、一台では重力波の波形パラメーターを決定できないという欠点が存在していた。このような問題を解決するために、検出器平面と直交する平面上の角度変動を取り入れ独立信号を増やした多出力型のアンテナ構成を新たに考案した。そして、その多出力型 TOBA の性能をフィッシャー解析を用いて評価した。その結果、多出力型 TOBA はあらゆる方向からの重力波に対して感度を持ち、イベント検出率は従来の TOBA に比べて約 1.7 倍向上することを明らかにした。さらに、IMBH 連星からのインスパイラル重力波に対するパラメーター推定精度は約 1 桁以上向上することを示した [2, 26, 140, 93, 141, 91]。

### ブラックホール周囲に存在するダークマターの重力波への影響

近年、中間質量ブラックホール (IMBH) の周囲にはダークマター (DM) が存在すると指摘されている。昨年度に引き続き、BH 周囲に存在する DM のインスパイラル重力波への影響を見積もるために、DM 分布として最も簡単なモデルである単一のべき乗則に従う球対称密度分布を仮定した。そして、このような分布の DM に覆われた連星系からのインスパイラル重力波波形を、重力ポテンシャルのほかに新たに DM とコンパクト星との重力的な摩擦の影響を取り入れて導出した。こうして得られた波形を真の波形と見なして、従来から用いられてきた DM の影響を含まない波形との相関を取り、重力波信号の検出可能性について検討をした。この結果、DM スパイクのように高密度の DM 領域が形成する場合には、重力波の位相部分は DM により強い修正を受けることを見出し、理論波形に DM 効果を取り入れなければ、IMBH からの重力波は検出されにくいことを示した。また、重力波波形が DM 分布に強く依存することに着目し、重力波波形が保有する DM 分布の決定精度を調べ、IMBH の近傍で高密度な DM 領域が形成している場合、例えば、Zhao and Silk [Phys. Rev. Lett. 95, 011301 (2005)] で提案されているモ

デルの場合には、信号対雑音比が10であるような重力波を検出したとき、IMBH近傍のDM分布の傾きが $5 \times 10^{-6}$ の精度で得られることを示した [27, 94]。

### 重力波を用いた孤立中性子星の質量推定法の提唱

高速回転する非軸対称な中性子星(NS)は、一般に四重極モードと呼ばれる回転周波数の二倍の周波数を持つ重力波を放射する。しかし、NSの角運動量軸と慣性主軸が一致しない場合、NSは角運動量軸を中心とした自由歳差運動を行い、四重極モードに加えて歳差モードと呼ばれる回転周波数と同一の周波数を有する重力波を放射する。さらに、近年では、NSが内部に超流動コアを含むモデルのもとで、たとえ電磁波観測で歳差運動による信号の変調が観測されなかったとしても、NSから放たれる重力波は歳差運動するNSと同様に、回転周波数の1倍と2倍の2つのモードを持つことが示唆されている。そこで、このような2つのモードを持つNSからの重力波に焦点を当て、重力波観測によるNSの質量推定法を新たに提案した。NSから放射される重力波の位相は、NSのなす重力ポテンシャルにより引き伸ばされ、結果として生じる位相シフトは、NSの質量と周波数、NSまでの距離に依存している。したがって、2つのモードの位相の差をとることで、原理的には、NSの質量情報を検出器の出力データ中から抜き取ることができる。モンテカルロシミュレーションを用いることで、Einstein Telescopeのような第三世代の重力波検出器での観測では、歳差角が一樣に分布するという仮定のもとで、1kpc離れた扁平率が $10^{-6}$ である孤立NSの約半数を、その質量の20%程度の精度で推定できることを示した [28, 92]。

### 重力波データ解析スクール

昨年に引き続き、東京大学ビッグバンセンターにおいて2014年4月18日(金)、19日(土)に重力波データ解析スクールを開催し、約60名の参加者を得ることができた。本スクールでは、ビッグバンセンターの横山順一教授、京都大学基礎物理学研究所の柴田教授、宇宙線研究所の川村静児教授らの講義と、データ解析チームによる演習を組み合わせたプログラムを持ち、アンケートによると、参加者した学部学生は、重力波データ解析と重力波による天文学への興味を新たにすることがわかった。本スクールのホームページURLは以下の通りである。<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/workshops/jgwdas201404>。また、2014年11月23日(日)、24日(月)には大阪大学においてもスクールを開催することができた。大阪大学のスクールでは、KAGRAデータ解析チームをメインの講師として、重力波天文学、データ解析手法、実際の演習までを約40名の学部学生に体験してもらうことができた [171]。また、今回初めて社会人(放送大学大学生)の参加を得て、知名度の拡大を実感した [184]。本スクールのホームページURLは以下の通りである。<http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/gwschool2014>。

## 1.2 観測的宇宙論

### シルク減衰で探る小スケールゆらぎ

初期宇宙においては、バリオンと光子は強く結合しているため、一体となって音響振動している。このバリオン・光子流体のゆらぎは、シルク減衰と呼ばれる効果で減衰する。減衰すると、もともと音響振動が持っていた振動エネルギーによって、宇宙全体の温度がわずかに上昇する(音響再加熱)。ビッグバン元素合成以降の音響再加熱により、光子の数密度は増えるがバリオンの数密度は増えないため、バリオン・光子比は減ることになる。一方で、バリオン・光子比は、ビッグバン元素合成の時期と光子の最終散乱の時期で、それぞれ軽元素量の存在量と宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測から独立に決められている。そのため、音響再加熱によるバリオン・光子比の減少分には上限がある、すなわち初期ゆらぎのシルク減衰による減衰分には上限がある。このような考察から、従来よりも小スケールの初期ゆらぎをはじめて制限した [29]。

### CMB 重力レンズ効果を用いた重力波の観測可能性

重力波は弱重力レンズ効果を通じてカールモードと呼ばれる回転モードを誘起することが知られており、CMBマップにその痕跡が残っていると考えられる。本研究では将来の精密なCMB観測計画について、特に原始重力波の振幅および幕における無矛盾関係を確認するために必要なノイズレベルについて着目し、議論を行った。その結果、スカラー・テンソル比が現在知られる上限より十分小さい値だった場合、次世代計画では無矛盾条件を確かめることは難しいが、その一方で重力波が誘起するカールモードについては $3\sigma$ 以上で観測できることを見出した [30]。また、将来観測においては、再結合後に生成される重力波についても制限しうることを指摘した。

### 銀河探査における原始非ガウス性の観測可能性

本研究では宇宙大規模構造の将来観測として、Square Kilometre Array (SKA) に着目した。特に、宇宙大規模構造観測を用いた初期宇宙の重要なプローブとしての原始揺らぎの非ガウス性の観測可能性について探査した。その結果、SKA単独においてもCMBでは到達できないような精度での探査が可能であることを見出した。また、SKA単独だけでなくEuclid衛星に代表される同時期に観測が行われる計画との同時解析を行うことでどの程度、宇宙論パラメータの制限について性能が向上するのかについて議論を行った。その結果、協働することでさらなる精度の向上が見込めることを指摘した [31, 81, 82, 174, 134, 135]。



### 遠方銀河撮像観測とガンマ線観測の相関解析

重力レンズ現象とは、遠方天体の像が、観測者と遠方天体の間に位置する質量分布によってゆがめられる一般相対論的な効果である。一般に重力レンズ効果による像のゆがみ具合はわずかなものであるが、統計処理を施すことにより視線方向に位置する質量分布を再構築することが可能である。重力レンズ現象によって再構築された質量分布は、我々の宇宙の組成や膨張史に依存しているために、重力レンズ解析により我々の宇宙の組成や膨張史に制限を与えることができる。

重力レンズ解析は、視線方向の物質分布を明らかにする点においては、非常に優れた解析手法であるものの、暗黒物質の素粒子的な性質には感度を持たない。そのため、弱重力レンズ解析を通じて暗黒物質の素粒子的な性質を探るには、多波長による観測データを併用する必要がある。本研究では、重力レンズ解析とガンマ線観測データの組み合わせにより、暗黒物質の素粒子的な性質の一つである対消滅反応を調査した。暗黒物質がもし対消滅しているなら、宇宙の物質分布の高密度領域では、対消滅によるガンマ線が発生していることが予想される。一方で、物質分布の高密度領域では、その背景の銀河の像は重力レンズ現象によりゆがめられている。このことを考慮すると、銀河系内からくるガンマ線（背景ガンマ線放射）と重力レンズ効果による銀河の像のゆがみの間には、角度相関が生じていることが期待される。

本研究では、実在するガンマ線観測と銀河撮像観測の2種のデータの相関解析を世界で初めて行い、暗黒物質の対消滅可能性を探索した。Fermi Large Area Telescopeによる背景ガンマ線放射と、Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS)による銀河楕円率の角度相関関数の測定を行い、現行のデータでは有意な相関は見られなかった。この測定結果と理論モデルの比較から、暗黒物質対消滅に関する上限を与えることに成功した。本研究の提案する手法は、宇宙論的な距離スケールを利用した解析手法であり、近傍の矮小銀河や銀河中心のガンマ線観測からくる制限とは独立な制限を与える。また、将来銀河撮像計画における背景銀河楕円率のデータ蓄積により、期待される暗黒物質対消滅に関する制限は、幅広い暗黒物質質量の範囲で近傍の制限と同等かそれ以上になることを示した。[32, 146, 102, 104, 61]

### 弱重力レンズ効果による宇宙論パラメータ推定に対するバリオンの影響

星形成や輻射冷却などのバリオンによる過程によって宇宙の大規模構造の分布や重力レンズ効果が影響を受けることが近年、示唆されてきた。また、すばる望遠鏡に搭載されるHyper Suprime-Camなどの将来観測を鑑みて、これらバリオンが存在することによる統計誤差を正確に推定することが必要になった。我々、特に弱重力レンズ効果において、このバリオンによる効果が定量的にどれほどかをバリオンを考

慮したN体シミュレーションを行うことによって明らかにした。特に弱重力レンズ効果の統計量を用いた宇宙論パラメータの推定において、従来のダークマターのみのシミュレーションを用いたときと、バリオンを含めた場合でどれだけパラメータ推定値に違いが生じるかを調べた。我々の研究から、Hyper Suprime-Camの観測条件を仮定した場合、バリオンによる統計誤差は最大で $2\sigma$ 程度になり、将来観測においてはバリオンの影響を評価することが重要であることが明らかになった。

### 銀河撮像観測による銀河団内部構造調査

標準的な宇宙モデルでは、小さい構造がまず形成し、時間進化とともに合体や衝突などを繰り返し、より大きな構造を階層的に形成していくことが期待される。この階層的構造形成は、数値シミュレーションにより確認されている一方で、観測的に階層的構造形成を明らかにする試みが継続的に行われてきた。

弱重力レンズ解析は、銀河や銀河団といった天体の周りの物質分布を明らかにできる強力な手法である。これまでの観測により、銀河から銀河団まで質量にして約3桁程度の範囲で、天体周りの物質分布が数値シミュレーションによる予言と整合的であることが示されている。一方、階層的構造形成の重要な特徴の一つとして、大構造内の微細構造の存在が挙げられる。これは、例えば銀河団を構成する銀河（メンバー銀河）の物理的な起源と考えられ、銀河団内部の物質分布の詳細な調査は、構造形成の精密検証には欠かせない研究である。

本研究では、先行研究の多くが導入している仮定を用いずに、メンバー銀河の中心からの距離を弱重力レンズ解析を通じて推定する手法を開発した。この手法では、中心から離れたメンバー銀河周りの背景銀河の像の歪みのパターンに特徴的な性質が現れることを利用し、中心からの距離を推定する。高解像度数値シミュレーションを利用し、我々の手法をテストした結果、銀河群および銀河団の外縁部に位置するメンバー銀河を高精度で同定できる可能性があることを発見した。この手法を将来銀河撮像計画に応用すると、銀河団外縁部に位置するメンバー銀河の物質分布を高精度で明らかにすることができる。メンバー銀河の物質分布の測定を利用し、例えば、階層的構造形成における重要な効果の一つである潮汐破壊が、銀河団内のどの領域で起こるかを明らかにすることが可能である。

この手法は、より少ない仮定の下で銀河団内部構造を明らかにし、階層的構造形成の新しい検証方法を提供する。それと同時に、メンバー銀河の性質と質量の関係についても可視光観測の結果から議論でき、銀河形成理論への新たな制限を与えるはずである。[33]

## 弱重力レンズを用いたフィラメントの研究

フィラメントは宇宙の大規模構造を特徴付けるものの一つであり、特に銀河団を結ぶように存在することが多い。しかしフィラメントに起因する重力レンズ信号は非常に弱く、いままで数例しか報告されていない。我々は大規模シミュレーションを用いてフィラメントの重力レンズ信号がどの程度検出されるかの詳細な統計研究を行った。この理論予測は将来のハイパースプリームカムサーベイなどによって観測と比較することで宇宙の構造形成の新たな検証が可能となる [34]。

## 強重力レンズで増光された Ia 型超新星の発見

パンスターズサーベイで発見された特異な超新星爆発 PS1-10afx について、我々のグループは重力レンズで 30 倍に増光された Ia 型超新星であるという説を唱え、論争になっていた。この説を検証すべく、超新星が十分暗くなった 2013 年にケック望遠鏡で超新星母銀河の深い分光観測を行い、その解析の結果重力レンズを引き起こす手前の銀河を検出し、重力レンズ説が正しいことを証明した。これは超新星の強重力レンズ効果の初発見である。また、今回の発見をもとに、将来のサーベイ観測で重力レンズ超新星を色等級図を用いて効率よく検出する新手法を考案し、この方法により将来発見される重力レンズ超新星の数を約一桁増やしうることを指摘した [35]。

## 銀河団背後の高赤方偏移銀河の観測が与える再イオン化への示唆

遠方銀河を銀河団の重力レンズ増光効果を利用して調べるハッブル望遠鏡 Frontier Fields 計画の最初の銀河団 Abell 2744 のデータを用いて、 $z \sim 5-10$  の銀河の光度関数の進化を調べた。その結果、紫外光度密度の減少が  $z > 8$  で加速していることを確認し、その結果 WMAP 衛星で観測されていた宇宙のトムソン散乱の光学的深さが観測された銀河だけでは説明できないことを示した [36]。

## 重力レンズクエーサー探索

スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) DR7 を用いた重力レンズクエーサーの最後の重力レンズ発見報告を行った。[37] 新たに発見された重力レンズクエーサーの一つ SDSS J1405+0959 についてすばる望遠鏡でレーザーガイド星補償光学観測を行った結果、重力レンズを受けたクエーサー母銀河と三つめのクエーサー像を発見し、この重力レンズクエーサーは複雑な構造を持っていることが示された。[38] また SDSS で見つかった、現在知られている中で最大分離角をもつ SDSS J1029+2623 の分光追観測によってクエーサー近傍のアウトフローの微細構造を調べ、アウトフローがクランピーな構造をもつことを突き止めた [39]。

## 銀河団の探索手法の開発

銀河団を構成するメンバー銀河は色等級図上で特徴的な関係を示すため、多波長撮像サーベイ観測で似た色等級関係を示す銀河の集合を選び出すことで銀河団を同定することができる。これまでは特定のバンドの色等級関係に基づき銀河団探索が行われていたが、メンバー銀河をいわゆる種族合成モデルを用いてモデル化することで、任意のバンドの組み合わせで銀河団探索を行う新手法を開発した。これをスローンデジタルスカイサーベイの撮像データに適用し約 7 万個の銀河団カタログを構築した [40]。

## 高赤方偏移銀河の形成シミュレーション

宇宙論的流体シミュレーションを用いて銀河種族の進化を明らかにした。銀河風と星からの輻射圧によるフィードバック効果を取り入れ、 $z = 4$  から現在までの星質量関数とその進化を再現することに成功した。このシミュレーションを用いてダウンサイジングや金属量の進化、また星質量とハロー質量の関係を調べたところ、既存の観測結果に整合することも明らかになった [41]。

## 遠方サブミリ波銀河の検出可能性と統計的特徴

近年の高分解能・高感度のサブミリ波観測によって、遠方宇宙のダストに隠された星形成史が明らかになりつつある。とくに、電離炭素輝線 ([CII] 輝線) は分光赤方偏移の決定や、その時代の星形成領域の描像の理解に貢献すると期待されている。一方で、最近の観測結果から、[CII] 輝線光度と遠方サブミリ波銀河の統計量の関係は近傍とは異なることが分かってきた。そのため、既存の観測結果を説明し、遠方サブミリ波銀河の検出可能性やサイエンスケースを議論できる理論研究が必要とされている。

本研究では、宇宙論的銀河形成シミュレーションの結果から得た銀河の [CII] 輝線光度を見積もり、遠方銀河の [CII] 輝線光度と銀河の統計的性質の関係を予測し、検出可能性を議論した。シミュレーション中のガス粒子は、計算コストの制限により [CII] 輝線が起源とする水素原子ガス雲まで分解されていない。そのため、[CII] 輝線光度の見積りには、水素原子ガス雲の熱平衡状態を解いた one-zone simulation の結果を用いる。

結果として、本研究の理論モデルは近傍の観測で示される、遠赤外線光度と [CII] 輝線光度の相関を再現した [148]。さらに、ALMA による deep survey においては、感度ではなく観測体積を優先する観測が適すると結論した [108]。また、理論的に見積もられた [CII] 光度関数は赤方偏移  $z = 4.0$  から  $z = 6.5$  にかけて bright end が 0.25 dex 明るくなる。これは、星形成領域の紫外線輻射場の強さの赤方偏移進化を反映している [165]。これらの結果から、遠方 [CII] 輝線銀河は  $z \sim 6$  付近の検出可能性が高く、この付近の星形成史の理解に貢献すると示唆される [64]。



## スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

ダスト (宇宙塵) は超新星や AGB 星の活動過程で形成されるとされており、したがって主には銀河ディスク内の星間空間に分布していると通常考えられている。一方で、Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、その結果銀河の中心から数 Mpc のスケールにまで、クエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとすれば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク (~10kpc) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。

本研究では IRAS の全天遠赤外放射マップのスタック解析により、MSFR で用いられた SDSS 銀河サンプルおよびこれに付随する赤外放射量を測定を行った。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR とスタック解析はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的に同等の観測結果を示したものと期待される。MSFR によるダスト赤化と、スタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを比較することでダスト温度を推定し、典型的な星間ダスト温度 (~20K) と整合的な値を得た。このことは、MSFR およびスタック解析の観測結果は、ダストが銀河団スケールに広がっているという解釈と同等に、銀河ディスク内の星間ダストが銀河の空間的クラスタリングによって統計的に重ね合わさったものとしても説明可能であることを示唆している [42, 43, 60]。

## AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析

銀河からの赤外線放射は星形成史を探る上で重要な指標となるが、その表面輝度は弱く個々では検出できないものがほとんどである。Kashiwagi et al. (2013, 以下 K13) では SDSS 銀河サンプルを IRAS の全天遠赤外線放射マップでスタックすることにより、SDSS 銀河およびこれに付随する銀河からの赤外線放射を、統計的にはあるが直接検出することに成功した。このスタック解析は銀河からの赤外線放射を探る現状では唯一の方法である。しかしながらここで用いられた、IRAS のデータは角度分解能が悪く (約 6 分角) 精度の良い解析をするのは困難であった。

そこで我々は分解能の良い (約 1 分角) 赤外線衛星 AKARI に搭載された観測器、Far-Infrared Surveyor (FIS) による全天遠赤外線放射マップを用いて、K13 と同様の解析を行った。結果として、AKARI FIS マップを用いても K13 と同様に系外銀河からの赤外線放射を直接検出することに成功した。また K13 で示唆されていた、SDSS 銀河ではない赤外線源は AKARI による解析では見つからず、単に IRAS の分解能が悪く解析がうまくいっていなかったことが判明した。さらに IRAS とは異なり AKARI は遠赤外域に多波

長のバンドを持っているため、同様の解析を各バンドで行うことにより、ダストの温度を推定することができる。ダストの温度は銀河のダストが、銀河ディスク (~数 kpc) を超えたホストダークマタースケール (~数 Mpc) まで広がっているのかどうかを決定する上で非常に重要である。実際にその解析を行ったところ、推定された温度は約 30K であり、Hwang et al. (2010) で測定された SDSS 銀河のダスト温度と整合性のあるものであった [152]。

## 個々の銀河のハロー質量の推定法

個々の銀河のハロー質量の確率分布関数を、その銀河周辺の銀河密度から見積もる方法論を Halo Occupation Distribution (HOD) の考え方にに基づき議論した。特に HOD を用いて確率分布関数の解析的な表式を導出し、それを  $N$  体計算に基づく銀河の模擬カタログから直接得られた確率分布関数と比較し、解析モデルが確率分布関数の複雑な振る舞いをよく再現することを示した [44]。

## 宇宙論的 $N$ 体シミュレーションによる非等方銀河クラスタリングの解析

分光サーベイにより得られた銀河分布は、銀河自身の持つ特異速度場の影響による赤方偏移歪みを受けており、そのクラスタリングは非等方性を帯びる。銀河の特異速度場は局所的な重力ポテンシャルを反映しており、そのため、この非等方性の強さは構造成長と密接に関係している。また、クラスタリングの非等方性は、銀河の距離を測定された見込み角・赤方偏移から共同距離に変換する際に仮定した宇宙論パラメータと真の宇宙論パラメータが異なることによっても引き起こされる。したがって、分光サーベイにより得られた銀河のクラスタリングに刻まれた非等方性を精密に解析することで構造成長と宇宙膨張を同時に測定すること、すなわち、重力理論の宇宙論的検証が原理的に可能となる。

銀河のクラスタリングは、パワースペクトルや二点相関関数といった二点統計量により特徴づけることが可能である。実際に銀河の二点統計量の解析を行うためには、観測された銀河固有のクラスタリングの性質 (銀河バイアス) を考慮した理論テンプレートを構築する必要がある。銀河バイアスは、物理的に正しく、十分な精度を保証された解を解析的に導出することが困難であるため、 $N$  体シミュレーションによる模擬銀河カタログ作製ができてはじめて銀河クラスタリングの解析から信用できる結果を得ることが可能となる。

視野 10,000 平方度、赤方偏移 0.5 に渡る大規模測光・分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により提供されている Luminous Red Galaxy (LRG) は、その広大なサーベイ体積ゆえに大規模構造を探る上で非常に有意なサンプルである。SDSS LRG サンプルは、サンプルのうち 95%もの LRG が周囲に LRG を伴わず単独で存在するため、

暗黒物質ハローの中心と対応していると考えられていた。しかし、 $N$ 体シミュレーションを用いて、LRGの非等方パワースペクトルを十分高精度で再現するためには、暗黒物質ハローの中心に LRG を対応づけるだけでは不十分であることを明らかにし、さらに、ハロー中のより局所的な重力束縛系であるサブハローと LRG を対応づけることで非等方パワースペクトルを再現できることを示した。また、サブハローを用いた模擬銀河カタログ自身を理論テンプレートとして使用し、宇宙論パラメータの推定をこれまでよりも高精度に行うことができる可能性を示した [45, 118, 100]。

### 非等方銀河クラスタリング解析における高次統計量を持つ情報量の評価

これまでの研究では、非等方銀河クラスタリングの解析にはパワースペクトルや二点相関関数といった二点統計量を用いられてきたが、非等方銀河クラスタリングをより精密に特徴付けるためにはより高次の統計量が必要となる。

我々は、銀河クラスタリングの三点統計量であるバイスペクトルを解析することで得られる、宇宙論的規模における重力理論の検証精度をフィッシャー解析により評価し、銀河クラスタリング解析におけるバイスペクトルの重要性を明らかにした [46]。

### 3.5 keV X 線輝線と Mixed Dark Matter モデルでの Substructure 問題

$\Lambda$ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造の観測結果を説明するが、銀河程度以下の小規模構造の観測は単純には説明できない。具体的には、天の川銀河サイズの銀河周辺に存在する矮小銀河の最大回転速度  $V_{\max}$  に対する分布が一致しない Substructure 問題が知られている。これを Warm Dark Matter (WDM) の自由流減衰により小規模構造を均すことで解決しようとする、Lyman- $\alpha$  吸収線の観測から加わる WDM モデルへの制限と矛盾する。ところが、WDM と CDM を混ぜた Mixed Dark Matter (MDM) モデルならこの制限を緩和し、矛盾を解消できる可能性がある。また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団等から起源不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された。これは Dark Matter 粒子が崩壊した信号の可能性がある。我々は、この信号と CMB 観測等で調べられた宇宙の全物質密度を共に説明できる素粒子モデルは MDM モデルとなることに注目した。

我々は、この 3.5 keV 輝線を説明できる MDM モデルでの構造形成を調べた。 $N$ 体シミュレーションを行うと、天の川銀河サイズ ( $\sim 10^{12} M_{\odot}$ ) のハロー中のサブハローの数は CDM モデルの場合より  $\sim 30$ – $50\%$  減少した。また、 $V_{\max} \geq 9 \text{ km/s}$  のサブハローの最大回転速度に対する分布について、MDM モデルは CDM モデルよりも観測をよく説明できた。即ち、この MDM モデルは 3.5 keV 輝線と Substructure 問題を共に説明できる [47, 149]。

### シミュレーションを用いた球対称崩壊モデルの正当性の検証

X 線や重力レンズによる銀河団観測は近年の観測技術の向上により、これまで以上に精確かつ大規模な宇宙論的応用が期待されている。そのために、最も重要な銀河団質量の推定において従来単純化のために置かれていた球対称の仮定などを必要としない理論的モデルの構築が必要である。

我々はそれを構築する前段階として、そもそも球対称の仮定がどの程度正しいものかを検証した。具体的には、球対称崩壊モデルが、シミュレーション中のダークマターハローの進化をどの程度よく記述しているかを調べた。すなわち、宇宙論的シミュレーションから取り出したハローを構成する粒子の初期時刻から現在までの分布の変化を、球対称崩壊モデルの予測と比較した。その結果、球対称崩壊モデルは、ダークマターハローの半径が最大になる時刻を早く、その最大半径を小さく予測することがわかった。また、しばしば球対称モデルと併せて用いられる、ビリアル定理が予測するハローの現在の半径は、シミュレーション中のハローの半径よりも小さいことを示した。さらにこのずれは、本来ダークマターの運動を記述する方程式であるジーンズ方程式の、速度分散に起因する項によって説明されることもわかった。この結果は球対称のモデルを超えた構築する際の基礎となるものである。

### ブラソフ方程式を用いた無衝突系の数値計算法の開発

宇宙論的構造形成においては、密度分布を質点で近似して表現する  $N$ 体数値シミュレーションが広く用いられ、多くの重要な結果を明らかにしてきた (ちなみに、世界的にもっともその先駆的な研究の一つは、本学の本原太郎先生が 1975 年に行ったものであり、物理的モデル化の本質はその論文に尽きているといっても過言ではない)。一方、この粒子法に基づく方法では、粒子の離散性に起因する系統的誤差の問題が不可避である。したがって、無衝突ボルツマン方程式 (ブラソフ方程式) を、直接数値的に解いて粒子法による結果と比較することには大きな意義がある。我々はフランスのグループと共同で、6次元ブラソフ方程式の数値シミュレーションコードの開発という長期プロジェクトを進めている。今年度は、マクスウェル分布に従う速度分散を持つ球対称系の計算を行い、粒子法の結果と詳細に比較を行った [48]。

#### 1.2.1 星形成

##### 紫外線背景光影響下での種族 III 星の質量分布

初期宇宙で金属量ゼロのガスから形成される星は種族 III 星と呼ばれ、銀河系の星と比べて質量が大きかったと言われている。今回我々はこのような種族 III 星が生まれるような始原ガス雲を宇宙論的シミュ

レーション中で多数同定し、その統計的性質を吟味することで具体的な星質量分布を求めた。本年の研究で特筆すべきはまずガス雲のサンプル数の多さであり、実に1500例以上のガス雲の重力収縮過程を計算した。さらに、種族 III 星の形成過程は周りの他の星が作る紫外線輻射場にも依存することが分かっており、輻射強度に応じて III.1 星、III.2 星の副種族に分かれると言われている。我々は次々と生まれる種族 III 星が作る紫外光輻射強度を全ての星形成ガス雲で評価し、III.1/III.2 別の星質量分布を計算した。その結果、 $100M_{\odot}$  を上回る大質量の星が全体としては多いこと、redshift が下がるにつれて III.2/III.1 星の比が小さくなって平均星質量が下がること、などの性質を初めて予言した [49]。

### 初期宇宙での超大質量星形成におけるバースト的質量降着と紫外線フィードバック

可視・赤外線観測によって、宇宙が10億歳程度未満の時に10億太陽質量程度の超巨大ブラックホールが活動銀河核の中に存在している証拠が幾つか見つかっている。このようなブラックホールの形成過程については詳しく知られていないため、それを説明しようと試みる研究が多くなされている。形成モデルの中でも有力なものが direct collapse モデルである。このモデルでは  $\sim 10^5 M_{\odot}$  の超大質量星が  $\sim 10^5 M_{\odot}$  の中間質量ブラックホールとなる過程を考える。このブラックホールが種となり、ガス降着・ブラックホール合体により成長していくことで超巨大ブラックホールが形成されていく。

超大質量星は、原始星から周囲のガスの急速降着により形成される。ここで問題となるのが星からの紫外線フィードバックである。星から大量の紫外線が放出されると、ガスの降着が抑制されて星の成長が止まり、超大質量星が形成されない。

降着率が一定の場合には、フィードバックが起きず問題にならないことが既に知られている。しかしより現実的には降着率は変動する。特に星の周囲にできる円盤は重力不安定になると分裂片を形成し、これが降着率のバーストを起こす。

本研究では、バースト降着が起きる状況で超大質量星形成を考え、この場合に紫外線フィードバックが星形成に与える影響を調べた。平均降着率が  $\sim 10^{-1} M_{\odot}/\text{yr}$  の場合で、バースト質量降着史を手で与え、1次元の星の進化計算を行った。

降着率が一定の場合には、星は進化の過程で収縮せず単調に膨張していく。その際、有効温度は5000 K程度と低い値に保たれるため、放出される紫外線量は少なく、フィードバックは効かない。一方バースト降着が起きる場合には、降着率が低い時期に星が収縮してしまい、その結果有効温度が上がり電離光子も大量に放出され、フィードバックが効く可能性が出てくる。フィードバックが効く条件は、降着率が低い時期の長さに大きく依存する。これは電離光子放出量が、降着率が低い時間が長いほど星が大きく収縮するために多くなるからである。本研究では、

低降着率期の長さが  $10^3 \text{ yr}$  以上になると、フィードバックが重要になると結論づけた。

### 初期宇宙における巨大ブラックホールの種形成

近年の遠方宇宙の観測により、ビッグバンからわずか8億年あまりで  $10^9 M_{\odot}$  の質量を持つ超大質量ブラックホール (SMBH) が存在する事が分かってきた。このような短い時間で観測されたような大質量天体を形成する機構は未だ知られていない。現在のところ Direct Collapse シナリオと呼ばれる形成プロセスが精力的に研究されている。これは初期宇宙において大きなジーンズ質量を持つガス雲が重力不安定により崩壊し、結果として  $10^5 M_{\odot}$  の超大質量星が形成される。この星が死後 BH に崩壊し観測された SMBH の種となる、というシナリオである。Direct Collapse は初期宇宙における非常に強い輻射を受けたガス雲で起こると考えられている。本研究では、この Direct Collapse 現象が初期宇宙においてどの程度起こりうるかを検証した。

現在のところ宇宙論的初期条件から出発した N 体計算をもとに約40個の Direct Collapse 候補ハロー (DC ハロー) を同定し、その中の20サンプルに対して流体計算を行った。これらのハローにおいては先行研究が示唆するような、超大質量星形成は起こらないということがわかった。これは先行研究では、孤立した環境下にある理想的な DC ハローの進捗が調べられていたのみであり、より現実的な宇宙論的環境下では光源となる星・銀河を含むハローに起因する複雑な相互作用 (潮汐作用、合体) によって崩壊が妨げられるためである。

### 低金属量ガス雲の収縮シミュレーション

金属 (ヘリウムより重い元素) を含まないガス雲の収縮により形成される初代星は現在より大質量 (数10-1000太陽質量) であったと考えられる。一方、現在の星は0.1-1太陽質量である。これまでの研究で、ガス雲中の金属量がある程度上昇すると、ダスト (金属が凝縮して形成される固体微粒子) による冷却でガスが分裂し、小質量星が形成される傾向になったことが明らかになっている。本研究では、ガス雲が分裂するのに必要なダスト量と、それに対応する金属量 (臨界金属量) を求めた。特に、我々は初期宇宙においてより現実的なダストモデルの構築を試みた。

初期宇宙において、ダストは初代星を親星とする超新星によって供給される。また、収縮ガス雲中では、ダストが気相中の金属原子や分子を取り込む現象 (ダスト成長) が効果的である。我々は両方を考慮した準解析的計算を行い、ガス雲の分裂条件に与える影響を調べた。いくつかのモデルパラメータ (超新星の親星質量、星周ガス密度) について計算を行った結果、臨界金属量は  $10^{-5}$  太陽金属量程度と見積もられた。また、先行研究では、初期宇宙のダスト組成・サイズ分布として、現在と同じものを仮定している場合が多いが、本研究のダストモデルと比較

して、最大で 1 桁程度臨界金属量を過小評価していることがわかった [50, 51, 101]。

続いて我々は、低金属量ガス雲の重力収縮過程を 3 次元流体シミュレーションで追うことにより、分裂条件を求めた。超新星ダストモデルとダスト成長を考慮したシミュレーションは本研究が初めてである。また、中心解像度を高めるため、ポロノイ図を用いた新しい粒子分割法 [163] を用いた。結果的に、金属量が  $10^{-6}$  太陽金属量の場合、ダスト冷却が不十分で、ガス雲は分裂せずに単一の原始星が形成された。一方、 $10^{-4}$  太陽金属量の場合、ダスト成長によってダスト冷却が促進され、円盤部分が分裂することが分かった。したがって、臨界金属量は  $10^{-6}$  と  $10^{-4}$  太陽金属量の間にあることが示された [97, 98, 147]。

#### <受賞>

- [1] 須山輝明 日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2015 年 3 月
- [2] 枝和成、JGRG presentation award、The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24)、2014 年 11 月 10 日-14 日

#### <報文>

(原著論文)

- [3] T. Fujita, S. Yokoyama, and J. Yokoyama, “Can a spectator scalar field enhance inflationary tensor mode?,” PTEP **2015** (2015) 043E01.
- [4] K. Kamada and J. Yokoyama, “Topological inflation from the Starobinsky model in supergravity,” Physical Review D **90** (2014) 10, 103520.
- [5] Teruaki Suyama, Yi-Peng Wu & Jun’ichi Yokoyama: “Primordial black holes from temporally enhanced curvature perturbation”, Phys. Rev. D **90**, 043514 (2014), [arXiv:1406.0249].
- [6] Hayato Motohashi & Teruaki Suyama: “Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability”, Phys. Rev. D **91**, 085009 (2015), [arXiv:1411.3721].
- [7] C. Germani, Y. Watanabe and N. Wintergerst, “Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data,” JCAP **1412**, no. 12, 009 (2014) [arXiv:1403.5766 [hep-ph]].
- [8] N. Takeda and Y. Watanabe, “No quasistable scalaron lump forms after  $R^2$  inflation,” Phys. Rev. D **90**, no. 2, 023519 (2014) [arXiv:1405.3830 [astro-ph.CO]].
- [9] T. Terada, Y. Watanabe, Y. Yamada and J. Yokoyama, “Reheating processes after Starobinsky inflation in old-minimal supergravity,” JHEP **1502**, 105 (2015) [arXiv:1411.6746 [hep-ph]].
- [10] Y. Watanabe and J. White, “Multi-field formulation of gravitational particle production after inflation,” arXiv:1503.08430 [astro-ph.CO].
- [11] Y. Watanabe, A. Naruko and M. Sasaki, “Multi-disformal invariance of nonlinear primordial perturbations,” arXiv:1504.00672 [gr-qc].
- [12] K. Kamada, Y. Miyamoto, D. Yamauchi and J. Yokoyama, “Effects of cosmic strings with delayed scaling on CMB anisotropy,” Phys. Rev. D **90**, no. 8, 083502 (2014) [arXiv:1407.2951 [astro-ph.CO]].
- [13] D. Yamauchi and M. J. Lake, “Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings,” arXiv:1410.6267 [hep-ph].
- [14] T. Kobayashi, Y. Watanabe and D. Yamauchi, “Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski,” Phys. Rev. D **91**, no. 6, 064013 (2015) [arXiv:1411.4130 [gr-qc]].
- [15] R. Saito, D. Yamauchi, S. Mizuno, J. Gleyzes and D. Langlois, “Modified gravity inside astrophysical bodies,” arXiv:1503.01448 [gr-qc].
- [16] T. Hiramatsu, Y. Miyamoto and J. Yokoyama, “Effects of thermal fluctuations on thermal inflation,” JCAP **1503**, no. 03, 024 (2015) [arXiv:1412.7814 [hep-ph]].
- [17] T. Nakama, “The double formation of primordial black holes,” JCAP **10**, 040 (2014) [arXiv:1408.0955 [gr-qc]].
- [18] T. Harada, C. Yoo, T. Nakama and K. Koga, “Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation,” Phys. Rev. D **91**, 084057 (2015) [arXiv:1503.03934 [gr-qc]].
- [19] K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, “Testing scenarios of primordial black holes being the seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos and CMB  $\mu$ -distortions,” Phys. Rev. D **90**, 083514 (2014) [arXiv:1405.5999 [astro-ph.CO]].
- [20] K. Takahashi and J. Yokoyama, “Equation of state of dark energy in  $f(R)$  gravity”, Phys. Rev. D **91**, 084060 (2015) [arXiv:1503.07412 [gr-qc]].
- [21] S. Kuroyanagi, K. Nakayama, and J. Yokoyama, “Prospects of determination of reheating temperature after inflation by DECIGO,” PTEP **2015** (2015) 1, 013E02.
- [22] K. Eda, A. Shoda, Y. Ito, and M. Ando “Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas”, Physical Review D, Volume 90, Issue 6, 064039 (2014).
- [23] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi, J. Silk, “Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes”, Physical Review D, Volume 91, Issue 4, 044045 (2015).
- [24] K. Ono, K. Eda, and Y. Itoh “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, Physical Review D, Volume 91, Issue 8, 084032 (2015).

- [25] J. Yokoyama, “Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic,” Proceedings of the Japan Academy ser B **90** (2015) 422–432.
- [26] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh and M. Ando, “Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas”, Phys. Rev. D **90**, no. 6, 064039 (2014) [arXiv:1406.7059 [gr-qc]].
- [27] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, “Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes”, Phys. Rev. D **91**, no. 4, 044045 (2015) [arXiv:1408.3534 [gr-qc]].
- [28] K. Ono, K. Eda and Y. Itoh, “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, Phys. Rev. D **91**, no. 8, 084032 (2015) [arXiv:1503.01231 [gr-qc]].
- [29] T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, “Reheating the universe once more: the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales,” Phys. Rev. Lett. **113**, 061302 (2014) [arXiv:1403.5407].
- [30] T. Namikawa, D. Yamauchi and A. Taruya, “Future detectability of gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments,” Phys. Rev. D **91**, no. 4, 043531 (2015) [arXiv:1411.7427 [astro-ph.CO]].
- [31] D. Yamauchi, K. Takahashi and M. Oguri, “Constraining primordial non-Gaussianity via a multi-tracer technique with surveys by Euclid and the Square Kilometre Array,” Phys. Rev. D **90**, no. 8, 083520 (2014) [arXiv:1407.5453 [astro-ph.CO]].
- [32] Masato Shirasaki, Shunsaku Horiuchi, & Naoki Yoshida: “Cross correlation of cosmic shear and extragalactic gamma-ray background: Constraints on the dark matter annihilation cross section”; Physical Review D, **90** (2014) 063502
- [33] Masato Shirasaki “Weak Gravitational Lensing as a Probe of Physical Properties of Substructures in Dark Matter Halos”; The Astrophysical Journal, **799** (2015) 188
- [34] Yuichi Higuchi, Masamune Oguri, & Masato Shirasaki: “Statistical Properties of Filaments in Weak Gravitational Lensing”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **441** (2014) 745-756
- [35] Robert M. Quimby, Masamune Oguri, Anupreeta More, Surhud More, Takashi J. Moriya, Marcus C. Werner, Masayuki Tanaka, Gaston Folatelli, Melina C. Bersten, Keiichi Maeda, & Ken’ichi Nomoto: “Detection of the Gravitational Lens Magnifying a Type Ia Supernova”, Science, **344** (2014) 396-399
- [36] Masafumi Ishigaki, Ryota Kawamata, Masami Ouchi, Masamune Oguri, Kazuhiro Shimasaku, & Yoshiaki Ono: “Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at  $z \sim 5 - 10$  for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization”, The Astrophysical Journal, **799** (2015) 12
- [37] Naohisa Inada, Masamune Oguri, Cristian E. Rusu, Issha Kayo, & Tomoki Morokuma: “Discovery of Four Doubly Imaged Quasar Lenses from the Sloan Digital Sky Survey”, The Astronomical Journal, **147** (2014) 153
- [38] Cristian E. Rusu, Masamune Oguri, Yosuke Minowa, Masanori Iye, Anupreeta More, Naohisa Inada, & Shin Oya: “Adaptive Optics Observations of the Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1405+0959”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **444** (2014) 2561-2570
- [39] Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Poshak Gandhi, Takashi Horiuchi, Suzuka Koyamada, & Rina Okamoto: “Resolving the Clumpy Structure of the Outflow Winds in the Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, The Astrophysical Journal, **794** (2014) L20
- [40] Masamune Oguri: “A Cluster Finding Algorithm Based on the Multiband Identification of Red Sequence Galaxies”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **444** (2014) 147-161
- [41] Takashi Okamoto, Ikkoh Shimizu, & Naoki Yoshida, “Reproducing the Cosmic Evolution of Galaxy Population from  $z = 4$  to 0”, PASJ, **66** (2014) 70
- [42] Toshiya Kashiwagi, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, and Kazuhiro Yahata: “Modeling the anomaly of surface number densities of galaxies on the Galactic extinction map due to their FIR emission contamination”, The Astrophysical Journal, **799**(2014)132 (arXiv:1412.0354)
- [43] Toshiya Kashiwagi and Yasushi Suto: “Constraining spatial extent and temperature of dust around galaxies from far-infrared stacking image analysis”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society (2015) in press.
- [44] Masamune Oguri & Yen-Ting Lin: “Inferring Host Dark Matter Halo Masses of Individual Galaxies from Neighboring Galaxy Counts”, The Astrophysical Journal, **801** (2015) 94
- [45] Takahiro Nishimichi, Akira Oka: “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”, 2014, *Physical Review D* **89**, 043509,
- [46] Yong-Seon Song, Atsushi Taruya, Akira Oka: “Cosmology with anisotropic galaxy clustering from the combination of power spectrum and bispectrum”, 2015, arXiv:1502.03099
- [47] Akira Harada, Ayuki Kamada, Naoki Yoshida: “Structure formation in a mixed dark matter model with decaying sterile neutrino: the 3.5

- keV X-ray line and the Galactic substructure”, arXiv:1412.1592.
- [48] S. Colombi, T. Sousbie, S. Peirani, G. Plum, and Y. Suto: “Vlasov versus  $N$ -body: the Hénon sphere”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society (2015) in press.
- [49] Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai, & Harold W. Yorke: “Primordial star formation under the influence of far ultraviolet radiation: 1540 cosmological haloes and the stellar mass distribution”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **448** (2015) 568
- [50] Stefania Marassi, Gen Chiaki, Raffaella Schneider, Marco Limongi, Kazuyuki Omukai, Takaya Nozawa, Alessandro Chieffi & Naoki Yoshida: “The Origin of the Most Iron-poor Star”, The Astrophysical Journal, **794** (2014) 100
- [51] Gen Chiaki, Stefania Marassi, Takaya Nozawa, Naoki Yoshida, Raffaella Schneider, Kazuyuki Omukai, Marco Limongi & Alessandro Chieffi: “Supernova dust formation and the grain growth in the early universe: the critical metallicity for low-mass star formation” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **446** (2015) 2659
- [52] Ikkoh Shimizu, Akio Inoue, Takashi Okamoto & Naoki Yoshida: “Physical Properties of UDF12 Galaxies”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **440** (2014) 731
- [53] Ken Osato, Masato Shirasaki & Naoki Yoshida: “Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias”, ArXiv:1501.02055
- [54] Matthew B. Bayliss, Jane R. Rigby, Keren Sharon, Eva Wuyts, Michael Florian, Michael D. Gladders, Traci Johnson, & Masamune Oguri: “The Physical Conditions, Metallicity and Metal Abundance Ratios in a Highly Magnified Galaxy at  $z = 3.6252$ ”, The Astrophysical Journal, **790** (2014) 144
- [55] Steve Schulze, et al.: “GRB 120422A/SN 2012bz: Bridging the Gap between Low- and High-Luminosity Gamma-Ray Bursts”, Astronomy & Astrophysics, **566** (2014) A102
- [56] Yousuke Utsumi, Satoshi Miyazaki, Margaret J. Geller, Ian P. Dell’Antonio, Masamune Oguri, Michael J. Kurtz, Takashi Hamana, & Daniel G. Fabricant: “Reducing Systematic Error in Weak Lensing Cluster Surveys”, The Astrophysical Journal, **786** (2014) 93
- [57] Zhang Yichen, Jonathan C. Tan, & Takashi Hosokawa: “Radiation Transfer of Models of Massive Star Formation. III. The Evolutionary Sequence”, The Astrophysical Journal, **788** (2014) 166
- (会議抄録)
- [58] K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, “Relationship between dark matter properties and primordial black holes as seeds of supermassive black holes”, Proceedings of JGRG23, 531-538, 2013.
- (学位論文)
- [59] Yuhei Miyamoto: “Effects of thermal fluctuations on phase transitions in the early Universe” (博士論文)
- [60] Toshiya Kashiwagi: “Stacking image analysis of SDSS galaxies in far-infrared and its implications for the Galactic extinction map” (博士論文)
- [61] Masato Shirasaki: “Probing Cosmic Dark Matter and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing Statistics” (博士論文)
- [62] 高橋 一史: 「 $f(R)$  重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式の研究」 (修士論文)
- [63] 林中貴宏: 「de Sitter 時空における Schwinger 効果」 (修士論文)
- [64] 早津夏己: “数値シミュレーションで探るサブミリ輝線銀河の検出可能性と統計的特徴” (修士論文)
- [65] 原田了: “重力崩壊型超新星爆発のニュートリノ加熱メカニズム” (修士論文)
- [66] 櫻井祐也: “初期宇宙における超大質量星形成と超大ブラックホール” (修士論文)
- (著書)
- [67] 須藤 靖: 水素エネルギー協会 (編) “水素の事典”, 朝倉書店 (2014 年 4 月刊行, 728 ページ, 2.2 節 宇宙の始まりと水素 執筆)
- [68] 須藤 靖: “宇宙人の見る地球”, 毎日新聞社 (2014 年 5 月刊行, 180 ページ)
- [69] 吉岡一男・有本信雄・山田亨・須藤 靖: “宇宙とその進化”, 放送大学印刷教材 (2015 年 3 月刊行, 12 ~ 15 章 執筆)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [70] Jun’ichi Yokoyama, “Prospects of determination of thermal history after inflation with DECIGO” COSMO 2014, University of Chicago, 2014/8/26.
- [71] Kazunari Eda, “Searching for gravitational waves using triple-output torsion-bar antennas”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Nagano, 2014/08/02-2014/08/04.
- [72] Kazunari Eda, “Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna”, The 24th Japan General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, 2014/11/12.

- [73] Yousuke Itoh, "KAGALI Coding Style Guide: Its motivation and introduction" A Satellite meeting of the The 7th Korea-Japan Workshop on KAGRA, 富山大学、Toyama, 2014/12/19-20.
- [74] Kazunari Eda, "A new estimation method for masses of isolated neutron stars using gravitational waves", , 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, 広島大学、Hiroshima, 2015/02/19-21.
- [75] T. Suyama, "Black hole perturbation in modified gravity," The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation-JGRG24, Kavli IPMU, The University of Tokyo, Nov. 10 - 14.
- [76] T. Suyama, "Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability," 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Hiroshima University, Feb. 19 - 21.
- [77] Y. Watanabe & N. Takeda, "Self-production of Scalar Gravitons after Starobinsky Inflation," AP-CosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Aug. 2013
- [78] Y. Watanabe, "New Higgs Inflation vs. Starobinsky Inflation: status after Planck2013 and BICEP2 results," Cosmology after Planck, Munich Institute for Astro- and Particle Physics, Germany, Sep. 2013
- [79] Y. Watanabe, C. Germani & N. Wintergerst, "Self-unitarization of New Higgs Inflation," 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Kavli IPMU, The University of Tokyo, Nov. 2014
- [80] Y. Watanabe, C. Germani & N. Wintergerst "Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data," 4th UTQuest B-mode Cosmology, KEK, Feb. 2015
- [81] Daisuke Yamauchi: "Constraining primordial non-Gaussianity via multitracer technique with surveys by Euclid and Square Kilometre Array"; CosPA 2014 (University of New Zealand, New Zealand, December, 2014)
- [82] Daisuke Yamauchi: "Constraining primordial non-Gaussianity via multitracer technique with Euclid and SKA"; The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (IPMU, Japan, November, 10, 2014)
- [83] T. Hiramatsu, Y. Miyamoto, and J. Yokoyama, "Effects of thermal fluctuations at the end of thermal inflation", The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Kavli IPMU, Chiba, Japan, Nov. 10 - 14, 2014.
- [84] T. Nakama, "Scalar perturbations induced by the second-order effects of primordial gravitational waves," RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Nagano, Japan Jul. 31 - Aug. 4.
- [85] T. Nakama, "Scalar perturbations generated by the second-order effects of gravitational waves and their cosmological implications" (Poster), The 18th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO 2014), University of Chicago, Chicago, Aug. 25 - 29.
- [86] T. Nakama, "Investigating tensor perturbations on small scales from their second-order effects to generate scalar perturbations," The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, Tokyo, Japan, Nov. 10 - 14.
- [87] T. Nakama, "Tensor perturbations as a source of scalar perturbations," CosPA 2014 (the 10th Asia-Pacific Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics), University of Auckland, Auckland, New Zealand, Dec. 8 - 12.
- [88] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, "Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon", RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Asama Spa "Jimotoya", Matsumoto, Nagano, July 31- August 4, 2014
- [89] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, "Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized G-inflation," The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, Japan, November 10 - 14 , 2014
- [90] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, "Large tensor mode, field range bounds, and consistency in generalized G-inflation," 30th Institut d'astrophysique de Paris Colloquium "The Primordial Universe after Planck," Institut d'Astrophysique de Paris, Paris, France, December 15 - 19, 2014
- [91] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yousuke Itoh, and Masaki Ando, "Searching for gravitational waves using triple-output torsion-bar antennas", RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Nagano, Aug. 2-4, 2014.
- [92] Kazunari Eda, Kenji Ono, and Yousuke Itoh, "A new estimation method for masses of isolated neutron stars using gravitational waves", 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Hiroshima, Hiroshima University, Feb. 19-21, 2015.
- [93] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yousuke Itoh, and Masaki Ando, "Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna" The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Nov. 10-14, 2014.
- [94] Kazunari Eda, "Gravitational waves as a probe of dark matter mini-spikes", Colloquium at the Albert Einstein Institutes, Hannover, Germany, Sep. 18, 2014.

- [95] K. Takahashi: “Cosmological evolution of the chameleon field in the presence of a compact object”, JGRG24, (Kavli IPMU, Tokyo, 11/12, 2014)
- [96] Kento Masuda: “Low Density Planets around Kepler-51 Revealed with Transit Timing Variations”; Exoplanetary Science 2014 (Quy Nhon, Vietnam, 4/20-26, 2014)
- [97] Gen Chiaki: “Hydrodynamic simulations of collapsing gas clouds with low metallicities” The physics of first star and galaxy formation (Edinburgh, 6/10–12, 2014)
- [98] Gen Chiaki: “Hydrodynamic simulations of collapsing gas clouds with low metallicities” EWASS 2014 (Geneve, 6/30–7/4, 2014)
- [99] Masamune Oguri: “Strong Gravitational Lenses in the 2020s”; Thirty Meter Telescope Science Forum (Tucson, USA, July 2014)
- [100] Akira Oka: “Simulating the Anisotropic Clustering of the SDSS DR7 LRGs with Subhalos”; RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics (Poster, Nagano, 7/31, 2014)
- [101] Gen Chiaki: “The effect of grain growth on star formation in low-metallicity collapsing gas clouds” Cosmic Dust (Osaka, 8/4–8, 2014)
- [102] Masato Shirasaki: “Cross-Correlation of Cosmic Shear and Extragalactic Gamma-ray Background”; International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO 2014) (Chicago, 8/25-29, 2014)
- [103] Sunmyon Chon: “The formation of SMBH in cosmological simulation”; The 6th EAST-ASIAN NUMERICAL ASTROPHYSICS MEETING (Kyung Hee University, Suwon, Korea, 9/15-19, 2014)
- [104] Masato Shirasaki: “Dark Matter Annihilation Cross Section Constraints from the Cross-correlation of Cosmic Shear and Extragalactic Gamma-ray Background”; Fifth International Fermi Symposium (Nagoya, 10/20-24, 2014)
- [105] Masamune Oguri: “Gravitationally Lensed Supernovae”; Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing (Kavli IPMU, November 2014)
- [106] Kento Masuda, Othman Benomar, Hiromoto Shibahashi, Yasusi Suto: “Spin-orbit angle from the joint analysis of the Rossiter-McLaughlin effect, transit lightcurve, and asteroseismology: mild misalignment in a multi-transiting planetary system,” The Workshop for Exoplanetary Science (Kunming, China, 11/17-19, 2014)
- [107] Sunmyon Chon: “The formation of SMBH in cosmological simulation”; Enzo Workshop 2014 (Hokkaido University, 11/18-21, 2014)
- [108] N. Hayatsu, N. Yoshida, Y. Matsuda, & I. Shimizu: “Detectability and Statistical Properties of the [CII] Emitter in Cosmological Hydrodynamics Simulations”; Revolution in Astronomy with ALMA -The 3rd Year- (Tokyo, 12/8-11, 2014)
- [109] Ken Osato, Masato Shirasaki, Naoki Yoshida: “Peak-halo connection in weak lensing surveys with baryonic N-body simulations”; Astroparticle View of Galaxy Clusters (Hiroshima, Japan, March 24-26, 2015)
- [110] Takashi Hosokawa, & Shu-ichiro Inutsuka: “Generation of dark molecular gas in magnetized PDR”; HI workshop (Nagoya university, 3/28, 2015)
- 招待講演
- [111] Jun’ichi Yokoyama, “Cosmology of the Higgs field”, Preworkshop on gravitation and cosmology, National Tsinghua University, Taiwan, 2014/4/11.
- [112] Jun’ichi Yokoyama, “Gravitational Waves: Near future, Far future” CosPA 2014, University of Auckland, New Zealand, 2014/12/11.
- [113] Jun’ichi Yokoyama, “Inflationary Magnetogenesis” Primordial Universe After Planck, IAP, France, 2014/12/17.
- [114] Jun’ichi Yokoyama, “Discussion session” The fourth UTQuest Workshop B-mode cosmology, IPNS, KEK, 2015/2/19.
- [115] Yousuke Itoh, “Status of KAGRA and gravitational wave astronomy”, 2nd International Workshop on Theoretical and Computational Physics, Buon Ma Thuot, Vietnam, 2014/07/28-31.
- [116] T. Suyama, “Reheating the Universe Once More - the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales,” IAS workshop on New Perspectives on Cosmology, HKUST, Hong Kong, May. 19 - 23.
- [117] Naoki Yoshida: “Formation of Early Blackholes”, Focus Week on Hyper Accretion (Kashiwa, Japan, April 9, 2014)
- [118] Akira Oka: “Redshift-Space Distortions; Applications to Observations”; invited talk at CosKASI Workshop (Oral, Korea, 4/21, 2014)
- [119] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD extinction map and discovery of FIR emission of SDSS galaxies and quasars by stacking image analysis”; invited talk at the 10th Sino-Germany Workshop on Galaxy Formation and Cosmology “ From Dark Matter to Galaxies”(Xian, China; May 22, 2014)
- [120] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars”, Physics of First Star and Galaxy Formation (Edinburgh, June 10, 2014)
- [121] Takashi Hosokawa: “The Endgame of the First Star Formation: protostellar evolution and radiative feedback” Physics of First Stars and Galaxy Formation (Edinburgh, UK, 6/15, 2014)
- [122] Naoki Yoshida: “Structure Formation in the Early Universe”, Unsolved Problems in Astrophysics (Budapest, Hungary, July 3, 2014)



- [123] Takashi Hosokawa: “The first stars and SMBHs” The 6-th East-Asian Numerical Astrophysics Meeting (Suwon, Korea, 9/15, 2014)
- [124] Yasushi Suto: “Spatial extent of dust from stacking image analysis of SDSS galaxies over IRAS and AKARI maps”; invited talk at the 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korea Institute for Advanced Study; Nov.5, 2014)
- [125] Yasushi Suto: “Workshop summary: from After Dark to Beyond Dark” summary talk at the 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korea Institute for Advanced Study; Nov.6, 2014)
- [126] Masamune Oguri: “Weak lensing with SuMIRe HSC/PFS”; Dawn of New Cosmology: Opportunities and Challenges in CMB Polarization and Large Scale Structure (ASIAA, Taiwan, R.O.C., December 2014)
- [127] Masamune Oguri: “Scatter and bias in cluster mass estimates”; Astroparticle View of Galaxy Clusters (Hiroshima Univ., March 2015)
- [128] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, JST Symposium on Big Data Application (Tokyo, Japan, March 5, 2015)
- [129] Naoki Yoshida: “Subaru Hyper-Suprime Cam Survey and Big Data Cosmology”, 10th International Workshop on Databases in Networked Information Systems (Aizu, Japan, March 23, 2015)
- (国内会議)  
一般講演
- [130] 枝和成、『3出力ねじれ振り子型検出器 (TOBA) によるパラメータ決定精度の向上』、日本物理学会 2014 年秋季年会、佐賀大学、佐賀県、2014 年 9 月 21 日
- [131] 伊藤洋介、“KAGRA Data Analysis Subsystem status report”, KAGRA f2f@Toyama Univ. 2 Aug. 2014.
- [132] 渡邊悠貴, Jonathan White, “ヒッグス凝縮場による非一様再加熱からの宇宙論的制限,” 第 70 回日本物理学会, 早稲田大学, Mar. 2015
- [133] 山内大介: “Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings”; 物理学会 (早稲田大学, 3/23, 2014)
- [134] 山内大介: “Constraining non-Gaussianity with multitracer technique”; 第 3 回観測的宇宙論ワークショップ (名古屋大学, 11/28, 2014)
- [135] 山内大介: “Constraining non-Gaussianity with multi-tracer technique”; 物理学会 (佐賀大学, 9/20, 2014)
- [136] 平松尚志、宮本裕平、横山順一、“熱的インフレーションにおける揺動効果”, 日本物理学会秋季大会、佐賀大学、佐賀、2014 年 9 月 19 日
- [137] 中間 智弘、須山照明: “テンソルゆらぎの二次の効果で生成されるスカラーゆらぎとその宇宙論的帰結”; 日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、佐賀、日本、2014 年 9 月 18 日 - 21 日.
- [138] 中間 智弘、須山照明、横山順一: “テンソルゆらぎの二次の効果で生成されるスカラーゆらぎとその宇宙論的帰結 (2)”; 日本物理学会 2015 年春季大会、早稲田大学、東京、日本、2015 年 3 月 21 日 - 24 日.
- [139] 國光太郎、須山輝明、渡辺 悠貴、横山順一、“Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon”、第 44 回天文・天体物理若手夏の学校、信州・戸倉上山田温泉ホテル圓山荘、2014 年 7 月 28 日-31 日
- [140] 枝和成、正田亜八香、伊藤洋介、安東正樹、「3出力ねじれ型振り子検出器 (TOBA) によるパラメーター決定精度の向上」、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、2014 年 9 月 18 日-21 日
- [141] Kazunari Eda, “Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna” Joint Seminar, University of Tokyo, Hongo, Dec. 1, 2014.
- [142] 高橋 一史: 「コンパクト天体の存在下におけるカメレオン場の宇宙論的進化」、日本物理学会秋季大会 (佐賀大学、9/19, 2014)
- [143] 林中貴宏、藤田智弘、横山順一: “de Sitter 時空における Schwinger 効果”; 日本物理学会 2015 年春季大会、早稲田大学、東京、日本、2015 年 3 月 21 日 - 24 日.
- [144] 大栗 真宗: “種族合成モデルを用いた銀河団同定法の開発”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11, 2014)
- [145] 細川 隆史、Rolf Kuiper、平野信吾、Harold W. Yorke、大向一行、吉田直紀: “Forming the First Stars in 3D: 電離領域形成に伴う質量降着抑制”; 天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学、9/13, 2014)
- [146] 白崎 正人: “ガンマ線背景放射と弱重力レンズの相関解析による暗黒物質対消滅の制限”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [147] 千秋元、平野信吾、吉田直紀、野沢貴也: “低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション II” 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [148] 早津夏己、吉田直紀、松田有一、清水一紘: “数値シミュレーションで探る遠方 [CII] 輝線銀河の検出可能性と統計的特徴”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11 - 13)
- [149] 原田了、鎌田歩樹、吉田直紀: “3.5 keV X 線輝線と Mixed Dark Matter モデルでの Substructure 問題”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (口頭発表, 山形大学, 9/13, 2014)
- [150] 櫻井祐也、細川隆史、吉田直紀: “時間変動降着率下での超大質量星形成計算”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [151] 大里 健、白崎 正人、吉田 直紀: “重力レンズ効果に対するバリオンの影響”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/13, 2014)
- [152] 岡部泰三、柏木俊哉、須藤靖: “AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析”; CIB ワークショップ (宇宙航空研究開発所, 10/6-8, 2014)
- [153] 鄭 昇明: “初期宇宙における巨大ブラックホールの種形成” 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 2 回ワークショップ (筑波大学, 11/3-4, 2014)

- [154] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: “初期宇宙における超大質量星形成過程の計算”; 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第2回ワークショップ(筑波大学, 11/3-4, 2014)
- [155] 大里 健、白崎 正人、吉田 直紀: “弱重力レンズ効果を用いたパラメータ推定に対するバリオンの影響”; 第三回観測的宇宙論ワークショップ(名古屋大学, 11/27, 2014)
- [156] 鄭 昇明: “初期宇宙における超大質量 BH の種形成” 第27回 理論懇シンポジウム(国立天文台、12/24-26, 2014)
- [157] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト的降着と間欠的 UV feedback”; 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/18, 2015)
- [158] 鄭昇明: “懼??宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性懼?? 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/19-21, 2015)
- [159] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: “初期宇宙における超大質量星形成の数値計算”; 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/19-21, 2015)
- [160] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: “初期宇宙における超大質量星形成: バースト降着のもとでの星の進化”; コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域(京都大学, 2/12-14, 2015)
- [161] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: “初期宇宙での超大質量星形成におけるバースト的質量降着と輻射フィードバックの影響”; 大質量星の進化・活動現象と星の回転(北海道大学, 2/18-20, 2015)
- [162] 吉田 直紀: “大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合”; 「京からポスト京へ向けて」シンポジウム(紀尾井ホール, 3/12, 2015)
- [163] 千秋元、吉田直紀: “ボロノイ図を用いた粒子分割法” 日本天文学会 2015 年春季年会(大阪大学, 3/18-21, 2015)
- [164] 須藤大地、大里健、北山哲、佐々木伸、須藤靖: “球対称崩壊・楕円体崩壊モデルの再考”; 日本天文学会 2015 年春季年会(大阪大学 2015 年 3 月 19 日)
- [165] 早津夏己、吉田直紀、松田有一、清水一紘: “数値シミュレーションで探る遠方[CII]光度関数の赤方偏移進化”; 日本天文学会 2015 年春季年会(大阪大学, 3/18 - 21, 2015)
- [166] 大里 健、白崎 正人、吉田 直紀: “バリオンを考慮した弱重力レンズ効果による宇宙論パラメータ推定”; 日本天文学会 2015 年春季年会;(大阪大学, 3/21, 2015)
- 招待講演
- [167] 横山順一 「一般相対論入門」KAGRA データ解析スクール@RESCEU 東京大学 2014 年 4 月 18 日
- [168] 横山順一 「原始重力波直接検出への期待」日本物理学会 2014 年秋季大会 重力波シンポジウム 佐賀大学 2014 年 9 月 19 日
- [169] 横山順一 「初期宇宙と重力波」 DECIGO 検討会 京都大学理学部 2014 年 10 月 26 日
- [170] 伊藤洋介、『重力波で探る巨大ブラックホールの物理量』(2014 年 4 月 24 日発表) 「活動銀河核ワークショップ ?2020 年代への展望?」、国立天文台(三鷹)、2014 年 4 月 23 日(水)・24 日(木)
- [171] 伊藤洋介、『重力波天文学』、KAGRA データ解析スクール @大阪大学 2014 大阪大学, 23-24 Nov. 2014.
- [172] 須山輝明 “原始密度揺らぎに関する話題” 第 27 回理論懇シンポジウム、国立天文台、2014 年 12 月 24 日 - 26 日.
- [173] 須山輝明 “原始密度ゆらぎ生成機構の峻別法の発見” 日本物理学会 第 70 回年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月 21 日 - 24 日.
- [174] 山内大介: “SKA による宇宙論”; SKA-Japan ワークショップ(国立天文台, 3/3, 2015)
- [175] 大栗 真宗: “重力レンズ研究の最近の進展”; 3rd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe (東京大学, 4/19, 2014)
- [176] 吉田 直紀: “広域サーベイによるダークマター探索”; 3rd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe (東京大学, 4/20, 2014)
- [177] 吉田 直紀: “初期宇宙での化学反応”; 第 11 回 AMO 検討会(大阪大学, 6/7, 2014)
- [178] 須藤靖: “ダークバリオンのサイエンス”、研究会「2020 年代の高エネルギー宇宙物理学: X 線・懼線天文学の展望」(宇宙科学研究所、2014 年 8 月 23 日)
- [179] 大栗 真宗: “Weak lensing with Subaru Hyper Suprime-Cam”; 第 3 回観測的宇宙論ワークショップ(名古屋大学, 11/27, 2014)
- [180] 細川 隆史: “大質量星の形成と回転”; “大質量星の進化・活動現象と星の回転” 研究会(北海道大学, 2/18, 2015)
- [181] 吉田 直紀: “初代星の形成”; “大質量星の進化・活動現象と星の回転” 研究会(北海道大学, 2/20, 2015)
- (セミナー)
- [182] 横山順一 「CMB 偏光による原始重力波の発見と宇宙論」東京大学物理学教室ビッグバン宇宙国際研究センター合同談話会 2014 年 4 月 22 日
- [183] Kazunari Eda, “Gravitational waves as a probe of dark matter mini-spike”, Albert Einstein Institute, 2014/09/18.
- [184] 伊藤洋介、『KAGRA データ解析スクール』、KAGRA データ解析ミーティング(ネット会議)、2014 年 11 月 7 日
- [185] 伊藤洋介、『単独パルサーの重力波観測による質量決定』、新潟大学コロキウム、新潟大学、2014 年 12 月 2 日
- [186] 伊藤洋介、『重力波天文学「重力波検出器をつくり重力波をみつけよう!!」(データ解析担当、2015/03/06)、宇宙線研究所スプリングスクール 2015、宇宙線研究所、2015 年 3 月 3 日(火)?7 日(土)
- [187] 須山輝明 「小スケールの宇宙初期揺らぎを探る」弘前大学外圏宇宙セミナー 2014 年 9 月 24 日

- [188] 須山輝明 “Black hole perturbation in Horndeski theory” 京都大学基礎物理学研究所 2015年2月18日
- [189] Y. Watanabe “New Higgs Inflation vs. Starobinsky Inflation: status after Planck2013 and BICEP2 results,” 早稲田大学, 理論物理学セミナー, 2014年5月16日
- [190] Y. Watanabe “Gravitational reheating after inflation,” Theoretical Physics Group Seminar, Technische Universitaet Muenchen, Germany, 9th Sep. 2014
- [191] Daisuke Yamauchi: “Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski”; APC theory seminar (APC, France, February, 10, 2015)
- [192] T. Kunimitsu, “Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized G-inflation,” Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, RESCEU, University of Tokyo, Japan, December 1, 2014
- [193] Naoki Yoshida: “The Dark Age of the Universe”, ASIAA Colloquium (Taipei, Taiwan, May 13, 2014)
- [194] 細川 隆史: “The First Stars: their diversity and beyond”; IoA 談話会 (東京大学天文教育センター, 5/15, 2014)
- [195] Masamune Oguri: “Gravitationally lensed supernovae”; Colloquium at Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (Taipei, Taiwan, R.O.C., 8/20, 2014)
- [196] Naoki Yoshida: “Matter Distribution around Galaxies”, Astroparticle seminar at UC Riverside (Riverside, USA, December 2, 2014)
- [197] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars and Galaxies”, UCLA Astronomy Colloquium (Los Angeles, USA, December 3, 2014)
- [198] Naoki Yoshida: “Putting the Universe on a Computer”, CRA Distinguished Lecture (Atlanta, USA, December 5, 2014)
- [199] Masamune Oguri: “Gravitationally lensed supernovae”; Colloquium at Department of Physics, National Tsing Hua University (Hsinchu, Taiwan, R.O.C., 12/12, 2014)
- [200] Naoki Yoshida: “Structure Formation in the Universe”, ISAS Space Science Colloquium (Sagamihara, Japan, January 14, 2015)
- [201] Ken Osato: “Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias”; Kavli IPMU Astrophysics seminar (Kashiwa, Japan, March 31, 2015)
- (講演)
- [202] 横山順一、「たくさんの宇宙」朝日カルチャーセンター 新宿 2014年5月10日
- [203] 横山順一、「死んだらどうなる?」朝日カルチャーセンター 新宿 2014年5月10日
- [204] 横山順一、「宇宙論入門」 埼玉県立高校見学会 2014年11月14日 東京大学
- [205] Jun'ichi Yokoyama, “One-dollar proposal,” AAPS General Council Meeting, 2015/2/7 Seoul, Korea.
- [206] Yasushi Suto: “Different cultures, same science”, UTRIP lecture (University of Tokyo, July 9, 2014)
- [207] 吉田 直紀: “ダークマターとダークエネルギー”; SSH 講演 (埼玉県立川越高校, 7/18, 2014)
- [208] 吉田 直紀: “宇宙のダークマターの謎”; ナガセ 大学 学部研究会 (東京国際フォーラム, 8/21, 2014)
- [209] 吉田 直紀: “宇宙 138 億年の進化”; 日本天文学会公開講演会 (山形テルサ, 9/14, 2014)
- [210] 吉田 直紀: “山頂で見る夜空、地下で見る物質”; 桐光学園訪問授業 (神奈川県 私立桐光学園, 11/15, 2014)
- [211] 吉田 直紀: “星と銀河の誕生”; じっくり学ぶ宇宙誕生の歴史 (名古屋 中日文化センター, 12/28, 2014)
- [212] 吉田 直紀: “ファーストスター”; コズミックフロントプラネタリウム版記念 講演会 (渋谷プラネタリウム, 12/28, 2014)

## 2 銀河と星の共進化論

### ——観測データ解析に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (茂山・戸谷・須田)

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

### 2.1 宇宙及び系外銀河

#### FastSound サーベイの推進 (戸谷)

すばる望遠鏡戦略枠プログラムとして採択されている、FastSound 計画の推進を行った。2年間の観測を2014年7月に終了し、データ解析と論文作成が進行中で、 $z \sim 1.3$ の宇宙における初めての大規模三次元銀河地図が描き出されつつある。赤方偏移歪みもほぼ予想通りの精度で検出され、最終目標の一般相対性理論の検証に向けて解析を進めている。すでにシリーズ論文のうち第一論文は受理済み、第二・第三論文は投稿中、宇宙論的示唆を報告する予定の第四論文は準備中である。また、FastSound 専用の輝線自動検出ソフトの論文も出版された。また、一般に銀河分光サーベイで赤方偏移歪み効果による一般相対論の検証を行う際の、ハローバイアスの影響について、大規模宇宙論シミュレーションを用いてを調べた [1, 2, 3, 4, 5, 38, 39, 49]。

#### Fast Radio Burst の研究 (戸谷)

2013年、Fast Radio Burst (FRB) と呼ばれる、継続時間わずか数 msec で宇宙論的な遠方からやってきている新種の変動天体が発見された。戸谷は、この FRB が、連星中性子星の合体でうまく説明できるという理論を提唱しているが、その検証のため、すばる望遠鏡での kilonova の検出可能性を議論した。また、実際にすばる望遠鏡による FRB 追観測チームを立ち上げ、観測時間を獲得して追観測を始めている [6, 40, 51]。

#### ガンマ線バーストによる宇宙再電離の研究 (戸谷)

2013年6月に発生した GRB 130606A は、 $z = 5.913$  で非常に明るく、宇宙再電離のプロブとして理想的であった。戸谷はすばる GRB チームとしての共同研究で、すばる望遠鏡で取得した可視残光の高精度スペクトルを理論解析し、GRB の周囲に中性度 10%以上の銀河間水素ガスが存在している兆候を、ライマン  $\alpha$  線の減衰翼の中に発見した。ガンマ線バーストで初めて銀河間中性水素の兆候が得られたもので、 $z = 6$  の宇宙はまだ完全に再電離が終わっていないことを示唆する [7, 50]。

#### 新しいフィードバックを考慮した宇宙論的銀河形成モデル (戸谷)

戸谷は、国立天文台 PD の真喜屋龍らとの共同研究で、宇宙論的な銀河形成モデルに、銀河の平均的な dust opacity に依存する新しいフィードバックを入れて、銀河の光度関数の進化などを調べた。その結果、超新星のみのフィードバックを考慮した従来のモデルでは説明できなかった光度関数の faint end slope の傾きが、うまく説明できることがわかった [8]。

#### すばる望遠鏡による遠方 Ia 型超新星発生頻度の研究 (戸谷)

戸谷は、京大 D3 の奥村純らとの共同研究で、すばる XMM-Newton Deep Survey で発見された遠方 Ia 型超新星のデータから、 $z \sim 1$  での発生頻度を測定した。この赤方偏移では最も統計の大きいサンプルである [9]。

### 2.2 銀河系及び近傍矮小銀河

#### 宇宙初期における初期質量関数の変遷 (須田, 小宮)

連星進化種族合成モデルを用いて、宇宙初期に誕生した星の初期質量関数を推定する研究を推進してき

た。宇宙最初期に誕生したと考えられている金属欠乏星には、炭素過剰星が数多く含まれていることが知られている。これらの炭素過剰星の起源は AGB 星からの連星間質量輸送によるものであると考えることが妥当であり、従って、金属欠乏星は中質量星、大質量星が支配的な初期質量関数の下で星形成が行われたことが推定される。連星種族合成モデルによって炭素過剰星の割合を調べた結果、初期質量関数の変遷が起こる時代は、太陽の百分の一程度の金属量を持つ化学進化段階に対応することが分かった [14, 28, 31, 32, 65]。

### 金属欠乏星の起源 (須田, 小宮)

金属欠乏星の中でもとりわけ鉄組成が少ない星は極超金属欠乏星と呼ばれる。これらの星の鉄組成は典型的には太陽の十万分の一以下程度とされ、銀河系内に 3 個程度見つかった。これらの星はすべて炭素過剰を示しており、AGB 段階における元素合成と物質混合、連星間質量輸送を経たものと考えられる。超金属欠乏な AGB 星における  $s$ -過程元素合成を考えることにより、ヘリウム対流層での元素合成ネットワーク計算を通じて理論と観測との比較を行い、極超金属欠乏星の元素組成パターンが再現可能であることを示した [13, 28, 30, 31, 43, 52, 53, 54, 59, 60]。

### 金属欠乏星データベースの開発・拡張 (須田)

金属欠乏星の分光観測によって元素組成測定を行った論文から観測データを収集し、Web で公開するシステムを構築してきたが (Suda *et al.*, PASJ, 60, 1159, 2008)、対象とする論文を近傍矮小銀河の恒星へと拡張した。また、データベースのシステムを流用することで、原子核物理における状態方程式のデータベースの構築へと応用した [12, 41]。

### 球状星団の起源 (須田, 茂山)

球状星団で観測されている星の元素組成異常と水平分枝の形状の起源が、恒星内部での物質混合に起因するとの仮説を立て、O と Na の逆相関とヘリウムの増大量を同時に説明できるかどうか調べるとともに、巨星段階での質量損失と物質混合との相関によって青い水平分枝の形成が可能かどうか検証した [58]。

### 回転星の進化 (須田)

恒星の内部構造の時間発展と自転による角運動量輸送の関係を調べ、Be 星の起源を論じるとともに、星震学から得られる恒星内部の回転則が再現されるかどうか検証した [47, 55, 61]。

### 極超金属欠乏星の鉄組成の起源 (小宮, 須田)

これまで見つかった星の中で最も金属量の少ない天体は、極超金属欠乏星とよばれ、鉄族元素の組成が太陽の 10 万分の 1 以下しかない。これまで 3 天体が見つかり、特に昨年、鉄組成が太陽の 1000 万分の 1 以下しかない星が発見された。これらの星の起源として、元々は金属を全く含まずに生まれた星 (種族 III 星) が、金属を含む星間物質の降着を受けて表面組成が変化したものである可能性を提唱してきた。昨年度は、銀河の階層的形成を考慮した化学進化モデル計算をおこない、観測された星の組成分布を再現することに成功した [26, 44, 46, 56]。

### 種族 III 星の現在の宇宙における生き残り (小宮, 須田)

宇宙最古の星は、金属を全く持たない種族 III 星であった。種族 III 星の多くは、現在までの間に星間物質降着で表面組成が変化していると考えられるが、力学的相互作用により、形成された銀河から放出された種族 III 星の場合は、そのままの組成を保っていると期待される。こうした種族 III 星の分布を予測し、100kpc 程度離れた銀河系周縁部にいるとの結果をえた [26, 35, 44, 45, 46, 60]。

### 金属欠乏星における $r$ 過程元素組成分布 (小宮, 須田)

金属欠乏星における、 $r$  過程元素の組成分布には、星によって大きな組成の違いが見られる。銀河は矮小銀河の合体により階層的に形成されてきたので、組成の違いは母体となった原始矮小銀河の違いによる考えられる。階層的化学進化のモデル計算と観測の組成分布の比較により、 $r$  過程元素組成の進化を再現し、 $r$  過程元素の起源天体について探った [36, 37]。

### 活動銀河核周囲 (AGN) の銀河の性質と巨大ブラックホール (小宮)

国立天文台の白崎裕治氏等との共同研究。AGN 周囲の銀河の情報をデータアーカイブから収集し、AGN 中心のブラックホール質量と、周囲の銀河の分布・色・等級との関連を調べた。特に大質量のブラックホールを持つ AGN 周辺には、赤い大質量銀河の密度が超過傾向にあることを指摘した [57, 64]。

### $r$ -過程元素の起源としての中性子星合体 (茂山)

継続時間の短いガンマ線バーストから  $r$ -過程元素が大量に放出されることを示唆する観測に端を発した研究。国立天文台の青木和光、辻本拓司、IPMU の石垣美歩との共同研究。継続時間の短いガンマ線バーストは中性子星合体から生じるジェットからの放

射と考えられている。中性子星合体は非常に稀な現象であるから、中性子星合体が主要な r-過程元素の起源とすると星の数の極端に少ない矮小銀河では超新星によって鉄の含有量が増えても r-過程元素は全く増えないことが予想される。実際、非常に暗い矮小銀河の一つである Draco 矮小銀河に属する恒星を Subaru 望遠鏡で分光観測を行い、これらの元素の組成を調べてみた。その結果、鉄の含有量が太陽に比べて 1/200 以下しかない恒星では r-過程元素の 1 つであるユーロピウムの含有量は低く検出できなかった一方、鉄の含有量が太陽に比べて 1/200 以上ある恒星ではユーロピウムはほぼ一定の含有量を持っていることを確認した。つまり、ある時点で一発の中性子星合体が起き、それ以前に形成された恒星では r-過程元素は含まれず、一回の中性子星合体で放出された r-過程元素にはほぼ一様に汚染されたガスから形成された恒星は一定の含有量を示すと考えると観測結果が説明できる。他方、超新星が主に r-過程元素を供給するとすると r-過程元素が増えると同時に鉄の含有量も増える必要があるので観測結果を説明するのは難しい。他にも球状星団 M15 に属する恒星はみなほぼ同じ鉄の組成比を示すのに対し r-過程元素には一桁以上のばらつきがあることが知られていた。これも中性子星合体で説明可能であることを指摘した [17, 20, 22, 33, 66]。

### フェルミバブルの研究 (戸谷)

銀河系中心に見つかった巨大なガンマ線のバブル上の構造、フェルミバブルの起源を明らかにするため、すざぐによる X 線観測を行った。その結果、フェルミバブル周囲の高温ガスの物理状態が判明し、バブルの生成メカニズムに関する示唆を得た [10, 11]。

## 2.3 新星

### MAXI が発見した特異な新星の理論モデル (大谷、和田、茂山)

小マゼラン雲に出現し、MAXI によって発見された MAXI J0158-744 は X 線でおおよそ 1,000 秒間輝いた後、スペクトルを低エネルギー側に移しながら数日かけて暗くなっていく様子を SWIFT によって観測された。X 線の強度は  $10^{40}$  erg s<sup>-1</sup> ほどに達し、白色矮星の Eddington limit を数十倍上回っていた。通常の新星では可視光で主に光り、その強度は最大でおおよそ Eddington limit に達する。また、MAXI が得たスペクトルの中には Ne XI イオンの非常に強い K $\alpha$  線が観測された。この現象を、限界質量に近い質量を持った白色矮星に通常の新星の 1% 以下の  $10^{-9} M_{\odot}$  程度の質量の水素が降り積もり熱核反応が暴走した結果として解釈する理論モデルを提案し、定常的に質量を放出する新星風モデルの構築を行っている。既存の新星風モデルでは光学的に厚い部分のみを扱っていたが、Eddington limit に近づくにつ

れ超音速に加速される場所が光球面に近づくところに着目し、本研究では光学的に薄い部分も扱えるモデルを考え、Eddington limit を超える明るさを持つ新星風モデルの構築を目指している [18, 25, 29]。

## 2.4 超新星

### 重力レンズを用いた遠方銀河での超新星残骸観測 (茂山)

天文学教育研究センターの小林尚人、濱野哲史、国立天文台の辻本拓司らとの共同研究。すばる望遠鏡で観測した重力レンズ天体の複数の視線に沿った吸収線系のデータから、赤方偏移が 3.5 にある超新星爆発によって掃き集められたガス中にある重元素が背景のクエーサーからの放射を吸収したのを見ていると解釈した。この解釈が正しければ、これまでで最遠方にある超新星の残骸を見つけたことになる [24]。

### Ia 型超新星での伴星の影響と水素の吸収線 (朽名、増山、茂山)

Ia 型超新星は連星系中の白色矮星の爆発と考えられている。伴星が赤色巨星や主系列星だった場合、その外層の多くの部分は爆発とともに吹き飛ばされる。そこに含まれる水素が観測されるスペクトルに吸収線を残す可能性と爆発物質が伴星にぶつかって衝撃波を発生し観測される向きによっては明るくなる可能性を 2 次元輻射流体力学計算コードを用いて計算して調べた。輻射流体力学計算で得られたモデルのもとに京大の前田啓一がモンテカルロ法でスペクトルの時間変化を詳細に計算した。最近観測された超新星に計算結果と良く似た形の光度曲線を持つものが現れたので、より詳細に伴星との衝突が放射に及ぼす影響を調べる予定 [19, 23]。

### Ia 型超新星の起源 (野田、須田、茂山)

Ia 型超新星が連星間質量輸送によって引き起こされる可能性を検証するため、質量を供給する伴星の検出条件を調べた。超新星の爆発によって巨星の外層がはがれた場合、星の光度が数百年でどのように変化するか、恒星進化モデルを用いて調べた [42]。

### マグネターからのエネルギーで駆動される超新星 (増山、茂山)

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

### 2.4.1 ガンマ線バースト

#### 衝撃波面での熱的放射とコンプトン散乱による非熱的放射形成 (大谷, 茂山)

超新星爆発時に内部で発生した衝撃波が星の表面を通過する直前にコンプトン散乱によって熱的放射の光の一部がエネルギーを与えられることで、スペクトルが黒体放射からずれ、高エネルギー側にテールが形成される。爆発時の流体力学的なモデルに自己相似解を用い、放射輸送をモンテカルロ法で扱うことで、この現象を数値計算した。衝撃波の伝播速度が光速に非常に近いときのスペクトルの時間変化を解析した結果を *The Astrophysical Journal* に発表した。現在は衝撃波が濃い星周物質内を伝播するとき放射される光子のスペクトル変化を解析中。京大の前田啓一、鈴木昭宏との共同研究 [21, 62, 63]。

#### ガンマ線バーストの新しい分類方法と相似則 (茂山)

ガンマ線バーストの即時放射のスペクトルパラメータ、赤方偏移、光度曲線のすべてのデータがそろっている GRB のデータを用いて、GRB のピークエネルギー ( $E_p$ ) と明るさの相関と光度曲線の一定光度からのズレという新しい指標を用いた長いガンマ線バーストの分類手法についての研究をしている。長いガンマ線バーストが2つの種族に分けることができたが、それは中心エンジンの違いを表している可能性を指摘した。即時放射の減衰のしかたが時間の二乗に反比例する種族の中心エンジンはマグネターであると指摘した。当センターの元特任研究員筒井亮との共同研究 [15]。

#### 中性子星の冷却 (茂山)

中性子星の冷却に磁場が及ぼす影響を2次元輻射輸送計算で調べた研究。福岡大学の固武慶、千葉工業大学の安武伸俊との共同研究 [16]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Tonegawa, Motonari; Totani, Tomonori; Okada, Hiroyuki; Akiyama, Masayuki; Dalton, Gavin; Glazebrook, Karl; Iwamuro, Fumihide; Maihara, Toshinori; Ohta, Kouji; Shimizu, Ikkoh; Takato, Naruhisa; Tamura, Naoyuki; Yabe, Kiyoto; Bunker, Andrew J.; Coupon, Jean; Ferreira, Pedro G.; Frenk, Carlos S.; Goto, Tomotsugu; Hikage, Chiaki; Ishikawa, Takashi; Matsubara, Takahiko; More, Surhud; Okumura, Teppei; Percival, Will J.; Spitler, Lee R.; Szapudi, Istvan, “The Subaru FMOS Galaxy Redshift Survey (FastSound). I. Overview of the Survey Targeting on H $\alpha$  Emitters at  $z \sim 1.4$ ”, 2015, PASJ in press
- [2] Okada, Hiroyuki; Totani, Tomonori; Tonegawa, Motonari; Akiyama, Masayuki; Dalton, Gavin; Glazebrook, Karl; Iwamuro, Fumihide; Ohta, Kouji; Takato, Naruhisa; Tamura, Naoyuki; Yabe, Kiyoto; Bunker, Andrew J.; Goto, Tomotsugu; Hikage, Chiaki; Ishikawa, Takashi; Okumura, Teppei; Shimizu, Ikkoh, “The Subaru FMOS Galaxy Redshift Survey (FastSound). II. The Emission Line Catalog and Properties of Emission Line Galaxies”, 2015, submitted to PASJ (arXiv:1504.05592)
- [3] Tonegawa, Motonari; Totani, Tomonori; Iwamuro, Fumihide; Akiyama, Masayuki; Dalton, Gavin; Glazebrook, Karl; Ohta, Kouji; Okada, Hiroyuki; Yabe, Kiyoto, “FIELD: Automated emission line detection software for Subaru/FMOS near-infrared spectroscopy”, 2015, PASJ in press
- [4] Tonegawa, Motonari; Totani, Tomonori; Akiyama, Masayuki; Dalton, Gavin; Glazebrook, Karl; Iwamuro, Fumihide; Sumiyoshi, Masanao; Tamura, Naoyuki; Yabe, Kiyoto; Coupon, Jean; Goto, Tomotsugu; Spitler, Lee R., “A study of selection methods for Halpalpha-emitting galaxies at  $z \sim 1.3$  for the Subaru/FMOS galaxy redshift survey for cosmology (FastSound)”, 2014, PASJ, 66, 43
- [5] Ishikawa, Takashi; Totani, Tomonori; Nishimichi, Takahiro; Takahashi, Ryuichi; Yoshida, Naoki; Tonegawa, Motonari, “On the systematic errors of cosmological-scale gravity tests using redshift-space distortion: non-linear effects and the halo bias”, 2014, MNRAS, 443, 3359
- [6] Niino, Yuu; Totani, Tomonori; Okumura, Jun E., “Unveiling the origin of fast radio bursts by optical follow-up observations”, 2014, PASJ, 66, L9
- [7] Totani, Tomonori; Aoki, Kentaro; Hattori, Takashi; Kosugi, George; Niino, Yuu; Hashimoto, Tetsuya; Kawai, Nobuyuki; Ohta, Kouji; Sakamoto, Takanori; Yamada, Toru, “Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at  $z = 5.913$ ”, 2014, PASJ, 66, 63
- [8] Makiya, R.; Totani, T.; Kobayashi, M. A. R.; Nagashima, M.; Takeuchi, T. T., “Galaxy luminosity function and its cosmological evolution: testing a new feedback model depending on galaxy-scale dust opacity”, 2014, MNRAS, 441, 63
- [9] Okumura, Jun E.; Ihara, Yutaka; Doi, Mamoru; Morokuma, Tomoki; Pain, Reynald; Totani, Tomonori; Barbary, Kyle; Takanashi, Naohiro; Yasuda, Naoki; Aldering, Greg; Dawson, Kyle; Goldhaber, Gerson; Hook, Isobel; Lidman, Chris; Perlmutter, Saul; Spadafora, Anthony; Suzuki, Nao; Wang, Lifan, “The Type Ia supernovae rate with Subaru/XMM-Newton Deep Survey”, 2014, PASJ, 66, 49

- [10] Tahara, M.; Kataoka, J.; Takeuchi, Y.; Totani, T.; Sofue, Y.; Hiraga, J. S.; Tsunemi, H.; Inoue, Y.; Kimura, M.; Cheung, C. C.; Nakashima, S., “Suzaku X-Ray Observations of the Fermi Bubbles: Northernmost Cap and Southeast Claw Discovered With MAXI-SSC”, 2015, *ApJ*, 802, 91
- [11] Inoue, Yoshiyuki; Nakashima, Shinya; Tahara, Masaya; Kataoka, Jun; Totani, Tomonori; Fujita, Yutaka; Sofue, Yoshiaki, “Metal Enrichment in the Fermi Bubbles as a Probe of Their Origin”, 2015, *PASJ* in press (arXiv:1502.01776)
- [12] Ishizuka C., Suda T., Suzuki H., Ohnishi A., Sumiyoshi K., Toki H. 2015, “EOSDB: The database for nuclear equations of state”, *PASJ*, 67, 13
- [13] Aoki, W., Suda, T., Beers, T. C., Honda, S. 2015, “High-Resolution Spectroscopy of Extremely Metal-Poor Stars from SDSS/SEGUE. II. Binary Fraction”, *AJ*, 149, 39
- [14] Lee, Y.-S., Suda, T., Beers, T. C., Stancliffe, R. J. 2014, “Carbon-enhanced Metal-poor Stars in SDSS/SEGUE. II. Comparison of CEMP-star Frequencies with Binary Population-synthesis Models”, *ApJ*, 788, 131
- [15] Ryo Tsutsui & Toshikazu Shigeyama, “On the subclasses in Swift long gamma-ray bursts: A clue to different central engines”, 2014, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, No. 2, Article No.42
- [16] Yasutake, Nobutoshi, Kotake, Kei, Kutsuna, Masamichi, & Shigeyama, Toshikazu “An investigation into surface temperature distributions of high-magnetic-field pulsars”, 2014, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, No. 2, Article No. 50
- [17] Tsujimoto, Takuji, & Shigeyama, Toshikazu, “Enrichment history of r-process elements shaped by a merger of neutron star pairs”, 2014, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 565, id.L5
- [18] Ohtani, Yukari; Morii, Mikio; Shigeyama, Toshikazu, “Origin of Ne Emission Line of Very Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744”, 2014, *Astrophys. J.*, 787, Issue 2, article id. 165
- [19] Maeda, Keiichi; Kutsuna, Masamichi; Shigeyama, Toshikazu, “Signatures of a Companion Star in Type Ia Supernovae”, 2014, *Astrophys. J.*, 794, Issue 1, article id. 37
- [20] Tsujimoto, Takuji; Shigeyama, Toshikazu, “The Origins of Light and Heavy R-process Elements Identified by Chemical Tagging of Metal-poor Stars”, 2014, *Astrophys. J. Lett.*, 795, Issue 1, article id. L18
- [21] Suzuki, Akihiro; Shigeyama, Toshikazu, “Dynamical Evolution of an Ultra-relativistic Fireball Colliding with a Freely Expanding Gas”, 2014, *Astrophys. J.*, 796, Issue 1, article id. 30
- [22] Tsujimoto, Takuji; Ishigaki, Miho, Shigeyama, Toshikazu, Aoki, Wako, “Chemical Feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy”, 2015, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 67, No. 3, in press
- [23] Kutsuna, Masamichi; Shigeyama, Toshikazu, “Revealing progenitors of type Ia supernovae from their light curves and spectra”, 2015, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 67, in press
- (会議抄録)
- [24] Hamano, Satoshi; Kobayashi, Naoto; Kondo, Sohei; Tsujimoto, Takuji; Okoshi, Katsuya; & Shigeyama, Toshikazu, “Type-Ia SNR at  $z=3.5$  seen in the three lines of sight toward the gravitationally lensed QSO B1422+231”, *AIP Conference Proceedings*, Volume 1594, Issue 1, p.117-122
- [25] Ohtani, Yukari; Morii, Mikio; Shigeyama, Toshikazu, “Origin of Ne Emission Line of Peculiar Nova MAXI J0158-744”, 2014, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda, 2014., p.337
- [26] Komiya, Yutaka, “Extremely metal-poor stars and chemical signature of the first stars”, 2014, *AIP Conference Proceedings*, Volume 1594, Issue 1, p.76-81
- [27] Yamada, Shimako; Suda, Takuma; Komiya, Yutaka; Aoki, Wako; Fujimoto, Masayuki Y., “Analysis of enrichment histories for elements and two modes of star formation during the early evolution of Milky Way” 2014, *AIP Conference Proceedings*, Volume 1594, Issue 1, p.93-98
- (国内雑誌)
- [28] 須田拓馬, “金属欠乏星で探る初期宇宙の星形成史”, *天文月報*, 第 107 巻, p.268, 2014 年 5 月
- (学位論文)
- (修士)
- [29] 和田健太郎; エディントン光度を超える新星のモデル構築
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [30] Suda, T., Komiya, Y., Yamada, S., Fujimoto, M. Y.; “Origin of the most iron-poor stars in the Galaxy”, in the workshop “RESCEU APCosPA Summer School 2014”, Matsumoto, Nagano, Japan, August, 2014



- [31] Suda, T., Komiya, Y., Yamada, S., Aoki, W., Fujimoto, M. Y.; “Formation and evolution of carbon-enhanced metal-poor stars”, in the conference “Nuclei in the Cosmos XIII”, Kőlcsey Convention Center, Debrecen, Hungary, July, 2014 (ポスター)
- [32] Suda, T., Komiya, Y., Yamada, S., Fujimoto, M. Y., “IMF of the First Stars Explored Using CEMP Star Statistics”, in the workshop “The physics of first star and galaxy formation”, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, June, 2014
- [33] Shigeyama, T., “Enrichment of r-process elements in nearby dSph galaxies, the Milky way, and globular cluster(s)”, in the workshop “INT Program 14-2b Nucleosynthesis and Chemical Evolution: Recent Progress and Future Directions”, University of Washington, Seattle, Washington, U.S.A, August, 2014
- [34] Ohtani, Y., “Numerical study of relativistic shock breakout in circumstellar medium”, Swift: 10 Years of Discovery, La Sapienza University, Roma, Italy, December 2014
- [35] Komiya Y., Suda, T., Fujimoto, M. Y., “Search for Pop.III stars in the Local Universe” Third Workshop on Numerical and Observational Astrophysics: Linking the Local Universe to the Early One, Buenos Aires, Argentina, Nov. 18, 2014
- [36] Komiya, Y., Yamada S., Suda, T., Fujimoto, M. Y., “R-process elements on the extremely metal-poor stars and effects of surface pollution”, INT workshop: The r-process: status and challenges, Seattle, Washington, U.S., July, 2014
- [37] Komiya Y., Yamada S., Suda, T., Fujimoto, M. Y., “Chemical evolution of r-process elements in hierarchical galaxy formation models”, RIKEN-IPMU-RESCEU Joint Meeting, RIKEN, Wako, Japan, July, 2014

## 招待講演

- [38] Totani, T.: “FastSound: Probing the Origin of Cosmic Acceleration by Galaxy Clustering at  $z \sim 1.3$  with Subaru/FMOS”, at 12th Asia-Pacific Regional IAU Meeting, Aug. 18-22, 2014, Daejeong, Korea
- [39] Totani, T.: “FastSound: A Galaxy Redshift Survey for Cosmology at  $z \sim 1.3$  using Subaru/FMOS”, at TAO / AIUC Joint Workshop for Optical/IR Astronomy at Cerro Chajnantor, Nov. 19, 2014, Santiago, Chile
- [40] Totani, T.: “Possible science cases of transient source searches in mm/submm: gamma-ray burst orphan afterglows, and fast radio bursts”, at the workshop on large aperture mm/submm telescopes in the ALMA era, Mar. 10, 2015, Mitaka, Tokyo, Japan
- (国内会議)
- 一般講演
- [41] 須田 拓馬、青木和光、日高潤、勝田豊、藤本 正行: “金属欠乏星データベースを用いた銀河考古学”, 天の川銀河研究会 2015, 東京大学大学院理学系研究科, 2015/3/23
- [42] Noda K., Suda T., Shigeyama, T.: “Detectability of non-degenerate companions proximate to Type Ia supernovae”, RIKEN-IPMU-RESCEU Joint Meeting, 東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター, 2015/3/3
- [43] 須田拓馬、小宮悠、山田志真子、藤本正行: “元素合成と恒星進化モデルで探る極超金属欠乏星の起源”, 初代星初代銀河研究会 2015, 東北大学片平さくらホール, 2015/1/19
- [44] 小宮悠、須田拓馬、藤本正行: 「種族 III 星はどこへいったのか」 第 27 回理論懇シンポジウム国立天文台, 2014/12/24-26 (ポスター)
- [45] 小宮悠、須田拓馬、藤本正行: 「銀河系における種族 III 星の生き残り」 初代星初代銀河研究会、東北大学、2015/1/19
- [46] 小宮悠、須田拓馬、藤本正行: 「銀河系における種族 III 星の生き残り」 天の川銀河研究会、東京大学、2015/3/23-24 (ポスター)
- 招待講演
- [47] 須田拓馬: “星の回転による組成異常”, 大質量星の進化・活動現象と星の回転, 北海道大学理学部 5 号館, 2015/2/18
- [48] 茂山俊和: “超新星の衝撃波が星表面を通過する前後のライトカーブについて”, 新学術領域「重力波天体」A04-05 班合同合宿, 瀬波温泉 ニューハートピア新潟瀬波新潟県村上市, 2015/1/08
- [49] 戸谷友則: “光赤外観測による宇宙論研究の展望「2020 年代の光赤外線天文学」宇宙論検討班 中間報告”, シンポジウム「2020 年代の光赤外線天文学: スペース計画の展望」, 2014.8.11, JAXA 宇宙研
- [50] 戸谷友則: “GRB による宇宙進化研究の重要性”, 研究会「2020 年代の高エネルギー宇宙物理学: X 線・ガンマ線天文学の展望」, 2014.8.24, JAXA 宇宙研
- [51] 戸谷友則: “Fast Radio Burst 及び電波による突発変動天体研究の展望”, 宇電懇シンポ「2030 年までの電波天文学を展望する」, 2015.1.27, 国立天文台 三鷹
- 日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 2014/9/11-13
- [52] 須田 拓馬, 小宮 悠, 山田 志真子, 藤本 正行, “連星仮説に基づく超金属欠乏星の起源と Hyper Metal-Poor Stars”, 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日 (口頭), N23a
- [53] 山田 志真子, 須田 拓馬, 小宮 悠, 藤本 正行, “超金属欠乏 AGB 星での中性子捕獲を伴う核種合成過程と Hyper-Metal-Poor Stars”, 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日 (口頭), N22a

- [54] 小宮 悠, 須田 拓馬, 山田 志真子, 藤本 正行, “金属欠乏星における表面汚染と hyper metal-poor stars”, 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日 (口頭), N21a
- [55] 勝田 豊, 岡崎 敦男, 須田 拓馬, 藤本 正行, “恒星の進化に伴う differential rotation の生成と成長”, 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日 (口頭), N19a
- [56] 小宮悠, 須田拓馬、藤本正行 ”金属欠乏星における表面汚染と Hyper Metal-Poor Stars”, 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日, (口頭), N21a
- [57] 白崎裕治, 小宮悠, 江口智士, 大石雅寿, 水本好彦, 石原康秀, 内田賢志, 檜山貴博, 布施純平, 寺西広太郎, 小蔵圭輔”JVO ポータル第二版: 検索インターフェイスの改善” 2014 年日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日, (ポスター), Y14b

日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学 2015/3/18-21

- [58] 須田拓馬, 茂山俊和, 辻本拓司, 谷川衝, 藤本正行, “球状星団における元素組成異常と水平分枝形状の起源 (2)”, 2015 年日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日, (口頭), N06a
- [59] 山田 志真子, 須田 拓馬, 小宮 悠, 藤本 正行, “超金属欠乏 AGB 星での中性子捕獲を伴う核種合成過程と Hyper-Metal-Poor Stars (II)”, 2015 年日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日, (口頭), N09a
- [60] 小宮 悠, 須田 拓馬, 藤本 正行, “銀河系における種族 III 星発見にむけて”, 2015 年日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日, (口頭), N08a
- [61] 勝田 豊, 岡崎 敦男, 須田 拓馬, 藤本 正行, “恒星の自転の進化 - 質量および進化段階への依存性”, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日 (口頭), N02a
- [62] 大谷友香理, 鈴木昭宏, 茂山俊和, “星周物質内部における相対論的 shock breakout の数値的研究”, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日 (口頭), J204a
- [63] 鈴木昭宏, 前田啓一, 茂山俊和, “低光度ガンマ線バーストの流体モデルと爆発的元素合成”, 大阪大学, 2015 年 3 月 18 日 (口頭), J205a
- [64] 白崎裕治, 大石雅寿, 水本好彦, 小宮悠, “超大質量ブラックホール周辺銀河の特性”, 2015 年日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2014 年 3 月 20 日, (口頭), X06a

(セミナー)

- [65] 須田 拓馬: “Star formation history in the early Galaxy explored using stellar evolution and nucleosynthesis”, 早稲田大学先進理工学研究科, 2014/6/6

(新聞記者発表)

- [66] 辻本拓司, 茂山俊和: 中性子星合体は金、プラチナ、レアアース等の生成工場, 2014 年 7 月 1 日, 国立天文台

## 3 光赤外線による観測的宇宙論

——可視光と赤外線による観測的宇宙論——  
— (土居・嶋作)

### 3.1 宇宙及び系外銀河

重力レンズ効果を利用して測定した銀河サイズで探る  $z \sim 6-8$  の銀河の性質

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

我々は、重力レンズ効果を受けた銀河の撮像データから、その銀河の真の明るさとサイズを求めるコードを構築した。このコードを、Hubble Frontier Fields の6つの銀河団のうち、1つ目の銀河団である Abell 2744 の撮像データに適用した結果、過去の HUDF12 のサンプルと合わせて、サンプルサイズを4倍近く増大させることに成功した。このサンプルを用い、サイズ-明るさ関係に加えて、銀河の色、星形成の様子、さらにはダークハローとの関係などの新たな視点から、最遠方銀河の性質について、先行研究に比べ、より踏み込んだ議論を行った。特に、ディスクとハローのサイズ比が幅広い赤方偏移で一定であるという新たな発見は、ディスクとハローの間の角運動量の分配に制限を与えるものとなった。

#### $z \sim 4$ の星形成銀河のダークハローの研究

GOODS South の領域において星形成銀河のクラスタリング強度を測定し、ダークハロー質量を推定した。推定されたダークハロー質量と銀河サイズとの関係を調べると、銀河サイズが大きいほど重いダークハローに属しているという傾向が見られた。従来は静止 UV 光度とダークハロー質量が対応関係にあると考えられてきたが、本研究ではサイズとも強い相関があるということが分かった。この結果は銀河のサイズ分布への議論などに有用である。

#### A Close Comparison between Observed and Modeled Ly $\alpha$ Lines for $z \sim 2.2$ Lyman $\alpha$ Emitters

大内正己、小野宜昭、澁谷隆俊 (宇宙線研究所)、中島王彦、A. Verhamme、D. Schaerer (Observatory of Geneva)、M. Rauch (OCIW) との共同研究。

Ly $\alpha$  Emitters (以下 LAEs) は測光研究から若くて小質量銀河であることが分かっており、銀河進化の初期段階を表す天体として重要である。しかし連続光で非常に暗いことから、なぜ LAEs が強い Ly $\alpha$  輝線を放射できるのかは不明である。過去の研究は、銀河のダスト量やアウトフローと Ly $\alpha$  輝線強度の関係を調べているが、決定的な結論は得られていない。一方で、理論研究は複雑な Ly $\alpha$  輻射輸送を解いた。これらのモデルの目的は、観測された Ly $\alpha$  輝線の解釈を助けることと、LAEs における Ly $\alpha$  脱出メカニズムの理解を進めることである。本研究では、Hashimoto et al. (2013) および Shibuya et al. (2014) で波長分解能と S/N 比の良い Ly $\alpha$  輝線が取得され、星雲輝線から銀河の後退速度や速度分散が測定されている12個の LAEs に対して、Verhamme et al. (2006) で構築された輻射輸送モデルを適用した。本サンプルの利点として、金属吸収線の青方偏移量からアウトフロー速度が推定されており、SED fit によってダスト量が推定されていることが挙げられる。これによって、観測された Ly $\alpha$  輝線とモデル化された輝線を詳細に比較することが可能となった。本研究の目的は (1) Ly $\alpha$  輻射輸送モデルが観測を再現できるか検証し、(2) モデルから推定されたパラメータを調べることで、なぜ LAEs が強い Ly $\alpha$  輝線を放射できるのか理解すること、である。一つ目の結果として、Ly $\alpha$  輝線プロファイルが、blue bump という銀河の後退速度よりも短波長側にある第二ピークを持たない場合には、モデルは Ly $\alpha$  プロファイルだけでなくアウトフロー速度や星雲輝線の FWHM といった物理量を再現することに成功した。一方で、blue bump を持つ天体では、星雲輝線の FWHM が観測値に比べ大きく見積もられた。以上から輻射輸送モデルは少なくとも blue bump を持たない天体では信頼できるものであり、blue bump を持つ天体についても、gravitational cooling のような追加の Ly $\alpha$  放射源を与えれば説明が可能であることを示した。

二つ目の結果として、我々は LAEs の中性水素柱密度に注目した。LAEs の持つ平均値は  $\log(N_{\text{HI}}) = 18.9 \text{ cm}^{-2}$  であり、明るく重い遠方銀河 LBGs に比べて一桁も小さな値を持つことがわかった。LAEs は小さな  $N_{\text{HI}}$  を持ち、Ly $\alpha$  光子が受ける散乱回数が小さいため、強い Ly $\alpha$  を放射できることを、初めて定量的に示した。現在これらの結果を論文としてまとめている。

#### $z = 2.2$ の Ly $\alpha$ emitters の SED の研究と極度に青い銀河の発見

大内正己、小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所)、中島王彦 (ジュネーブ天文台) との共同研究。

我々は、Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった赤方偏移  $z=2.2$  の LAE、742 個の SED の分析を行った。個々の LAE は暗いため、静止系可視光域に対応する近赤外帯のバンドでは検出されにくい。そこで、静止系紫外域のスペクトルの特徴でサンプルを分類し、画像をス

タックすることで静止系可視光の検出した。その結果、紫外線スペクトルの傾斜が大きい(すなわち青い)、 $\text{Ly}\alpha$  光度が明るい、 $\text{Ly}\alpha$  等価幅の大きい上位3割程度の LAE は平均星質量  $10^7 M_\odot$  と非常に軽く、活発な星形成をしていることがわかった。この質量と紫外線スペクトルの特徴との相関関係は、昨年度に行ったクラスタリング強度に見られる傾向と無矛盾である。また、紫外線スペクトルの分類の段階で、紫外線スペクトルの傾斜  $\beta$  が3以下の極度に青い銀河を6つ発見した。この青さは通常の星種族合成モデルではダスト減光無しを仮定しても説明できないため、特別な星種族、例えばよりハードな紫外線を放射する大質量星の存在を考える必要がある。今後は、これらの極度に青い銀河について、可視・近赤外線の分光観測を提案して物理状態を探る予定である。

### $z \sim 2$ の $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) のダスト放射の性質と星形成モードの解明

中島王彦(ジュネーブ天文台)、大内正己(宇宙線研究所)との共同研究。

銀河のダスト減光量や星形成率を正確に求めるには、星からの紫外放射に加えて、ダストからの赤外放射を測定することが不可欠である。我々は、The Great Observatories Origins Deep Survey South Field (GOODS-S)において、我々が得た  $z \sim 2$  の LAE サンプル(213銀河)に対して、Herschel/PACS と Spitzer/MIPS の深い公開データのスタッキング解析を行なうことで、平均的な LAEs の赤外光度に初めて強い制限を与えた。赤外光度に対して最も厳しい上限値を与える MIPS  $24\mu\text{m}$  の結果から、LAEs のダストに隠された星形成率およびダスト減光は大変小さいこと、同時代の他の銀河に比べて  $\text{Ly}\alpha$  光子、紫外連続光の脱出率が高いことなどが分かった。また、ダスト減光の性質を表す減光曲線は、これまで根拠なく使われて来た Calzetti の曲線ではなく、小マゼラン銀河 (SMC) の曲線が適切であることがわかった。銀河のスペクトルフィットの解析では、仮定する減光曲線を変えた場合に得られる銀河の描像が大きく変わり、本研究では典型的な LAEs は普通の星形成銀河であることがわかった。一方で、既存の方法では爆発的星形成銀河と見誤ってしまう。さらに、サブミリのフラックスを推定することで、典型的な LAEs が ALMA 望遠鏡によって見つかった暗いサブミリ銀河の可視対応天体である可能性を排除することができた。今後は ALMA 望遠鏡のデータも用いて、本研究で扱ったものより10倍程度明るい個別の LAEs について、ダスト減光の性質や星形成モードを調べていきたい。

### 銀河進化における紫外連続光の脱出率とダストのジオメトリー

銀河の若い星からの紫外連続光放射の一部は、ダストによって減光されずに銀河から脱出する。紫外

連続光の脱出率は銀河の性質に深く関係する重要な物理パラメーターである。しかし、これまでは近傍から遠方の星形成銀河を統一的に扱って、紫外連続光脱出率のダスト質量やダストの柱密度の依存性は調べられておらず、理論で仮定されるダスト減光モデルも観測的に確かめられていない。我々は、Herschel Reference Survey から  $z \sim 0$  の gas rich 星形成銀河、 $z \sim 1$  の PEP 銀河、 $z \sim 1.5$  の BzK 銀河、 $z \sim 1-1.5$  の重力レンズ銀河を用いて、紫外連続光脱出率はダスト質量よりもダストの柱密度に依存することを初めて示すことに成功した。これは、既存の一般平板ダスト減光モデルであるスラブモデルやサンドウィッチモデル (Shimizu et al. 2014) では表現できない。一方で、ダストと若い星で同じ exponential profile を仮定した新しいモデルを導入すると、観測とよく合うことがわかった。シミュレーションに本減光モデルを組み込むと、先行研究とは大きく異なる結果が得られ、シミュレーション自体に改訂が必要な可能性が浮上した。その場合、結果として得られる赤外の光度関数、銀河の色の質量や光度に対する依存関係、サブミリ帯での銀河の個数密度などが変わりうる。今後はサンプルを追加して新減光モデルの吟味を行い、準解析的モデルにも本モデルを組み込む予定である。

### 星形成史が2成分の銀河を効率よく選び出す新手法の提案と $\text{H}\alpha$ 分光観測を用いたその検証

中島王彦(ジュネーブ天文台)、大内正己、小野宜昭、久保真理子(宇宙線研究所)との共同研究。

近年、遠方銀河で特に低質量のものは、複雑な星形成史を辿ると示唆されている。そのような銀河の SED は過去の星形成と現在進行中の星形成を表す2つの成分で近似できる。しかしながら、2成分をもつ銀河の観測がほとんど無いため、どのような銀河が2成分の SED をもつのか、それぞれの成分の性質はどのようなものなのかは明らかにされていない。そこで我々は、紫外の測光データを用いて2成分の銀河を効率よく選び出す手法を開発し、複雑な星形成史を辿る銀河に特化して調べることを初めて可能にした。選び出された銀河の  $\text{H}\alpha$  輝線等の分光観測を行うことで、銀河全体のスペクトルを(2成分の)スペクトルモデルで表す際の測光データの連続光と輝線の縮退を解くことができる。この手法の検証を行うために、我々の大きな  $z = 2.2$  の  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河 (LAEs) を用いたすばる望遠鏡の MOIRCS に  $\text{H}\alpha$  輝線の分光観測を提案中である。観測が採択された際には LAEs の形成史についても議論をする。

### Isophote Shapes of Early-Type Galaxies at $z \sim 0.9-1.5$

鈴木尚孝、安田直樹(カブリ IPMU)との共同研究。

我々は Hubble Space Telescope (HST) Cluster Supernova Survey で得られた赤方偏移  $z \sim 0.9-1.5$  の銀

河団の早期型銀河について等面輝度形状の詳細な分析を行った。楕円銀河は等面輝度線の歪みから Boxy 型、Disky 型に分類でき、質量や力学構造との関係があることが知られている。遠方の楕円銀河については、このような近傍の観測と比較できる結果が乏しく、楕円銀河の形状や力学構造がいつ、どのようにして形成され、進化してきたかはよくわかっていない。我々は何枚もの画像を他の HST データよりも精度よく足し上げ、詳細な形状の分析に耐えうる高品質のデータを作成し、また遠方の楕円銀河について詳細な形状を分析するために、新たな表面測光の手法を構築した。そして、HST Cluster Supernova Survey の分光によって赤方偏移が決定している  $z \sim 1$  の 92 個の早期型銀河について、等面輝度形状の歪みを測定し Boxy 型、Disky 型に分類した。また  $z \sim 0$  についても Sloan Digital Sky Survey (SDSS) で分光によって赤方偏移が決定している早期型銀河サンプル 284 個を作成し、SDSS の画像データを用いて同じ手法で Boxy 型、Disky 型に分類した。これらと比較した結果、 $z \sim 1$  では Disky 型の割合が増えている傾向が見られたものの、 $z \sim 1$  のサンプル数不足のために有意であるとは結論できていない。

### 重力波天体の光学同定にむけての CMOS センサーカメラ Tomo-e の開発

渡部潤一、田中雅臣、前原裕之（国立天文台）、富永望（甲南大学）他との共同研究。

重力波天体の光学同定を主目的として、木曾観測所の口径 105cm シュミット望遠鏡に広視野 Tomo-e カメラの開発を進めている。最終的には直径約 9 度の視野に 84 個の CMOS センサーを搭載する計画であり、世界的にみても抜群の探査能力を有するカメラとなる。本年は RESCEU の支援を得て天体観測向けとしては世界トップレベルの CMOS センサー 2 個を購入し、独自開発のエレクトロニクスで動作させることに成功した。今後低発熱となるような動作パラメータを見つけていく必要があるが、読み出し雑音や案電流も仕様通り低いことを確認し、全体として順調に進んでいる。デューワーの設計や解析ソフトウェアの準備も平行して進んでおり、2015 年度に数個のセンサーを搭載した試作機での試験観測を目指す。

### 国内望遠鏡最高感度の可視低分散分光器の開発

Kuncarayakti Hanindyo (チリ大)、森鼻 久美子、伊藤陽一 (兵庫県立大) との共同研究。

RESCEU の支援も得て製作した LISS (Line Imager and Slit Spectrograph) は、液晶型エタロンと低/中分散グリズムを用いた撮像分光装置である。長波長側の量子効率が世界で最も高い浜松ホトニクス社の  $2k \times 1k$  CCD を搭載し、また Canon EOS 5D Mark II をガイドカメラとして用いたオフセットガイドを搭載して、微光天体分光のための長時間露出も可能となっている。2014 年 7 月からは兵庫県立

大学西はりま天文台なゆた望遠鏡 (カセグレン焦点) に搭載し、科学観測を開始、g バンドで 19 等よりも暗い超新星の分光同定に成功するなどした。また分散の高めのグリズムやフィルターの追加も行い、現在、PI 装置として西はりま天文台公募観測に供されている。日本国内で使用できる可視分光器としては最も高感度の装置であり、2015 年度にはマルチスリットを用いた系外惑星の掩蔽観測を実施する予定である他、将来 Tomo-e カメラ完成時には重力波天体候補の可視追加分光を行っていくことができる。

### <報文>

(原著論文)

- [1] Ly, C., Malkan, M. A., Nagao, T., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Hayashi, M. 2014, “Direct” Gas-phase Metallicities, Stellar Properties, and Local Environments of Emission-line Galaxies at Redshifts below 0.90”, *Astrophys. J.*, **780**, id.122 (28pp)
- [2] Kokubo, M., Morokuma, T., Minezaki, T., Doi, M., Kawaguchi, T., Sameshima, H., Koshida, S. 2014, “WStatistical Properties of Multi-epoch Spectral Variability of SDSS Stripe 82 Quasars”, *Astrophys. J.*, **783**, id.46 (20pp)
- [3] Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Yuma, S., Hashimoto, T., Shimasaku, K., Mori, M., Umemura, M. 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly $\alpha$  Emission? I. Demographics of Ly $\alpha$  Emitter Structures”, *Astrophys. J.*, **785**, id.64 (12pp)
- [4] Shibuya, T. et al. (incl. Hashimoto, T., Shimasaku, K., Goto, R.) 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly $\alpha$  Emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Ly $\alpha$  Emitters”, *Astrophys. J.*, **788**, id.74 (14pp)
- [5] Toshikawa, J., Kashikawa, N., Overzier, R., Shibuya, T., Ishikawa, S., Ota, K., Shimasaku, K., Tanaka, M., Hayashi, M., Niino, Y., Onoue, M. 2014, “A First Site of Galaxy Cluster Formation: Complete Spectroscopy of a Protocluster at  $z = 6.01$ ”, *Astrophys. J.*, **792**, id.15 (15pp)
- [6] Konno, A., Ouchi, M., Ono, Y., Shimasaku, K., Shibuya, T., Furusawa, H., Nakajima, K., Naito, Y., Momose, R., Yuma, S., Iye, M. 2014, “Accelerated Evolution of the Ly $\alpha$  Luminosity Function at  $z > 7$  Revealed by the Subaru Ultra-deep Survey for Ly $\alpha$  Emitters at  $z = 7.3$ ”, *Astrophys. J.*, **797**, id.16 (15pp)
- [7] McGee, S. L., Goto, R., Balogh, M. L., 2014, “The stellar mass function and efficiency of galaxy formation with a varying initial mass function”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **438**, 3188–3204
- [8] Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M. 2014, “Diffuse Ly $\alpha$  haloes around

- galaxies at  $z = 2.2-6.6$ : implications for galaxy formation and cosmic reionization”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **442**, 110–120
- [9] Diaz, G., Koyama, Y., Ryan-Weber, E. V., Cooke, J., Ouchi, M., Shimasaku, K., Nakata, F. 2014, “Large-scale environment of  $z \sim 5.7$  C IV absorption systems - I. Projected distribution of galaxies”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **442**, 946–978
- [10] Okumura, J. E., Ihara, Y., Doi, M., Morokuma, T., Pain, R., Totani, T., Barbary, K., Takanashi, N., Yasuda, N., Aldering, G., Dawson, K., Goldhaber, G., Hook, I., Lidman, C., Perlmutter, S., Spadafora, A., Suzuki, N., Wang, L. 2014, “The Type Ia supernovae rate with Subaru/XMM-Newton Deep Survey”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, id.49 (23pp)
- [11] Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Mori, K., Matsumoto, E., Kikuchi, Y., Shibata, T., Sako, S., Aoki, T., Doi, M., Kobayashi, N., Maehara, H., Matsunaga, N., Mito, H., Miyata, T., Nakada, Y., Soyano, T., Tarusawa, K., Miyazaki, S., Nakata, F., Okada, N., Sarugaku, Y., Richmond, M. W., Akitaya, H., Aldering, G., Arimatsu, K., Contreras, C., Horiuchi, T., Hsiao, E. Y., Itoh, R., Iwata, I., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kitagawa, Y., Kokubo, M., Kuroda, D., Mazzali, P., Misawa, T., Moritani, Y., Morrell, N., Okamoto, R., Pavlyuk, N., Phillips, M. M., Pian, E., Sahu, D., Saito, Y., Sano, K., Stritzinger, M. D., Tachibana, Y., Taddia, F., Takaki, K., Tateuchi, K., Tomita, A., Tsvetkov, D., Ui, T., Ukita, N., Urata, Y., Walker, E. S., Yoshii, T. 2014, “Kiso Supernova Survey (KISS): Survey strategy”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **66**, id.114 (16pp)
- [12] Betoule, M., Kessler, R., Guy, J., Mosser, J., Hardin, D., Biswas, R., Astier, P., El-Hage, P., Konig, M., Kuhlmann, S., Marriner, J., Pain, R., Regnault, N., Balland, C., Bassett, B. A., Brown, P. J., Campbell, H., Carlberg, R. G., Cellier-Holzem, F., Cinabro, D., Conley, A., D’Andrea, C. B., DePoy, D. L., Doi, M., Ellis, R. S., Fabbro, S., Filippenko, A. V., Foley, R. J., Frieman, J. A., Fouchez, D., Galbany, L., Goobar, A., Gupta, R. R., Hill, G. J., Hlozek, R., Hogan, C. J., Hook, I. M., Howell, D. A., Jha, S. W., Le Guillou, L., Leloudas, G., Lidman, C., Marshall, J. L., Moller, A., Mourao, A. M., Neveu, J., Nichol, R., Olmstead, M. D., Palanque-Delabrouille, N., Perlmutter, S., Prieto, J. L., Pritchett, C. J., Richmond, M., Riess, A. G., Ruhlmann-Kleider, V., Sako, M., Schahmanche, K., Schneider, D. P., Smith, M., Sollerman, J., Sullivan, M., Walton, N. A., Wheeler, C. J. 2014, “Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples”, *Astron. Astrophys.*, **568**, id.A22 (32pp)
- [13] Hashiba, Y., Doi, M., Sako, S., Morokuma, T., Kuncarayakti, K., Kokubo, M., Mitsuda, K., Takahashi, N., Tateuchi, K., Watanabe, M., Nakao, H. 2014 “A Fabry-Perot and Grism imaging spectrograph LISS (line imager and slit spectrograph)”, *Proceedings of the SPIE*, **9147**, id. 91472J (12pp)
- [14] Kashikawa, N., Ishizuka, Y., Willot, C.-J., Onoue, M., Im, M., Furusawa, H., Toshikawa, J., Ishikawa, S., Niino, Y., Shimasaku, K., Ouchi, M., Hibon, P. 2015, “The Subaru High- $z$  Quasar Survey: Discovery of Faint  $z \sim 6$  Quasars”, *Astrophys. J.*, **798**, id.28 (10pp)
- [15] Ishigaki, M., Kawamata, R., Ouchi, M., Oguri, M., Shimasaku, K., Ono, Y. 2015, “Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at  $z \sim 5-10$  for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization”, *Astrophys. J.*, **799**, id.12 (21pp)
- [16] Kusakabe, H., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ouchi, M. 2015, “First Infrared-based implications for the dust attenuation and star formation of typical Ly $\alpha$  emitters”, *Astrophys. J.*, **800**, L29 (5pp)
- [17] Tateuchi, K., Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Mitani, K. N., Kitagawa, Y., T., Soya, Todo, S., Sako, S., Uchimoto, Y. K., Ohsawa, R., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Nakamura, T., Nakashima, A., Okada, K., Takagi, T., Tanabe, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kawara, K., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K., Yoshii, Y. 2014, “Ground-based Paalpa Narrow-band Imaging of Local Luminous Infrared Galaxies. I. Star Formation Rates and Surface Densities”, *Astrophys. J. Suppl.*, **217**, id.1 (26pp)
- [18] Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Oguri, M., Ouchi, M. 2015, “The sizes of  $z \sim 6-8$  lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 data”, *Astrophys. J.*, in press
- (学位論文)
- [19] 川俣良太 “Properties of  $z \sim 6-8$  galaxies indicated by physical sizes of lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields data” (修士論文)
- [20] 満田和真 “A Study on Structures of Early-Type Galaxies at  $z 1.0-1.5$  with Measuring Detailed Isophote Shapes” (修士論文)
- [21] Takuya Hashimoto “Outflows in Distant Star Forming Galaxies Probed by Lyman Alpha Spectra” (博士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演

- [22] Hashimoto, T., Ouchi, M., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., & Rauch, M.: “The statistical spectroscopic properties in high- $z$  Lyman-Alpha Emitters and close comparison between observed and modelled Ly $\alpha$  line”: EWASS2014, European Week of Astronomy and Space Science, 2014/6/30–2014/7/4, Geneva, Switzerland
- [23] Kawamata, R., Ishigaki, M., Oguri, M., Shimasaku, K., & Ouchi, M. “Size-luminosity relation for  $z \sim 7 - 8$  lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields Data”, Oral presentation, The Formation & Growth of Galaxies in the Young Universe, Obergurgl, Austria, 2014/4/26–30
- [24] Kawamata, R., Ishigaki, M., Oguri, M., Shimasaku, K., & Ouchi, M. “The sizes of  $z \sim 6 - 8$  lensed galaxies from the data of Abell 2744”, Oral presentation, Yale Frontier Fields Workshop, New Haven, U.S.A., 2014/11/12–14
- [25] Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Oguri, M., & Ouchi, M. “The sizes of  $z \sim 6 - 8$  lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields Data”, Oral presentation, Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing, Kashiwa, Japan, 2014/11/17–21
- [26] Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Oguri, M., & Ouchi, M. “The sizes of  $z \sim 6 - 8$  lensed galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 data”, Oral presentation, Back at the Edge of the Universe, Sintra, Portugal, 2015/3/15–19
- [27] Kusakabe, H., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ouchi, M. 2015, “First Infrared-based implications for the dust attenuation and star formation of typical Ly $\alpha$  emitters”: Back at the Edge of the Universe: Latest results from the deepest astronomical surveys, Sintra, Portugal, 2015/03/15–19
- [28] Hashiba, Y., Doi, M., Sako, S., Morokuma, T., Kuncarayakti, K., Kokubo, M., Mitsuda, K., Takahashi, N., Tateuchi, K., Watanabe, M., Nakao, H. 2014 “A Fabry-Perot and Grism imaging spectrograph LISS (line imager and slit spectrograph)”: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, SPIE, Montreal, Quebec, Canada, 2014/6/22–27
- [29] Watanabe, J., Enomoto, T., Terai, T., Kasuga, T., Miyazaki, S., Oota, K., Muraoka, F., Onishi, T., Yamasaki, T., Mito, H., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Matsunaga, N., Sako, S., Kobayashi, N., and Doi, M., “Faint-meteor survey with a large-format CMOS sensor”: “Asteroids, Comets, Meteors 2014”, Helsinki, Finland, , 2014/6/30–7/4
- (国内会議)  
一般講演
- [30] 橋本 拓也: Ly $\alpha$  Profile and Gas Motion, 「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」ミーティング, 筑波大学, 2014/5/29–30
- [31] 川俣良太, 石垣真史, 大栗真宗, 嶋作一大, 大内正己: Hubble Frontier Fields 2: Evolution of Galaxy Sizes, 「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」ミーティング, 筑波大学, 2014/5/29–30
- [32] 日下部 晴香 他:  $z \sim 2$  の LAEs の赤外放射で探る小質量銀河のダスト吸収, 第 1 回銀河進化研究会, ポスター発表, 2014/6/4–6, 国立天文台, 三鷹
- [33] 酒向 重行 他: Kiso wide-field CMOS camera and new science capability Chile-Japan Academic Forum in the University of Tokyo, Workshop “Astrophysics and Astronomical Instrumentation”, 2014/10/8, 天文学教育研究センター
- [34] 酒向 重行 他: 東京大学木曾観測所超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の開発, 2014/12/3, 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台, 三鷹
- [35] 菊池 勇輝 他: 木曾広視野 CMOS カメラ Tomoe データ取得部のシステム設計, 2014/12/3, 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台, 三鷹
- (学会発表)
- 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形大学 (2014/09/11–13)
- [36] 橋本拓也, 大内正己, 嶋作一大, 澁谷隆俊, 小野宜昭, 中島 王彦 (国立天文台), Anne Verhamme, Daniel Schaerer (ジュネーヴ天文台), Michael Rauch (OCIW): Close Comparison between Observed and Modeled Ly $\alpha$  Lines, X28a.
- [37] 川俣良太, 石垣真史, 大栗真宗, 嶋作一大, 大内正己: 重力レンズで探る高赤方偏移銀河の サイズ進化とそのダークハロー依存性, X44a.
- [38] 日下部晴香, 嶋作一大, 大内正己, 中島王彦 (国立天文台):  $z \sim 2$  の Lyman $\alpha$  輝線銀河 (LAEs) のダスト放射の性質とその応用, X27a.
- [39] 酒向重行, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 小林尚人, 諸隈智貴, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 前原裕之, 三戸洋之, 藤堂颯哉, 菊池勇輝, 白井文彦, 有松亘 (東京大学), 田中雅臣, 渡部潤一 (国立天文台), 富永望 (甲南大学): 木曾観測所超広視野 CMOS カメラの開発計画, V219a
- [40] 菊池勇輝, 酒向重行, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 小林尚人, 諸隈智貴, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 前原裕之, 三戸洋之, 藤堂颯哉, 白井文彦, 有松亘 (東京大学), 田中雅臣, 渡部潤一 (国立天文台), 富永望 (甲南大学): 木曾超広視野 CMOS カメラのデータ取得部のシステム設計, V220b
- 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学 (2015/03/18–21)
- [41] 後藤亮介, 嶋作一大, 大内正己, 日下部晴香, 中島王彦 (ジュネーヴ天文台), 小野宜昭, 橋本拓也: ライマンアルファ輝線銀河の SED の多様性, X10b.
- [42] 日下部晴香, 嶋作一大, 清水一紘: 銀河進化における UV 減光とダストのジオメトリー, X15c.

- [43] 酒向重行, 小林尚人, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 高橋英則, 大澤亮, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 三戸洋之, 中田好一, 藤堂颯哉, 菊池勇輝, 松永典之, 白井文彦, 有松亘 (東京大学), 田中雅臣, 渡部潤一, 前原裕之 (国立天文台), 富永望 (甲南大学), 板由房, 小野里宏樹, 花上拓海, 岩崎仁美 (東北大学), 猿楽祐樹 (JAXA), 浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 佐藤幹哉 (かわさき宙と緑の科学館), 河北秀世, 近藤荘平 (京都産業大学), 谷川衝 (理化学研究所): 超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の観測戦略, V215a
- [44] 菊池勇輝, 酒向重行, 小林尚人, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 高橋英則, 大澤亮, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 三戸洋之, 中田好一, 藤堂颯哉, 松永典之, 白井文彦, 有松亘 (東京大学), 田中雅臣, 渡部潤一, 前原裕之 (国立天文台), 富永望 (甲南大学), 板由房, 小野里宏樹, 花上拓海, 岩崎仁美 (東北大学), 猿楽祐樹 (JAXA), 浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 佐藤幹哉 (かわさき宙と緑の科学館), 河北秀世, 近藤荘平 (京都産業大学), 谷川衝 (理化学研究所): 超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e の読み出しシステムの開発, V216b
- [45] 大澤亮, 酒向重行, 小林尚人, 土居守, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 高橋英則, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 三戸洋之, 中田好一, 藤堂颯哉, 菊池勇輝, 松永典之, 白井文彦, 有松亘 (東京大学), 田中雅臣, 渡部潤一, 前原裕之 (国立天文台), 富永望 (甲南大学), 板由房, 小野里宏樹, 花上拓海, 岩崎仁美 (東北大学), 猿楽祐樹 (JAXA), 浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 佐藤幹哉 (かわさき宙と緑の科学館), 河北秀世, 近藤荘平 (京都産業大学), 谷川衝 (理化学研究所): 超広視野高速 CMOS カメラ Tomo-e のバックエンド解析システムの開発, V217b
- [46] 満田和真, 土居守, 諸隈智貴, 鈴木尚孝, 安田直樹 (東京大学) 表面測光による  $z \sim 1$  の楕円銀河の詳細な形状分析, X02a

(その他)

集中講義

- [47] 土居 守 “Galaxies and Cosmology”, International School for Young Astronomers (ISYA) 2014, Chaing Mai, Thailand



## 4 地上サブミリ波観測

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

### 4.1 星形成から惑星系形成に至る物質進化の研究

#### 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・理論両面から活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。本研究室では、銀河系および系外銀河における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によって研究している。

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

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

**【動き出した ALMA (アルマ)】** ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) A は、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波干渉計で、日本、北米、欧州による共同建設が進んでいる。2011 年 10 月から部分運用が始まっており、我々のグループでも成果が出つつある。ALMA は既存装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を一挙に進展させつつある。

**【テラヘルツ帯観測の開拓】** テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには  $C^+$ ,  $N^+$  などの原子スペクトル線の他、 $CH$ ,  $H_2D^+$ ,  $HD_2^+$  などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測によ

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

#### 4.1.2 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著に違うことがわかった点である。その一つの典型は、 $HCOOCH_3$  などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる(へびつかい座の IRAS16293-2422 など)。もう一つの典型は、炭素鎖分子が異常に豊富な天体(おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359)で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。このような分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成研究においても注目され始めている。さらに重要なことは、このような分子組成の違いがどのように惑星系へ伝播されるかである。本研究室では、これらの点を中心に、ALMA などを用いて幅広い研究を進めている(図 4.1)。

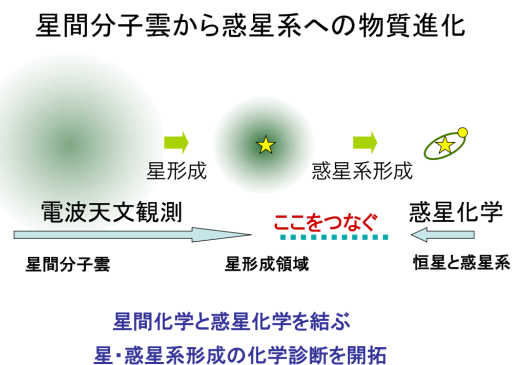


図 4.1: A schematic illustration of our goal

**【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】** 昨年度、ALMA を用いて、おうし座分子雲にある原始星 L1527 の高感度・高空間分解能観測を行い、原始星円盤が形成される様子を調べた。いくつかの分子のスペクトル線観測から、中心星から半径 100 AU の位置に回転落下円盤の遠心力バリアがあることを

発見し、そこで劇的な学組成の変化が起こっていることを示した。遠心力バリアは原始星円盤形成の最前線なので、それを観測的に捉えたことは大きな意義がある。本年度は、ALMA 観測データの解析を進め、遠心力バリアを境にどのような分子組成の変化が起こっているかを詳しく調べた。その結果、CCH や  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  のような炭素鎖関連分子と CS は遠心力バリアの外側に主に存在していることが示された。逆に SO や  $\text{CH}_3\text{OH}$  は遠心力バリアの近傍で急激に増加し、その内側にまである程度存在している。一方、 $\text{H}_2\text{CO}$  は全体に広がって存在していることがわかった (図 4.2)。そこで、 $\text{H}_2\text{CO}$  に対する分子の存在量比を見積もったところ、遠心力バリアを境に存在量の大きな変化が確認された (図 4.3)。遠心力バリア近傍では弱い降着衝撃波が生じるため、ガス中に含まれる塵 (星間塵) 表層に凍りついていた SO や  $\text{CH}_3\text{OH}$  などが蒸発してくる。原始星円盤の赤道面では密度が非常に高く ( $> 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) 温度も低い ( $< 30 \text{ K}$ ) ので、遠心力バリアを通過した後は、炭素鎖関連分子などの不揮発性の分子は星間塵に凍りつく。円盤形成に伴ってこれほどまでの激しい分子組成変化がおこることは予想すらされていなかった。この天体については、ALMA によるさらに高空間分解能の観測が予定されており、今後の発展が期待される。

**【低質量原始星 L1527 におけるアウトフロー】** CS ( $J=5-4$ ) 輝線の高分解能観測 ( $\sim 0''.7$ ) の結果、原始星から南北に伸びるほとんど edge-on のエンベロープ成分と、バタフライ状に広がる弱いアウトフロー成分が確認された。回転落下エンベロープガスのモデルと観測された速度場との比較から、このエンベロープの向きは、完全な edge-on からエンベロープの西側の面が手前に向くよう  $5^\circ$  程度傾けた状態であることがわかった。またアウトフローの速度場は典型的な放物面モデルで説明された。この傾きの方向は、従来報告されていたものと反対であり、このことは、アウトフローの軸とエンベロープの回転軸が必ずしも平行でないこと、あるいはアウトフローの軸が歳差運動をしている可能性を示唆する。

**【L1527 における  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子の  $^{13}\text{C}$  同位体比異常】** 野辺山 45 m 望遠鏡および IRAM30 m 望遠鏡を用いた L1527 に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測のデータを解析し、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子と 2 種類の  $^{13}\text{C}$  同位体の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比を求めた。その結果、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  の同位体比は元素の同位体比 (60-70) より有意に高いことが明らかになった。 $\text{C}^+$  を起源として生成される分子は  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が高くなるのが理論的に予測されており、この結果はそれを支持する。さらに、2つの同位体種間で  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が異なることを示した。この結果は、この分子が生成される反応過程の理解に強い制限をあたえるものである。

**【L1527 における  $c\text{-C}_3\text{D}$  の検出】** L1527 のラインサーベイ観測では、 $c\text{-C}_3\text{H}$  分子が非常に強く検出され、関連分子である  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  や  $l\text{-C}_3\text{H}$  に対する存在量比が他天体に比べ高いことがわかった。これは、WCCC の効果によるものと考えられる。それに伴い、 $c\text{-C}_3\text{H}$  の重水素化分子である  $c\text{-C}_3\text{D}$  を分子雲で初めて検出した。 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  および  $l\text{-C}_3\text{H}$  の重水素化分子  $c\text{-C}_3\text{HD}$ 、 $c\text{-C}_3\text{D}_2$  および  $l\text{-C}_3\text{D}$  の輝線も検出した。これらの分子種の D/H 比の関係は、WCCC で

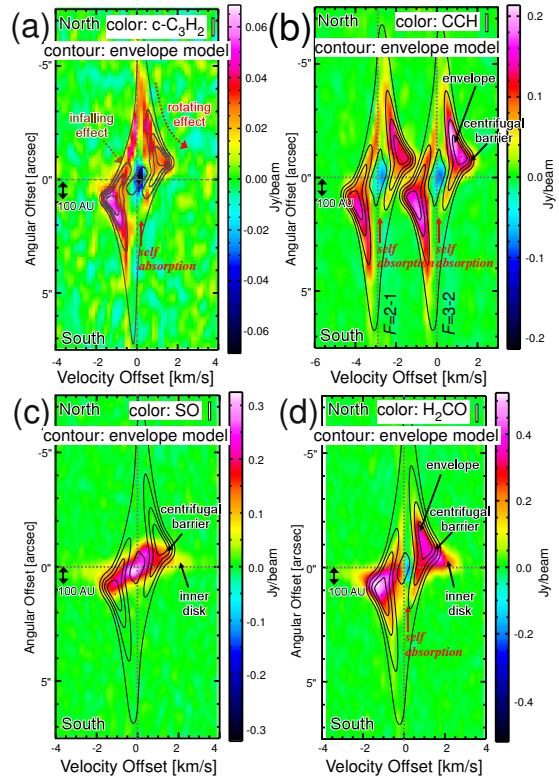


図 4.2: Position-velocity diagrams of  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ , CCH, SO, and  $\text{H}_2\text{CO}$  observed toward L1527. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ , CCH reside in the envelope.  $\text{H}_2\text{CO}$  exists in the overall region.

の生成過程から予測されるものと矛盾しない。

**【IRAS 16293-2422 における回転落下エンベロープ】** IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星連星 (Source A, B) である。この天体は、原始星付近の暖かい領域に飽和有機分子を多く含む典型的なホットコリノとして知られる。今回、天体の向きがより edge-on に近い Source A について、アーカイブデータの再解析を行った。解析に用いた輝線は、 $\text{C}^{34}\text{S}$  (SMA) と  $\text{HCOOCH}_3$  (ALMA) である。再解析の結果、どちらの輝線でも北東-南西方向に伸びるエンベロープ成分が確認された。 $\text{C}^{34}\text{S}$  の速度構造は、L1527 と同様の回転落下エンベロープのモデルで再現されることがわかった。一方、 $\text{HCOOCH}_3$  の分布は遠心力バリア付近に集中していることがわかった。このことは、この天体の特徴である飽和有機分子が、遠心力バリアでの降着衝撃波によって星間塵から蒸発している可能性を示唆する。

**【ペルセウス座分子雲における原始星天体の分子組成の多様性の統計的研究】** 低質量原始星天体の化学的多様性については、ホットコリノ天体と WCCC 天体の 2つの極端なケースが見出されてきた。しかし、確実なホットコリノ天体は 5 個程度、WCCC 天体に



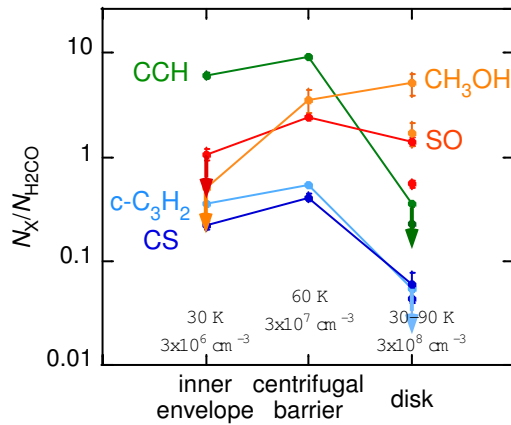


図 4.3: A Change in molecular abundances across the centrifugal barrier. Arrows represents upper limits.

については 2 個であり、他の大多数の原始星の分子組成の特徴は明らかになっていない。そこで、ペルセウス座分子雲に含まれる原始星天体 37 個について、分子組成の特徴を調べる統計的研究を、野辺山 45 m 電波望遠鏡と IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いてスタートした。予備的解析から、多様性の特徴が見えつつある。

**【TMC-1 における大型飽和有機分子の検出】** 飽和有機分子は星形成領域における特徴的な分子として知られている。近年の研究により、それらが星なしコアの星間塵上に相当量存在していることがわかってきた。低温分子雲における飽和有機分子の生成過程についての理解を深めるため、TMC-1 に対して CH<sub>3</sub>OH のマッピング観測を行った。その結果、CH<sub>3</sub>OH がコア周辺の低密度領域で豊富であることを見出した。そこで、CH<sub>3</sub>OH のピーク強度位置で CH<sub>3</sub>CHO および大型有機分子の観測を行った (図 4.4)。その結果、CH<sub>3</sub>OCHO を TMC-1 において初検出し、CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub> を暫定的に検出した。これは、TMC-1 という若い進化段階にある星なしコアにおいて、既に星間塵上で大型飽和有機分子が生成されていることを示唆する重要な結果である。

**【星形成領域における重水素濃縮度】** 原始星形成に伴う重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551 IRS5, IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度の分布を観測した。原始星形成に伴う温度上昇のため、原始星近傍では重水素濃縮度が減少する。イオン種と中性分子種では減少速度が違い、中性分子種の場合の減少のタイムスケールは 10<sup>5</sup> 年程度と予想される。観測では、この予想と整合する結果が得られた。

**【大質量星形成領域 NGC 2264 ラインサーベイ】** NGC 2264 C 領域はオリオン星雲に次ぎ太陽系に近い大質量星形成領域であり、その中で最も重い CMM3 には力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随しており、非常に若い段階の原始星であると考えられる。若い段階の大質量原始星の化学組成を調べるため、国立天文台野辺山 45m 鏡に搭載された T70 受信機

を用いて、68–115 GHz 帯の分子輝線サーベイを実施した。観測の結果、265 本の輝線を検出し 35 種類の分子と 29 種類の同位体種を同定した。特に、C<sub>4</sub>H、HC<sub>3</sub>N、C<sub>3</sub>S などの炭素鎖分子の輝線強度が相対的に強く、代表的な Hot Core である Orion KL とはかなり異なる化学組成を持つことがわかった。

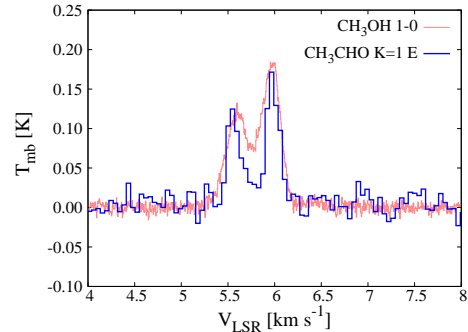


図 4.4: Spectra of CH<sub>3</sub>OH and CH<sub>3</sub>CHO observed toward TMC-1, showing a similar double peaked profile.

**【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】** おうし座の分子雲 HCL2 に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 分子の基底状態遷移の観測を行った。この遷移は 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHz の 4 本の超微細構造線からなり、それらのうち 1612 MHz の遷移が宇宙背景放射に対する吸収線として観測された。吸収線を説明するため、OH 分子の統計平衡計算を行ったところ、吸収を起こしている雲の運動温度は 50 K 程度であることが示された。また、1612 MHz 遷移は 40 K 程度以上で吸収線、40 K 程度以下で輝線となることがわかり、良い温度計となり得ることもわかった。HCL2 の東側の希薄な星間雲と HCL2 本体についてストリップスキャン観測で温度分布を調べたところ、いずれも雲の中心部分で温度が下がり、OH 分子の柱密度が上昇することがわかった。分子雲をとりまく希薄な星間雲の温度分布は、分子雲形成の理解につながる重要な知見であり、OH 分子の観測でその測定ができることを示したことは大きな意義がある。

#### 4.1.3 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と分子組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測され

る化学組成の持つ意味と起源を明らかにすることが、系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本研究室では以下の研究を推進している。

**【M51の渦状腕における分子分布】** 近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、CRAMA 干渉計を用いたイメージング観測を実施した。観測した領域は、IRAM 30 m を用いてラインサーベイを実施した 2 点を含む領域である。観測の結果、5–7'' 程度の空間分解能で  $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 、CN、CS、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 、HNC の分布を明らかにすることに成功した (図 4.5)。それぞれの分子の分布が異なることから、数 100 pc スケールでは渦状腕において化学組成に違いが生じることが明らかになった。一方で、星形成領域で存在量が顕著に増加する分子は見られないことから、このスケールの化学組成は星形成活動よりガスダイナミクスなどの影響を受けると考えられる。

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

**【大マゼラン雲におけるラインサーベイ】** 大マゼラン雲 (The Large Magellanic Cloud: LMC) は、近傍にある矮小不規則銀河であり、重元素量が我々の銀河系の半分程度と低いことで知られている。昨年度に引き続き、この銀河の中にある分子雲を対象に、オーストラリアの Mopra 22 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。昨年度と合わせて、観測時間は 450 時間にのぼり、計 7 つの分子雲について高感度のデータを得ることができた。その結果、7 つの分子雲の化学組成は星形成段階によらず類似していること、LMC の分子雲では我々の銀河系の分子雲と比べ、CCH 分子が多く、 $\text{CH}_3\text{OH}$  分子が少ないことを見出した。これは重元素量の少なさを反映した LMC の特徴であると考えられる。

**【IC10 におけるラインサーベイ】** 上記の LMC の観測結果は、低重元素量銀河の分子雲における化学組成の質的特徴を浮き彫りにした。LMC で見られた CCH 分子が豊富で  $\text{CH}_3\text{OH}$  が少ないという特徴が低重元素量の銀河で一般に見られるものであるのか検証するため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、LMC よりもさらに重元素量の低い銀河である IC 10 の分子雲をラインサーベイ観測した。結果として、複数の分子の輝線を検出することができ、LMC で見られた特徴がこの銀河でも見られることがわかった。

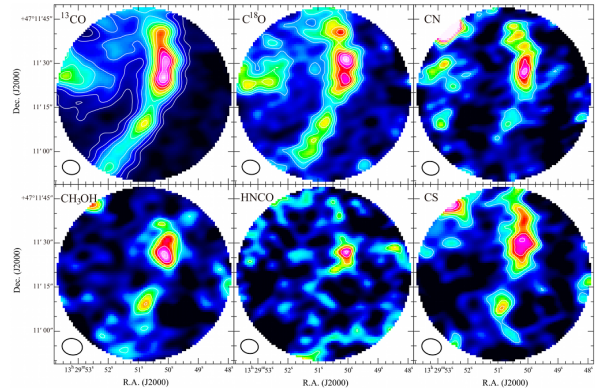


図 4.5: Molecular distributions in M51

**【銀河系分子雲のマッピングラインサーベイ】** 系外銀河における分子ガスの化学組成と、銀河系の分子ガスの化学組成を比較するために、銀河系内の大質量形成領域 W51 に対してマッピングラインサーベイを Mopra 22 m 望遠鏡で行った。観測した領域全体 (50 pc × 50 pc) でスペクトルを平均すると星形成の影響は薄められ、広がった希薄な分子ガスの化学組成が優勢になる。その結果は M 51 などの系外銀河で観測されるスペクトルと類似することがわかった。同様に、銀河系内の大質量星形成領域 W3(OH) に対しても、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、10 pc に相当する領域を 3 mm 帯の分子スペクトル線でマッピング観測した。現在、詳細な解析が進行中である。

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

**【ASTE 搭載 THz 受信機の開発】** THz 帯には星間空間における化学反応の始点となるような基本的な原子・分子の輝線が存在する。それらの分子の観測は星間空間における化学反応の根幹を捉える上で基本的な重要性を持っている。THz 帯での高空間分解能観測を行うことを目指して、大口径地上望遠鏡搭載に向けた THz 帯受信機の開発を進めている。開



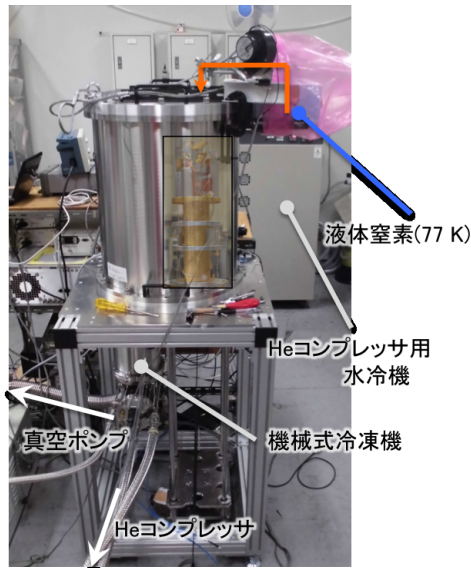


図 4.6: A test cryostat for evaluation of the THz HEB mixer receiver

発している受信機は ALMA カートリッジタイプで、900 GHz 帯と 1.5 THz 帯の 2 つの周波数帯を同時に観測できる。導波管型 HEB ミクサを使用しており、IF 帯域は 0.8-1.3 GHz である。HEB ミクサ素子は東京大学の研究室で開発・作成し、実験室で試験したミクサ雑音温度は 809 GHz で 390 K、1475 GHz で 490 K を達成している。1.5 THz 帯の性能は量子雑音の 7 倍程度であり、これは導波管型の HEB ミクサとしては世界最高の性能である。これまでの望遠鏡搭載実験を踏まえ、局部発振器の最終通倍器をカートリッジ内部に設置し、冷凍機の機械振動を排除できるよう改良を行った。これにより、受信機の実出力安定性を向上させるとともに、運用時の負担軽減を計っている。カートリッジ冷却試験用デューワーを新たに導入し、実際の運用を想定した状況で性能評価を行っている (図 4.6)。一層の低雑音化、広 IF 帯域化を目指しての HEB ミクサ素子の改良を進めるとともに、光学系・導波管回路の改良による観測 RF 帯域の広帯域化の研究も進めている。

**【THz-TDS による超伝導薄膜の評価】** HEB ミクサの心臓部である超伝導薄膜の物性を調べることは、その動作原理を理解し、検出性能を向上させるために重要である。本年度より、東大物性研の浅原彰文氏と末元徹教授との共同研究により、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) を用いた超伝導薄膜の物性評価実験を開始した。当研究室で作製した NbTiN 薄膜 (30 nm) のテラヘルツ伝導特性 (0.2 2 THz) を転移温度近傍 (11 K) について測定し、Mattice-Bardeen モデル解析によって超伝導特性に関する情報を抽出した。

**【準光学型 THz 帯 HEB ミクサの開発】** 有限境界要素法による Singular ソフトウェアをもちいて、1.9 THz 準光学ツインスロットアンテナの周波数応答と

ビームパターンをシミュレーションし、設計パターンの改良を行った。機械式 4K 冷凍機の振動に伴って局部発振器からの入射パワーがゆらぎ、これが HEB ミクサの出力変動を誘起する。この振動の影響を最小限に抑えるように GRASP シミュレータをもちいて光学伝送系の最適化を行った。この研究は大阪府立大学の前澤裕之准教授との共同研究である。

#### <受賞>

- [1] 大屋瑠子、Poster Award, Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.

#### <報文>

(原著論文)

- [2] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51 in the 3 mm and 2 mm Bands", *ApJ*, 788, 4 (2014).
- [3] Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Ceccarelli, C., Kahane, C., Lopez-Sepulcre, A., Lefloch, B., Vastel, C., Bottinelli, S., Caux, E., Coutens, A., Aikawa, Y., Takakuwa, S., Ohashi, N., Yen, H.-W., & Yamamoto, S., "A Chemical View of Protostellar Disk Formation in L1527", *ApJ*, 791, L38 (2014).
- [4] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., & Yamamoto, S., "A Substellar-Mass Protostar and Its Outflow of IRAS15398-3359 Revealed by Subarcsecond Resolution Observations of H<sub>2</sub>CO and CCH", *ApJ*, 795, 152 (2014).
- [5] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., "Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1", *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [6] Shiino, T., Furuya, R., Soma, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Ling, J., Maezawa, H., Yamakura, T., Sakai, N., and Yamamoto, S., "Low-Noise 1.5 THz Waveguide-Type Hot-Electron Bolometer Mixers Using Relatively Thick NbTiN Superconducting Film", *JJAP*, 54, 033101 (2015).

(国内雑誌)

- [7] 山本 智、「もっと化学を」、日本天文学会 天文月報、Vol. 107, 620, 2014.

(学位論文)

- [8] 柴田大輝、"The Behavior of the Deuterated Species after Birth of Protostars" (博士論文)
- [9] 大屋瑠子、「ALMA を用いた太陽型原始星のエンベロープおよびアウトフローの研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Sakai, N., "A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation", The Early Phase of Star Formation, Ringberg, Germany, 2-6, Jun, 2014
- [11] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sorai, K., & Yamamoto, S., "Chemical Compositions of Spiral Arm Clouds in M51", Behind the curtain of dust - the molecular view of activity in (U)LIRGs Sexten, Italy, 14 - 18, July, 2014

## ポスター発表

**【Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo, December 8-11, 2014】**

- [12] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sora, K., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51".
- [13] Lopez-Sepulcre, A., Taquet, V., Ceccarelli, C., Neri, R., Kahane, C., & Charnley, S.B., "Complex organics in the planet formation region of two solar-type protostars"
- [14] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., "Origin of Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1".
- [15] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Quiescent Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud"
- [16] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Sakai, T., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jørgensen, J.K., & van Dishoeck, E.F. "Submillimeter-Wave Observations toward the Low-Mass Protostar IRAS 15398-3359 at Subarcsecond Resolution".(Poster Award 受賞)
- [17] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Watanabe, Y., Sakai, N., Menten, K.M., & Yamamoto, S., "Effects of Line Overlap in Statistical Equilibrium Calculations of OH".
- [18] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., & Yamamoto, S., "Abundance Anomaly of the  $^{13}\text{C}$  Isotopic Species of  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ "

## 招待講演

- [19] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K. & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51", Chemical Diagnostics in the ALMA/NOEMA Era - MPIA/ISM-SPP workshop 2014 The Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg, Germany, 21-23, July, 2014.
- [20] Sakai, N. & Yamamoto, S., "Chemical Evolution of Star-Forming Cores toward Protostellar/Planetary Disks", Workshop on Interstellar Matter 2014, Hokkaido University Sapporo, October 16 - 18, 2014.

- [21] Sakai, N., "Protostellar Disk Formation Traced by Chemistry", Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.
- [22] Sakai, N., "Chemical Evolution in Star and Planet Formation", 6th RSC-CSJ Joint Symposium on Advanced Measurements for Chemistry, Nihon University, Funabashi, March 27, 2015.

## (国内会議)

## 一般講演

**【天文学会 2014 年秋季年会、山形大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】**

- [23] Sakai, N. Oya, Y., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Hirota, T., Aikawa, Y., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H-W., Ceccarelli, C., IPAG group members. "A Chemical View of Protostellar-Disk Formation in L1527" P115a
- [24] 西村優里、渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「M51 の渦状腕における 70 GHz 帯の輝線観測」、R11a
- [25] 渡邊祥正、坂井南美、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 70 GHz 帯分子輝線サーベイ」、P105a
- [26] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い原始星に付随するエンベロープおよびアウトフローのモデル解析」、P116a
- [27] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 分子の超微細構造遷移線における Line Overlap を含めた統計平衡計算」Q47b
- [28] 吉田健人、徳留智矢、坂井南美、渡邊祥正、山本智、高野秀路、NRO ラインサーベイメンバー、Bertrand Lefloch、ASAI メンバー、「NRO 45 m/IRAM 30 m を用いた L1527 ラインサーベイ」、P126b

**【天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2014 年 3 月 18 - 21 日】**

- [29] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智 「Multi Line Observation toward Spiral Arm of M51 with the CARMA」、R09a
- [30] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Detection of Complex Organic Molecules in Starless Core; TMC-1」、P116a
- [31] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智、「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトラルラインサーベイ II」、Q33a
- [32] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「ALMA によるおうし座 Class 0 原始星 L1527 の観測」、P129a
- [33] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「HCL2 領域における OH 吸収線と構造形成の関係の研究」、P114a
- [34] 吉田健人、坂井南美、西村優里、Lopez-Sepulcre, A., 渡邊祥正、Lefloch, B., 山本智、「低質量星形成領域 L1527 における  $c\text{-C}_3\text{D}$  の検出」、P115a

- [35] 山本智、相馬達也、吉田健人、海老澤勇治、西村優里、渡邊祥正、椎野竜哉、大口脩、酒井剛、小嶋崇文、Gonzalez, A., 「ASTE 10 m 望遠鏡搭載 THz 受信機の開発」、V119c

(書籍)

- [36] 坂井南美、日本物理学会編「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」日本評論社、第6章

(公開講演)

- [37] 坂井南美「生まれつつある原始惑星系円盤で劇的な化学変化」、科学ライブショー「ユニバース」、国立科学技術館、2014年4月5日

- [38] 坂井南美「アルマ望遠鏡で挑む星の誕生と星間化学」、朝日カルチャーセンター「アルマ望遠鏡が解き明かす宇宙の謎」、横浜、2014年8月30日

## 4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究

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

こうした、ダストに隠された星形成活動を検出する決定打となるのが、ミリ波・サブミリ波帯の連続波観測である。爆発的星形成で放射される強烈な紫外光を吸収し、数10Kに熱せられたダストの熱放射は、約100 $\mu$ m付近にピークを持ち、そのRayleigh-Jeans側にあたるミリ波サブミリ波帯で観測されるダスト熱放射は、 $S_\nu \propto \nu^{3\sim 4}$ もの強い傾きを持つ。これが、赤方偏移によって長波長側へシフトしてくるため、結果として、この波長帯では、ダスト放射のみかけのフラックスが、赤方偏移が大きくなってほとんど変化しないという特徴を示す (Blain et al. 2002, Physics Reports, 369, 111; Casey et al. 2014, Physics Reports, 541, 45)。これは、高赤方偏移になるほど急速に暗くみえる可視光・赤外線や長波長の電波領域には見られない、極めてユニークな性質であり、本プロジェクトでは、この性質を最大限に活用したミリ波サブミリ波帯による深撮像サーベイと、その追及観測に基づく銀河、特に、質量の大きい銀河の形成・進化の研究、また、そのような銀河の中

心核における活動現象および巨大ブラックホールの進化に関する観測的研究を進めている。また、こうした観測的研究を進展させるため、ミリ波サブミリ波帯における新しい観測装置や観測手法の開発にも取り組んでいる。

### 4.2.1 高赤方偏移銀河の観測研究

#### SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> deep survey

ALMAを使い、SXDF-UDS-CANDELSの1.5平方分領域における1.1mm帯での高解像度(0".5)deep imaging観測を行った。観測はALMA cycle 1のhighest priority programとして採択されたが、cycle 2にcarry overされ、2014年の7月17日-18日にかけて、アンテナ30台を使って実施された。ベースライン長は20mから650mの範囲をカバーし、可降水量(PWV)は0.42-0.55mmという非常によい大気条件の下で観測が行われた。達成された1 $\sigma$ 感度は最も深いところで55 $\mu$ Jyであり、これは、赤外線光度 $L_{\text{IR}} \sim 6 \times 10^{11} L_{\odot}$ (ただしダスト温度 $T_{\text{dust}} = 40$  Kの場合、温度が高くなるにつれて対応する赤外線光度での検出限界は高くなる)あるいは星生成率 $\text{SFR} \sim 100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の天体があれば $z \sim 10$ まで検出可能な感度となっている。この結果、4 $\sigma$ 以上のcontinuum sourceが合計23個検出された。また、観測周波数範囲内で、周波数幅60MHzでのslice(channel map)を作成し、“3次元cube”(空間2次元+周波数方向(redshift方向)1次元)として、3次元空間内で閉じた構造を同定するclump find algorithmを適用した解析を行ったところ、複数の輝線銀河候補天体が検出された。

観測した領域は、SXDF-UDS-CANDELSやVLT/HAWK-Iによる深い撮像(HUGS)、Spitzer(SpUDS, SEDS)、およびJVLA(K-bandおよびC-band)の深い撮像データがあるため、ALMAで検出された天体の対応天体を同定し、その性質を調べる研究が進められている(山口ほか)。また、この観測領域内には、すばる望遠鏡+MOIRCS(narrow band filter)によるH $\alpha$ 輝線銀河や[OII]輝線銀河が多数検出されており、こうした $z \sim 2$ の輝線銀河種族との対応関係についても解析が進められ、論文投稿準備が進んでいる(但木ほか)。この領域内で検出されたサブミリ波銀河の銀河計数(廿日出ほか)、K-band選択の銀河に対するstacking解析(Wangほか)などの論文出版準備も進められている。

clump findにより検出された輝線銀河候補のうち、最もsignificanceの高いものについては、銀河と考えて矛盾のない線幅を持ち(FWHM  $\sim 100$  km s<sup>-1</sup>)、近/中間赤外線域で顕著な対応天体が存在しないことから、 $z = 5.955$ の[CII]輝線の可能性がある。この場合、観測された[CII]輝線の光度は $L_{\text{[CII]}} = 5.1 \times 10^8 L_{\odot}$ に及ぶ。波長1mm付近でALMAを使った掃天観測を行うと、検出される輝線銀河としてはlow redshiftでのCO輝線銀河よりも $z \sim 6$ の[CII]輝線銀河の割合が高くなるとする経験的予測

や理論的な検討 (たとえば Geach & Papadopoulos 2012, ApJ, 757, 156) とも整合している可能性があり、ALMAを含めた follow up を進めていく予定である。[35][36]

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

SSA22 はライマンブレイク銀河やライマン  $\alpha$  輝線銀河の極めて顕著な密度超過から赤方偏移 3.1 の宇宙に原始銀河団が存在する領域だと考えられている。このような高赤方偏移の原始銀河団領域は希少であり、宇宙全体の星形成活動に大きな寄与を示すサブミリ波銀河の発見や進化と宇宙の大規模構造の関係性を調べる上で重要な実験場として期待される。本領域において、我々が行った ASTE 望遠鏡に AzTEC カメラを搭載した広視野高感度サブミリ波観測によって 125 個のサブミリ波銀河が発見された。さらに電波や赤外線を用いた天体同定と測光赤方偏移の推定から、10 個のサブミリ波銀河が SSA22 原始銀河団のメンバーである可能性が高いことが示された。さらに SSA22 原始銀河団を構成するライマン  $\alpha$  輝線天体とサブミリ波銀河の 2 点角度相関関数は両者の強い空間相関を示し、またサブミリ波銀河の体積密度が一般領域に比して数桁高いことも判明した。本研究で示された結果は、原始銀河団のなかでも特に高密度の環境で選択的に大質量銀河が形成・進化するという、銀河進化の環境依存性を強く示唆する (Umehata et al., 2014, MNRAS, 440, 3462)。ALMA を使った大規模なフォローアップ観測が実施され、 $z = 3$  の Ly $\alpha$  輝線銀河を指標とした銀河の密集度 (環境) をパラメータ化して大質量爆発的星生成銀河やそでの活動的巨ブラックホールの発見頻度を定量的に比較し、高密度環境化では、サブミリ波銀河や活動銀河核の存在量が (Ly $\alpha$  銀河でトレースされるような、質量の軽い銀河の個数の増加で期待される増え方よりも) 非線形に増加していること、すなわち、銀河の環境効果によりこうした激しい活動性を伴う銀河の生成が加速されること、を明快に示した [3][11][16]。

### ALMA を使った $\gamma$ 線バースト母銀河における CO 分子輝線の初検出と異常に低いガス/ダスト比の発見

ALMA を使い、2 つの long-duration  $\gamma$  線バースト (以下、単に GRB と称する)、GRB021819B ( $z = 0.41$ ) および GRB051022 ( $z = 0.81$ ) から、CO 輝線およびダストからの熱放射の検出に成功した。GRB 母銀河における CO 輝線の検出はこれが初めてである。これまで、我々のグループは、世界に先駆けて GRB 母銀河におけるミリ波帯 CO 分子の回転遷移を使った分子ガスの探査を進めてきたが (たとえば GRB030329 における CO 輝線探査; Kohno et al. 2005, PASJ, 57, 147)、全て negative results にとどまっていた。GRB が大質量星の終末における爆発現象であり、宇宙における星生成活動のトレーサーとして利用できることと示唆がある一方で、では GRB を

起こしている銀河は通常の星生成銀河と比較してどのような違いがあるのか (ないのか) という点については不明な点が多いが、特に星生成の材料である分子ガスが検出されない (通常、活発な星生成銀河では大量の分子ガスが観測される) 理由については全く理解されていない。こうした中、我々は、金属量が通常の星形成銀河と同程度 ( $\sim Z_{\odot}$ ) かつ多量のダストの存在が期待される dark GRB と呼ばれる GRB (X 線残光は明るいとその光度に対して期待されるほどには可視光の残光が明るくない GRB。この原因はいくつか考えられるが、一つの可能性は多量のダストが存在するために可視光が強く減光されているというシナリオである) を選んで CO 輝線を探査した。この結果、2 つの dark GRB において、CO 輝線とダスト連続波の検出に成功したのである。ところが、驚くべきことに、CO 輝線が検出されたのは各母銀河の中心領域で、そこから離れた場所にある GRB 発生場所では CO 輝線が検出されず、一方で強いダストからの熱放射のみが検出された。GRB 発生場所における分子ガスとダストの質量比 ( $M_{\text{gas}}/M_{\text{dust}}$ ) は 14 以下となり、天の川銀河や高赤方偏移銀河で知られている値 (数 10-数 100) とは、かけ離れていることがわかった。GRB は、通常の星形成領域とは異なる環境で発生する可能性を示唆するものであり、GRB を宇宙論的な星生成活動のプロープとして活用する上で、その母銀河の性質を更に理解することが不可欠であることを示している。以上の成果は、Nature 誌に掲載され (Hatsukade, B., et al. 2014, Nature, 510, 247)、また、プレスリリースを通して、広く関心を集めた [4][38]。

### Herschel 衛星アーカイブを利用した明るいサブミリ波銀河における電離ガスの物理化学状態の研究

大量のダストに覆われたサブミリ波銀河において、電離ガスの物理化学状態を調べるためには、ダスト減光の影響を受けにくい遠赤外線域の微細構造線が有用である。一方で遠赤外線域の微細構造線は大気による吸収のため、地上での観測は難しい。本研究では重力レンズの効果により極めて強く増光された明るいサブミリ波銀河における電離ガスの平均的な物理化学状態を調べるため、Herschel 宇宙望遠鏡に搭載された SPIRE-FTS モード (分光モード) で分光観測がなされた合計 23 天体の分光スペクトルに着目し、その周波数方向での stacking 解析を行なった。この結果、電離炭素からの微細構造線 ([CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線) を検出したほか、電離酸素、電離窒素の微細構造線 ([OIII] 88  $\mu\text{m}$ , [NII] 205  $\mu\text{m}$  輝線等) に上限値をつけることができた。特に、通常の星生成銀河では [CII] 輝線と同等以上の強度になる [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線が上限値 (未検出) となったことは驚きである。[CII] 輝線とほかの微細構造線の輝線強度比は、金属量や電離度など電離ガスの物理化学状態の指標となるが、今回得られた値から、SMG の金属量が平均的には太陽金属量程度と考えて矛盾はないが、より低い金属量である可能性も示唆されることになった。[31]



### 4.2.2 ミリ波サブミリ波帯分光観測に基づく銀河の活動性の研究

野辺山 45m 鏡や ASTE10m サブミリ波望遠鏡に、ALMA のデジタル相関器技術を用いた広帯域デジタル分光システムを搭載し、これによる、さまざまな銀河、特に活動的な銀河における、スペクトル線観測を行っている。これにより、天の川銀河の中には存在し得ない、極めて活動性の高い領域・異なる活動性の領域において、どのような物理化学過程が発現しているのか、を系統的に調べることができるとともに、活動銀河核に特徴的で、エネルギー源診断の「マーカー」となり得るスペクトル線やスペクトル線の組み合わせを見出すことも重要な目標の一つである。いよいよ初期科学運用を開始した ALMA による高感度高分解能観測により、スペクトル線によるエネルギー源診断を確立していくと共に、開発した手法を、高赤方偏移銀河、特に、サブミリ波銀河の中心核に適用することを目指す。

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

この他、ミリ波サブミリ波帯の分子輝線の分光観測に基づき、銀河における星形成の進化を探る観測的研究も行っている。これら近傍銀河で得られる知見は、空間的に分解して調べることが容易でない高赤方偏移銀河での星形成とそこでの物理素過程を解明していく上での重要な手掛かりとなる。

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

ALMA の Cycle 1 観測で得られた近傍の高光度 1 型セイファート銀河 (AGN) NGC 7469 における高密度ガストレーサー輝線データの解析を行った。NGC 7469 は、近傍宇宙では稀な 1 型 AGN であり、かつ高光度 AGN でもある。これは、我々の先行研究で調査した低光度 1 型 AGN である NGC 1097 の観測結果と比較する上で絶好のターゲットである。また、NGC 7469 は高光度かつ高 Eddington 比を持つ天体でもあるので、得られた結果は高赤方偏移のクエーサーを探索する際のテンプレートとしても重要である。今回 ALMA で得た HCN(4-3)、HCO<sup>+</sup>(4-3)、CS(7-6) 輝線放射の空間分布からは、これらの放射が空間的に強い中心集中を示すことが分かった。具体的には、HCN(4-3) 輝線の場合、観測視野内 (約 6 kpc) のフラックスの 80% 以上が中心数百 pc 領域 (circumnuclear disk = CND) から放射されている。また、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3)、HCN(4-3)/CS(7-6) 輝線強度比は、CND で 1 以上の値を示すが、CND を取り囲む環状の爆発的星形成領域 (スターバースtring) では 1 以下の値しか示さなかった。この結果は、これらの強度比が AGN の存在を示す経験的指標になりうる

と示唆した Izumi et al. (2013) と合致するものである。AGN 環境における HCN 輝線放射の原因として、これまで X 線による特異な化学組成の実現 (X-ray dominated region = XDR) が挙げられてきた。しかし、我々の観測結果では、高光度 AGN の NGC 7469 における輝線比は、低光度 AGN の NGC 1097 における比よりも有意に小さかった。約 1000 倍も異なる両者の X 線光度を考慮すると、AGN 環境における HCN 輝線放射の増加は、単に X 線による化学組成の変化だけでは説明することが難しい。X 線のような放射過程によるガスの加熱に加えて、AGN からのジェットやアウトフローによる力学的な加熱も、系の物理化学状態を決定する上で重要になると考えられる。以上の成果は、Astrophysical Journal に投稿中である (Izumi, T., Kohno, K., et al.) [15]。

#### 高密度分子ガス輝線の強度比を用いた銀河中心の熱源診断法の提唱

ALMA の観測成果に基づく Izumi et al. (2013)、Izumi et al. (2015, submitted to ApJ) により、AGN 周辺の分子ガス中では、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3)、HCN(4-3)/CS(7-6) 輝線強度比が、爆発的星形成銀河に比べて有意に高いという現象 (HCN-enhancement) が報告されている。ただし、これまでの研究では、ごくわずかなサンプル天体の観測に基づく議論が展開されているに過ぎなかった。そこで、我々は、HCN-enhancement 現象をさらに詳しく理解するために、ALMA のアーカイブデータや、文献を詳細に調べることで、サンプル天体数を先行研究より大幅に増やした上で、上述の 2 つの輝線強度比の天体のタイプへの依存性を調べた。その結果、やはり AGN においては HCN-enhancement が発現していることを確認した。たとえば、HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3) 強度比は、AGN では 1 以上だが、星形成銀河では 1 以下である。ただし、このような顕著な HCN-enhancement が見られるのは、少なくとも数百 pc スケールの空間分解能が達成されている場合である。電波単一鏡観測の kpc スケールの観測では、この兆候を見出すことは難しい。これは、AGN の活動 (たとえば X 線放射やジェット) が分子ガスに影響を及ぼす範囲が小さいことに起因すると考えられる。また、この HCN-enhancement 現象が発現する原因に対して知見を得るために、観測された分子輝線強度のモデリングを行なった。ここでは、密度、温度、組成が異なるガス雲を考え、そこでの分子種 (たとえば HCN) の存在量を変化させた際の輻射輸送を RADEX というオープンコードを用いて解くという操作を、様々なパラメータセットに対して行なっている。その結果、AGN で見られるような HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3) 比を再現するためには、HCN 分子の存在量が、通常の分子雲の組成に比べて 10 倍以上増加していなければならないことが分かった。これは、AGN の活動に起因して、周囲の分子ガス中に特異な化学組成が実現していることを示すものである。我々はこの結果を、現状提唱されている多くの星間化学モデルと観測事実と照らし合せながら、詳細に解釈した。そして、AGN 環境において分子ガスが高温に加熱さ

れることが、HCN 分子存在量の増加を説明するためには重要だろうという結論を得た。以上の成果は、Astrophysical Journal に投稿中である [15]。

### ALMA を使った NGC1068 中心領域におけるダスト関連分子の高感度イメージング探査

代表的な活動銀河 NGC1068 における ALMA を使ったダスト関連分子の高感度イメージング探査を行い、中心核と kpc スケールでのスターバースト領域において、いくつかの分子で特徴的な差異がみられることを初めて明らかにした。特に、 $\text{HC}_3\text{N}$  ははじめとする、強い紫外線により容易に破壊されるような“弱い”分子が活動銀河核周辺のみで顕著に検出されたことは驚きであった。これは、活動銀河の近傍に、強い紫外線を遮蔽するような構造が存在することを意味しており、現在考えられている AGN の統一モデルに対しても示唆を与えるものである。以上の成果は PASJ 誌において 2 編の論文として出版された [5][8]。

### ALMA calibrator sources での分子吸収線探査

遠方クエーサーを背景光源とする分子吸収線系は、銀河系内から遠方まであらゆる星間物質の化学的性質や進化を探求する上で極めて重要な観測対象であるが、その半面、強い背景光源が必要であることから、現在知られている吸収線系の数は極めて限られる。本研究では、新たな分子吸収線系を探査する対象として、過去に ALMA で観測されている膨大な数のキャリブレーション天体に着目した。ALMA アーカイブデータに含まれるキャリブレーション天体 36 個のスペクトル解析を行った結果、4 天体において銀河系内の星間物質由来の分子吸収線を検出することに成功し、このうち 3 天体は先行研究のない新たな銀河系内吸収線系であることが明らかになった。また 2 天体においては、過去に 2 例しか報告のない銀河系内の希薄なガスにおける HCO ラジカルの吸収線を検出したことに加え、HCO が PDR(光解離領域)のトレーサーであることから、観測された希薄なガスが PDR 的な環境下にあることが示唆された。さらに、HCO を含む 10 種もの分子吸収線を検出した新たな吸収線系 J1717-337 については、炭素同位体比の測定及び検出された速度成分の議論から、吸収を生じているガスまでの距離を約 2.5 kpc 以内と制限することができた。本研究を通して、複数の新たな分子吸収線系の検出に成功したことに加え、銀河系内のガスの化学的性質に関する知見を得られたことから、ALMA のキャリブレーション天体を用いた分子吸収線系探査が有効な手法であることが確かめられた。本研究は安藤亮の課題研究としてまとめられ、2015 年度には本探査の手法と新検出の吸収線系について速報的に報告するレター論文と、新たな吸収線系 J1717-337 の物理化学的性質に着目した論文として出版する予定である。[13]

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

多くの銀河の中心には、その質量が太陽の数百万倍から数十億倍にも及ぶ超巨大ブラックホール (super massive black hole = SMBH) が存在すると考えられている。その質量の測定方法は、水メーザーの運動を VLBI で測定する方法、星の速度分散を測定する方法、電離ガスの運動を測定する方法、などが知られているが、それぞれ適用できる銀河の性質に偏りがある。我々は、従来方法では SMBH の質量測定があまり測定されていなかった、晩期型銀河での SMBH 質量測定を行う方法として、cold molecular gas のトレーサーである分子輝線の運動を高い解像度で調べる手法に着目し、ALMA cycle 0 で観測された活動銀河 NGC1097 での HCN(1-0) および  $\text{HCO}^+(1-0)$  輝線の高解像度データを使って、SMBH 質量測定を試みた。ショックやアウトフローなどの影響を受けやすい電離ガスと異なり、低温の分子ガスは、銀河中心領域のポテンシャルをより忠実に反映した運動を示すことが期待される。星の質量分布としては HST による I-band の撮像データを利用し、これに様々な SMBH 質量を加えた時に期待される速度場を計算して、分子輝線で観測された速度場と比較、これを最もよく再現する SMBH 質量を推定する。この結果、SMBH 質量として  $M_{\text{BH}} = (1.40_{-0.32}^{+0.27}) \times 10^8 M_{\odot}$  (このときの I-band 出の mass/luminosity 比は  $5.14_{-0.04}^{+0.03}$ ) が得られた。この結果は、近傍の晩期型銀河で知られている SMBH 質量とバルジの速度分散との関係と整合していることが分かった。今後、ALMA の感度と解像度が向上していくことにより、より多数の銀河で、より信頼性の高い SMBH 測定が可能になると期待される。以上の結果は投稿論文としてまとめられた (Onishi, K., Iguchi, S., Sheth, K., & Kohno, K. 2015, ApJ, in press.)[9][17]。

### 4.2.3 ミリ波サブミリ波観測装置の開発

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

我々は、初期宇宙におけるダストに覆われた爆発的星形成銀河(サブミリ波銀河)を広域し、さらにそのミリ波/サブミリ波でのフラックス比(カラー)を使った赤方偏移への制限を得るため、270GHz 帯と 350GHz 帯の 2 波長同時撮像が可能なミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。UC Berkeley 等との共同研究により開発した超伝導遷移端センサー (TES) ボロメーターを使ったカメラであり、これまでの試験観測の結果を踏まえた改良を進めてきた。2014 年 3 月-4 月に 2 回目の commissioning 観測を実施し、sky dip 観測や望遠鏡が静止した状態でのデータ取得、惑星の観測による beam map 取得といった基本的な評価試験観測を進めた。これに加え、天の川銀河内の星生成領域や銀河中心領域の広域マッピング観測を重点的に行った。重力レンズサブミリ波銀河やガンマ線バースト天体のデータも取得した。得られた膨大な

データをもとに、各ボロメーター出力の時系列データの詳しい分析を進め、パワースペクトルに見られる特定の周波数でのノイズの同定とその原因追求を行うと共に、正常に動作しているボロメーターとそうでないボロメーターを判定する基準を見極め、各データに適用するなどの解析を進めている。この結果、まだ感度の点では設計値に到達しておらず、更なる改良の余地があるものの、NGC6334I や銀河中心領域において、広がった成分まで既存の他のカメラによる観測結果とよく整合する 270GHz/350GHz 帯画像を得ることに成功した。我々は、特に試験観測への参加およびデータ解析、特に sky dip データや beam map の解析・解釈などで重要な役割を担っている。今後は、引き続きデータ解析を進めていくことに加え、より改良した TES アレイの製作とそれを踏まえた 2016 年 3 月-7 月期における ASTE 望遠鏡への再搭載/Commissioning and Science Verification (CSV) キャンペーンの実施に向け、LC ボード部の新規設計や、実験室での評価試験、観測計画の策定などを担当して進めていく予定である [14]。

#### 周波数変調局部発振器を用いた新しいミリ波サブミリ波分光観測法の提唱とその実用化

ヘテロダイン受信機で用いられる局部発振周波数に変調をかける (Frequency Modulation Local Oscillator; FMLO) ことにより、大気放射や装置に起因する雑音を高効率で除去し、分光観測の感度および精度を向上させる新しい分光観測法 (FMLO を使った新しい分光観測法) を提案し (Tamura et al. 2013)、その実証試験および実用化のための開発を行っている。

今回我々は、FMLO を用いた観測が所定の性能を発揮すること、また従来のポジションスイッチング観測と矛盾ないデータが取得できることを確認するため、野辺山 45m ミリ波望遠鏡に搭載した FMLO での評価試験・観測を行った。この際、連続波多素子カメラのパイプラインを応用し、輝線プロファイルの再現性が大幅に改善されるとともに、相関雑音を分離する際に用いる主成分分析 (PCA) に確率的解釈を導入した「確率的主成分解析」の手法を適用・実装した。これにより、これまで、解析時に恣意的に決定する必要があった主成分数を現実的な計算時間内で自動的に最適化することができた。また、これらの手法を実装したパッケージを開発し、FMLO のデータリダクションを簡便かつ直感的に行えるようにすることができた。

評価試験では周波数信頼性やサイドバンド分離比測定を行い、これらが担保されていることを確認した。評価観測では周波数変調の速度と幅のパターン (FMP) を最適化するため、様々な FMP を用いて狭輝線 (Ori-KL) と広輝線 (M82) の 3mm 帯 ( $^{13}\text{CO}$ 、CS) の観測を行った。また、FMLO を併用した OTF 観測を実施し、オフ点を使用せずに天体画像を取得できることを実証した。本研究成果は谷口暁星の修士論文としてまとめられ、2015 年度は追加観測による更なる評価試験の上、論文としてまとめる予定である [12]。

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

到来する電磁波を波として検出するヘテロダイン分光が効率的に利用できる電波からミリ波サブミリ波帯では、従来、高分散分光は得意である一方で、中～低分散であるが非常に幅広い波長域 (オクターブ) にわたるような分光というのは不得手な分野であった。一方で、上述の TES カメラなど、直接検出器を周波数方向に並べ、分光分散素子と組み合わせ、中～低分散ながら超広帯域の分光計を実現しようとする動きが活発化している。このような中、デルフト工科大学・SRON が提唱した on-chip 型超広帯域分光システム DESHIMA は、325GHz から 905GHz という帯域幅を one-shot で分光 (波長分解能  $R \equiv \lambda/\Delta\lambda = 500 - 1000$ ) する極めて野心的な specification であり、ALMA 時代において、ALMA と相補的なパラメータスペースを開拓する上で鍵となる次世代装置と期待されている。今年度は、主に光学系の検討を進めた他、読み出し回路系の開発と評価、また、データ取得システムとデータ解析のための枠組みの検討を行い、TES カメラ等の連続波カメラと共通化した解析システムを利用できるための設計を進めた [14]。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Miura, R., Kohno, K., Tosaki, T., Espada, D., Hirota, A., Komugi, S., Okumura, S. K., Kuno, N., Muraoka, K., Onodera, S., Nakanishi, K., Sawada, T., Kaneko, H., Minamidani, T., Fujii, K., Kawabe, R., “Enhancement of CO(3-2)/CO(1-0) Ratios and Star Formation Efficiencies in Supergiant H II Regions”, *The Astrophysical Journal*, 788, article id. 167 (2014)
- [2] Tadaki, K., Kodama, T., Tamura, Y., Hayashi, M., Koyama, Y., Shimakawa, R., Tanaka, I., Kohno, K., Hatsukade, B., Suzuki, K., “Evidence for a Gas-rich Major Merger in a Proto-cluster at  $z = 2.5$ ”, *The Astrophysical Journal*, 788, article id. L23 (2014)
- [3] Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., Hatsukade, B., Scott, K. S., Kubo, M., Yamada, T., Ivison, R. J., Cybulski, R., Aretxaga, I., Austermann, J., Hughes, D. H., Ezawa, H., Hayashino, T., Ikarashi, S., Iono, D., Kawabe, R., Matsuda, Y., Matsuo, H., Nakanishi, K., Oshima, T., Perera, T., Takata, T., Wilson, G. W., Yun, M. S., “AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 3462-3478 (2014)
- [4] Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Hashimoto, T., Kohno, K., “Two  $\gamma$ -ray bursts from dusty regions with little molecular gas”, *Nature*, 510, 247-249 (2014)

- [5] Takano, S., Nakajima, T., Kohno, K., Harada, N., Herbst, E., Tamura, Y., Izumi, T., Taniguchi, A., Tosaki, T., “Distributions of molecules in the circumnuclear disk and surrounding starburst ring in the Seyfert galaxy NGC 1068 observed with ALMA”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, id. 75 (2014)
- [6] Martín, S., Kohno, K., Izumi, T., Krips, M., Meier, D. S., Aladro, R., Matsushita, S., Takano, S., Turner, J. L., Espada, D., Nakajima, T., Terashima, Y., Fathi, K., Hsieh, P.-Y., Imanishi, M., Lundgren, A., Nakai, N., Schinnerer, E., Sheth, K., Wiklind, T., *Astron. Astrophys.*, 573, id. A116 (2015)
- [7] Konishi, M., Motohara, K., Tateuchi, K., Takahashi, H., Kitagawa, Y., Kato, N., Sako, S., Uchiyama, Y. K., Toshikawa, K., Ohsawa, R., Yamamuro, T., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Matsunaga, N., Minezaki, T., Morokuma, T., Nakashima, A., Takagi, T., Tanabe, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kato, D., Kawara, K., Kohno, K., Miyata, T., Nakamura, T., Okada, K., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K., Yoshii, Y., “ANIR: Atacama near-infrared camera for the 1.0 m miniTAO telescope”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id.4 (2015)
- [8] Nakajima, T., Takano, S., Kohno, K., Harada, N., Herbst, E., Tamura, Y., Izumi, T., Taniguchi, A., Tosaki, T., “A multi-transition study of molecules toward NGC 1068 based on high-resolution imaging observations with ALMA”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id.8 (2015)
- [9] Onishi, K., Iguchi, S., Sheth, K., Kohno, K., “A Measurement of the Black Hole Mass in NGC 1097 Using ALMA”, *The Astrophysical Journal*, in press (会議集録)
- [10] Lee, M., Suzuki, K., Kohno, K., Tamura, Y., Iono, D., Hatsukade, B., Nakanishi, K., Tanaka, I., Kodama, T., Tadaki, K., Ikarashi, S., Ueda, J., Umehata, H., Saito, T., Kawabe, R., “Jansky VLA S-band view of H $\alpha$  emitters (HAEs) associated with a protocluster 4C23.56 at  $z = 2.5$ ”, *Galaxies in 3D across the Universe*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 309, pp. 287-288 (学位論文)
- [11] 梅畑豪紀, “The Formation of Massive Starbursts and Super Massive Black Holes in a Proto-cluster at a Redshift of 3”, 博士論文, 2015年3月
- [12] 谷口暁星, 「周波数変調局部発振器による新しいミリ波サブミリ波分光法の開発と性能評価」, 修士論文, 2015年3月
- [13] 安藤亮, 「Quest for Molecular Absorption Systems toward ALMA Calibrator Sources」課題研究, 2015年2月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [14] Kohno, K., “High-z review and science case: roles of single dish telescopes in the ALMA era” (Invited), 2014/06/17–18, “ASTE/ALMA Development Workshop”, National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo, Japan
- [15] Kohno, K., “Dust-obscured galaxies near and far” (Invited), 2014/07/14–18, Sesto (U)LIURG workshop, “Behind the curtain of dust”, Sexten Primary School, Sesto, Italy
- [16] Kohno, K., “ASTE Science Review” (Invited), 2014/10/27–29, “2014 ALMA/ASTE/MOPRA User’s Meeting”, National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo, Japan
- [17] Kohno, K., “Quantifying key components in galaxies using ALMA: molecular clouds, dust, outflows, and supermassive black holes” (invited), 2014/12/08–11, “Revolution in Astronomy with ALMA - the 3rd year -”, Tokyo International Forum, Tokyo, Japan
- [18] Kohno, K., “Dust-obscured star formation and SMBH growth unveiled by NGVLA” (Invited), 2015/01/04, NRAO workshop at the Seattle AAS meeting “Next Generation Very Large Array”, Washington State Convention Center, Seattle, USA
- 一般講演
- [19] Kohno, K., “Formation and role of accreting SMBHs in forming massive galaxies”, 2014/07/28–29, “ULTIMATE-Subaru Science Workshop 2014”, NAOJ, Tokyo, Japan
- [20] Kohno, K., “ALMA Deep Surveys”, 2014/10/27–29, “2014 ALMA/ASTE/MOPRA User’s Meeting”, NAOJ, Tokyo, Japan
- [21] Kohno, K., “Cycle 3 proposal plans on extragalactic chemistry”, 2014/12/12, “Workshop on Astrochemistry in External Galaxies”, The University of Tokyo, Tokyo, Japan
- (セミナー)
- [22] Kohno, K., “Science cases for Large Submm Telescope (LST): CO/[CII] tomography & serendipitous search of transient sources”, 2014/11/27, IRAM, Grenoble, France
- [23] Kohno, K., “Submillimeter deep surveys using ALMA and CCAT”, 2014/12/19, Astronomy Department Colloquia, Cornell University, Ithaca, NY, USA
- [24] Kohno, K., “Overview of NAOJ and University Radio Astronomy Programs in Japan”, 2014/12/19, Cornell University, Ithaca, NY, USA

## (国内会議)

## 招待講演

- [25] 河野孝太郎, 活動銀河における星間物質とその進化」(招待講演), 2014/04/23-24, 活動銀河核ワークショップ – 2020 年代への展望 –, 国立天文台三鷹
- [26] 「SMBH の起源と進化: 観測レビュー」(招待講演), 2014/11/03-04, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第 2 回ワークショップ, 筑波大学計算科学センター

## 一般講演

- [27] 河野孝太郎, “Impact and roles of mergers: from CO observations of high-z starbursts and AGNs”, 2014/04/22, Galshop2014 “Impact and roles of mergers on galaxy formation and evolution”, 国立天文台三鷹
- [28] 河野孝太郎, 「Dust-obscured galaxies near and far」, 2014/07/31-08/04, RESCEU 「宇宙における時空・物質・構造の進化研究会」, 長野県浅間温泉
- [29] 河野孝太郎, 「ALMA 時代の次世代大口径広視野単一鏡計画: 現状と今後の進め方」, 2014/09/12, 宇宙電波懇談会会合, 山形大学 (日本天文学会 C 会場)
- [30] 河野孝太郎, 「Status of on-going ALMA deep surveys and possible plans for cycle 3」, 2014/10/20-21, ALMA Workshop “Nearby/High-z Galaxies”, 国立天文台三鷹
- [31] 山口裕貴, 田村陽一, 河野孝太郎, 「Herschel 望遠鏡による SMG 分光データ stacking 解析の現状」, 2014/12/02-03, ALMA Workshop “系外銀河における微細構造輝線の観測とその理解”, 東京大学天文学教育研究センター
- [32] 河野孝太郎, 「ALMA 時代の大型ミリ波サブミリ波単一鏡」, 2015/01/27-28, 宇宙電波懇談会シンポジウム 「2030 年までの電波天文学を展望する」, 国立天文台三鷹
- [33] 河野孝太郎, 「VLA ワークショップ報告」, 2015/01/27-28, 宇宙電波懇談会シンポジウム 「2030 年までの電波天文学を展望する」, 国立天文台三鷹
- [34] 河野孝太郎, 他 「SPICA への期待」, 2015/03/02, SPICA 広視野サーベイ・ミニワークショップ, 国立天文台三鷹
- [35] 河野孝太郎, 「SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> deep survey: I. The survey description and source catalogue」, 2015/03/18-21, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学
- [36] 山口裕貴, 河野孝太郎, 他 「SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> deep survey: II. The photometric redshift survey of 1.1 mm sub-mJy sources」, 2015/03/18-21, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学

## (その他講演 (アウトリーチ活動))

- [37] 河野孝太郎, 「アルマ望遠鏡が描き出す近傍銀河と活動銀河核」, 2014/9/20, ルミネ横浜

## (プレスリリース)

- [38] 廿日出文洋, 太田耕司, 河野孝太郎, 「塵の向こうの巨大爆発: アルマ望遠鏡で探るガンマ線バーストの発生環境」 2014/6/12



## 5 重力波探査

### ——重力波によるビッグバン宇宙の探索—— — (安東・麻生)

#### — 重力波によるビッグバン宇宙の探索 — (安東, 道村)

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

### 5.1 大型重力波検出器 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一辺 3km の L 字型巨大レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである (図 5.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがス



図 5.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

タートし、2011 年 1 月 28 日には、それまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。現在、装置の建設は順調に進んでおり、2015 年には常温での運転が、2017 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている。当研究室では、主干渉計光学系の設計などの主要部分の役割を担っており、それに関連した研究開発が進められている。

#### 5.1.1 主干渉計制御系の設計開発

レーザー干渉計型重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を懸架し、重力波によって伸び縮みする鏡間の距離をレーザー光を用いて測定することで重力波の検出を行う。この時、距離変動に対する感度を最もいい状態に保つため、検出された距離変動をキャンセルするように鏡の位置を制御することにより、その制御力から重力波の振幅を割り出すというを行う。また、鏡の姿勢を高精度に制御しないと、干渉計内に十分なレーザー光を往復させることができない。そのためレーザー干渉計型重力波検出器では、干渉計制御が重要となる。

今年度は、鏡の制御を行うためのアクチュエータの設計や、鏡の姿勢をモニタするための光てこと呼ばれるセンサーの設計と評価、制御系に用いるデジタルシステムと電気回路類の設計、発注、評価などを行った。また、こうしたアクチュエータやセンサー、制御系からの雑音を評価するためのシミュレーションツールの開発を行った。KAGRA では、鏡の制御のためのアクチュエータにはコイル-マグネットアクチュエータを用いる。鏡に磁石をつけ、そばにおいてコイルに流れる電流を調整することで鏡を動かすのである。このとき用いる磁石の強さは、外部磁場の影響が無視できる程度に小さくしなければならない。また、コイルの巻き数が多すぎたり、コイルに流れる電流が大きすぎたりすると、雑音電流により鏡を揺らしてしまうことになって雑音となる。一方、アクチュエータ効率が十分でないと、地面振動などによる鏡の揺れを十分に抑えることができない。これらの要求を満たすような磁石、コイル、電圧電流変換回路の設計を行った。

また、光てこの雑音や長期安定度の評価を国立天文台の TAMA 実験施設で行ったり、デジタルシステムの整備を KAGRA の建設が進められている岐阜県の神岡町で行った。さらに、干渉計制御に用いる光検出器や光検出器からの信号を復調するための復調器、制御フィルタ回路、デジタルシステムとアナログ回路のインターフェース回路などの製作を進めた。これら回路を繋ぐケーブルの選定や配線図の作成、ケーブルラックの検討なども行った。

#### 5.1.2 入射光学系の設計開発

KAGRA では現在、主干渉計へのレーザー光入射光学系の開発が急ピッチで進められている。入射光

学系は主に、周波数や強度が安定化されたレーザー光源、主干渉計の信号取得のための変調光学系、そして基本モード以外の空間モードを除去する入射モードクリーナーから構成されている。レーザー光源の周波数安定化には周波数参照共振器と入射モードクリーナーが用いられる。また、ビームジッターを低減し、RF強度雑音を低減するプリモードクリーナーも入射光学系の構成物の一つである。こうした構成物の一つ一つを、主干渉計の目標感度が達成させられるような仕様で制作しなければならない。

今年度はこれらの設計と開発を東京大学宇宙線研究所の重力波グループなどと共に進めた。入射モードクリーナーは懸架された3枚の鏡から構成されているが、この鏡の懸架系の設計と開発は、国立天文台重力波推進室や新潟大学のグループと共に進めた。また、多重の制御ループが組まれる周波数安定化をモデリングするツールの開発を行った。

強度安定化と変調光学系に関しては、KAGRAの初期段階では単純化したものを用いる。しかし、最終段階では複雑なシステムとなるため、富山大学や新潟大学のグループと共同で検討を進めている。

## 5.2 宇宙空間レーザー干渉計

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

2014年度は、DECIGOの前段階となるPre-DECIGOの検討を進めた。中性子星連星、中間質量ブラックホールの合体といった観測で得られる科学的成果の検討、また、その観測を行うためのミッション検討を進めた。

## 5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

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

や背景重力波などといった低周波重力波源の探査を行う事を目標とする。

### 5.3.1 Phase-II TOBA の開発

現在までに最初のプロトタイプによって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、更なる技術検証が求められている。そこで次世代のTOBAとして、テストマスの懸架システムや多方向同時観測などといった新たな技術を実証するPhase-II TOBAの開発を行った(図5.2)。

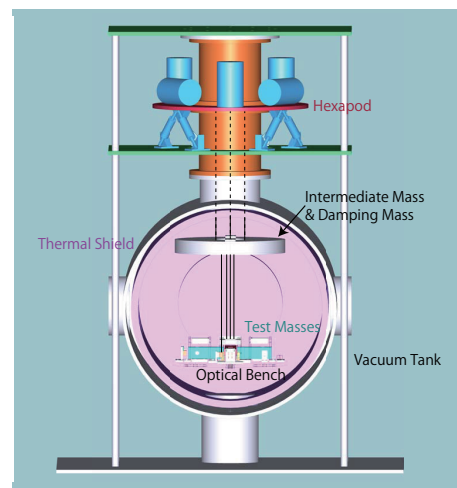


図 5.2: Phase-II TOBA の概念図

テストマスの懸架システムの開発では、能動防振系と受動防振系を組み合わせた防振系を組み込む事により、並進方向の地面振動からのカップリング雑音を評価・低減した。また、多方向同時観測では、水平方向だけではなく垂直方向の回転も同時にモニターする新手法を提案・導入する事により、1台から3つの独立な信号を同時に取得する事に成功した(図5.2)。この多方向同時観測により、重力波の検出頻度が約1.7倍に向上する他、波源方向などといった重力波信号のパラメータをより少ない検出器で決定する事ができるようになる。これはより少ない検出器でも低周波重力波天文学を展開する可能性を広げるものである[4]。

## 5.4 中間質量ブラックホール連星の探査

開発したPhase-II TOBAを用いて中間質量ブラックホール連星の探査を行った。中間質量ブラックホール連星は、超巨大質量ブラックホールや銀河の形成過程を明らかにするうえで重要な重力波源として注目されている。

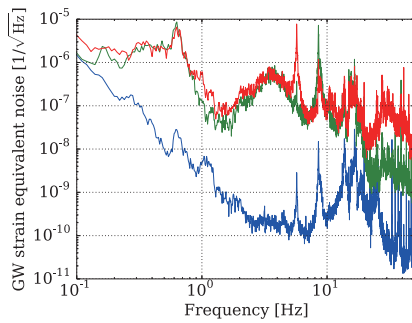


図 5.3: Phase-II TOBA で得られた感度。青線が水平方向の回転から得られた感度、赤・緑線がそれぞれ垂直方向の回転から得られた感度である。水平回転では、防振システムの導入により 10~100 Hz で約 100 倍の感度が向上した。

衝突以前の中間連星ブラックホール連星からの重力波は、これまで  $100 M_{\odot}$  以下の質量を持つものに対してしか探査されていなかったが、本研究では TOBA が干渉計型重力波検出器よりも低い周波数帯に感度を持つ特色を活かし、matched filtering と呼ばれる手法を用いて  $200 M_{\odot}$  の質量を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波を初めて探査した。

本研究では Phase-II TOBA を用いて 24 時間連続観測を行い、この観測中に重力波信号は検出されなかった。また、この観測中に  $1.2 \times 10^{-4}$  pc 以内では中間質量ブラックホール連星合体はおこらなかったという観測的制限値を世界で初めて設定した。

#### 5.4.1 背景重力波探査

重力波のターゲットの一つに背景重力波があり、大きく分けて宇宙論的な重力波と分解不可能な点重力波源の和の 2 種類が考えられる。背景重力波からはインフレーションや相転移に関する情報を得ることができ、それはほぼ重力波によってしか得ることができないものである。これまでに背景重力波のエネルギー密度  $\Omega_{\text{gw}}$  に対する上限値は、100 Hz 以上の高周波数帯で干渉計型や共振型の重力波検出器によって、1 mHz–1 Hz の低周波数帯で TOBA や地球の地面振動によって、さらに低周波の 1 mHz 以下でドップラートラッキングやパルサータイミング、CMB などによって設定されてきた。しかし 1–100 Hz 帯では、特に干渉計型重力波検出器が地面振動の影響を大きく受けるために背景重力波探査はなされて来なかった。

今回は開発した TOBA を用いて 2014 年 12 月に 24 時間の観測観測を行い、そのデータから背景重力波に対して最も感度のよい周波数帯であった 1–3 Hz において背景重力波探査を行った。1 台の検出器からのデータのみを用いた探査のため、相関解析を行って

重力波信号のみを抽出することはできず、仮にデータが全て重力波由来であっても成立する等号を含んだ上限値を設定した。その結果、1–3 Hz 背景重力波のエネルギー密度に対して、頻度論的な上限値として  $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{18}$ 、ベイズ的な上限値として  $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{20}$  の値を得た。今後の TOBA アップグレードによる感度向上、複数台の検出器を用いることによる相関解析により、背景重力波に対してさらに厳しい上限値が得られるものと期待されている。

### 5.5 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

安東研究室では次世代の周波数標準として期待される光格子時計の性能を向上させるための周波数安定化光源の開発を行っている。本研究では低温重力波検出器の開発で培ったノウハウを活用し、単結晶シリコンで製作した光共振器を低温に冷却することによって、従来の周波数安定化の妨げとなっていた熱雑音を低減し、1 秒のアラン分散で  $10^{-17}$  という非常に高い周波数安定度を実現する。これにより、光格子時計は 100–1000 秒という非常に短時間の積算時間で  $10^{-18}$  の安定度が実現可能になる。

#### 5.5.1 光共振器の防振

目標の安定度を達成するためには地面振動や冷凍機由来の振動による共振器の弾性変形を防ぐ必要がある。そのために我々はヘキサポッドステージと呼ばれる 6 本脚の除振台を製作した。ヘキサポッドの 6 本の脚には PZT が組み込まれており、速度センサーによって読み取ったヘキサポッドステージの振動をフィードバックすることにより能動的に振動を抑制する。

これまでに、並進 3 自由度の同時防振に成功しており、最もよい周波数帯においては 10 倍以上の防振比を得ることに成功している。

#### 5.5.2 温度安定化

目標の安定度達成のためには光共振器の温度変動による共振器長変動を抑制する必要がある。冷凍機で冷却した光共振器は外気温の日周変動や季節変動によって大きく変動するがこれらは非常に長い時間スケールでの変動であるため、温度を能動的に安定化することによって抑制することができる。

冷凍機のコールドヘッドは温度安定化を行わない場合には  $12 \text{ mK/day}$  程度の温度ドリフトが見られたが、温度安定化を施すことによって  $0.1 \text{ mK/day}$  以下までドリフトを抑えることに成功している。



## 5.6 相対論・量子光学精密実験

### 5.6.1 巨視系における量子輻射圧変動の測定

これまで重たい物体の重ね合わせ状態が観測されていないのはなぜか。単なる技術的な問題に過ぎないのか、あるいは量子性を示さない根源的な機構が存在するのか。この問いに答えるべく、我々は重たい物体の重ね合わせ状態を生成しその持続時間を測定することを目標とした研究を行っている。

持続時間検証のために用意する重ね合わせ状態は、光子と懸架鏡のエンタングルメント状態である。まず、振り子モードが基底状態まで冷却された懸架鏡を用意する。その懸架鏡から構成されるマイケルソン干渉計に単一光子を入射することで、光子の有無と、懸架鏡の基底/励起状態のエンタングルメント状態が生成される。

第一目標として懸架鏡の基底状態冷却を目指す、そのためには懸架鏡をレーザー光強度の量子的な揺らぎから生ずる反作用（量子輻射圧揺らぎ）で支配的に駆動しなければならない。特に、原理的な古典雑音である振り子の熱雑音よりも量子輻射圧揺らぎの方が強く働く懸架鏡の開発に取り組んだ。

鍵となったのは、熱雑音低減のための外部環境からの孤立と、量子輻射圧揺らぎ増大のためのレーザー光と懸架鏡の強力な結合を両立である。非常に細くエネルギー散逸の小さな  $3\mu\text{m}$  のタングステンワイヤーで、 $5\text{mg}$  の鏡を懸架した。さらに、この懸架鏡を一端として構成される光共振器を三角形とすることで回転方向に自律的な共振器を構築、高い共振器内パワーを実現した。入射レーザー光量を大きくしていくにつれて懸架鏡に加わる輻射圧が理論通り増大していく様子を測定し、量子輻射圧揺らぎと振り子内部の散逸に由来する熱雑音の信号雑音比が  $1.4 \pm 0.2$  と推定された。

### 5.6.2 光リング共振器を用いた光速の等方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論は Lorentz 不変性が宇宙の基本的な対称性であることを明らかにした。しかし、重力と他の相互作用を統一的に理解しようとする理論的な研究から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。特に光子の Lorentz 不変性の破れは光速の異方性に通じ、Michelson-Morley の時代から数々の異方性探査が行われてきた。我々は光速の行きと帰りの差、つまり片道光速の異方性に着目し、その探査実験を行っている。

光速の行きと帰りの差は、非対称な光リング共振器を用いて測定することができる。非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ、光路の一部の屈折率を変えることで導入している。片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振器の時計回りの

共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定し、異方性の null 測定を行った。また、この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで、異方性信号の変調を行う。

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い、そのデータ解析を行うことで片道光速の異方性に  $10^{-15}$  レベルの上限値をつけてきた。これは光子の Lorentz 不変性の破れのうち、奇パリティ成分としては世界最高精度での上限値となっている。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した、装置改良の検討を進めた。これまでの感度は装置の回転に伴う振動によって制限されていたため、振動感度の低いモノリシック光学系を用いることや、より振動の少ないモーターを用いた安定な連続回転を行うことを検討している。これまでは信号取得や電源供給のためのワイヤがねじれてしまうことを防ぐため、回転と逆回転を交互に繰り返していた。連続回転を行うことで回転反転時の測定時間のロスが無くなるとともに、複数回の回転に渡るデータを解析に用いることで、雑音レベルを下げるができると考えている。

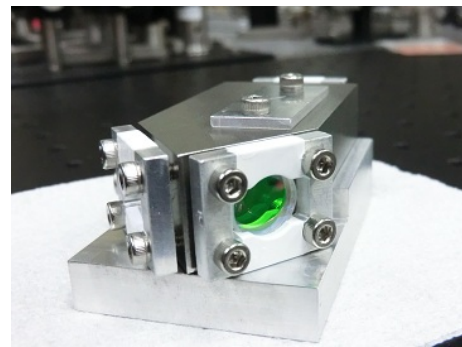


図 5.4: シリコンの入った非対称光リング共振器

### 5.6.3 光学浮上鏡を用いた量子測定

懸架した鏡のような機械系の振動状態をレーザー光を用いて測定したり、制御したりする機械光学系の研究が現在盛んに行われている。特に、プランク質量を超える巨視的な物体の基底状態を実現することや、ハイゼンベルグの不確定性関係で決まる標準量子限界を超える位置測定を行うことは、巨視的量子力学の検証に繋がるため、注目を浴びている。

しかし、巨視的な物体において量子力学的な測定を行うことは極めて難しい。それは標準量子限界に比べ、熱雑音が大きいためである。物体を支持するために懸架のような機械的な手法を用いると、機械的な散逸に伴って熱的揺動力が物体に加わってしまい、熱雑音となる。

我々は機械的な手法を用いずに物体を支持する、光学浮上の検討を行っている。光学浮上とは光の輻

射圧のみによって鏡を支える方法である。光子の有効温度は環境に比べて十分高いため、この支持方法では熱雑音となる散逸が存在しないことになる。今年度は 1.6 mg の浮上鏡の製作と装置設計を進めるとともに、ねじれ振り子を用いた基礎実験を行った。

十分な浮上力を得るためには浮上鏡は mg 程度以下の軽さでなければならないが、この製作は困難を極める。そのため、ねじれ振り子の端に鏡をつけることで、有効質量を軽くし、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を作ることで光学浮上に向けた技術開発を行っている。今年度はこの Fabry-Perot 共振器の制御には成功したが、制御が安定ではなく、ねじれ振り子の運動状態を十分に変化させることができなかった。アクチュエータの改良やねじれ振り子の改良が必要ながわかった。

### < 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar Antennas, *Phys. Rev. D*, 90, 064039 (2014).
- [2] M. Adier, F. Aguilar, T. Akutsu, M.A. Arain, M. Ando *et al.*: Progress and challenges in advanced ground-based gravitational-wave detectors *General Relativity and Gravitation*, 46, 1749 (2014).
- [3] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, *Phys. Rev. D*, 89, 064008 (2014).
- [4] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).
- [5] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Kimio Tsubono: Optically trapped mirror for reaching the standard quantum limit, *Opt. Express* 22, 12915 (2014).

(学位論文)

- [6] 正田亜八香: Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 博士論文, 2015 年 3 月.

### < 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] A. Shoda: TOBA experience and future plans, 2015, E-GRAAL kickoff meeting (March 2015, Paris, France).
- [8] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: New iKAGRA Configuration, 11th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2015, Tokyo).

招待講演

- [9] Nobuyuki Matsumoto: Development of the 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (Feb. 25, 2015, Okazaki Conference Center, Aichi).
- [10] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori: Development of 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (February 23rd, 2015, Institute for Molecular Science, Aichi).
- [11] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC37, The 37th Program Advisory Committee Meeting (January 28th, 2015, Hanford, USA).
- [12] Masaki Ando: DECIGO: Space Gravitational-wave Antenna, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics (August 3rd, 2014, Matsumoto).
- [13] A. Shoda: Torsion-bar Antenna for low-frequency gravitational wave detection, GWADW (May 2014, Takayama, Japan).
- [14] Masaki Ando: DECIGO and DECIGO Pathfinder, 10th International LISA Symposium (May 19th, 2014, Florida, USA).

(国内会議)

一般講演

- [15] 安東 正樹, DECIGO WG: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (59): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [16] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章, KAGRA Collaboration: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干涉計制御設計, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [17] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 麻生洋一, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (4), 日本物理学会 2015 年春季大会 (2015 年 3 月 早稲田大学).
- [18] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 IV, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [19] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) を用いた背景重力波探査, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [20] 小森健太郎, 松本伸之: 重力デコヒーレンス検証に向けた量子輻射圧揺らぎで駆動される巨視的振り子の開発, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学).
- [21] 安東 正樹: DECIGO / DPF, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 1 月 24 日, 東京大学宇宙線研究所).

- [22] 安東 正樹: DECIGO のロードマップ, DECIGO ワークショップ (2014 年 10 月 25 日, 京都大学).
- [23] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (55): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [24] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (2), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 21 日, 佐賀大学).
- [25] 道村唯太, Matthew Mewes, 松本伸之, 麻生洋一, 安東正樹: 光リング共振器による高次ローレンツ不変性検証, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [26] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (3), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [27] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 III, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [28] 安東 正樹: DECIGO/DPF CRC タウンミーティング (2014 年 7 月 12 日, 名古屋大学).

## 招待講演

- [29] 安東 正樹: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA とレーザー干渉計技術, 第 62 回 応用物理学会 春季学術講演会 (2015 年 3 月 12 日, 東海大学).
- [30] 安東 正樹: 重力波の観測, コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 (2015 年 2 月 14 日, 京都大学).
- [31] 安東 正樹: アインシュタインの宿題と重力波で探る宇宙, 一般相対性理論白寿記念シンポジウム (2014 年 9 月 27 日, 慶応大学).
- [32] 安東 正樹: レーザー干渉計による原始重力波観測原始重力波シンポジウム 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [33] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 第 3 回 自然科学研究機構 機構長プレス懇談会 (2014 年 4 月 11 日, 虎ノ門 SQUARE, 東京).

## (セミナー)

- [34] Masaki Ando: Recent Situations of DECIGO and DECIGO Pathfinder, NAOJ GW Seminar (July 10th, 2014, NAOJ, Mitaka).
- [35] 安東 正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 平成 26 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 5 月 30 日, 東京大学).

## 6 宇宙素粒子物理学

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

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

#### 6.1 Sumico, Tokyo Axion Helioscope

太陽由来のアクシオンを捉えるために、中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角  $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできる東京アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope、愛称 Sumico) は、探索結果の最初の論文を 1998 年に出版した。類似の実験装置である、CERN の CAST 実験の 7 年前であった。その後改良を加えながら探索を続けてきたが、その歴史的使命を終えて 2015 年 3 月に実験室から退いた。長年にわたり最先端で働いてくれた Sumico に心から感謝する。

#### 6.2 原子炉ニュートリノモニター

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

原子炉から放出された反電子ニュートリノは、有機シンチレータ中の陽子と逆  $\beta$  崩壊を起こし陽電子と中性子を生成する。これら 2 つの粒子を遅延同時計測で検出することで、ニュートリノのフラックスを測定できる。我々のグループが開発している PANDA は、液体シンチレータと比べてより安全性の高いプラスチックシンチレータをターゲットとして使用しており、セグメント化した構造を採用することで効率的なバックグラウンド事象の排除を可能にしている。またトラックやコンテナに積載した状態での測

定が可能であるため、原子炉建屋の外からのモニタリングに適している。

2008 年から現在までに第 1~3 次プロトタイプとして lesserPANDA、PANDA36、PANDA64 を開発してきた。2011-2012 年には PANDA36 を大飯発電所に設置し、原子炉建屋の外から原子炉運転中と停止中のニュートリノフラックスの差を約  $2\sigma$  で検出することに世界で初めて成功した。現在は PANDA64 の開発を終え、最終型の検出器 PANDA100 の開発をおこなっている。

PANDA36 を大飯発電所に設置していた冬季の 2 か月間に、予想していなかった数分間にわたるカウントレートの上昇が 3 バースト見つかった。これらのバーストは、エネルギースペクトルが 10-15 MeV の高エネルギーまで伸びていることや気象庁の提供する雷情報との一致などから、雷雲に由来する長時間持続性のガンマ線バーストであることがわかった。長時間持続性の雷雲由来バーストは山岳地帯での観測例が多いが、冬季の日本海沿岸は雷雲が低い高度に発生するため海面レベルで雷雲バーストを観測することができる世界でも珍しい地域である。

雷雲内に存在する電場の強さが  $\sim 300 \text{ kV/m}$  以上になると、空気中の電子は電場による加速が大気分子との衝突による減速を上回って加速され、相対論的逃走電子が発生する。電子が相対論的速度に達する過程でさらに新しい逃走電子が次々に生成するため、逃走電子数は雷雲電場中で  $10^5$  倍程度まで増倍するという相対論的逃走電子雪崩 (RREA) モデルが提唱されている。RREA モデルに基づく逃走電子の増倍とそれに伴う制動放射  $\gamma$  線が、これまで山岳地帯や日本海沿岸で検出されてきた長時間持続性バーストを十分に説明できるかどうかや、バーストが長時間持続するメカニズムはまだわかっていない。

大飯発電所で PANDA36 が観測したバーストの解析から、 $\gamma$  線の到来方向がほぼ天頂方向からでありバースト持続中に変化しないこと、電場加速後の逃走電子を単色と仮定してシミュレーションをおこなうと 16 MeV の逃走電子を高度 400-1000 m から発射した場合に観測スペクトルをよく再現することがわかった (図 6.1)。また、単色の逃走電子に 35 MeV までの高エネルギー成分を加えてシミュレーションをおこなうことで、さらによく測定スペクトルを再現できた。空気中の窒素分子との光核反応によって生成した中性子と思われるイベントも 1 つのバーストと同時に検出されている。

PANDA36 による日本海沿岸での雷雲由来バーストの観測を踏まえ、第 3 次プロトタイプ PANDA64 による山岳地帯での観測を計画した。観測は 2014 年 7 月から 9 月に東大宇宙線研究所乗鞍観測所で実施し、PANDA64 はトラックに積載した状態で観測所の屋外に設置して測定をおこなった。全測定期間のデータ解析をおこなった結果、12 回の雷雲由来長時間持続性バーストが観測され、そのエネルギースペクトルは最大規模のバーストで 25 MeV 程度まで伸びていた。気象庁提供の雷情報との関連を調べたところ、12 回のバースト全てが「雷可能性あり」を示すレベル 1 以上の状態で観測されていた。また全測定期間中に 8 回あった「雷あり」を示すレベル 2 以

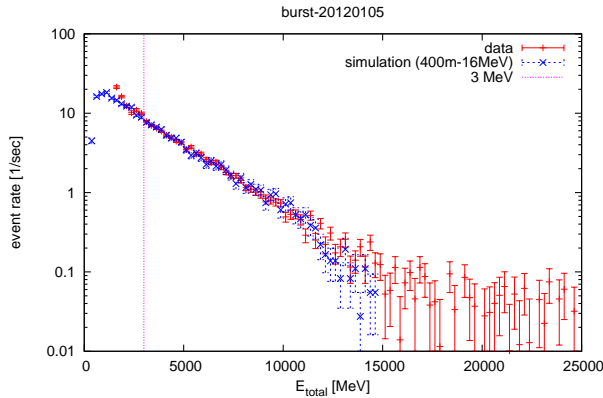


図 6.1: 大飯発電所で観測されたバーストのエネルギースペクトルとそれを再現するシミュレーション結果

上の前後では、すべてバーストが観測された。このような雷情報との強い相関は PANDA36 による日本海沿岸でのバースト観測では見られなかった。

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

検出器周囲に設置した電場計と光検出器のデータも解析したところ、雷光と同時に電場の強さが急激に変化するケースが観測され、またすべてのバーストのピーク付近では電場計の値が $-10\text{kV/m}$ 以下の負の値となっていた。バーストの終わり方として緩やかなものと急激なものの2通りが観測され、それぞれ電場との関連から前者は雷雲の通過による終結、後者は放電と同期した終結であることが示唆された(図 6.2)。PANDA64 で観測したバーストについて、現在さらなる解析をおこなっている。

## 6.3 Hidden photon ダークマター探索

### 6.3.1 概要

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

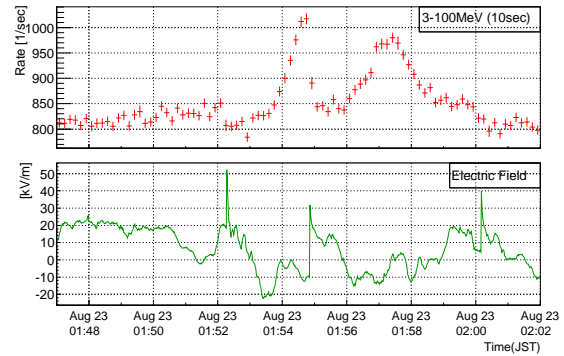


図 6.2: 10 秒ごとのカウントレートと電場の強さの時間変化。電場の急上昇（放電）と同時に発生した急なバースト終結と、電場の急激な変化を伴わない緩やかなバースト終結が連続して観測された。

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

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

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

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

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



### 6.3.2 光学領域

Hidden photon の質量が  $\sim eV$  の光学領域では、光を反射する球面鏡と光検出器を用いて探索を行うことができる。我々は2014年度、直径50cmの鏡とフォトンカウンティングが可能な低ノイズの光電子増倍管を用いて、質量が光学領域にある hidden photon CDM の探索実験を行ったその結果、現在のセットアップで到達可能な感度では hidden photon CDM の証拠は見つからなかった。これを用いて、質量  $3.1 \pm 1.2eV$  における mixing parameter について、 $\chi < 6 \times 10^{-12}$  という制限を得た。今後は光検出器を CCD などに換装して量子効率を上げることにより、より高感度な探索を行う計画がある。

### 6.3.3 電波領域

光学領域の他に、 $m_{\gamma'} \sim 50 \mu eV$  付近の電波領域での探索も行っている。2014年度は、直径2.2mの市販されているパラボラアンテナを用いて、BS放送で使われているKuバンドについて実験を行った。その結果、hidden photon 由来の信号は見つからなかったが、そのことを利用して  $m_{\gamma'} \simeq 50 \mu eV$  近傍に  $\chi < 2 \times 10^{-12}$  という制限を得た。現在のセットアップでは極めて限られた質量領域しか探索できていないが、より広範囲の周波数を取ることで受信機を取り付ければ、その範囲の分だけ広い質量領域を探ることができる。そのため、現在どのような可能性があるか検討を行っている。

これらの測定によって得られた  $\chi$  への制限を、図に示す。いずれも、これまでに初めて探索された領域である。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] S. Oguri, Y. Kuroda, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 757 (2014) 33 – 39., arXiv:1404.7309 [physics.ins-det].
- [2] J. Suzuki, T. Horie, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental Search for Hidden Photon CDM in the eV mass range with a Dish Antenna, arXiv:1504.00118 [hep-ex].
- [3] Kenichi KARATSU, *et al.*: Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Cosmological Observations, IEICE Transactions on Electronics 98.3 (2015): 207 – 218.

(学位論文)

- [4] 富田望: 小型反電子ニュートリノ検出器におけるバックグラウンド事象、平成26年3月修士(理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。

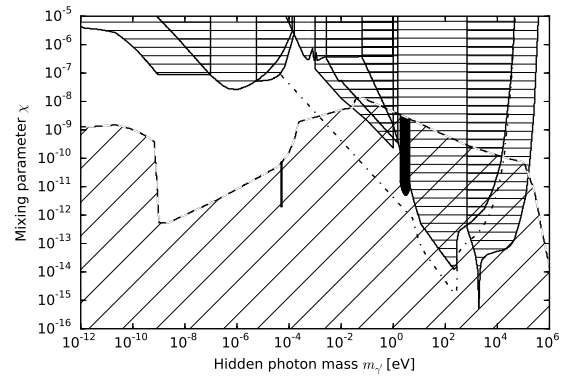


図 6.3: 今年度の探索によって得られた mixing angle  $\chi$  に対する制限。横軸は hidden photon の質量  $m_{\gamma'}$ 、縦軸は mixing angle  $\chi$ 。ダークマターがすべて hidden photon CDM で構成されていると仮定したとき、 $50 \mu eV$  付近と  $\sim eV$  の黒く塗りつぶされた部分が、今回の探索により否定された。横線部分は、これまで実験や天体に関する考察などから否定された領域で、斜線部分は hidden photon CDM としてまだ否定されていない領域。

- [5] 黒田康浩: Observation of gamma ray storms at the earth's surface related to the thunderclouds and a study of their properties, 平成27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] Y. Kato: Reactor monitoring using a segmented antineutrino detector (PANDA), Neutrino 2014, Boston University, Boston, United States, 2–7 June 2014.
- [7] N. Tomita: Study for response of superconducting detectors on the rotating system towards GroundBIRD experiment, 15th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Ise-Shima, Mie, Japan, 15 December 2014.

(国内会議)

一般講演

- [8] 井上慶純: Hidden photon dark matter, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, 長野県松本市あさみ温泉錦の湯地本屋、2014年7月31日。
- [9] 富田望: GroundBIRD 高速回転ステージ上での MKID の応答性評価、日本物理学会2014年秋季大会、佐賀大学2014年9月18日。

- [10] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学 2014 年 9 月 18 日.
- [11] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学 2014 年 9 月 18 日.
- [12] 富田望: CMB 偏光観測実験「GroundBIRD」の検出器応答評価、第 21 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2015 年 2 月 11 日.
- [13] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 21 日.
- [14] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 21 日.
- [15] 加藤陽: 原子炉モニタリング用ニュートリノ検出器を用いた雷雲と同期する放射線バーストの観測、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 24 日.

## 7 飛翔体によるX線観測

——宇宙からのX線・ガンマ線を捉える——  
——(牧島・平賀・中澤)

### 7.1 はじめに

牧島は2014年度末をもって65歳の定年で退職する運びとなり、1986年に開設された牧島研究室は、29年間の歴史を閉じ[110]、後を中澤研究室に託す。研究室はこの間、JAXA宇宙科学研究所による第3世代の宇宙X線衛星「ぎんが」(1987年2月打ち上げ)、第4世代の「あすか」(1993年2月)、第5世代ASTRO-Eの打ち上げ失敗(2000年2月10日)を経て、その再挑戦機となる「すざく」(2005年7月)に深く参加し、搭載装置の開発、衛星運用への協力、観測データを用いた研究遂行の三面から貢献した。ASTRO-Eと「すざく」では釜江研究室と緊密な協力をを行った。

我々は、2015年度末に打ち上げ予定の第6世代ASTRO-Hに向けても、中澤を中心に、宇宙科学研究所の学際理学併任の3研究室(満田研、高橋研、山崎研)と協力し装置開発を続けてきた。

牧島研究室は、1991年8月に打ち上げられた太陽X線衛星「ようこう」に対しても、装置開発とデータ解析の両面で貢献した。さらに牧島は昨年に引き続き、宇宙科学研究所の宇宙理学委員長を勤めた。

こうした科学衛星による観測的宇宙物理学を主軸として、牧島研と中澤研を合わせて、今日までに40名の博士学位取得者と17名の修士取得者を輩出することができ、牧島は3月に学士院賞を拝受した[1]。

### 7.2 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9年目に入った。放射線損傷による太陽電池の出力低下と、二次電池の劣化のため、X線CCDカメラ(XIS; X-ray Imaging Spectrometer)による観測が中心となり、我々が設計製作に貢献した硬X線検出器(HXD; Hard X-ray Detector)は、断続的なオンオフを余儀なくされている。我々は本年度も、衛星およびHXDの運用を支援し、観測データの解析を進めた。

#### ○国際宇宙ステーション搭載 MAXI

2009年夏に国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の曝露部に搭載された全天X線監視装置MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)は、理研、JAXA、

東工大、青学大、阪大、日大、京大、中央大、宮崎大などにより、運用が続けられている。その運用はJAXAにより2014年度末まで認可されていたが、年度末の審査で、さらに3年間の運用延長が認められた。牧島は引き続き、理研MAXIチームの責任者を非常勤で兼務した。

#### ○後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機ASTRO-Hは、2015年度末の打ち上げに向け、建造が進んでいる。§7.9に詳述するように、我々はそれに全面的に参加している。

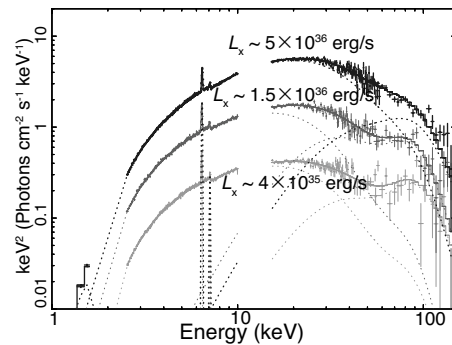


図 7.1: X-ray spectra of the “X-ray pulsar like object” 4U 1700–37, accumulated with *Suzaku* over three different luminosity levels. They are fitted with a standard “NPEX” continuum model. A Cyclotron Resonance Scattering Feature is suggested at  $\sim 60$  keV, particularly in the faintest spectrum [75].

### 7.3 強磁場中性子星の研究

#### ○中性子星の磁場とサイクロトロン共鳴

強磁場の中性子星(NS)に連星の相手星からガスが降着すると、連星X線パルサー(BXP)となる。そのX線スペクトル中には、しばしば電子サイクロトロン共鳴に基づく構造(CRSF)が現れ、磁場計測の切り札となる(Makishima et al. 1999) [6, 7, 18]。主星の多くは大質量星だが、低質量星の場合もある[7, 47, 65]。本研究室ではこれまで、「ぎんが」や「すざく」を用い、多数のBXPからCRSFの検出に成功し、この研究で世界をリードして来た。

室田らは、「すざく」による4U 1700–37の公開データを解析した[35, 75]。これは1970年代から知られたNS連星で、そのX線スペクトル、激しいX線変動、主星の型などはBXPのものに酷似するが、X線パルス(=NSの自転)は未検出である。解析の結果、X線強度の激しい変動につれ、蛍光鉄輝線の中心エネルギーがわずかに変化することが発見された[87]。これは鉄輝線を発生する周辺物質が、X線の照射を受けて光電離するためと考えられる。さらに図7.1に示すように、そのスペクトルの $\sim 60$  keVにCRSFの徴候が発見され、NSが $B \sim 5 \times 10^{12}$  Gの強磁場をもつ可能性が強まった。



○ 長周期パルサーの研究

既知の約 50 例の BXP のうち、約半数では CRSF が未検出で、磁場強度が算出できない。そこで笹野らは、スペクトル連続成分の形、パルス深さのエネルギー依存性、鉄輝線の形状、パルス周期と変化率などから、降着 NS の磁場を経験的かつ総合的に推定する方法を開発し、CRSF を示すパルサーを用い、その推定方法を較正した。その結果、BXP のうち低い X 線光度と数百秒〜1 万秒の長いパルス周期をもつ「長周期パルサー」(LPP) は、周期の他にも、深い X 線パルス、きわめて硬いスペクトルなどの観点から、通常の BXP より一桁も強い  $B \sim 10^{13}$  G の磁場をもつ可能性が強まった [12, 38, 43, 68]。これらはマグネターが連星を成した可能性をもち、ASTRO-H による  $> 100$  keV での CRSF 探査が待たれる。

これを踏まえ笹野らは図 7.2 に示すように、磁気圧と重力の釣り合うアルフヴェン半径  $r_A$ 、主星からの星風捕獲が起きる上限半径であるボンディ半径  $r_B$ 、NS の自転角速度がケプラー角速度と一致する共回転半径  $r_{co}$  の三者を用い、BXP の新しい分類方法を考案した [38]。LPP は、磁場が強いため  $r_A$  が大きく、それとトルク平衡から  $r_{co}$  も大きくなり、この両者が  $r_B$  に近づくため、星風捕獲の効率が下がり、結果として X 線光度が低いと説明できる。

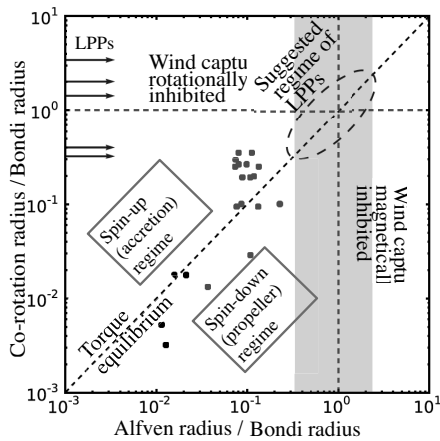


図 7.2: A new classification scheme of binary X-ray pulsars in terms of three characteristic radii; the Alfvén radius, the Bondi radius, and the co-rotation radius. Filled dots represent X-ray pulsars of known magnetic field strength, while horizontal arrows represent five Long Period Pulsars (LPPs) [38]. In LPPs, the 3 radii become comparable to one another.

○ マグネターの自由歳差運動の研究

一群の孤立 NS はマグネターと呼ばれ、遅いスピン周期 ( $P = 2 - 10$  sec) と高いスピンドウン率から、 $B = 10^{14-15}$  の超強磁場をもち、磁場エネルギーを消費して X 線を放射すると考えられる。~ 30 個のマグネターのうち、数例は超新星残骸の中に存在する。マグネターのスペクトルは一般的に、黒体放射的な軟 X 線成分ときわめて硬い硬 X 線成分から成る。

牧島、村上らは昨年、理研の榎戸と協力し、マグネター 4U 0142+61 の 2009 年のデータで、 $P = 8.6$

sec パルスの位相が周期  $T = 55$  ksec で位相変調される現象を発見し、それを軸対称に変形した NS の自由歳差運動の発現と解釈した [2, 44, 66, 61, 102]。剛体の慣性モーメントが  $\epsilon \equiv \Delta I / I$  だけ非対称だと、自由歳差周期と自転周期  $P$  が  $\epsilon$  だけずれ、周期  $T = P / \epsilon$  のうなりが生じ、それがパルスに位相変調をもたらすと考えられる。4U 0142+61 の場合  $\epsilon = 1.6 \times 10^{-4}$  で、NS 内部に  $B \sim 10^{16}$  G のトロイダル磁場が存在する結果、星が縦長に変形していると考えられる。この成果はプレスリリースされた [112]。

村上らは今年度、2011 年と 2013 年に追観測した 4U 0142+61 の「すざく」データを同様に解析した結果、2009 年の現象を再確認することに成功した。さらに図 7.3 に示すように、位相変調の振幅が年のオーダーで変化することもわかった [31, 59, 72, 107, 82]。これは歳差の首振り角の変化ではなく、硬 X 線の放射パターンが NS 対称軸回りに非対称性をもち、その度合いが時間変化した結果と解釈される。

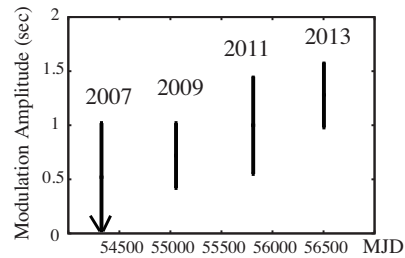


図 7.3: Evolution of the phase-modulation amplitude of hard X-ray pulses of the magnetar 4U 0142+61, as observed with Suzaku [2, 72, 82, 107].

牧島らは今年度は、最速自転マグネター 1E 1547-5408 が 2009 年 1 月に活性化した際の「すざく」データを再解析した。図 7.4 に示すように、この天体でも  $P = 2.07$  sec の硬 X 線パルスに位相変調が見られ、自由歳差運動の検出の二例目となった [77, 103, 107]。この位相変調の周期は  $T = 36$  ksec で、変調振幅は  $\sim P/4$  に達すること、軟 X 線パルスは位相変調されていないことがわかった。 $\epsilon \equiv P/T = 0.6 \times 10^{-4}$  は、一例目と同程度であり、やはり  $\sim 10^{16}$  G のトロイダル磁場が内在する可能性を示唆する。これは外部に現れる双極子磁場より 2 桁も強い。これらの重要な結果は、NuSTAR 衛星や ASTRO-H で大幅に強化できるであろう。

7.4 質量降着する弱磁場中性子星

弱磁場 ( $B < 10^9$  G) の NS が低質量の恒星と連星系をなすものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。それらは質量降着率が高い時には「ソフト状態」、低い時には「ハード状態」にある。櫻井らは昨年続き、代表例である Aql X-1 を中心に、「すざく」で観測されたハード状態 LMXB のデータを統一的に解析した [37]。また小野らは GS 1826-238 の「すざく」のデータ解析を進めた [32, 73, 50]。その結果、ソフト状態でもハード状態でも X 線放射は、

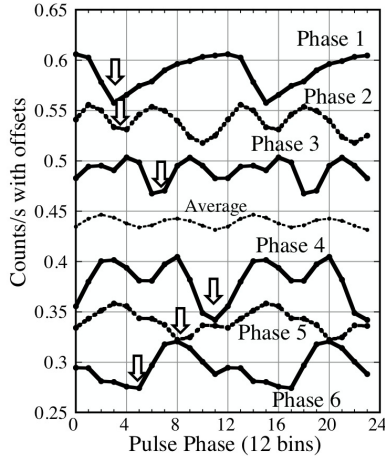


図 7.4: Hard X-ray (15–40 keV) pulse profiles (two cycles) of the magnetar 1E 1547–5408 observed with *Suzaku*, folded at the pulse period of 2.072147 sec. They were accumulated over six different phases of a 35-ksec “slip period”, arising as a beat between the rotation and free precession periods. The pulse phase is modulated (see arrows) with this period.

(1) 降着円盤からの多温度黒体放射、(2) NS 表面からの黒体放射、(3) 降着流の最終段階で生じる「コロナ」により (2) が逆コンプトン化された硬い放射、という 3 成分で記述できること、状態遷移に伴いそれらの相対強度や物理パラメータが、顕著な変化を示すことが明らかになった [37, 45]。図 7.5 は、Aql X-1 がハード状態からソフト状態に約半日で遷移した、貴重なデータで、スペクトルの変化が明らかである [37]。

学振外国人研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のうち周期的ディップを示す (円盤を横から見る) ものを研究した [19, 14, 48]。昨年 4U 1916–053 (ソフト状態) [5] に続き、今年度はハード状態にある dipping LMXB として、EXO 0748–676 の「すぎく」データを解析した。その結果この天体は、図 7.6 に示すように、同じ  $Q \equiv (\text{コロナ電子温度})/(\text{円盤温度})$  をもつ LMXB に比べ、系統的にコンプトン雲の光学的厚みが大きなことが判明した [64, 83]。これは LMXB のコロナが扁平であることを示す [79, 14, 48, 19]。

## 7.5 超新星残骸の研究

我々はビッグバンセンターの平賀らと協力しつつ、「すぎく」を用い超新星残骸 (SNR) の研究を続けている。中野らは昨年 [36] に続き、マグネター 1E 2259+586 に付随する、CTB 109 と呼ばれる SNR の研究を進めた。「すぎく」による X 線分光の結果、その爆発エネルギー ( $\sim 10^{51}$  erg) は重力崩壊型 SNR として典型的で、マグネター生成現場を特徴づける特異性は検出されなかった。しかし図 7.7 に示すように、プラズマ 2 成分を分離し、それらを親星イジェクタと衝撃波加熱された星間物質とに同定できた。そこから

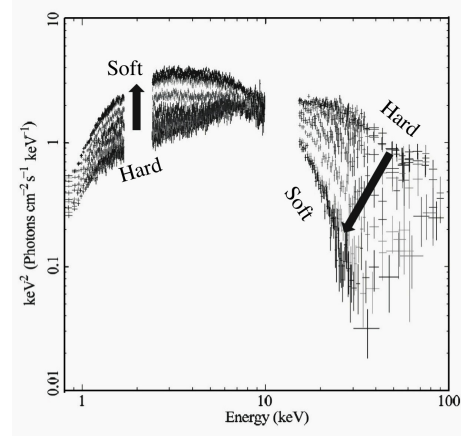


図 7.5: A remarkable state transition of the LMXB Aql X-1, witnessed with *Suzaku*. In about half a day, the spectrum changed from those typical of the Hard State to those of the Soft State [37].

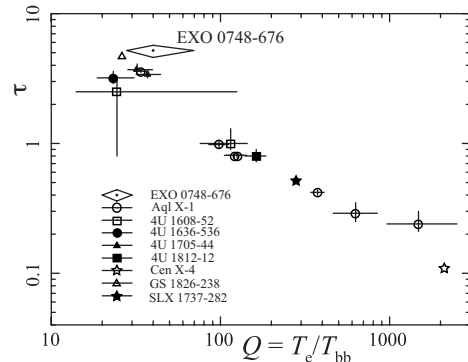


図 7.6: Compton optical depths of various LMXBs in the Hard State, plotted against  $Q \equiv (\text{electron temperature})/(\text{disk temperature})$  [48]. The dipping source EXO 0748–676 is indicated by a diamond.

X 線放射プラズマを積算した結果、超新星爆発を起こした親星は、太陽の  $\sim 40$  倍の大質量星であったことを突き止め [36]、マグネターが超大質量星の重力崩壊で作られるという理論描像を強化できた。重元素アバンダンスもこの結論を支持する。ASTRO-H により、さらに精密な測定が可能となろう。

中野らはまた CTB 109 の推定年齢が中心マグネター 1E 2259+586 の特性年齢よりずっと若いという矛盾を逆手に取り、マグネターの特性年齢は、その磁場が減衰するため過大評価されていること、よってマグネターが真の磁気駆動 NS であること、またマグネターが従来の理解より若いことを示した [36, 9, 42]。よって  $\sim 10^{12}$  G の磁場をもつ通常の NS より、マグネターの方が多く誕生するという、斬新な可能性が示唆される。ASTRO-H による、老齢マグネターの探査に期待がかかる。

古田らは「すぎく」および *XMM-Newton* 衛星のデータを用い、RCW103 と呼ばれる SNR を研究した [34, 74, 86]。この天体は中心に、6.7 h という超長周期の奇妙な NS を擁している。CTB 109 と類似

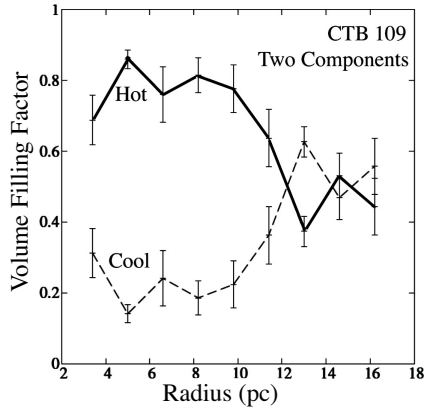


図 7.7: Volume filling factors of the hotter ( $kT \sim 0.68$  keV) and cooler ( $kT \sim 0.23$  keV) plasma components in the SNR CTB 109, measured with *Suzaku* and shown against the projected radius from the center [36]. The hotter and cooler components can be identified with the progenitor's ejecta and the shock-heated inter-stellar medium, respectively.

の解析を行った結果、SNR の全面にわたって  $\sim 0.6$  keV と  $\sim 0.3$  keV の二温度プラズマが存在し、その温度は図 7.8 に示すように、円周方向に  $\pm 20\%$  で一定であることがわかった [86]。これは超新星爆発が、強い非対称性は持っていないことを意味する。

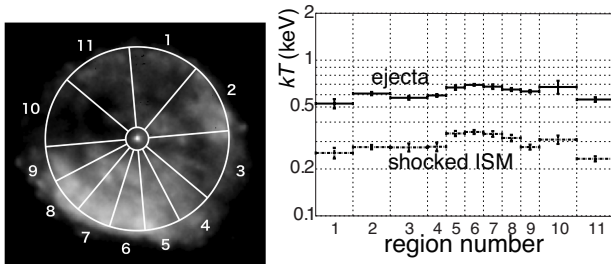


図 7.8: An X-ray image of the SNR RCW103 obtained with *XMM-Newton* (left), and the azimuthal distributions of the two temperatures (right) [86].

## 7.6 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) にガスが降着すると、静止質量エネルギーの  $< 10\%$  が、 $\sim 0.01$  keV から  $\sim 100$  MeV までの広範囲な帯域に放射として解放される。当研究室では長年にわたり、大質量星の末裔である恒星質量 BH (Makishima et al. 1986) [3, 17, 50]、謎の天体 ULX、ある種の銀河の中心に見られる巨大 BH という 3 カテゴリーに対して、世界をリードする研究を展開して来た [109]。

### ○ ULX 天体 [54, 81]。

牧島らは、近傍銀河に見られる大光度の X 線点源に ULX (Ultra-Luminous X-ray Source) という呼称

を与え、それらが恒星質量 BH と巨大 BH の橋渡しをする「中質量 BH」であると論じてきた (Makishima et al. 2000)。他方それらは超臨界降着する恒星質量 BH との解釈もあり、決着がつかない。

ULX は、Power-Law 的なスペクトルを示す PL 状態と、上に凸なスペクトルを示す円盤の状態の間を遷移し、後者の方が光度が高い。小林らは「すぎく」を用いて ULX の研究を続けた結果、 $1\text{--}10$  keV のスペクトルは両状態とも、 $< 2$  keV に見られる降着円盤放射と、その光子が強く熱的コンプトン散乱を受けたものとの和で、表現できることを確立した。

さらに小林らは、NGC 1313 X-1 と呼ばれる ULX を「すぎく」で追観測し、図 7.9 に示すように、顕著な時間変動の検出に成功した。 $1\text{--}10$  keV の光度が  $1.3 \times 10^{40}$  から  $3.4 \times 10^{40}$  erg  $s^{-1}$  に増加するさい、円盤のパラメータやコンプトン電子温度はほぼ不変だが、コンプトンの光学的厚みが  $\sim 13$  から  $\sim 18$  に増加することがわかった。さらに光度が上がり disk-like 状態に遷移すると、円盤温度が上がり、コロナの電子温度が下がると同時に、円盤放射のうち直接に見える成分がほぼ消失する (すべてコンプトン化される) ことも示唆される。

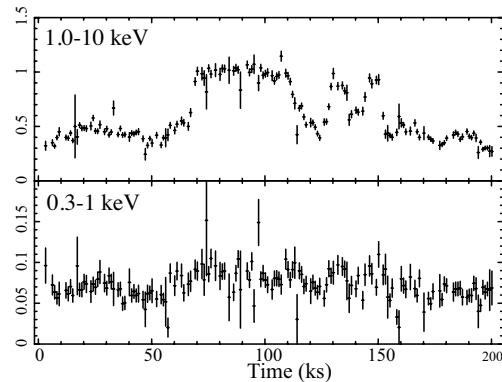


図 7.9: Two-band light curves (1 ksec/bin) of the ULX NGC 1313 X-1 obtained with the *Suzaku* XIS [30, 54, 81]. The variation is prominent in the harder band.

### ○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。その円盤放射は真空紫外領域に来るため、複雑なスペクトル成分を切り分けることが難しい。三宅、牧島らは、理研の野田らと協力し、「すぎく」で得た広帯域の AGN スペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する“C3PO”法を進めた。その結果、従来は単一成分と思われていた AGN の X 線放射が、光子指数  $\Gamma \approx 2.3$  と柔らかく変動の激しい成分と、 $\Gamma \approx 1.4$  と硬く、吸収が強く、変動の遅い成分との混合であり、光度 (Eddington 比) が高くなると前者が卓越することが確実となった [11, 20, 49, 69]。この重要な結果は、8 月にプレスリリースされた [113]。三宅らは、セイファート銀河 IC 4329A のにこの描像を適用し成功を取めた [33, 56]。

昨年度は野田のリードにより、国内の中型望遠鏡を総動員し、NGC 3516 の「すぎく」と可視光の同時観測を実施した。今年度は野田らとともに、その



データを解析した結果、暗い時に卓越する  $\Gamma \approx 1.4$  の X 線成分が、降着円盤からの可視光と強く相関すること、硬 X 線変動に比べ可視光変動が 2~3 日ほど遅れることを発見した [78, 57]。これは可視光のかなりの部分が、硬 X 線による降着円盤の照射で発生することを示唆する。

## 7.7 銀河団の研究

銀河団は、暗黒物質、X 線を放つ高温プラズマ (ICM = Intra Cluster Medium)、数十~数百のメンバー銀河から成る宇宙最大の自己重力系で、その研究は宇宙論的な意義が大きい。

### ○ 銀河団の宇宙論的進化の新描像 [13, 21, 101, 46]

牧島らは「あすか」の X 線観測により、銀河団に関し独創的な磁気流体的描像 (Makishima et al. 2001) を構築してきた。それは「銀河団のメンバー銀河たちは、ICM 中を運動するさい抵抗を受け、渦巻から楕円へと形態を変化させつつ中心に落下し、その解放エネルギーが ICM の放射冷却を止め、粒子加速を駆動する」という壮大な筋書きで、銀河団に関する多くの謎を一挙に解決できる。

この予言を証明すべく我々は、ビッグバンセンターの Gu Liyi (雇 力意)、奈良高専の稲田直久らと協力し、ハワイ大学 88 インチ望遠鏡で観測された近傍 ( $z \sim 0.1$ ) から遠方 ( $z \sim 0.9$ ) までの 34 個の銀河団 (サンプル 1)、ついで Sloan Digital Sky Survey のデータを 2 次処理した、 $z = 0 \sim 0.5$  の 250 個の銀河団 (サンプル 2) を用い、個々の銀河団の可視光サイズと X 線サイズの比較を行ってきた。その結果、図 7.10 に示すように、銀河たちは暗黒物質に比べて中心へ落下する一方で、ICM は暗黒物質より空間的に広がってゆくことを世界で初めて発見した。これは宇宙論的な時間の間に、銀河たちの力学的エネルギーが ICM の熱エネルギーへと転化することを意味する。これは牧島の予言を立証するものであり、かつ、宇宙最大級のエネルギー流の新発見を意味する。ASTRO-H を用い、大きな視線速度をもつメンバーの周囲で、ICM の X 線放射のドップラーシフトを検出できれば、動かぬ証拠となろう。

### ○ 衝突銀河団 CIZA J1358.9 – 4750 の研究 [10, 29, 58, 70, 80, 40]

銀河団は大規模構造の節であり、宇宙年齢の中で衝突合体を繰り返しながら、成長してきたと考えられている。加藤、中澤、Gu らは、銀河系から  $z = 0.07$ 、距離 300 Mpc という近傍に、衝突の初期段階にある銀河団 CIZA J1358.9 – 4750 を発見し、その研究を進めてきた。この段階はごく短時間 ( $\sim 10^8$  年) で終わるため、これまで観測例がなく、しかも銀河団として極めて近傍にあり、X 線観測に適しているため、重要な発見であった。我々は「すざく」衛星の観測から ICM の温度ジャンプを、欧州の XMM-Newton 衛星の短時間データから密度ジャンプを発見し、2 つの銀河団の中央で衝撃波が形成されていることを示し、論文にまとめた [10]。

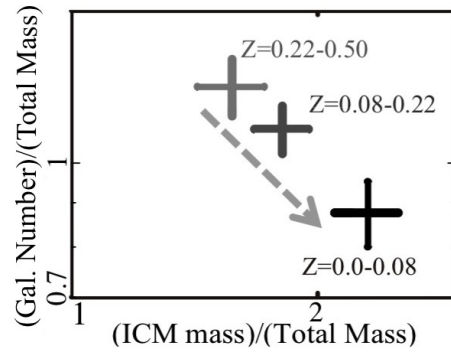


図 7.10: Spatial distributions of the three mass components of clusters of galaxies. Abscissa shows the ratio of the ICM mass to the total gravitating mass, while ordinate is the ratio of the galaxy number vs. the total mass. The three mass quantities are all calculated at  $0.5R_{500}$  and normalized to unity at  $0.2R_{500}$ . The three crosses represent ensemble averages over three subsamples with different redshift ranges [13].

さらに、2014 年夏に「すざく」を用いて周辺領域を追観測したところ、衝撃波領域が 2 つの銀河団のほぼ中間から北東に向かって伸びていること、南西には見られないことを発見した (図 7.11)。これは衝突のジオメトリに対称性から外れる成分があることを示している。現在、山形大の滝沢准教授、大阪大学の藤田准教授、鹿児島大の赤堀准教授らとともに、衝突前の銀河団質量、衝突速度と角度等のパラメータ導出を進めている。

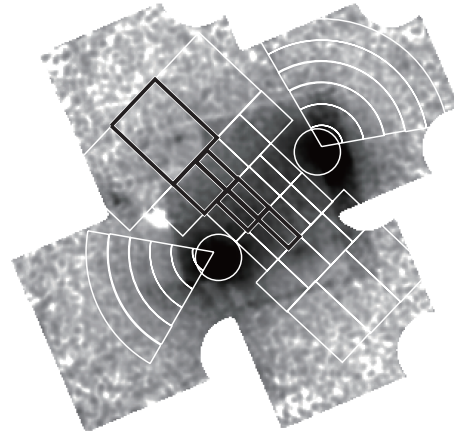


図 7.11: *Suzaku* X-ray image of the merging cluster CIZA J1358.9 – 4750. Overlaid is the spectral analysis regions. Black boxes represent hot regions, with  $kT > 7.5$  keV, while the white boxes are for cooler regions with  $kT = 4.5 \sim 7.5$  keV [80].

### ○ 低光度銀河団 Abell 548W の研究 [71]

銀河団の光度  $L_X$  は、概ね温度  $kT$  の  $\sim 3$  乗に比例することが知られているが、Abell 548W は、この関係から X 線光度が 1 桁以上も低い特異な銀河団である。同様の例はこれまでに数個知られているが、

他は全て顕著な非一様構造を持ち直ちに衝突銀河団と分かるのに対し、Abell 548W は比較的丸く、安定しているように見える点が謎である。中澤、加藤、Gu らはこの天体を「すざく」で観測し、その高感度で初めてピリアル半径近くまで ICM の温度、密度を決定した。この結果、ICM に顕著な温度構造は無い一方で、その密度が際立って少ないことが示された。実際、ピリアル半径までの積分で ICM 質量を総質量と比較すると、通常の銀河団の半分しかない。[71]

一つのシナリオとして、温度 2 keV 程度の小型銀河団 (あるいは銀河群) が高速で衝突し、強く加熱された後の姿を見ている可能性がある。このような銀河団は、放射冷却が効かないため通常の銀河団の持つ  $kT-L_X$  関係に戻ることは無い。同様の安定した銀河団は一定数存在するはずで、将来、より感度の良い観測でその性質を明らかにしてゆくことが重要である。

## 7.8 雷雲ガンマ線の研究

近年、雷雲から 10 MeV に達する高エネルギーのガンマ線が放射されていることが分かってきた。これは雷雲中に静電場加速器があり、そこで  $\sim 10$  MeV 以上に加速された電子から、制動放射が出ていると理解されているが、その加速器の仕組みや、成立条件等はまだまだ分かっていない。我々は新潟県の柏崎刈羽原発の敷地内で、日本海岸で発達する冬季雷雲からのガンマ線を観測する実験 (GROWTH 実験) を 2006 年の冬から継続している。2014 年度の冬は、ガンマ線の方向検知能力をもつ新たな観測装置を設置し、11 月 14 日から 2015 年の 4 月 14 日まで観測を実施した。低温な気候と日本海の海水温が高かったこともあり、今期は非常に雷雲が活発で、これまでに解析した 2 月までのデータだけで、8 個のガンマ線イベントを新たに検出した。これまでの 8 シーズン合計 12 個と比較して、大幅に数が多いのは、異常気象の影響だけでなく、検出器面積が大きかったからと考えられる。

8 個のイベントのうち、2 個はかつて無い統計の良いデータとなった。そのうちのひとつを図 7.12 に示す。レーダーで確認できる雷雲の通過に同期して、ガンマ線フラックスが上昇・下降していることが分かる。その大統計を活かして、連続成分スペクトルのベキの時間変化を追ったところ、光度が高いときほどベキが  $\Delta\Gamma = 0.1$  ほど硬くなっていることを初めて示した。これは上空から強くビーミングしたガンマ線が来ており、放射域の端の方ではオフビームの柔らかいスペクトルが混ざっていると解釈できる。方向検知の結果も、天頂角 30 度以内ほどから放射がビーミングして到来していると考えたと説明でき、加速器の構造に迫る重要な結果を得た。

## 7.9 ASTRO-H 衛星

ASTRO-H 衛星は、2015 年度末の打ち上げを目指して開発の進められている次世代の宇宙 X 線衛星で、

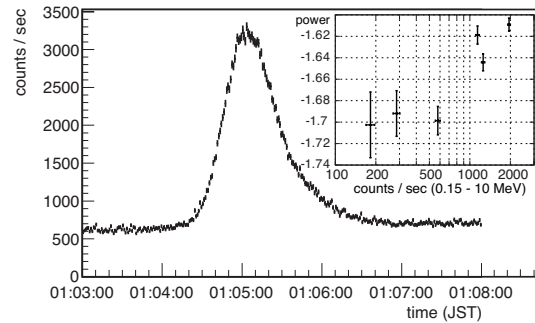


図 7.12: A 0.15–10 MeV gamma-ray count rate profile of the thunder storm event on 2015.01.25 (JST). Gamma-ray enhancement was observed for  $\sim 1.5$  min, and its spectral index was harder at its brightness peak by  $\Delta\Gamma = 0.1$  compared to those in the rising and falling edge [92, 93]. Note that the countrate profiles includes background, while it is subtracted in the inserted index plot.

広帯域、高感度、高精度での X 線分光観測において、これまでと比較して桁違いの性能を発揮し、ブラックホールや銀河団の研究などに飛躍的な進展をもたらす。この衛星には、0.5–10 keV 域で X 線エネルギーを 5–7 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、38' の広視野を持つ X 線 CCD カメラに加え、5–80 keV を集光結像する 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT) とその焦点面に置かれる硬 X 線イメージャ (HXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。ASTRO-H は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本の科学衛星として最大で、H-IIA ロケットで打ち上げられる。我々は、JAXA、広島大、理研ほか国内外の大学研究機関、スタンフォード大、フランス CNES などと共同し、中澤を中心に研究室の総力を挙げて、HXI と SGD の開発に参加している。

HXI は、5–80 keV の帯域を 9 分角の視野と 1.7 分角の角分解能で撮像しつつ、エネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。その検出器部は図 7.13 に示すように、BGO 結晶シンチレータを用いたアクティブシールドにより低バックグラウンド環境を実現し、その中に 4 段の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と 1 段の両面 CdTe ストリップ検出器 (CdTe-DSD) を重ねたイメージャを搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来の装置より 2 桁よい感度を実現する。

SGD は図 7.13 のように、 $3 \times 2$  台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む  $25 \times 2$  個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラは、半導体パッド検出器 (シリコンおよび CdTe) を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するもので、60–600 keV の帯域で動作する。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去し、「すざく」HXD より感度を一桁上げる。

2014 年度は、HXI、SGD とともに衛星搭載品 (Flight Model: FM) が完成し、小林、村上、三宅、中澤ら

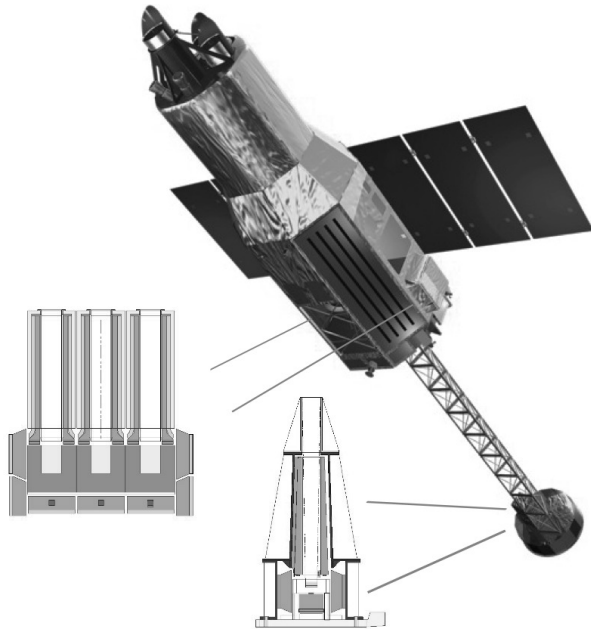


図 7.13: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in JPY 2015. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the XISM (right: 40 cm tall) and SGS (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

を中心に、JAXA の国分、川原田、佐藤 (悟)、佐藤 (理)、萩野、広島大学の 大野氏らとともに、環境試験 (熱真空試験、振動試験、音響試験) と性能評価試験 (低温試験) を実施し、要求する性能が達成できていることを確認した (図 7.14)。試験には、加藤、小野、古田、室田らもサポートに入っている。これらの結果、どちらの衛星搭載品も完成を迎え、衛星に搭載された。そのときの集合写真を図 7.15 に示す。

## 7.10 将来計画

*ASTRO-H* 衛星の打ち上げが迫る中で、次の世代にどのような高エネルギー宇宙観測が必要とされているかの検討を進めている。

### ○ 広視野 MeV ガンマ線観測計画 [28, 52, 106]

一つの方向性は、*ASTRO-H* の観測帯域より上のエネルギーを目指すことである。0.1 から数 MeV の帯域は物質と光子の相互作用のうちコンプトン散乱が支配的で、ガンマ線検出が難しい。*ASTRO-H* SGS は Si と CdTe を組み合わせた半導体コンプトンカメラでこの難題に取り組むが、同じ技術を使って広い視野をコンプトン撮像し、0.2-2 MeV という sub-MeV から MeV の帯域の全天観測を目指すのが *CAST* (Compton telescope for Astronomy and Solar Terrestrial physics) 計画である。主検出器は、30 cm 立方の Si/CdTe コンプトン望遠鏡であり、これを単独の小型衛星、または国際宇宙ステーション

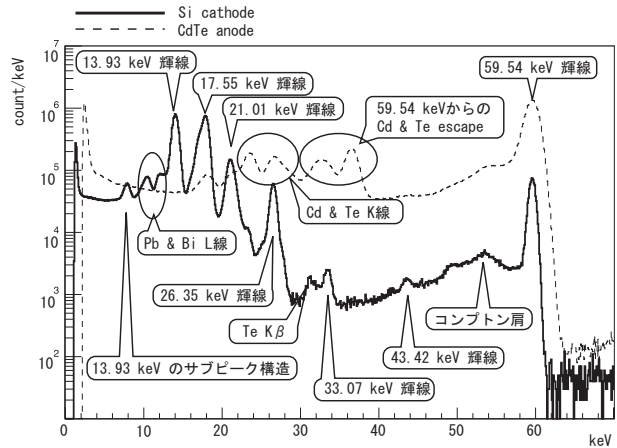


図 7.14: X-ray spectra obtained with HXIS2-S FM model in the low temperature test.  $^{241}\text{Am}$  source was irradiated to the imager part, and spectra from the 1st DSSD (dashed line) and the CdTe-DSD (solid line) is shown [41, 94, 105]

などの大型衛星のサブ機器として軌道に上げる計画である。*ASTRO-H* 開発の中で、Si/CdTe コンプトン望遠鏡の技術開発は着実に進んでおり、2020 年中頃からの軌道投入へ向けて、コンセプトの検討を進めている。

同様の発想の、より大型の衛星として、ヨーロッパを中心として *ASTROGAM* が ESA の中規模ミッションとして提案されている。この計画では、Si の両面ストリップ検出器を多数並べたものの周りを、CeBr<sub>3</sub> シンチレータのアレイで覆うことで、0.3-30 MeV でコンプトン望遠鏡として、0.03-3 GeV では対生成望遠鏡として動作させる。sub-MeV 帯域では *CAST* にわずかに劣る性能となるが、数 10 MeV でも動作し、GeV 帯域では *Fermi* GeV ガンマ線衛星の検出器からタングステンコンバーターを除く概念で設計され、電子散乱を押さえることで、より低いエネルギーまで対生成望遠鏡の稼働範囲を広げたものである。2024 年の打ち上げを目指して 2014 年末に ESA に提案されている。日本もシリコン検出器の提供を中心に貢献することを検討しており、中澤が日本を代表してその発起人の一翼を担っている。審査の結果は、2015 年の夏頃に出る予定であるが、ここで落選したとしても 2-3 年後の次の中型計画へ向けてさらに計画をリファインし、より強力な衛星計画にしてゆく予定である。

### ○ 高角分解能の広帯域 X 線撮像分光衛星 (*NGHXT*) 計画 [104, 99, 100, 89, 90, 91]

*ASTRO-H* に続く世界の宇宙 X 線観測衛星としては、2028 年打ち上げ予定の *ATHENA* という大型衛星が ESA 主導でプロジェクト化されている。この衛星は、*ASTRO-H* の 2 つの特徴の一つ、精密分光を引き継ぐもので、望遠鏡の有効面積を 1 桁、角度分解能を 1 桁改善する計画である。日本もこの計画に参加しており、分光検出器の冷却機構や、もう一つの広視野イメージャの評価試験などへの貢献が期待されている。一方で *ASTRO-H* のもう一つの特徴、



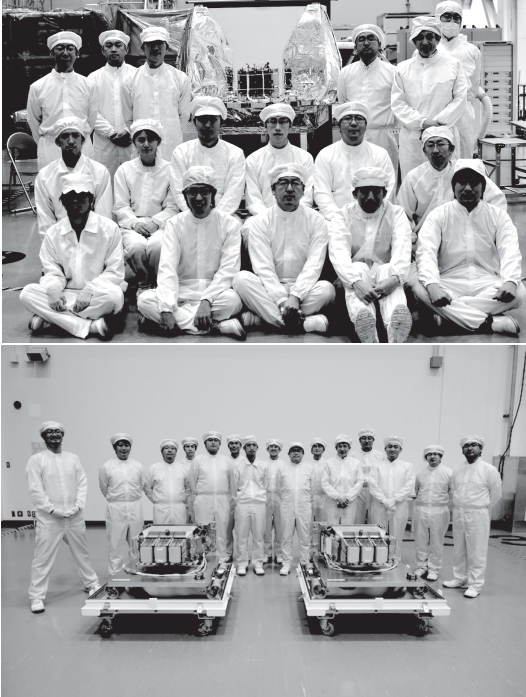


図 7.15: (Top) Photo of the 2 flight model HXIs with core team members snapped in February 2015, and (bottom) those with the 2 SGDs in April 2015.

0.5-80 keV までの広帯域の撮像分光観測は、天体のスペクトルからその正体を探る有力なツールであるが、*ASTRO-H* 以後にこの特徴を引き継ぐ衛星計画は世界に存在しない。

Next Generation Hard X-ray Telescope (*NGHXT*) 計画は、2020 年代前半の打ち上げを目標に、*ASTRO-H* 同様の 0.5-80 keV の広帯域を、角分解能を 1 桁改善し、同等の有効面積を 800 kg ほどの比較的小型の衛星で実現しようという計画である。中澤は、宮崎大、京都大、大阪大、NASA のゴダード宇宙センターの研究とともに、この計画の発起人を勤めている。2014 年度は、X 線コミュニティ内で本計画の重要性を議論した上で、この計画を検討するためのワーキンググループ申請書を提出した。この計画は、優れた望遠鏡 (NASA の担当) と検出器 (我々や京大の担当)、そして効率的な衛星システム、特に姿勢系の構築 (JAXA と共同) が鍵を握っており、*ASTRO-H* の「次」を目指して精力的にサイエンス、検出器システム、そして衛星システムの検討を行っている。

#### ○ その他の開発 [39, 63, 96]

こうした X 線ガンマ線観測の将来検討と並行して、太陽フレアからの ~10 MeV 中性子の観測を目指した検出器の研究も進めている。2014 年度に、小野、村上らは、中性子散乱のリコイル陽子からの信号と、ガンマ線を区別できる新しいプラスチックシンチレータ 2 個を用いて、中性子の弾性散乱をエネルギー損失から再構成し、入射方向とエネルギーを知る装置の概念実証となる基礎実験を行い、 $^{251}\text{Cf}$  線

源からの数 MeV の中性子の散乱角を検出することに成功した [39]。

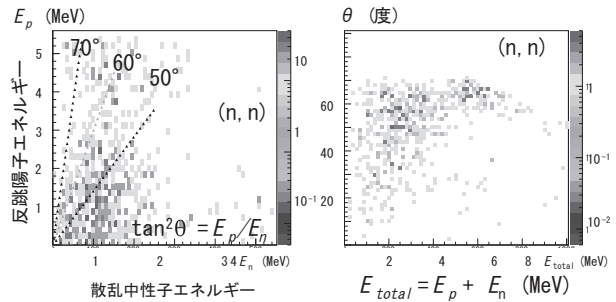


図 7.16: Angular resolution of elastic neutron scattering within the detectors. (left) Energy comparison between recoil proton ( $E_p$ ) and scattered neutron ( $E_n$ , measured via time-of-flight) is shown. (right) The same plot, converted into scattering angle vs initial neutron energy [39].

このほかに、中澤は、宇宙重力波観測計画 *DECIGO* の検討にもアドバイザーとして参加している [63, 96]。

#### <受賞>

- [1] 牧島一夫、第 105 回学士院賞、「X 線観測による中性子星の強磁場の研究」にて。2015 年 3 月 12 日。

#### <報文>

(原著論文 (Refereed))

- [2] Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, id.171102 (2014)
- [3] Koyama, S., Yamada, S., Kubota, A., Tashiro, Makoto S., Terada, Y., & Makishima, K.: “Suzaku observation of X-ray variability in soft state LMC X-1”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [4] Yasuda, T., Iwakiri, W.B., Tashiro, M., Terada, Y., (8 co-authors), Makishima, K.: “Sub-MeV band observation of a hard burst from AXP 1E 1547.0-5408 with the Suzaku Wide-band All-sky Monitor”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [5] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M., & Ono, K.: “Probing the Accretion Scheme of the Dipping X-ray Binary 4U 1915-05 with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.120 (2014)
- [6] Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. & Sasano, M.: “Firm detection of a cyclotron resonance feature with Suzaku in the X-ray spectrum of GRO J1008-57 during a giant outburst in 2012”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.59 (2014)

- [7] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: “Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822–37”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.35 (2014)
- [8] Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, et al. : “Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations ”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.9914 (2014)
- [9] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K., Hiraga, J.S., Uchiyama, H., Kaneda, H., Enoto, T., : “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, id.912 pp.
- [10] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K., : “Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9-4750”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [11] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K., Sakurai, S., & Miyake, K.: “Suzaku Studies of the Central Engine in the Typical Type I Seyfert NGC 3227: Detection of Multiple Primary X-Ray Continua with Distinct Properties ”, *Astrophys. J.* **786**, id.127 (2014)
- [12] Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al.: “Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System”, *Astrophys. J.* **786**, id.127 (2014)
- (会議抄録)
- Proc. *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe* (2014 February 19–22, Matsuyama, Ehime)
- [13] Gu, L., Gandhi, P., Han, J., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Wen, Z., Xu, H., & Makishima, K.: “Probing of the Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale ”, p.382
- [14] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M. & Ono, K.: “Probing the geometry of the Comptonizing coronae of LMXBs”, p. 264
- [15] Terada, Y., (6 co-authors), Makishima, K., Mukai, K., Urata, Y., (7 co-authors): “Systematic surveys of non-thermal emission from white dwarfs with Suzaku ”, p.248
- [16] Sugita, S., Yamaoka, K., Takahashi, H., Yoshida, A., Tawara, Y., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “Suzaku Observation of LMXB 4U 0614+091 ”, p.224
- [17] Koyama, S., Yamada, S., Tashiro, M., Terada, Y., Kubota, A., & Makishima, K.: “Spectral Variability of LMC X-1 with SUZAKU ”, p.170
- [18] Mihara, T., Yamamoto, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K., Sasano, M., Yamaoka, K., & Morii, M.: “Cyclotron lines at high energies in GRO J1008-57 and GX 304-1 with MAXI-Suzaku collaboration”
- Proc. *The X-ray Universe 2014* (2014 June 16-19, Dublin, Ireland)
- [19] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M., & Ono, K.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs ”, id.341
- [20] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., & Miyake, K.: “Understanding X-ray Spectral and Timing Characteristics of Active Galactic Nuclei by a Novel Picture with Multiple Primary Emission ”, id. 153
- [21] Gu, L., & Makishima, K.: “Probing of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale ”, id.87
- Proc. SPIE, *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*
- [22] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “The ASTRO-H X-ray astronomy satellite”, *Proc. SPIE*, **9144**, 914425 24 pp. (2014).
- [23] Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Thermal design of the hard x-ray imager and the soft gamma-ray detector onboard ASTRO-H”, *Proc. SPIE*, **9144**, 91445E 11 pp. (2014).
- [24] Sato, G., Kokubun, M., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission”, *Proc. SPIE*, **9144**, 914427 11 pp. (2014).
- [25] Ohno, M., Tokuda, S., Kawano, T., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Development and verification of signal processing system of BGO active shield onboard Astro-H”, *Proc. SPIE*, **9144**, 91445G 13 pp. (2014).
- [26] Mizuno, T., Kimura, D., Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Development and calibration of fine collimators for the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector”, *Proc. SPIE*, **9144**, 91445F 10pp. (2014).
- [27] Fukazawa, Y., Tajima, H., Watanabe, S., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Soft gamma-ray detector (SGD) onboard the ASTRO-H mission”, *Proc. SPIE*, **9144**, 91442C 12 pp. (2014).
- [28] Nakazawa, K., Takahashi, T., Watanabe, S., Makishima, K., et al. : “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope”, *Proc. SPIE*, **9144**, 91440J 13 pp. (2014).
- 天文・天体物理若手夏の学校 2014 (長野： 2014 年 7 月 28 日～31 日) 集録



- [29] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫：「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の観測」銀河・銀河団分科会 c2
- [30] 小林翔悟：「Ultra Luminous X-ray source の Te/Tin による統一的理解」、コンパクトオブジェクト分科会 a23
- [31] 村上浩章ほか：「自由歳差運動する中性子星からのパルス放射」、コンパクトオブジェクト分科会 c21
- [32] 小野光、櫻井壮希、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫：「『すぎく』を用いたソフト状態とハード状態における LMXB の統一的研究」、コンパクトオブジェクト分科会 a13
- [33] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫：「セイファート I 型活動銀河核 IC4329A の新たな硬 X 線成分とスペクトル描像」、コンパクトオブジェクト分科会 a24
- [34] 古田祿大ほか：「Central Compact Object 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の『すぎく』による観測的研究」、星間現象分科会 a3
- [35] 室田優紀ほか：「『すぎく』による大質量星と中性子星との連星系 4U 1700 - 37 の解析」、コンパクトオブジェクト分科会 14a

● その他の集録

(学位論文)

- [36] Toshio Nakano: “*Suzaku* Studies of Supernova Remnants Hosting Non-Rotation-Powered Neutron Stars”, 博士学位論文
- [37] Soki Sakurai: “X-ray Study of Mass Accretion Flow in Weakly-Magnetized Neutron Star Binaries”, 博士学位論文
- [38] Makoto Sasano: “X-ray Studies of Highly Magnetized Neutron Stars in Binary Systems with *Suzaku*”, 博士学位論文
- [39] 小野光:「プラスチックシンチレータを用いた太陽フレア MeV 中性子の検出の試み」、修士学位論文
- [40] 加藤佑一:「衝撃波を伴う衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9 - 4750 の X 線観測」、修士学位論文
- [41] 三宅克馬:「ASTRO-H 衛星硬 X 線イメージャ実機の地上較正試験と応答関数の構築」、修士学位論文

< 学術講演 >

(国際会議講演)

- European Week of Astronomy and Space Science, Special Session 1 (2014 June 30, Geneva)
- [42] Nakano, T.: “Study of Magnetic Fields Decays in Magnetars through Age discrepancy between the Anomalous X-ray pulsar 1E 2259+586 and the Supernova Remnant CTB 109”, No.204
- [43] Sasano, M.: “Study of long period pulsars as a candidate of magnetar in X-ray binaries”, No. 280
- [44] Makishima, K.: “Evidence for Magnetic Deformation of the Magnetar 4U 0142+61”, No. 287

- The 40th COSPAR Scientific Assembly (2014 August 2–10, Moscow)
- [45] Makishima, K.: “State Transitions and Diagnostics of Accretion Flows in Neutron Star Systems”, Symp, E1.1-1 (invited)
- [46] Makishima, K.: “X-ray Diagnostics of Clusters of Galaxies with ASTRO-H”, Symp. E1.4-3 (invited)
- [47] Sasano, M., Enoto, T., Makishima, K., & Sakurai, S.: “Study of magnetic field effects for accretions with highly magnetized neutron stars in low mass X-ray binaries”, Symp. E1.1-18 (contributed)
- [48] Zhang, Z., Sasano, M., Ono, K., Makishima, K., & Sakurai, S.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs”, Symp. E1.1-2 (contributed)
- [49] Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., Gu, L., & Minezaki, T.: “A Novel Picture of the AGN Central Engine Derived with X-ray and Optical Simultaneous Observations”, Symp. E1.5-15.
- [50] Ono, K. Sakurai, S. Zhongli, Z. Kazuhiro, N. Kazuo, Makishima: “Unified view of the accretion corona in the LMXBs across the soft and the hard state”, E1.1 STW-S-056
- その他の国際会議
- [52] Nakazawa, K. et al.: “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope”, 10th INTEGRAL Workshop: A Synergistic View of the High Energy Sky (2014 9/15-19 Annapolis, USA)
- [53] Nakazawa, K., Takahashi, T., et al.: “The ASTRO-H mission”, 10th INTEGRAL Workshop: A Synergistic View of the High Energy Sky (2014 9/15-19 Annapolis, USA)
- [54] Kobayashi, S., Makishima, K., Nakazawa, K. : “A Unified View of the Spectral States of ULXs Using the Te/Tin Ratio” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16–19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [55] Zhang, Z. et al. : “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16–19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [56] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K. : “The New Spectral Picture of Seyfert 1 AGNs” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16–19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [57] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Miyake, K.: “Understanding X-ray Spectral and Timing Characteristics of Active Galactic Nuclei by a Novel Picture with Multiple Primary Emission” (Oral), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16–19, Trinity College, Ireland, Dublin)

- [58] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Observation of nearby early merging clusters with clear shock, CIZA J1358.9-4750”, *ASTRO-H summer school 2014* (2014 7/7-8, Paris)
- [59] Murakami, H., “Pulsation from a free-precessing neutron star”, *ASTRO-H summer school 2014* (2014 7/7-8, Paris)
- [60] Ono, K., Sakurai, S., Kazuhiro, N., Kazuo, M.: “Investigation into a possible spectral feature at 30 keV in Low-Mass X-ray Binaries in the hard state”, *ASTRO-H summer school 2014* (2014 7/7-8, Paris)
- (国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2014 年 9 月 18 日～21 日；佐賀大学；口頭)
- [61] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、平賀 S. 純子、中野俊男、中澤知洋、櫻井壮希、笹野理：「『すぎく』で探るマグネター 4U 0142+61 における中性子星の自由歳差運動と磁気変形 II」、18pSA-7
- [62] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫：「GROWTH 実験で 2012 年に検出された北陸冬季雷雲からの対消滅線」19pSB-12
- [63] 安東正樹、中澤知洋、ほか：「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (55)：DECIGO/DPF の概要」、21aSB-4
- 日本天文学会・春季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日；山形大学；口頭)
- [64] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K., Sasano, M., & Yamada, S.: “Suzaku observation of eclipsing source EXO 0748-676 in the LHS”, J117a
- [65] 笹野理、榎戸輝揚、牧島一夫、堂谷忠靖、岩井将親：「『すぎく』による特異な低質量星と中性子星の連星 GRO J1744-28 の観測」、J119a
- [66] 牧島一夫、榎戸輝揚、中澤知洋、平賀純子、中野俊男、笹野理、櫻井壮希、村上浩章：「マグネター 4U 0142+61 における自由歳差運動の徴候 II」、J133a
- [67] 安田哲也、田代信、寺田幸功、神頭知美、岩切渉、榎戸輝揚、中川友進、馬場彩、浦田裕次、柴田晋平、牧島一夫：「『すぎく』衛星搭載 WAM 検出器による AXP 1E1547.0 - 5408 の硬 X 線バーストの観測 (II)」、J137a
- [68] 榎戸輝揚、笹野理、山田真也、玉川徹、牧島一夫：「自転周期のきわめて遅い X 線パルサー 4U 1954+319 の『すぎく』観測」、J138a
- [69] 野田博文、牧島一夫、山田真也)、中澤知洋、三宅克馬：「セイファート NGC 3227 が示す巨大ブラックホールへの降着流の状態遷移」、S29a
- [70] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫：「衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9-4750 における衝撃波の観測的研究」、T18a
- [71] 中澤知洋、加藤佑一、Liyi Gu、川原田円、滝沢元知：「『すぎく』による衝突銀河団 Abell 548W の観測」、T16a
- [72] 村上浩章、古田禄大、中野俊男、笹野理、櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫：「自由歳差運動する中性子星からのパルス放射の定式化」、J135a
- [73] 小野光、櫻井壮希、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫：「『すぎく』衛星による弱地場中性子星の観測とコンプトン過程の統一解釈」、19aSB
- [74] 古田禄大、中野俊男、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫：「長周期パルサー 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の『すぎく』による観測的研究」、J134a
- [75] 室田 優紀、笹野 理、中澤 知洋、牧島 一夫：「『すぎく』による大質量星中性子星連星 4U 1700 - 37 の解析」、J118a
- [76] 栗山翼、佐藤浩介、松下恭子、赤松弘規、大橋隆哉、藤田裕、川原田円、田村隆幸、中澤知洋、岡部信広、太田直美、滝沢元和：「銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証」、T06a
- 日本天文学会・春季年会 (2015 年 3 月 18 日～21 日；大阪大学；口頭)
- [77] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、古田禄大、笹野理、中野俊男、中澤知洋：「マグネター歳差運動の二例目：『すぎく』による 1E1547.0 - 5408 の結果」、J125a
- [78] 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、中澤知洋ほか：「セイファート NGC 3516 の X 線と可視光の間に見られた光度変動の遅延」、S30a
- [79] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K., Sasano, M.: “Suzaku observations of eclipsing LMXB 2S 0921-630 in the hard state”, J117a
- [80] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫：「衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9-4750 の『すぎく』による追加観測～外縁部の ICM の特徴～」、T04a
- [81] 小林翔悟、牧島一夫、中澤知洋：「『すぎく』による ULX 天体 NGC1313 X-1 の観測」、J137a
- [82] 村上浩章、牧島一夫、榎戸輝揚、古田禄大、中野俊男、笹野理、櫻井壮希、中澤知洋：「マグネター 4U 0142+61 における自由歳差運動の兆候 IV」、J124a
- [83] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K. & Sasano, M.: “Suzaku observations of eclipsing LMXB 2S 0921-630 in the hard state”, J117a
- [84] 中野俊男、村上浩章、古田禄大、平賀純子、牧島一夫、金田英宏、内山秀樹、榎戸輝揚：「マグネター 1E 2259+586 と付随する超新星残骸 CTB109 の親星質量」、K16a
- [85] 中澤知洋、国分紀秀、佐藤悟朗、中野俊男、牧島一夫ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状 FM の完成」、W101a
- [86] 古田禄大、中野俊男、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫：「長周期パルサー 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の XMM-Newton による詳細解析」、Q03a

- [87] 室田 優紀、笹野 理、中澤 知洋、牧島 一夫：「『すぎく』が得た大質量星中性子星連星系における鉄輝線の光電離の兆候」、J119a
- [88] 内田 悠介、渡辺 伸、太田 方之、中澤 知洋 ほか：「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の搭載品を用いた地上較正」、W107a
- [89] 森浩二、久保田あや、中澤知洋ほか：「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT」、W131a
- [90] 上田佳宏、信川正順、鶴剛、中澤知洋ほか：「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス」、W131a
- [91] 鶴剛、幸村孝由、佐藤悟朗、中澤知洋ほか：「NGHXT に搭載する広帯域 X 線撮像分光器」、W134a
- 日本物理学会・春季大会 (2015 年 3 月 21~24 日；早稲田大学；口頭)
- [92] 榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、古田禄大、山田真也、牧島一夫：「GROWTH 実験 1：2014 年末に新規設置した雷雲ガンマ線検出器と初期成果」22pDK-10
- [93] 古田禄大、榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、山田真也、牧島一夫：「GROWTH 実験 2：2014-2015 冬に観測された雷由来ガンマ線の詳細解析」、22pDK-11
- [94] 三宅克馬、室田優紀、小野光、加藤佑一、小林翔悟、村上浩章、笹野理、櫻井壮希、中野俊男、中澤知洋、牧島一夫、萩野浩一、小高裕和、川原田円、佐藤理江、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、湯浅孝行、斉藤新也、勝田隼一郎、大野雅功、高橋弘、深沢泰司、山岡和貴、田島宏康、谷津陽一、佐藤悟朗、内山秀樹、他 HXI/SGD チーム：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャの実機の地上での機能検証試験」、23pDK-6
- [95] 小野光、中澤知洋、牧島一夫：「太陽フレア MeV 中性子の検出のための基礎開発実験」、23pDM-14
- [96] 安東正樹、中澤知洋 ほか：「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (59)：DECIGO/DPF の概要」、23pDJ-1
- [97] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、中澤知洋 ほか：「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星搭載器試験結果」、23pDK-3
- [98] 大野雅功、河野貴文、古井俊也、枝廣育実、村上浩章、小林翔悟、三宅 克馬、小野光、室田優紀、ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線軟ガンマ線検出器における BGO アクティブシールドの地上較正試験」、23pDK-5
- [99] 鶴剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、武田彩希、上田佳宏、久保田あや、中澤知洋、馬場彩、幸村孝由、内山泰伸、北山哲、高橋忠幸、渡辺伸、松本浩典、森英之、古澤彰浩、常深博、中嶋大、粟木久光、寺島雄一、森浩二、岡島崇、山口弘悦：「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT」、23pDK-12
- [100] 信川正順、上田佳宏、鶴剛、田中孝明、内田裕之、武田彩希、久保田あや、中澤知洋、馬場彩、幸村孝由、内山泰伸、北山哲、高橋忠幸、渡辺伸、松本浩典、森英之、古澤彰浩、常深博、中嶋大、粟木久光、寺島雄一、森浩二、岡島崇、山口弘悦ほか：「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス」、23pDK-13
- その他の国内研究集会
- [101] 牧島一夫：「宇宙論的な銀河の落下現象：その発見、プラズマ物理学的な意味、および ASTRO-H 衛星を用いた検証」、地球惑星科学連合大会 (2014 年 5 月 1 日、横浜パンフィコ)
- [102] Makishima, K: "Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61: X-ray Observations with *Suzaku*", in *Mini Workshop on High-Density Nuclear Matter and Compact Stars* (2014 年 6 月 7 日、千葉工業大学スカイツリーキャンパス)
- [103] 牧島一夫：「マグネターの自由歳差運動と磁気変形」、科研費新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第 3 回研究会 (2014 年 9 月 23 日~25 日、伊豆熱川ハイイツ)
- [104] 中澤知洋：「X 線検出器を衛星に載せるということ～ASTRO-H 衛星の硬 X 線イメージャの例から～」(招待講演)、新学術研究領域研究「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」第 3 回研究会 (2014 年 11 月 26-27 日、金沢工科大学)
- [105] 国分紀秀、川原田円、佐藤悟朗、中澤知洋ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、第 15 回宇宙科学シンポジウム (2015 年 1 月 6 日~7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス)
- [106] 中澤知洋、高橋忠幸、田島宏康ほか：「MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST の現状」、第 15 回宇宙科学シンポジウム (2015 年 1 月 6 日~7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス)
- [107] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、古田禄大、中野俊男、笹野理、中澤知洋：「『すぎく』によるマグネターの自由歳差運動の検出」、第 15 回宇宙科学シンポジウム (2015 年 1 月 6 日~7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス)
- [108] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫：「GROWTH 実験の最前線 2012 年に検出された対消滅線について」(招待講演)、宇宙線研究所共同利用研究会「次の 10 年の宇宙線研究」(2014 年 11 月 6-7 日、東京大学宇宙線研究所)
- (セミナー、談話会、集中講義)
- [109] 牧島一夫：「ブラックホールの宇宙物理学」、京都大学・物理第二教室集中講義 (2014 年 11 月 17 日~19 日)
- [110] 牧島一夫：「宇宙で見る物理、物理で見る宇宙、最終講義 (2015 年 3 月 10 日、小柴ホール)
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [111] 牧島一夫：「ロケットとブラックホールの話」、第 13 回東大ホームカミングデー一般向け講演会「理学のワンダーランド」の一環として (2014 年 10 月 18 日、小柴ホール)。

- [112] 牧島一夫、平賀純子、中澤知洋ほか：「宇宙で最強な磁石天体が、磁力でわずかに変形している兆候を発見」、プレスリリース（掲載依頼）、2014年6月2日。
- [113] 野田博文、牧島一夫ほか：「巨大ブラックホールが支配する『AGN エンジン』の解明へ。吸い込むガスの重力エネルギーが2種類の X 線放射に変換される」、プレスリリース（掲載依頼；理研主導、東大副主導）、2014年9月18日。

## 8 太陽系外惑星

### ——太陽系外惑星および惑星形成—— (田村・須藤)

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、具体的な研究テーマは多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的である。我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙連携機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。現在我々がやっている中心的課題は、宇宙のダークエネルギーとダークマター、太陽系外惑星、第一世代の天体形成の3つである。これらについて簡単に説明を加えておこう。

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。多くの観測データを組み合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の3/4がダークエネルギー、1/5がダークマター、残りの約4パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く21世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

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

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえかねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系外惑星はすでに1500個以上が発見されている。その初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型(ガス)惑星だったが、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程度の質量を持つ惑星も検出されるようになった。と

すればそれら遠方の地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか。まさに「第2の地球は存在するか」という問いに答える日が現実のものとなりつつある。これは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部横断的な研究テーマである。

我々はこのような状況を踏まえつつ、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、さらには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つつある。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進化と重力レンズ統計、銀河のクラスタリング解析、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマーカーの検出、第一世代星やブラックホールの形成進化を研究しつつある。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、超並列計算機を用いたボルツマンシミュレーションなど、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。

これらに関しては、研究室ホームページからより詳細な情報を入手することができる。

### 8.1 星震学とロシター効果を用いたスピン軌道角の3次元的决定

惑星の公転軸と中心星の自転軸のなす角(スピン軌道角 $\psi$ )は、惑星系の形成・軌道進化過程の解明につながる重要な観測量である。例えばホットジュピターの場合、軌道移動が円盤との相互作用によるものであれば $\psi$ はつねに小さく、古在機構や惑星散乱によるものであれば $\psi$ はランダムにばらつくと考えられる。従って、観測された $\psi$ の統計的な分布は、ホットジュピターが経験した軌道移動の過程を解明する手掛かりとなる。

$\psi$ の観測的制限には、これまで主にトランジット惑星系におけるロシター・マクローリン効果(RM効果)が用いられてきた。ところが、RM効果から制限できるのは天球面に射影したスピン軌道角 $\lambda$ のみであり、これは一般に真のスピン軌道角 $\psi$ とは異なる。 $\psi$ を正確に求めるには、 $\lambda$ に加えて中心星の自転軸が視線方向となす角 $i_*$ を決定する必要がある。

そこで我々は、これまでRM効果が観測されている2つのトランジット惑星系(HAT-P-7およびKepler-25)において星震学を用いて $i_*$ を決定し、これをRM効果やトランジットの減光曲線と組み合わせて解析することで、スピン軌道角 $\psi$ の3次元的な推定を行った。その結果、HAT-P-7の惑星bについては、真のスピン軌道角 $\psi \approx 120^\circ$ は、観測された $\lambda \approx 180^\circ$ よりもやや小さいことが分かった。またKepler-25の惑星cに対しては、 $\lambda$ が $0^\circ$ 程度であるにも関わら

ず、3次元的にみると惑星公転軸と中心星自転軸がずれていることを示唆する結果 ( $\psi = 27^{+7}_{-9}^\circ$ ) を得た。Kepler-25系は複数トランジット惑星系であるため、惑星どうしの公転軌道面はほぼ揃っており、それらはもとの原始惑星系円盤をトレースしていると考えられる。従って今回の結果は、惑星の軌道移動とは無関係に、中心星の自転軸を原始惑星系円盤に対して相対的に傾ける機構が存在することを示唆する [3, 33, 36]。

## 8.2 重力減光を用いたホットジュピターのスピン軌道角測定と軌道の長期進化

系外惑星系のスピン軌道角（主星自転軸と惑星公転軸のなす角）は、ホットジュピターの軌道移動や惑星形成の初期条件と密接な関わりをもつ重要な特性である。トランジット惑星のスピン軌道角は、スピン軌道角の天球面成分  $\lambda$  および主星自転軸の視線に対する傾き  $i_*$  の2つから決まる。通常、スピン軌道角への制限は、ロシター効果や星震学によって入または  $i_*$  のいずれかを決定することで与えられる。

これら2つの成分を測光データから同時に制限できるユニークな手法として、高速自転星における重力減光を用いるものがある。von Zeipelの定理によると、主星の表面輝度は有効表面重力に比例するため、高速自転星の赤道付近は極付近と比べて暗くなる。このような星を惑星がトランジットすると、主星の極と惑星軌道の位置関係に応じてライトカーブの形状が変化するため、 $i_*$  と  $\lambda$  を決定できる。この手法はホットジュピター系 Kepler-13A に適用され、スピン軌道角を高精度で決定 ( $i_* = 45^\circ \pm 4^\circ$ ,  $\lambda = 24^\circ \pm 4^\circ$ ) することに成功した。ところが、その後の分光観測からは、重力減光の結果と矛盾する値 ( $\lambda = 58.6^\circ \pm 2.0^\circ$ ) が得られた。この差異の原因を特定するため、我々は重力減光を用いた手法における系統誤差の要因を精査した。結果、重力減光から求まる  $i_*$  や  $\lambda$  は主星の周辺減光パラメータに非常に敏感であり、その値次第では分光観測と整合的な解 ( $i_* = 81^\circ \pm 5^\circ$ ,  $\lambda = 59^\circ \pm 2^\circ$ ) が得られることがわかった。従って、重力減光からスピン軌道角を決定する際は、周辺減光の信頼できるモデル化、あるいは他の独立な観測による制限のいずれかが必須であるといえる。さらに、上記の解の正当性の検証手段として、主星の四重極ポテンシャルに起因する軌道歳差運動の追観測が有用であることも示した [2, 38, 39, 40]。

以上の理解を踏まえたうえで、上記の手法をホットジュピター系 HAT-P-7 にも新たに適用した。その結果、惑星の公転軌道面が我々の視線方向と揃っているのに対し、主星の極は視線方向に向いている ( $i_* \simeq 0^\circ$ ) ことが明らかとなった。このような構造は星震学の結果と整合的だが、今回の結果はそれをより高い精度で定量的に裏付けるものである [2]。

## 8.3 トランジット光度曲線の時間変化性を利用した系外惑星系 PTFO8-8695 のパラメータ推定

PTFO 8-8695系は、高速自転する T タウリ型星と超短周期のホットジュピターからなる系外惑星系である。この系に対しては2009年と2010年の2回トランジット（惑星による主星の食）が観測されているが、その際の主星の光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている。過去の研究ではこの解釈の難しい特徴を、主星の重力減光（高速自転による極領域に対する赤道領域の光度の低下）及び主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動に帰着させ、それをモデル化することで惑星の質量や半径、軌道傾斜角など種々のパラメータを決定している。しかし、その内容は主星の自転周期と惑星の公転周期の同期という、この系においては物理的根拠の乏しい仮定の下に限定されており、解析が十分尽くされているとは言い難い。そこで本研究では自公転同期の仮定を取り除き、より広いパラメータ空間の下で観測データを再解析した結果、この系に対しては過去の研究の解以外にも様々な解が存在しうることを示した。さらに、それぞれの解においては惑星の質量、半径などの物理的特徴が互いに大きく異なるため歳差運動を通じて光度曲線の形状が変化する時間スケールも異なる点に着目し、それぞれの光度曲線の形状の今後の理論予測を与えた。この理論予測は、追観測によって得られるトランジット光度曲線との比較を通じた系の真の解の峻別に有用であると期待される。[27, 37]

## 8.4 系外惑星および惑星形成現場の直接観測サーベイの完了

太陽系外惑星やその誕生現場である原始惑星系円盤などを直接撮像観測する「SEEDS プロジェクト」を、2009年からすばる望遠鏡を用いて進めていたが、大きなトラブル無く2015年1月に本来のサーベイをほぼ完了した。今年度は、Herbig Ae型星 HD 100546 から約47AUの距離に惑星質量天体（15木星質量以下）の存在を確認した。惑星天体は点状ではなく広がっており、周惑星構造の存在が示唆された。円盤に渦巻腕が存在する証拠も得られた [5]。また、SEEDSの250個のサンプルを用いた中間統計的議論の結果、恒星が遠方（10-100 AU）に5-70木星質量の巨大惑星・褐色矮星を持つ確率は1-3%であることを示した [6]。さらに、ケック望遠鏡とすばる望遠鏡の観測に基づき、約120個のM型星まわりの巨大惑星の直接観測による探査の結果をハワイ大学他と共同で出版した [7]。

## 8.5 原始惑星系円盤および残骸円盤の直接撮像観測

すばる望遠鏡戦略枠 SEEDS プロジェクトに基づく国際共同研究の一環として HiCIAO を用いた高コントラスト観測を行い、原始惑星系円盤の観測を行った。その結果、若い恒星 IRS 48 (WLY 2-48) の原始惑星系円盤が著しく非対称であることを円盤散乱光として初めて検出した [8]。また、原始惑星系円盤の高コントラスト観測に関するレビュー論文を出版した [9]。さらに、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた国際共同研究により、約 10 天体の残骸円盤の可視光コロナグラフ観測を行い、円盤の微細構造と惑星との相互作用を議論した [10]。

### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano, Masashi Omiya, Hiroki Harakawa, Atsushi Kobayashi, Ryo Hasegawa, Takuya Takarada, Kiyoe Kawauchi, & Kento Masuda: "Precise Radial Velocity Measurements for Kepler Giants Hosting Planetary Candidates: Kepler-91 and KOI-1894," *The Astrophysical Journal*, **802** (2015) 57
- [2] Kento Masuda: "Spin-orbit Angles of Kepler-13Ab and HAT-P-7b from Gravity Darkened Transit Light Curves," arXiv:1503.05446 (2015)
- [3] Othman Benomar, Kento Masuda, Hiromoto Shibahashi, & Yasushi Suto: "Determination of three-dimensional spin-orbit angle with joint analysis of asteroseismology, transit lightcurve, and the Rossiter-McLaughlin effect: Cases of HAT-P-7 and Kepler-25," *Publication of the Astronomical Society of Japan*, **66** (2014) 94
- [4] Teruyuki Hirano, Kento Masuda, Bun'ei Sato, Othman Benomar, Yoichi Takeda, Masashi Omiya, Hiroki Harakawa, & Atsushi Kobayashi: "Global Analysis of KOI-977: Spectroscopy, Asteroseismology, and Phase-curve Analysis," *The Astrophysical Journal*, **779** (2015) 9
- [5] Currie, T. et al.: *Astrophys. J.* **796**, article id. L30, 6 pp (2014)
- [6] Brand, T. et al.: *Astrophys. J.* **794**, article id. 159, 25 pp (2014)
- [7] Bowler, B. P. et al.: *Astrophys. J. Supplement* **216**, article id. 7, 53 pp (2014)
- [8] Follette, K. B. et al.: *Astrophys. J.* **798**, article id. 132, 17 pp (2014)
- [9] Grady, C. et al.: *Astrophysics and Space Science* **355**, pp.253-266 (2014)
- [10] Schneider, G. et al.: *Astron. J.* **148**, article id. L30, 6 pp (2014)

(国内雑誌)

- [11] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その二十七: 科学者倫理をめぐる狂騒"、東京大学出版会 UP **500**(2014)6 月号, pp.33-41.
- [12] 須藤 靖: "宇宙の加速膨張: 宇宙定数か、ダークエネルギーか"、日本物理学会誌 **69**(2014)7 月号, pp.442-443.
- [13] 須藤 靖: "サイエンス最前線 2 : 宇宙の始まり インフレーションと金融ビッグバン"、週刊エコノミスト 2014 年 7 月 22 日号, pp.80-81.
- [14] 須藤 靖: "サイエンス最前線 6 : 時空のさざ波を見る 重力波で宇宙を探る「目」: KAGRA"、週刊エコノミスト 2014 年 8 月 18 日号, pp.72-73.
- [15] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その二十八: 西安で学んだ日中関係打開の糸口"、東京大学出版会 UP **503**(2014)9 月号, pp.30-38.
- [16] 須藤 靖: "サイエンス最前線 10 : 世界最大のデジカメ すばる望遠鏡で宇宙史を紐解く"、週刊エコノミスト 2014 年 9 月 23 日号, pp.70-71.
- [17] 須藤 靖: "サイエンス最前線 14 : 太陽系外惑星 第二の地球を探すケプラー探査機"、週刊エコノミスト 2014 年 10 月 21 日号, pp.70-71.
- [18] 須藤 靖: "サイエンス最前線 18 : CMB 全天温度地図 誕生後 38 万年の宇宙の姿"、週刊エコノミスト 2014 年 11 月 18 日号, pp.46-47.
- [19] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その二十九: 書評という仕事"、東京大学出版会 UP **506**(2014)12 月号, pp.24-30.
- [20] 須藤 靖: "サイエンス最前線 22 : SDSS 銀河宇宙のデジタル 3 次元地図"、週刊エコノミスト 2014 年 12 月 16 日号, pp.86-87.
- [21] 須藤 靖: "サイエンス最前線 26 : たんぼぼ計画 地球上の生命はどこから来たのか"、週刊エコノミスト 2015 年 1 月 20 日号, pp.66-67.
- [22] 須藤 靖: "サイエンス最前線 30 : ハッブル宇宙望遠鏡 可視光で探る銀河宇宙の果て"、週刊エコノミスト 2015 年 2 月 17 日号, pp.72-73.
- [23] 須藤 靖: "一般相対論ミニマム"、日本物理学会誌 **70**(2015)2 月号, pp.87-94.
- [24] 須藤 靖: "サイエンス最前線 34 : TMT 史上最大の口径 30 メートル工学赤外線望遠鏡"、週刊エコノミスト 2015 年 3 月 17 日号, pp.72-73.
- [25] 須藤 靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境 論説 2014 年 6 月 23 日、7 月 16 日、9 月 9 日、12 月 6 日、2015 年 2 月 6 日、2 月 11 日、3 月 20 日
- [26] 須藤 靖 読売新聞 書評 2014 年 4 月 27 日、5 月 12 日、6 月 8 日、6 月 15 日、6 月 29 日、7 月 20 日、8 月 17 日、8 月 24 日、8 月 31 日、9 月 14 日、9 月 21 日、10 月 12 日、10 月 19 日、11 月 2 日、11 月 9 日、12 月 7 日、12 月 14 日、12 月 21 日

(学位論文)

- [27] Shoya Kamiaka "Characterization of a planetary system PTFO 8-8695 from the variability of its transit lightcurve induced by the nodal precession" (修士論文)



(著書)

- [28] 須藤 靖: 水素エネルギー協会 (編) “水素の事典”, 朝倉書店 (2014 年 4 月刊行, 728 ページ, 2.2 節 宇宙の始まりと水素 執筆)
- [29] 須藤 靖: “宇宙人の見る地球”, 毎日新聞社 (2014 年 5 月刊行, 180 ページ)
- [30] 吉岡一男・有本信雄・山田亨・須藤 靖: “宇宙とその進化”, 放送大学印刷教材 (2015 年 3 月刊行, 12 ~ 15 章 執筆)
- [31] 内田樹 他: “高校生と考える日本の問題点”, 桐光学園訪問授業 (2015 年 4 月刊行) (第 6 章 吉田直紀担当)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [32] Kento Masuda: “Low Density Planets around Kepler-51 Revealed with Transit Timing Variations”; Exoplanetary Science 2014 (Quy Nhon, Vietnam, 4/20-26, 2014)
- [33] Kento Masuda, Othman Benomar, Hiromoto Shibahashi, Yasusi Suto: “Spin-orbit angle from the joint analysis of the Rossiter-McLaughlin effect, transit lightcurve, and asteroseismology: mild misalignment in a multi-transiting planetary system,” The Workshop for Exoplanetary Science (Kunming, China, 11/17-19, 2014)

招待講演

- [34] Yasushi Suto: “Workshop summary: from After Dark to Beyond Dark” summary talk at the 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korea Institute for Advanced Study; Nov.6, 2014)

(国内会議)

一般講演

- [35] 須藤 靖: “Spin-orbit angles of transiting planets”, RESCEU summer school (浅間温泉地本屋, 2014 年 7 月 31 日)
- [36] 増田賢人, Othman Benomar, 柴橋博資, 須藤 靖: “星震学とロンター効果を用いたスピン軌道傾斜角の 3 次元的決定”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [37] 上赤 翔也, 増田賢人, Yuxin Xue, 須藤 靖: “高速自転星と超短周期惑星からなる系の角運動量の力学進化”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11, 2014)
- [38] 増田賢人: “重力減光を用いた高速回転星まわりのトランジット惑星系の構造決定”; 大質量星の進化・活動現象と星の回転 (北海道大学, 2/18-20, 2015)
- [39] 増田賢人: “Spin-orbit configuration of an exoplanetary system from gravity-darkened transit light curves”; 系外惑星大研究会 (東京大学, 3/2-3/3, 2015)

- [40] 増田賢人: “重力減光を用いたホットジュピターのスピン軌道角測定と軌道の長期進化”; 日本天文学会 2015 年春季年会 (大阪大学, 3/18-21, 2015)

招待講演

- [41] 須藤 靖: “日本学術会議科学と社会委員会科学力増進分科会高校理科教育検討小委員会からの報告”, 日本天文学会 2014 年秋季年会天文教育フォーラム「これからの学校教育における天文学」(山形大学, 2014 年 9 月 11 日)
- [42] 須藤 靖: “第 2 2 期日本学術会議科学と社会委員会科学力増進分科会高校理科教育検討小委員会からの報告”, サイエンスアゴラ 2014 学術会議シンポジウム「高校で学ぶべき科学とは」(科学未来館, 2014 年 11 月 9 日)

(セミナー)

- [43] 須藤 靖: “トランジット惑星系の主星自転・惑星軌道公転角”, 神戸大学地球惑星科学教室談話会 (神戸大学, 2015 年 1 月 29 日)

(講演)

- [44] 須藤 靖: “系外惑星とバイオマーカー”, 東京大学理学部クラスター講義 「伝える」(小柴ホール, 2014 年 7 月 22 日)
- [45] 須藤 靖: “もう一つの地球の色を解読する”, 河合塾未来発見フォーラム 2014 (東京国際フォーラム, 2014 年 10 月 12 日)
- [46] 須藤 靖: “みどりの地球の探し方”, 高校生のための冬休み講座 2014 (東京大学理学部 4 号館 1220 号室, 2014 年 12 月 24 日)
- [47] 須藤 靖: “昨今の大学をとりまく環境に関する大いなる懸念”, 神戸大学地球惑星科学教育部会外部評価委員会 (神戸大学, 2015 年 1 月 30 日)