

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

Annual Report

2006

平成18年度 年次研究報告



東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター

目次

I	プロジェクト別 2006 年度 研究活動報告	iv
1	初期宇宙進化論	1
1.1	初期宇宙・相対論	1
1.2	観測的宇宙論	5
1.3	天体核・素粒子物理	8
2	銀河進化理論	20
2.1	系外銀河	20
2.2	銀河系	20
2.3	元素の起源	21
2.4	超新星爆発 ejecta の流体力学	22
2.5	Ia 型超新星	22
2.6	超新星の観測とモデル	23
2.7	極超新星	24
2.8	大質量星の進化	24
3	可視光近赤外観測	32
4	サブミリ波観測	41
4.1	富士山頂サブミリ波望遠鏡	41
4.2	HEB ミクサ素子の開発	41
4.3	星形成領域の観測的研究	42
4.4	銀河系中心部の観測的研究	44
5	暗黒物質観測	47
5.1	アクシオンヘリオスコープ実験	47
5.2	暗黒物質探索実験	47
5.3	レーザー共鳴イオン化質量分析法によるニュートリノ検出	47
5.4	原子炉ニュートリノモニター	48
6	銀河と宇宙構造の研究	50
6.1	高赤方偏移銀河と大構造の研究	50
6.2	銀河進化と環境効果	51
6.3	銀河に属さない惑星状星雲	52
6.4	スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS)	53
6.5	機器開発	53
7	気球観測による反物質探査, 衛星による X 線・γ 線観測	56
7.1	気球による反物質探査	56
7.1.1	はじめに	56
7.1.2	宇宙線反陽子流束の精密観測	56
7.1.3	宇宙線陽子スペクトルと太陽活動による変調	56
7.1.4	反陽子/陽子比の太陽活動変調の電荷効果	57
7.1.5	まとめ	57
7.2	衛星による X 線・ γ 線観測	58
7.2.1	「すざく」衛星の運用と稼働状況	58
7.2.2	星と太陽の物理学	58
7.2.3	コンパクト天体からの X 線放射	59
7.2.4	広がった宇宙プラズマからの X 線	59
7.2.5	雷雲からのガンマ線の観測	60

7.2.6	将来に向けての技術開発	61
8		70
II	2006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	71
1	教員, 職員, および研究員	73
2	シンポジウム・研究会	74
2.1	ビッグバン宇宙国際研究センター第一回公開講演会 「宇宙最大のなぞ: ダークエネルギー」	74
2.2	第5回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	74
2.3	第6回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	76
3	プレプリント・リスト	78

I

プロジェクト別 2006年度 研究活動報告

1 初期宇宙進化論

——基本法則に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (横山・佐藤・須藤・柳田・向山・樽家・渡利)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡っているのみならず、その方法論も多様であり、非常に学際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応用物理学的な色彩の濃い学問分野である。

我々の住むこの宇宙は今から 137 億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され、豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいつか始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980 年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当プロジェクトでは、最近の超紐理論の進展で中心的役割を担っているブレインを基礎とした相対論的宇宙論に取り組んでいる。重力の深い理解によって真の宇宙創生像を明かにすることを目標としている。

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。このテーマに関して現在我々が具体的に取り組んでいる課題は、日米独国際共同観測プロジェクトであるスローンデジタルスカイサーベイを用いた宇宙論パラメータの決定、銀河・銀河団の空間分布の定量化、赤方偏移空間での銀河・クエーサー分布 2 体相関関数の探求である。また宇宙のバリオンの半分以上を占める“ダークバリオン”を酸素輝線によってサーベイする軟 X 線精密分光観測ミッション DIOS (Diffuse Intergalactic

Oxygen Surveyor) を首都大学東京、名古屋大学、宇宙科学研究所、のグループとともに共同で推進しつつある。特に、数値シミュレーションを用いてその検出可能性とそれらの科学的意義を理論的に探求することが我々の担当である。このミッションが成功すれば、可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、および X 線による銀河団観測とは相補的な新しい宇宙の窓が開かれることが期待できる。これらと同時に、国立天文台、プリンストン大学の共同研究者とともに、すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星の観測的・理論的研究を行っている。現時点で、系外惑星の分光観測を行っている国内では唯一のグループであり、食を起こしているトランジット惑星の大気と反射光の検出、さらには系外惑星のリングと衛星の検出を目指している。(http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/を参照)

質量の大きい星は進化の最終段階で中心にブラックホールもしくは中性子星を形成し、超新星爆発を起こす。「超新星・高密度天体」を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいかにか合体しながら核子物質へ移行するのか、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ、一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。1987 年、大マゼラン星雲中に起こった超新星 1987A からのニュートリノバーストが神岡の観測装置で観測された。これはニュートリノ天文学の始まりを告げる歴史的出来事であった。当プロジェクトでは爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の 2 次元 3 次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。従来中性子形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが、実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしている。これらのシミュレーションとともに、実際の超新星ニュートリノの将来観測から得られる、超新星モデルあるいは素粒子モデルへの示唆・予言に関する研究も行なっている。また近年、超新星爆発との関連が示唆されているガンマ線バーストや、ガンマ線バーストが一つの候補天体となっている超高エネルギー宇宙線についての研究も進めている。

1.1 初期宇宙・相対論

重力のヒッグス機構

ダークエネルギーは、現代宇宙論における最も興味深い謎の 1 つである。現在の宇宙の大部分を占めていると考えられているにも関わらず、我々はその正体を知らない。この状況は、宇宙規模の長距離における重力に、新しい物理を紐解くヒントが隠されているかもしれないと予感させる。そこで、一般相対性理論を宇宙規模の長距離において変更する可能性を探るため、重力にヒッグス機構を応用することを提唱し、その性質についての研究を行なった。素粒子論においてヒッグス機構が果たしている役割を

思い起こせば、これが重力法則を長距離で変更する恐らく唯一の方法であると予想される。実際、このシナリオでは、他の理論 (massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデル等) が抱える問題 (巨視的スケールでの強結合によって生じる、制御不能な量子補正) を回避できることが分かっている。

具体的には、重力のヒッグス機構の最も簡単な例である「ゴースト場凝縮」について、非線形ダイナミクスや膨張宇宙での線形摂動を詳細に調べた [1, 4, 57, 58, 93, 121, 122, 123, 124, 139, 152, 208, 223, 224, 225, 226, 227, 231]。また、この理論の持つシフト対称性をゲージ化することで理論を拡張した。その性質を調べ、超弦理論の枠内で実現するシナリオを考察した [2, 59, 93, 121, 122, 123, 124, 226, 227, 231]。

超弦理論における宇宙論

初期宇宙論において揺るぎない予言をするには、2つの立場がある。1つは、低エネルギー有効理論における対称性または対称性の破れのパターンを用いて、量子論的に安定な議論を展開することである。これは、上記の「重力のヒッグス機構」において採用した立場である。もう1つの立場は、超高エネルギーの基礎理論に立ち返って、そこから帰結される予言を引き出すことである。

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚しく進展し、その枠内でインフレーションを議論する事が可能になりつつある。本研究では、超弦理論におけるワープしたコンパクト化 (KKLT シナリオ) で、新しいインフレーションのモデルを考察した [180, 209, 228, 229, 230]。

二つの余次元を持つ宇宙モデルでの境界条件

超弦理論と類似の構造を備える、磁束によって支持される曲がった有限な大きさの二次元余次元を持つ六次元膜宇宙モデルにおいて、四次元膜上での重力相互作用および解そのものの動的安定性について調べた。この目的のために、まず二次元の余剰空間を持つ時空において膜の内外で二重に共変的な形式での境界条件を与えた。今回用いた定式化では必要な程度の数学的厳密性と可搬性が実現されており、今後の同種の解析で幅広く応用できることが期待される。実際、上記の宇宙モデルに対して適用することで重力摂動のスペクトルの計算を行ない、二乗質量の正值性から時空の安定性を示した [9]。

6次元ブレーン宇宙モデルにおける de Sitter ブレーンの安定性

6次元 Warped Flux Compactification ブレーンモデルは、フラックスによるワープしたコンパクト2次元余剰空間の安定化の機構を含んだモデルである。このモデルではブレーン上の4次元宇宙を正の

宇宙定数をもった de Sitter 時空にすることが可能であり、そのような場合についての時空の安定性を動的および熱力学的な面から調べた。動的安定性については、背景時空の線形摂動を考えスカラー・ベクトル・テンソル型に分離して解析した。この結果、4次元上の Hubble パラメータが大きくなり過ぎるとスカラーモードに不安定性が生じ、この不安定性が生じる領域では4次元の重力法則が再現されないことがわかった。また他方、時空の熱力学的な性質を cosmological horizon に付随するエントロピーを用いて調べた。この結果、先の動的に不安定なパラメータ領域では時空は熱力学的にも不安定であることを示し、今の6次元ブレーンモデルにおいて時空の動的安定性と熱力学的安定性の間に対応があることを解析的に示した [60, 94, 99, 140, 153, 170, 181]。

ブレーンワールドシナリオにおける宇宙論的摂動論

近年の超弦理論の発展に触発されて、我々の世界は重力以外のすべての物質と相互作用が拘束されている4次元ブレーンで、それがバルクという重力のみが伝播できる高次元中に存在するという、ブレーンワールドシナリオが盛んに研究されている。これらのシナリオの妥当性を評価するための有効な手段の一つは、これらのシナリオに基づいた宇宙論を考え、様々な宇宙論的な観測結果と比較することであり、その際に宇宙論的摂動論は重要な役割を果たす。その解析の際には、ブレーンという非自明な物体の自己重力を考慮に入れなければならないために、我々のブレーン上の世界の予言を得るためには、余剰次元の重力とブレーン上に拘束された物質との結合を適切に考慮に入れて評価をしなければならないため、単純なブレーンワールドモデルに対してでさえ、具体的な予言を与えるにいたっていなかった。そこで、ブレーンの効果により、標準理論から変更が顕著になることが予想されるいくつかの状況に関する宇宙論的摂動論の研究を行った。

具体的には、Randall-Sundrum ブレーンモデルで、高エネルギー期にインフレーションが起こったとしたときに、生成される揺らぎのモード関数の時間発展に対して、余剰次元の効果による補正が入ることを明らかにした。[119, 262]

また、ダークエネルギーを導入することなしに、現在の宇宙の加速膨張を説明できる Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデルにおける、ニュートンポテンシャルの振る舞いを詳細に調べた。[39, 71, 120, 97, 151, 162, 261]

Randall-Sundrum モデルにおけるインフレーション起源の背景重力波

5次元 Randall-Sundrum モデルにおける背景重力波の進化について、数値シミュレーションに基づいた解析を行った。高エネルギー宇宙にある背景重力波は、フリードマン方程式の補正に伴う宇宙膨張則の変更による増幅効果と、Kaluza-Klein モー

ドの励起に伴う減衰効果を同時に受ける。本研究により、重力波が宇宙の地平線を横切った時期が輻射優勢だった場合は、上記の二つの効果が相殺し、得られるエネルギースペクトルが4次元の理論で予言されるものと同じになってしまうことを示した。また、Kaluza-Klein モードの励起量がバルク中を動くブレーンのローレンツファクターによって決まるといふ、状態方程式に依存しない法則があることを見出した。これにより、二つの効果の相殺は輻射優勢期の時にのみ起こることが分かった。[5, 79, 100]

5次元ブレーンインフレーションモデルにおける曲率揺らぎの進化

5次元 Randall-Sundrum モデルに基づくブレーンインフレーションモデルの一つである、Hawkins-Lidsey モデルを用いて、インフレーション中の曲率揺らぎと、ブレーンに束縛されているインフラトンの揺らぎの成長について、数値シミュレーションに基づく解析を行った。特に、初期時刻に5次元のバルク時空に揺らぎが存在しないことを仮定し、重力場が5次元的に振る舞う小スケールの揺らぎの振る舞いを調べた。シミュレーションの結果、揺らぎの波長が宇宙の地平線の大きさより小さい間、バルクに重力場の揺らぎを励起させていく代わりに、ブレーン上のインフラトンの揺らぎの振幅が減衰していくことが分かった。さらに、この減衰の効果は揺らぎの初期のスケールが小さいほど顕著であることも確かめられた。[6, 79, 90, 100]

Randall-Sundrum モデルにおけるスカラー摂動の量子化

5次元 Randall-Sundrum モデルで一般的なスローロールインフレーションを考え、曲率揺らぎとブレーンに束縛されているインフラトンの揺らぎの量子論的な取り扱いを試みた。これは、インフレーション中の揺らぎの初期条件を与えるという意味で重要である。本研究では、揺らぎの振幅を求めるためにロンスキアンを用いた手法を新たに開発し、量子論的な観点から曲率揺らぎのパワースペクトルを半解析的に導いた。その結果、5次元のバルク時空が存在するために生じる揺らぎのパワースペクトルの補正が、従来の Stewart-Lyth 補正（スローロールパラメータの1次の効果）と同程度であることが示された。[7]

Randall-Sundrum 宇宙モデルにおけるインフレーションと原始ブラックホール

Randall-Sundrum 高次元宇宙モデルとインフレーションとの整合性を原始ブラックホールを通じて調べ、インフレーションに由来するスカラー揺らぎを種として形成される原始ブラックホールの質

量関数を導出した。質量関数が計算できれば、ブラックホールの Hawking 輻射によって生じる粒子のスペクトルと宇宙線の観測との整合性から、インフレーション期の宇宙の状態、とくにスカラー揺らぎのスペクトルに対する制限が得られる。Randall-Sundrum 宇宙モデルにおいては宇宙が4次元の場合に比べ小さなスケールの揺らぎに対応する原始ブラックホールの蒸発を観測していることになるため、大規模構造での観測値で規格化したスペクトルの冪指数は4次元よりも小さくなくてはならないことが示された [8, 80, 101, 102, 141, 154]。

Randall-Sundrum 模型におけるバリオン数の破れ

余剰次元を含む理論は、標準模型を超える理論の一つと考えられている。余剰次元は階層性問題を解決する方法として導入され、その後、湯川行列やダークマターなど、他の現象論的な問題を説明する可能性があることが分かった。その一方で、バリオン数・レプトン数・フレーバーなどの破れが、通常の4次元時空の理論に比べて強く現れることが知られている。新原と中島は、余剰次元を含む理論の一つである Randall-Sundrum 模型において、バリオン数とレプトン数の破れの問題を解決する方法として、離散的ゲージ対称性を導入することを提案した。さらに、ニュートリノ質量がディラック型・マヨラナ型のそれぞれの場合について可能な対称性を分類し、対称性を実験によって区別する可能性を指摘した [47]。

Ekpyrotic シナリオにおける曲率揺らぎの生成

ブレーンワールドではないものの、やはり超弦理論に影響を受け、ブレーンの特質を用いて提案された初期宇宙モデルとして、Ekpyrotic (ブレーン衝突) シナリオというものがある。これは、インフレーションに代わって、超弦理論に基づいて初期宇宙における様々な問題点を統一的に説明できる自然な宇宙モデルになる可能性もあるものの、現状では課題が多い。我々は、このモデルにおける宇宙の収縮期に、観測されているような宇宙の大規模構造の種となる曲率揺らぎが生成されるか、という点を調べた。その結果、有効的に複数のスカラー場で記述できるモデルにおいては、それによってエントロピー揺らぎが生成され、ある条件を満たせば、それが自然に曲率揺らぎに変換され、現在の観測を説明できることを示した。[41]

Holographic QCD

有限温度、有限密度におけるゲージ理論の相構造は理論の性質を理解する上で非常に重要である。我々は漸近的 AdS 時空に probe D-brane を導入する事により、基本表現に属する粒子の相構造を解析した。その結果、バリオン密度が有限である限りそれがどんなに小さな値であっても必ずメソンのマスギャップ

が消え連続スペクトラムになる事、低密度領域では熱力学的に一次相転移が存在するのに対し高密度領域では相転移が消失すること、相図の中に不安定領域が存在する事が分かった。[31]

Holographic Surface Operator

ストリング理論を dual なゲージ理論で書き表すためにはすべてのゲージ不変な operator と対応するストリングの関係を突き止める必要がある。我々は't Hooft-Wilson operator の次元拡張に相当する Surface operator において、この対応関係を調べた。まず、全ての Half-BPS Surface operator に dual な漸近的 AdS 超重力解を構成した。さらにゲージ理論の全ての情報が超重力解に再現される事を明らかにし、超重力解に現れる conical singularity がゲージ理論では対称性の回復に伴う singularity に対応する事、両者の S-duality が一致する事を突き止めた。[186]

陽子・電子質量比と微細構造定数の時間変化

超弦理論の低エネルギー極限の一つとして導かれる dilaton runaway scenario において、基本定数の繰り込みを考慮して陽子・電子質量比と微細構造定数の時間変化を計算した。観測的にはこれらの時間変化は異符号を持つことが示唆されているが、このモデルによる計算の結果、その振る舞いと値がうまく説明できることがわかった。[10, 128]

パラメーター共鳴による原始ブラックホール形成

WMAP 衛星の観測したスペクトル指数のスケール依存性 (running) を再現するインフレーションモデルとして先に提唱した、smooth hybrid new inflation model において生成される曲率揺らぎを数値計算によって精細に求めた。その結果、WMAP 衛星等で観測される大スケールの揺らぎを生成する一回目のインフレーション時に生成した揺らぎの短波長モードが、その直後に起こるスカラー場の振動によるパラメーター共鳴によって大きく成長することを見出した。この揺らぎのスケールは二回目のインフレーションによって天体スケールに引き延ばされるため、天体物理的に興味深い質量の原始ブラックホールが形成されることを示した。[11, 61, 62, 125, 126, 127, 129]

多成分スカラー場によるインフレーション時に生成する曲率揺らぎ

最も単純なインフレーションモデルは、インフレーションを起こすスカラー場を一つだけ導入し、そのポテンシャルに基づいて揺らぎの生成論を展開する。しかし、現実的な素粒子モデルに於いてはさまざま

なスカラー場が存在すると考えられ、たとえ長波長量子ゆらぎを持つ軽い場が一つしかなかったとしても、インフレーションを起こす場の時間発展に伴って値の変化するスカラー場が多数存在する状況があり得る。そのような場合に生成する曲率揺らぎの一般的な公式を与えることに成功した。[12]

初期宇宙における重元素合成

我々は宇宙初期のバリオン数の揺らぎからビッグバン元素合成において重元素が生成される可能性を研究した。その結果多くの領域で軽元素観測に矛盾なく重元素を生成する事が可能である事が分かった。[30]

超対称性と宇宙論

現在、標準理論を超える理論の有力な候補の一つとして、超対称性を持つように拡張された標準理論 (超対称標準理論) が考えられている。この理論は、階層性問題が解消される可能性があること、標準理論の三つのゲージ理論の結合定数が高いエネルギースケールでよく一致することなどから支持されている。しかしながら、超対称性の破れの現れ方についてはまだ多くの疑問が残されている。特に、レプトンやクォークの超対称対として存在すると考えられているスレプトン、スクォークの二乗質量行列は超対称性の破れを示す重要なパラメータであるが、フレーバー対称性を破る中性カレント相互作用が非常に小さいという観測結果から、その大きさや形が厳しく制限されている (SUSY-FCNC 問題)。また、一般に長寿命のグラビティーノは、崩壊の際にビッグバン元素合成の予言を変えてしまうことが知られている。グラビティーノの量は宇宙初期の温度に比例するため、この事実から宇宙の初期温度が厳しく制限されている (グラビティーノ問題)。

一方、超弦理論や余次元空間を持つ理論に現れるモジュライと呼ばれる粒子もまた、寿命が長く問題を引き起こす事が知られている (モジュライ問題)。これまで、非常に重いモジュライ (質量 100TeV 以上) はビッグバン元素合成より前に崩壊するために問題は引き起こさないと考えられていた。

またグラビティーノが Lightest SUSY Particle (LSP) で安定な場合でも、その次に軽い Next-to-LSP (NLSP) が長寿命となり、その崩壊が問題を引き起こしかねない。浜口、柳田、伊部は、Buchmüller 氏 (DESY) と共に、 $\mathcal{O}(100 - 1000)$ 程度のエンタロピー生成が温度 $T = \mathcal{O}(\text{GeV})$ から $\mathcal{O}(\text{MeV})$ の間に起これば問題を回避出来る事を示した [42]。さらに別の可能性として、浜口、柳田は、Buchmüller 氏、Covi 氏、Ibarra 氏 (DESY) と共に、R-parity がわずかに破れているシナリオがグラビティーノ暗黒物質、レプトジェネシス、ビッグバン元素合成のいずれの観点からも無矛盾で面白い可能性である事を示した [43]。

柳田、伊部、新原は超対称性を破っている粒子の初期宇宙での問題点に関する研究を行った [45]。この結果超対称性の破れが重力相互作用で媒介されている場合にはインフレーションのエネルギースケールが厳しく制限されることが明らかになった。

柳田、伊部、新原はスケールアノマリーにより超対称性の破れが伝播している模型における暗黒物質の性質について研究を行った [44]。その結果、ある種のインフレーション模型ではインフラトンの崩壊により適切な量の暗黒物質が生成され、これまで観測と合わないと思われていた軽い粒子でも観測事実を説明できることを明らかにした。

レプトン非対称性と背景重力波

宇宙に存在する物質・反物質の非対称性は、宇宙論、素粒子物理学における大問題のひとつである。わたしたちにとって身近なバリオン物質の非対称性は、ビッグバン元素合成の理論と天文学的な軽元素観測との比較、および宇宙線形密度揺らぎの理論と宇宙背景輻射揺らぎ観測とを比較することにより、精密に測られている。ところが、宇宙のもうひとつの重要な構成要素であるレプトン物質の非対称性については、その非対称性を予言するさまざまな理論があるものの、観測的には全く確認されていない。

そこで私たちはレプトン非対称性の新しい検証可能性を提案した [53]。宇宙に満ちているニュートリノ・反ニュートリノに非対称性が存在すると、ニュートリノが空間を自由に伝搬する際に作られる分布関数の 4 重極にその非対称性の効果が現れる。私たちは、その非対称性の効果は宇宙に存在する背景重力波の伝搬に作用することに着目し、重力波の伝搬とニュートリノの伝搬を同時に数值的に解くことによりその影響を定量的に求めた。結果、ニュートリノの非対称性は、対称的な場合と比較して背景重力波の振幅の増幅となって現れること、非対称性のパラメタ ξ が $O(1)$ 程度であれば、将来の宇宙背景輻射の偏光観測を通じた背景重力波観測を通じた観測の可能性を示唆した。

宇宙背景磁場が宇宙の線形揺らぎに与える影響の考察

宇宙では銀河以上の大スケールでも磁場の存在が観測的に確認されている。ところが、その起源については明らかではない。スケールの大きな磁場の相関長を自然に説明することのできる磁場の起源として、初期宇宙の加速的な膨張期に磁場が作られたと考える説が今まで提案されている。ところが、宇宙初期から磁場が存在していたならば、過去から現在までの宇宙の進化・発展に対して、さまざまな物理過程を通じてその影響を与えてきたはずである。

そこで私たちは、磁場が初期宇宙から存在していた場合、その磁場が宇宙誕生 3 8 万年までに存在した宇宙プラズマに与える影響を考察した。確立している宇宙線形密度揺らぎの理論に磁場の効果を加えて一般化し、数值的に計算を実行することにより、

光子、バリオン物質の密度揺らぎの時間発展に対し、磁場がどのように影響したはずであるか定量的に調べた。その結果を、最新の WMAP 衛星の観測結果と比較することにより、初期宇宙起源の磁場の大きさはナノガウス以下であるという新しい制限を得た。 [55],[56]

宇宙密度揺らぎから生成される宇宙磁場

磁場は宇宙の様々な階層スケールに存在し、重力と並んで力学的に重要な役割を果たしている。ところが、銀河や、銀河団といった非常に大きな天体においても磁場の存在は観測的に確認されているものの、その起源は未だ定かではない。私たちは、宇宙の構造の種であると考えられている宇宙論的な密度揺らぎについての摂動理論を摂動の 2 次まで拡張し、そうすることで初めて取り入れることのできる磁場の生成について考察した。この研究の特徴は、既に理論的にも観測的にも確立された宇宙論的摂動論に基づいており、他の起源についての議論と比較して定量的なあいまいさが非常に小さいことが挙げられる。実際に数値計算を実行し、結果としてこの大スケールの磁場の起源として十分なだけの種磁場を宇宙の晴れ上がりの時期までに生成すること、磁場が宇宙全体の大スケールから太陽系程度の小スケールに渡って生成されること、光子の非等方圧力が重要な磁場の源になっている、などが初めて明らかになった。 [63, 98, 131, 132, 143, 189, 210, 211, 235, 236, 237]

1.2 観測的宇宙論

SDSS 銀河の 3 点相関関数

スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログを用いて、銀河の 3 点相関関数解析を行った。我々のグループはこの問題に関して、銀河 2 点相関関数に表れる銀河バイアスの影響が 3 点相関関数には見られないことを発見し、バイアスの非線型性の重要性を指摘した (Kayo et al. 2004)。今回はさらに、英国ポーツマス大学、米国ペンシルバニア大学のグループと共同で、宇宙の大構造の存在が、3 点相関関数の推定に大きな揺らぎを生み出すことを示し、さらに広い観測領域のサーベイが重要であることを指摘した [15]。

大分離角重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 のレンズ銀河団の X 線観測

2003 年に我々のグループが発見した重力レンズ 4 重像クエーサー SDSS J1004+4112 は、銀河団をレンズ天体とする初めてのクエーサーとして注目され、すばる望遠鏡、ケック望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、など、世界の代表的な望遠鏡で観測が継続されている。今回は、 $z = 0.68$ にあるレンズ天体銀河団をチャ

ンドラ衛星によって X 線観測した。その結果、このレンズ源の質量分布モデルを正確に構築することができた。従来、弱い重力レンズから推定された銀河団の質量統は、X 線観測から推定される値の二倍程度であることが多く、銀河団質量推定の系誤差として問題になっているが、この銀河団の場合には、強い重力レンズ現象であるクエーサー 4 重像から推定された質量と X 線データからの推定が良い一致を示す。一方で、4 つの像間の X 線強度比は単純なレンズモデルの予言とはくい違っていることを発見した。このことは、銀河団内の重力マイクロレンズ、時間変動など他の物理過程の存在を示唆し、さらなる観測の重要性を意味する [16]。

背景重力波の非等方性のマッピング

現在、地上でレーザー干渉計を主とする重力波の検出装置が建設・稼働中だが、近い将来、スペース干渉計の打ち上げにより、幅広い周波数帯での重力波観測が可能となる。そのスペース干渉計のターゲットの 1 つが、背景重力波と呼ばれる位相がランダムな重力波である。背景重力波は、天体起源と初期宇宙起源とに大別され、宇宙論的にも興味深いさまざまな情報を含んでいる。本研究では、宇宙論的情報を引き出す上で重要な背景重力波の全天強度マップの構築について考察を行った。特にスペース干渉計に焦点をあて、マップ作成の方法論・アルゴリズムを提示し、高周波帯域（重力波の波長が干渉計のアーム長より短い）でのマップ作成を具体的にデモンストレーションした。その結果、LISA のような干渉計では、多重極モーメントで $l \sim 8-10$ 程度の解像度をもつ全天強度マップが作れることをはじめて示した。ただし、今回用いたアルゴリズムは検出器の雑音に敏感で、 $l \sim 6-8$ まで解像度が落ちることが予想されたため、雑音の影響を受けないアルゴリズムの改良が今後必要なことがわかった。[27, 66, 110, 155, 167, 256]

非ガウス雑音があるときの背景重力波の検出方法

背景重力波の検出は、2 台の検出器から得られた信号の相関をとり、その相関シグナルが検出器の雑音レベルを凌駕することで達成される。相関シグナルの評価において通常よく使われる統計推定量は、検出器の雑音がガウス確率過程に従うことを前提に導かれたもので、前提が正しい場合、最適な推定量であることが知られている。本研究では、標準的に使われているこの統計推定量を一般的に拡張した、GCC (Generalized Cross-Correlation statistic) と呼ばれる統計量について焦点をあて、検出器に非ガウス性が混入した場合の検出能力について議論した。ロングテールを持つ非ガウス雑音に対し、解析的な見積もりを行った結果、GCC はロングテールにほとんど影響されず、標準的な統計推定量よりもすぐれた検出能力を持つことが明らかになった。GCC の統計推定量は単純な形をしており、実データを用いた解析でも比較的容易に実装可能である。今後の具体的な応用が望まれる。[28, 65, 111]

偏極成分を持つ背景重力波の検出方法

位相がランダムな背景重力波は、検出器の雑音と一見すると見分けがつかないため、2 台の検出器から得られたデータを使って相関解析を行う。通常、こうした解析では重力波は無偏極 (+, x-モードの振幅は同じ) であると仮定する。しかしながら、初期宇宙におけるパリティ非保存に由来して、背景重力波に円偏極成分が生じるなど、偏極した背景重力波を作るメカニズムがいくつか知られており、統計的観点からも無偏極の仮定を外した検出方法が望まれる。そこで本研究では、相関解析の一般的拡張を行い、偏極成分が混じる場合の検出方法についての定式化を行った。その定式化に基づき、偏極成分に対する検出感度をスペース干渉計、地上のレーザー干渉計の場合に評価し、4 種類の偏極成分（無偏極、円偏極、2 種類の直線偏極 (E-, B-モード)）の分離可能性について議論を行った。その結果、偏極成分の検出には干渉計の向き・配置が重要で、通常、無偏極成分の検出には不利と考えられていた検出器のペアでも、円偏極成分の検出にはきわめて有利になる場合があることを見出した。[95, 173, 182, 201]

CMB の偏光による初期宇宙モデルの制限

インフレーション期に生成された量子的揺らぎは、Cosmic Microwave Background (CMB) の温度と偏光の非等方性に対して、特徴的な影響を与える。特に量子揺らぎのテンソル成分である背景重力波の与える CMB の非等方性への影響に注目して、初期宇宙のモデルを観測的にどの程度制限しうるかを考察した。インフレーション起源の背景重力波は、スキューリング状態という特殊な量子状態であると考えられている。このスキューリング状態はインフレーション期の情報を直接含むが、CMB の偏向観測によってスキューリング状態による影響を見ることは非常に難しいことを示した。[160] また、超弦理論などではインフレーション起源の背景重力波が円偏光成分をもつことが示唆される。この円偏光成分をもつ背景重力波により生じる、CMB の特徴的なパワースペクトルを計算し、その振る舞いについて考察した。さらに、WMAP の 3 年目のデータを用いた現在での円偏光成分の観測的制限と、将来の観測で予想される検出可能性について議論した。[83, 176, 184]

ニュートリノ質量に関する宇宙論的制限

WMAP 衛星等による CMB データ、宇宙の大規模構造、超新星データ等を用いて初期揺らぎのスペクトルとニュートリノ質量をマルコフチェーンモンテカルロ法によって同時にフィットした。その結果、スペクトル指数のスケール依存性 (running) を考慮することによって、従来以上に厳しい制限がニュートリノ質量に対して得られた。[13, 14]

ガンマ線バーストとクエーサーを背景光とした WHIM 吸収線系の検出可能性

WHIM (Warm/Hot Intergalactic Medium) を検出する新たな試みとして、ガンマ線バースト (GRB) の X 線残光 (GRB 残光) を背景光源とした場合の金属吸収線に着目した。これは QSO 吸収線による WHIM 検出の QSO を GRB 残光に置き換えたものである。この方法の利点のひとつは、GRB が宇宙論的距離 (例えば $z=1$ 程度) で起こるので、長い距離を稼ぐことができ、そのため間に WHIM が存在する確率が高くなることである。一方、明るいクエーサーは比較的近く (Mkn 421 の場合、 $z=0.03$) に存在するので短い距離しか稼げない。また、もう一つの利点は、残光が充分暗くなった後に WHIM 自身からの輝線観測が可能になる点であり、これは常時輝き続けているクエーサーでは不可能である。我々は次世代衛星 (例えば XEUS) の性能を仮定し、宇宙流体シミュレーションを用いて、GRB 残光中の金属吸収線の模擬スペクトルを衝突、光電離平衡を仮定して作成し、GRB 残光中の WHIM による吸収線が検出可能であることを示した。また、DIOS の性能を仮定した輝線の模擬観測も同時に行った。この結果、XEUS を用いれば明るいガンマ線バーストを背景光とした WHIM 吸収線系の検出が可能であること、さらに、数十個程度の明るいクエーサーもこの方法論のターゲットとなり得ることを示した [19]。

銀河団ガスの温度・密度プロファイルと空間ゆらぎの解析モデルと、分光的温度推定にあたる系統誤差

我々は、宇宙流体シミュレーションの解析を通じて、銀河団ガス内の温度、密度揺らぎの空間一点確率密度分布関数が対数正規分布で良く近似できる事を発見し、銀河団ガスの揺らぎの新たな解析モデルを立てる事に成功した。これに基づき、X 線分光観測により求まる分光的温度とその代用としてシミュレーションもしくは理論でよく用いられる放射率重みつき温度に比べ、1-3 割程度低くなるという近年、報告された系統誤差の原因を探った。この系統誤差自体は、各種宇宙論パラメータの推定に影響を及ぼし得る重要な問題である。結果、対数正規分布モデルを用いた系統誤差に対する解析的モデルを構築し、温度揺らぎと温度密度プロファイルの二点が主な原因である事を示した [20]。

WHIM における非平衡電離過程

WHIM における重要な物理過程として、これまでは考慮されていなかったバリオンの非平衡電離過程を考慮に入れた数値計算を世界で初めて行ない、WHIM 検出の手掛かりとなる酸素イオンの電離度が電離平衡を仮定した場合と比較して大きく異なることがわかった。その結果、WHIM の酸素輝線・吸収線の観測結果を解釈する際には非平衡電離過程を考慮することが本質的に重要であることを示した。具

体的には、O VII と O VIII の電離度の比が電離平衡の場合よりも小さくなり、この二つのイオンの吸収線や輝線を使って WHIM の温度を評価する場合には、温度を過小評価することになることがわかった。 [37]

宇宙論スケールでの重力法則のずれに対する制限

まず、重力法則が変更された場合の質量密度ゆらぎの摂動論を議論し、線形成長、さらにはその上のオーダーである非線形成長に対する表式を与えた。さらに、非線形成長を含めたゆらぎの統計量を議論するため、N 体シミュレーションのコードを重力法則が変更した場合に拡張し、シミュレーションを行った。また SDSS の観測と比較するために、モックデータをシミュレーションから作成した。前年度行った準解析的方法によって得られるパワースペクトル、また摂動論を用いたバイスペクトルが、シミュレーションの結果とよく一致していることを確認し、理論的手法が有効であることを示した。更に、モックデータと SDSS の観測結果とを比較し、銀河バイアスに対し線形を仮定した場合は、バイスペクトルを用いたほうが重力法則の変更に対してよく制限できることを示した。また銀河バイアスに非線形項を含めて考えた場合は、バイアスパラメータに対する制限を与えることができ、今後の様々な宇宙論的観測で得られるであろうバイアスの情報と組み合わせることで、重力法則の変更に対し更に厳しく制限できる可能性があることを示した。 [105, 106, 144, 245, 246]

加速膨張宇宙における大規模構造の統計的性質

大規模構造の起源はインフレーションによって説明されると考えられており、多くのインフレーションモデルでは、初期の構造はガウス分布に従うことが予言されている。初期にガウス分布で与えられた構造は、線形理論の枠内ではガウス性を保ちながら発展していくものの、重力不安定性の効果で揺らぎが大きくなり、非線形領域に入るとその確率分布はガウス分布からずれる。そのずれ方は背景となっている一様・等方宇宙の膨張則によることを利用して、そのずれが宇宙の加速膨張の度合いを決めているパラメータであるダークエネルギーの状態方程式にどれだけ依存するかを Lagrange 摂動を用いたもの、N 体計算を用いたものの 2 つのアプローチから考察した。 [40, 188]

広視野銀河分光サーベイによるバリオン振動からの重力理論への制限の可能性

宇宙の大規模構造に見られるバリオン振動のシグナルは、宇宙のものさしとしての役割を果たす。そのため、ダークエネルギーの状態方程式を決定するなどの目的で、バリオン振動を精度よく検出しようとする観測計画が世界中で進められている。我々は

SDSS データと現在計画中の広視野銀河分光サーベイ、WF MOSによるデータを念頭に、銀河パワースペクトル中のバリオン振動から DGP モデルと Λ CDM モデルを区別して制限をかけられるか調べた。その結果、WF MOS と Planck などの観測を合わせる事により、重力理論に対して強く制限を与えられる事が判明した。[25]

SDSS 銀河分布を用いた銀河系ダストマップの検証

銀河系ダストによるダスト減光はあらゆる天文学的観測に重要な影響をおよぼす最も基本的なデータである。現在最も広く利用されているダストマップは、Schlegel, Finkbeiner, & Davis (1998) によるものであるが、これは減光量を直接求めたものではなく、ダストの遠赤外線での放射量から決められたものである。我々はこのマップの精度を SDSS データを用いて検証し、このダストマップに背景銀河からの遠赤外線が混入していることに起因する、わずかなが系統的な誤差が含まれている事を明らかにした。[26, 168]

SDSS 銀河のバイスペクトルと銀河バイアスの非線形性

銀河の数密度の空間分布は背景にあるダークマター、バリオンの質量分布を反映しているものと考えられる。大規模構造の統計解析において、通常はこれらの揺らぎの間を線形な関係式で結ぶモデル(線形バイアスモデル)が採用されてきた。SDSS に代表されるように、近年、銀河分布のデータベースが大幅に増加し、より精度の高い統計解析が可能になった。これにより、線形バイアスモデルの妥当性、これを用いることによる系統的な誤差を精査することが一層重要になってきた。我々はこのモデルの破れ、つまり、バイアスの非線形性を調べるのに都合の良い統計量であるバイスペクトルに注目した。解析モデル、N 体シミュレーション、さらには実際の SDSS 銀河分布についてバイスペクトルの振る舞いを計算、比較し、バイアスの非線形性を定量的に評価した。また、非線形性の度合いは用いた銀河サンプルのバイアス関係式の線形項と強い相関を持つことを発見した。[21, 107, 145, 164]

バリオン振動のスケールに対する重力非線形効果と赤方偏移歪みの影響

近年、種々の観測から宇宙の加速膨張が決定的となり、これを説明するものとして正体不明のエネルギー成分、ダークエネルギーの存在が考えられるようになった。ダークエネルギーは宇宙全エネルギーの7割程占めることが分かってきたが、その素粒子論的実態は全く未知である。ダークエネルギー解明の最初のステップとして、その状態方程式を決定す

ることが極めて重要かつ現実的である。この一つの方法論として、銀河分布のパワースペクトル中に現れる特徴的スケールを利用するものがある。このスケールはバリオン振動と呼ばれる脱結合以前のバリオンと光子の流体の音響振動によって決まるもので、宇宙の物質密度、バリオン密度が分かれば理論的に予言することができる。一方で、観測サイドでもこの特徴的振る舞いを精度よく検出できるレベルに到達し、これを宇宙の「ものさし」として利用することが現実的となってきた。これまでの研究では、このスケール線形理論に準拠して計算されてきたが、より正確なダークエネルギーの制限のためには重力非線形効果、赤方偏移歪みなどの効果を適切に取り入れることが重要である。我々は摂動論を用いて重力非線形効果、赤方変移歪みが振動スケールに与える影響を定量的に見積もり、ダークエネルギー状態方程式の推定に混入しうる系統誤差を評価した。[195, 172, 196, 190]

トランジット惑星系での Rossiter-McLaughlin 効果の観測

トランジットを起こす太陽系外惑星系では、惑星が公転周期ごとに主星の前面を通過する。この時、惑星が主星の自転による吸収線の広がりやを隠してしまうため、トランジット中の主星の視線速度は見かけ上ケプラー運動によるものからずれて観測される。この効果は古くから食連星の観測によって知られており、発見者の名前にちなんで Rossiter-McLaughlin 効果(以下、RM 効果: Rossiter 1924, McLaughlin 1924)と呼ばれている。この RM 効果による視線速度のずれは、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角 λ などのパラメータを用いて記述することができる(Ohta, Taruya, & Suto 2005)。この λ という量は惑星の形成と進化の過程を反映しており、hot Jupiter がどのように形成されたのかについて手がかりを与えてくれる貴重な観測量である。我々のグループでは、トランジット惑星系での RM 効果の検出を目指し、ハワイ島・マウナケアにあるすばる望遠鏡/HDS またはケック望遠鏡/HIRES と、マウイ島・ハレアカラにあるマグナム望遠鏡/MIP を同時に用いて、2006 年に2つのトランジット惑星系 TrES-1 と HD 189733 のトランジット観測を行った。その結果、我々は2つの惑星系でそれぞれ世界で初めて RM 効果を検出し、 λ の制限をつけることに成功した。[22, 23, 24, 64, 108, 109, 146, 193, 198]。

1.3 天体核・素粒子物理

マグネターとガンマ線バースト

今年度発見された GRB 060218-SN 2006AJ は観測結果と理論予測をつき合わせると、中心天体は中性子星になると考えられている。通常の超新星よりも激しい爆発を起こすためには直感的には強磁場中性子星であるマグネターがこの爆発現象のセントラルエンジンと考えるのが自然である。この

状況は私のシミュレーションの状況に酷似しており、ある種のガンマ線バーストの起源は私の研究で解明できるかもしれない。昨年度完成特殊相対論的計算コードを開発、完成させた。その結果、長時間安定な計算が可能になり、磁気超新星の爆発の様子が磁場の強さとコラプスしてからの時間に寄ることが理解できた。[33, 91, 165, 177, 191, 197, 247, 248, 249]

暗黒物質対消滅による放射

観測されている宇宙背景ガンマ線のうち、多くの部分はブレーザーなどの天体起源と考えられているが、そのうち一部のエネルギー領域では、暗黒物質対消滅の兆候が見えているという可能性が以前から指摘されてきた。しかし、その予言は暗黒物質の密度分布に強く依存しており、検出可能性もさほど高くはないとされていた。そこで今回我々は、暗黒物質の密度分布の細部構造として中間質量ブラックホール (IMBH) 周りの暗黒物質の増加 (スパイク構造) を取り入れ、観測にどの程度の寄与を与えうかを定量的に評価した。その結果、観測されている背景放射と同等のフラックスが予言され、暗黒物質起源の特徴的なシグナルが来年度に打ち上げの予定がされている GLAST 衛星によって検出可能であることを明らかにした [32, 116, 150, 185, 207]。

また暗黒物質が対消滅を起こす際、暗黒物質の定義上、最終的には素粒子物理の標準理論のいずれかの粒子を放出しなければならない。このことから、暗黒物質が標準理論の粒子の中で最も検出が困難であるニュートリノのみを放出すると仮定すると、暗黒物質の性質の極限値を観測より求めることが可能である。今回我々は、銀河中心のニュートリノ観測をもとに、暗黒物質の対消滅断面積の上限を求めた。また、我々の銀河ハローの構造の議論もした [194]。

超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線は宇宙空間に存在する磁場にほとんど曲げられることなく地球に到来すると期待されるため、宇宙線ソースの直接的なプローブになり得る。しかし一方で宇宙空間の磁場の強さはほとんどわかっていないため、我々は宇宙の大規模構造を考慮した磁場のモデルを作成し、宇宙線の伝搬計算を行い、地球での到来方向分布をシミュレートした。これを既存の観測結果と比較し、宇宙線ソースの数密度が $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$ 程度であると見積もった [67, 112, 137, 203]。この結果は観測イベントの少なさを原因とした不定性を大きく含むが、近い将来の観測でこの不定性が小さくなり、ソースの数をより精度よく見積もれることを示した [138] また、近い将来にソース分布と宇宙線到来方向分布に数度スケールの相関が見えてくるであろうことを示した [68, 138, 148, 157, 204, 205]。

宇宙線の大きな問題の一つとして銀河系内成分と銀河系外成分がどの程度のエネルギーで入れ替わるかという問題がある。この問題の解決策の一つとし

て、銀河系外起源の超高エネルギー宇宙線が伝搬中に宇宙背景放射と反応して生成する超高エネルギーニュートリノの観測が有用であると指摘し、そのフラックスについて議論した [138, 174]。

超新星コアの原子核パスタ

超新星爆発の初期段階である重い星の死の直前の重力崩壊の過程において、原子核が融けて核物質へと転移していくフェイズが存在する。その相転移の様子は自明ではなく、一つの可能性として球の形状であった原子核が棒状、板状にその姿を変え、さらに反転して棒状のバブル、球状のバブルへと転移して最終的に核物質へと転移することが示唆されている。これらの非球状の原子核は「原子核パスタ」と呼ばれ、パスタ相が存在することで超新星爆発において重要な役割を果たすニュートリノと物質との相互作用に変化をもたらす可能性があることが示唆されてきた。我々は実際にパスタ相が超新星爆発において 10% から 20% 程度存在するというところを見積もることでその重要性を指摘した。[29, 187] さらに実際パスタ相が存在することでニュートリノの不透明度がどのように変化するかを調べ、20MeV から 30MeV 程度の比較的エネルギーの低いニュートリノに対して超新星コアの不透明度が著しく落ちることを示した。[29, 158, 113, 114, 115, 178]

第一世代星の重力崩壊と背景放射

宇宙で最初にできた星のことを第一世代星と呼ぶ。このような天体は、現在の星と異なり、非常に重かったことが示唆されている。これまで、第一世代星の形成についてはよく調べられてきたが、その進化の最終段階である崩壊についてはほとんど調べられてこなかった。そこで我々は、このような天体の重力崩壊のシミュレーションを行い、重力波やニュートリノの背景放射の成分にどのような影響を及ぼすのかを調べた。その結果、重力波については、次世代の重力波検出器である DECIGO や BBO といったもので観測可能性が高いことを示した [69, 70, 82, 92, 96, 149, 159, 179, 206]。さらに、ニュートリノに関してはこれまで観測可能性は低いとされていたが、今まで考慮されていなかった回転の効果を入れた計算を行うと、観測の窓となる周波数帯が存在する可能性を示唆した [175, 183]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and T. Wiseman: "Dynamics of gravity in a Higgs phase"; *Journal of High Energy Physics* **0701**, 036 (2007) [arXiv:hep-ph/0507120].
- [2] H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler: "Spontaneous Lorentz breaking at high energies"; *Journal of High Energy Physics* **0605**, 076 (2006) [arXiv:hep-th/0603010].

- [3] S. Kawamura *et al.*: “The Japanese space gravitational wave antenna DECIGO”; *Classical and Quantum Gravity* **23**, S125 (2006).
- [4] S. Mukohyama: “An accelerating universe and cosmological perturbation in the ghost condensate”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0610**, 011 (2006) [arXiv:hep-th/0607181].
- [5] Takashi Hiramatsu: “High-energy effects on the spectrum of inflationary gravitational wave background in braneworld cosmology”; *Physical Review D* **73**, 084008 (2006) (hep-th/0601105)
- [6] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama: “Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0612**, 009 (2006) (hep-th/0607068)
- [7] Kazuya Koyama, Andrew Mennim, V. A. Ruvakov, David Wands, Takashi Hiramatsu: “Primordial perturbations from slow-roll inflation on a brane”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0704**, 001 (2007) (hep-th/0701241)
- [8] Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: “Mass spectrum of primordial black holes from inflationary perturbation in the Randall–Sundrum braneworld: a limit on blue spectra”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0606**, 003 (2006)
- [9] Yuuiti Sendouda, Shunichiro Kinoshita and Shinji Mukohyama: “A doubly covariant formula of deficit angle and its application to six-dimensional braneworld”; *Classical and Quantum Gravity* **23**, 7199 (2006)
- [10] T. Chiba, T. Kobayashi, M. Yamaguchi, and J. Yokoyama: “Time variations of proton-electron mass ratio and fine structure constant with runaway dilaton,” *Physical Review* **D75** (2007) 043516.
- [11] M. Kawasaki, T. Takayama, M. Yamaguchi, and J. Yokoyama: “Power Spectrum of the Density Perturbations From Smooth Hybrid New Inflation Model” *Physical Review* **D74** (2006) 043525 (10 pages).
- [12] M. Yamaguchi and J. Yokoyama: “Density fluctuations in one-field inflation,” *Physical Review* **D74** (2006) 043523 (5 pages).
- [13] B. Feng, J.Q. Xia, J. Yokoyama, X. Zhang, and G.B. Zhao: “Weighing neutrinos in the presence of a running primordial spectral index,” *JCAP* **0612** (2006) 011.
- [14] B. Feng, J.Q. Xia, and J. Yokoyama: “Scale dependence of the primordial spectrum from combining the three-year WMAP, galaxy clustering, supernovae and Lyman-alpha forests,” *JCAP* **0705** (2007) 020.
- [15] R.C.Nichol, R. Sheth, Y. Suto, A. J. Gray, I. Kayo, R.H.Wechsler, F.Martin, G. Kulkarni, M. Blanton, A. J. Connolly, J. Gardner, B. Jain, C.J.Miller, A. W. Moore, A. Pope, J. Pun, D. Schneider, A. Szalay, I. Szapudi, I. Zehavi, N.A.Bahcall, I.Csabai, and J.Brinkmann: “The Effect of Large-Scale Structure on the SDSS Galaxy Three-Point Correlation Function”; *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **368**, 1507–1514 (2006) (astro-ph/0602548)
- [16] Naomi Ota, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Kazuhisa Mitsuda, Gordon T. Richards, Yasushi Suto, W. N. Brandt, Francisco J. Castander, Ryuichi Fujimoto, Patrick B. Hall, Charles R. Keeton, Robert C. Nichol, Donald P. Schneider, Daniel E. Eisenstein, Joshua A. Frieman, Edwin L. Turner, T.Minezaki and Y.Yoshii: “Chandra Observations of SDSS J1004+4112: Constraints on the Lensing Cluster and Anomalous X-Ray Flux Ratios of the Quadruply Imaged Quasar”; *The Astrophysical Journal* **647**, 215–221 (2006) (astro-ph/0601700)
- [17] Seitaro Urakawa, Toru Yamada, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Yoichi Itoh, Tadashi Mukai, Masahide Tamura and Yiping Wang: “An Extrasolar Transiting Planet Search with Subaru Suprime-Cam”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 869-88 (2006)1 (astro-ph/0603346)
- [18] Y.P.Jing, Yasushi Suto, and H.J.Mo: “The dependence of dark halo clustering on the formation epoch and the concentration parameter”; *The Astrophysical Journal* **657**, 664–668 (2007) (astro-ph/0610099)
- [19] Hajime Kawahara, Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Nobuyuki Kawai, Kazuhisa Mitsuda, Takaya Ohashi, and Noriko Y. Yamasaki: “Soft X-ray Transmission Spectroscopy of Warm/Hot Intergalactic Medium: Mock Observation of Gamma-Ray Burst X-ray Afterglow”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 657–671 (2006) (astro-ph/0504594)
- [20] Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Mamoru Shimizu, Elena Rasia, and Klaus Dolag: “Radial profile and log-normal fluctuations in intra-cluster medium as an origin for systematic underestimate bias of cluster temperature”; *The Astrophysical Journal* **659**, 257–266 (2007) (astro-ph/0611018)
- [21] Takahiro Nishimichi, Issha Kayo, Chiaki Hikage, Kazuhiro Yahata, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, Ravi Sheth, and Yasushi Suto: “Bispectrum and nonlinear biasing of galaxies: perturbation analysis, numerical simulation and SDSS galaxy clustering”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, 93–106 (2007) (astro-ph/0609740)
- [22] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Gregory W. Henry, Anna Roussanova, Matthew J. Holman, Keigo Enya, Norio Narita, Yasushi Suto,

- and Edwin L. Turner: “Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733”; *The Astrophysical Journal* **653**, L69-L72 (2006) (astro-ph/0609506)
- [23] Joshua N. Winn, Matthew J. Holman, Gregory W. Henry, Anna Roussanova, Keigo Enya, Yuzuru Yoshii, Avi Shporer, Tsevi Mazeh, John A. Johnson, Norio Narita, and Yasushi Suto: “The Transit Light Curve Project. V. System Parameters and Stellar Rotation Period of HD 189733”; *The Astronomical Journal* **133**, 1828–1835 (2007) (astro-ph/0612224)
- [24] Norio Narita, Keigo Enya, Bun’ei Sato, Yasuhiro Ohta, Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Motohide Tamura, Toru Yamada, and Yuzuru Yoshii: “Measurement of the Rossiter–McLaughlin Effect in the Transiting Exoplanetary System TrES-1”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, in press (astro-ph/0702707)
- [25] Kazuhiro Yamamoto, Bruce A. Bassett, Robert C. Nichol, Yasushi Suto and Kazuhiro Yahata: “Searching for modified gravity with baryon oscillations: from SDSS to wide field multiobject spectroscopy (WFMOSS)”; *Physical Review D* **74**, 063525-1-11 (2006) (astro-ph/0505278)
- [26] Kazuhiro Yahata, Atsunori Yonehara, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Tom Broadhurst, and Douglas P. Finkbeiner: “The effect of FIR emission from SDSS galaxies on the SFD Galactic extinction map”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, 205–219 (2007) (astro-ph/0607098)
- [27] Atsushi Taruya: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer. III. Reconstruction of a high-frequency sky map”; *Physical Review D* **74**, 104022 (2006) (gr-qc/0607080)
- [28] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: “Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise: A performance of generalized cross-correlation statistic”; *Physical Review D* **75**, 022003 (2007) (gr-qc/0607015)
- [29] H. Sonoda, G. Watanabe, K. Sato, T. Takiwaki, K. Yasuoka, and T. Ebisuzaki: “Impact of nuclear pasta on neutrino transport in collapsing stellar cores”; *Physical Review C* **75**, 042801(R) (2007)
- [30] Shunji Matsuura, Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto & Katsuhiko Sato: “Reply to ‘Comment on ‘Heavy element production in inhomogeneous big bang nucleosynthesis’ ”; *Physical Review D* **75**, 068302 (2007)
- [31] Shinpei Kobayashi, David Mateos, Shunji Matsuura, Robert C. Myers & Rowan M. Thomson: “Horographic phase transitions at finite baryon density”; *Journal of High Energy Physics* **0702**, 016 (2007)
- [32] Shunsaku Horiuchi & Shin’ichiro Ando: “Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background”; *Physical Review D* **74**, 103504 (2006) [arXiv:astro-ph/0607042]
- [33] Shigehiro Nagataki, Rohta Takahashi, Akira Mizuta, and Tomoya Takiwaki: “Numerical Study on GRB-Jet Formation in Collapsars”; *The Astrophysical Journal* **659**, 512 (2007)
- [34] Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato: “R-Process Nucleosynthesis in MHD Explosions of Core-Collapse Supernovae”; *The Astrophysical Journal* **642**, 410-419 (2006) (astro-ph/0504100)
- [35] Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Masa-aki Hashimoto, and Katsuhiko Sato: “Magnetohydrodynamic Simulations of A Rotating Massive Star Collapsing to A Black Hole”; *The Astrophysical Journal* **644**, 1040-1055 (2006) (astro-ph/0602457)
- [36] Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, and Katsuhiko Sato: “Explosive Nucleosynthesis in GRB Jets Accompanied by Hypernovae”; *The Astrophysical Journal* **647**, 1255-1268 (2006) (astro-ph/0601111)
- [37] Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki: Non-equilibrium Ionization States of a Warm-Hot Intergalactic Medium; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 641–65 (2006)
- [38] Tamon Suwa, Asao Habe, Kohji Yoshikawa: “Protoclusters in the Λ -CDM Universe”; *The Astrophysical Journal* **646**, L5-L8 (2006)
- [39] K. Koyama and S. Mizuno, “Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity,” *JCAP* **0607**, 013 (2006) [arXiv:gr-qc/0606056].
- [40] T. Tatekawa and S. Mizuno, “Non-Gaussianity of the density distribution in accelerating universes II:N-body simulations,” *JCAP* **0702**, 015 (2007) [arXiv:astro-ph/0608691].
- [41] K. Koyama, S. Mizuno and D. Wands, “Curvature perturbations from ekpyrotic collapse with multiple fields,” to appear in *Classical and Quantum Gravity* **24**, (2007), arXiv:0704.1152 [hep-th].
- [42] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, M. Ibe and T. T. Yanagida, “Eluding the BBN constraints on the stable gravitino,” *Phys. Lett. B* **643** (2006) 124.
- [43] W. Buchmuller, L. Covi, K. Hamaguchi, A. Ibarra and T. Yanagida, “Gravitino dark matter in R-parity breaking vacua,” *JHEP* **0703** (2007) 037.
- [44] M. Ibe, Y. Shinbara, T.T. Yanagida, “A New Inflation Model with Anomaly-mediated Supersymmetry Breaking,” *Phys. Lett. B* **642** (2006) 165.
- [45] M. Ibe, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “The Polonyi problem and upper bound on inflation

- scale in supergravity,” *Phys. Lett. B* **639**, 534 (2006)
- [46] M. Ibe, T. Moroi, T.T. Yanagida, “Possible Signals of Wino LSP at the Large Hadron Collider,” *Phys.Lett.***B644** (2007) 355.
- [47] H. Nakajima and Y. Shinbara, “Solutions to large B and L breaking in the Randall-Sundrum model”, *Phys. Lett.* **B648** (2007) 294.
- [48] M. Endo, K. Kadota, K. A. Olive, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Decay of the Inflaton in No-scale Supergravity,” *JCAP* 0702:018,2007.
- [49] M. Endo, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Spontaneous Non-thermal Leptogenesis in High-scale Inflation Models,” *Phys.Rev.***D74**(2006)123523.
- [50] M. Endo, M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Inflaton decay through supergravity effects,” *Phys.Lett.***B642**(2006)518-524.
- [51] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Gravitino-overproduction problem in inflationary universe,” *Phys.Rev.***D74**(2006)043519.
- [52] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Gravitino overproduction in inflaton decay.” *Phys.Lett.***B638**(2006)8.
- [53] Kiyotomo Ichiki, Masahide Yamaguchi, Jun’ichi Yokoyama: “Lepton asymmetry in the primordial gravitational wave spectrum”; *Physical Review D* **75**, 084017 (2007)
- [54] Kiyotomo Ichiki, Tomo Takahashi: “Constraints on Generalized Dark Energy from Recent Observations”; *Physical Review D*, in press
- [55] Dai G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Toshitaka Kajino, Grant J. Mathews: “Constraints on the evolution of the primordial magnetic field from the small scale cmb angular anisotropy”; *The Astrophysical Journal* **646**, 719, (2006)
- [56] Dai G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Ken’ichi Umezu, Hidekazu Hanayama: “Effect of Primordial Magnetic Field on Seeds for Large Scale Structure”; *Physical Review D* **74**, 123518, (2006)
- (会議集録)
- [57] S. Mukohyama: “Gravity in a Higgs phase”; *Proceedings of QUARKS-2006 14th International Seminar on High Energy Physics*, presented at St. Petersburg, Russia, May 2006.
- [58] S. Mukohyama: “Gravity and cosmology with ghost condensate”; *Proceedings of Summer Institute 2006 International Workshop on Supersymmetry, Electroweak Symmetry Breaking and Particle Cosmology*, presented at APCTP, Pohang, Korea, August 2006.
- [59] S. Mukohyama: “Higgs phase of gravity”; *Proceedings of the 16th workshop on General Relativity and Gravitation*, presented at Niigata University, November 2006.
- [60] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: “Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld”; *Proceedings of the 16th Workshop on General Relativity and Gravitation* (Niigata Prefectural Civic Center, November 27 - December 1, 2006) in press
- [61] J. Yokoyama: “Inflation with a running spectral index in supergravity,” *Proc. APCTP General Relativity and Gravitation Miniworkshop*, Jeju Island, Korea. September 1-3, 2006.
- [62] M. Kawasaki, T. Takayama, M. Yamaguchi, and J. Yokoyama: “Features in the primordial power spectrum: a running spectral index and formation of primordial black holes,” *Modern Physics Letters A*, in press, *Proceedings of 2006 International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics*, presented at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 15-17, 2006
- [63] K. Ichiki, K. Takahashi, N. Sugiyama, H. Hanayama, H. Ohno: “Generation of Large-Scale Magnetic Fields from Primordial Density Fluctuations”; *Modern Physics Letters A*, in press, *Proceedings of 2006 International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics*, presented at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 15-17, 2006
- [64] Norio Narita: “Simultaneous Subaru/MAGNUM Observations of Extrasolar Planetary Transits”; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific proceedings of Transiting Extrasolar Planets Workshop*, The University of Chicago Press, 2007
- [65] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: “Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise”; *6th International LISA Symposium*, AIP Conference Proceedings**873** (2006) 471-475
- [66] Atsushi Taruya: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer”; *6th International LISA Symposium*, AIP Conference Proceedings**873** (2006)494-497
- [67] 高見 一: 「最高エネルギー宇宙線の伝搬と到来方向分布からわかるソースの性質」; 名古屋大学太陽地球研究所研究会報告集「平成18年度STE研究集会」p.125
- [68] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields”; *Proceedings of International Workshop on ‘Cosmic-rays and High Energy Universe’*, in press
- [69] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: “Gravitational Coallase of Population III Stars”; *Proceedings of “Eleventh Marcel Grossmann Meeting on General Relativity”*, in press
- [70] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: “Gravitational Wave Background

from Population III Stars”; Proceedings of “The 16th Workshop on General Relativity and Gravitation”, in press

- [71] Shuntaro Mizuno, Kazuya Koyama: “Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity”; Proceedings of the 16th Workshop on General Relativity and Gravitation (Niigata Prefectural Civic Center, November 27 - December 1, 2006) in press

(国内雑誌)

- [72] 須藤 靖:「宇宙の加速膨張: 暗黒エネルギー、それとも未知の重力法則?」、数理科学 **517**(2006) pp.26–32.
- [73] 須藤 靖、相原博昭、高田昌広:「宇宙の暗黒エネルギーを探る」、日本物理学会誌 **62** (2007) 2月号 pp.83–91.
- [74] 茂木健一郎、須藤 靖: 茂木健一郎と愉しむ科学のクオリア 第11回 「青空の向こうの見えない宇宙を見る」、日経サイエンス (2007) 4月号, pp.66–71.
- [75] C. J. コンセリス, 樽家 篤史:「宇宙を造った見えざる手 暗黒エネルギー」、日経サイエンス (2007) 5月号, pp.22–30
- [76] 佐藤勝彦:「宇宙の創生とウロボロスの図」、Ouroboros (ウロボロス) 第29号 東京大学総合研究博物館ニュース 平成18年7月
- [77] 向山信治:「アインシュタインの間違い」、S. Weinbergによる原題“Einstein’s Mistake”の翻訳、パリテイ2006年6月号掲載
- [78] 向山信治:「一般相対論を長距離で変更できるか?」、パリテイ2006年10月号掲載

(学位論文)

- [79] 平松 尚志: “Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld” (博士論文)
- [80] 仙洞田雄一: “Inflationary braneworld probed with primordial black holes” (博士論文)
- [81] 西道啓博: “Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics” (修士論文)
- [82] 諏訪雄大: “Gravitational Collapse of Population III Stars” (修士論文)
- [83] 斎藤 俊: “Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy”

(著書)

- [84] 須藤 靖: 「ものの大きさ – 自然の階層・宇宙の階層 –」、東大出版会 UT Physics シリーズ 第一巻 (2006年10月刊行)
- [85] 成田 憲保: 「あの惑星はどんな環境なんだろう? “もうひとつの地球探し”をめぐって」、アストロアーツ月刊星ナビ 2006年9月号 p66. 系外惑星を探れ!20
- [86] 佐藤勝彦: 「宇宙の起源と現在の姿」、シリーズ 現代の天文学 I 岡村等編 日本評論社 2007年 (分担執筆)

- [87] 佐藤勝彦: 「相対性理論における時間と宇宙の誕生」、 「時空のデザイン」 総合博物館 三河内彰子・橋由里香・洪恒夫= [編]、2006年 (分担執筆)

- [88] 佐藤勝彦: 「インフレーション宇宙論」 特集、ニュートン、ニュートンプレス、2006年12月号 (監修)
- [89] 佐藤勝彦: 相対性理論と量子論 PHP 研究所 2006 (監修)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- Eleventh Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (Freie Universitat Berlin, July, 2006)
- [90] Takashi Hiramatsu: “High-energy effects on the spectra of cosmological perturbations in braneworld”
- [91] Tomoya Takiwaki: “Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae”
- [92] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Gravitational Coallase of Population III Stars”
- The 16th Workshop on General Relativity and Gravitation (Niigata Prefectural Civic Center, November - December, 2006)
- [93] S. Mukohyama, “Higgs phase of gravity”
- [94] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: “Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld”
- [95] Atsushi Taruya: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds”
- [96] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Gravitational Wave Background from Population III Stars”
- [97] Shuntaro Mizuno and Kazuya Koyama, “Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity”
- [98] K. Ichiki, T. Takahashi: “Cosmological Constraints on Generalized Dark Energy Models”
- その他
- [99] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: “Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld”; APCTP-TPI Meeting “Gravity, Cosmology, and Astrophysics - II” (University of Alberta, Edmonton, Canada, December 2006)
- [100] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama: “Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies”; Brane-World Gravity: Progress and Problems (Institute of Cosmology and Gravitation, Portsmouth, UK, September 18–29, 2006)

- [101] Yuuiti Sendouda: “Mass spectrum of primordial black holes from inflationary perturbation in the RS braneworld”; Brane-World Gravity: Progress and Problems (University of Portsmouth (Portsmouth, UK), Sep 19)
- [102] Yuuiti Sendouda: “Cosmic rays from primordial black holes in the Randall–Sundrum braneworld”; International Workshop on Cosmic-rays and High Energy Universe (Aoyama Gakuin University (Tokyo, Japan), Mar 5–6)
- [103] Yasushi Suto: “Report from Japan: from HyperSuprime-Cam to WFMOS”; WFMOS Science Team meeting (Royal Observatory, Edinburgh, May 15-17, 2006)
- [104] Yasushi Suto: “Modified gravity vs. cosmological constant”; WFMOS Science Team meeting (Royal Observatory, Edinburgh, May 15-17, 2006)
- [105] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida: “Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales”; SDSS-II collaboration meeting (Seoul National University, Korea, September 22-24, 2006)
- [106] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida: “Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales”; Second International Symposium on Nanometer-Scale Quantum Physics (Tokyo Institute of Technology, Japan, January 24-26, 2007)
- [107] Takahiro Nishimichi, Chiaki Hikage, Issha Kayo, Kazuhiro Yahata, Atsushi Taruya, Yipeng Jing, Ravi K. Sheth and Yasushi Suto: “Bispectrum and Nonlinear Biasing of Galaxies”; SDSS collaboration meeting (Seoul National University, September 22-24, 2006)
- [108] Norio Narita: “Simultaneous Subaru/MAGNUM Observations of Extrasolar Planetary Transits”: Transiting Extrasolar Planets Workshop at Heidelberg, Germany, September 27 2006
- [109] Norio Narita et al.: “Simultaneous Spectroscopic and Photometric Observations of a Transit of TrES-1b”: The Third Workshop on Development of Extrasolar Planetary Science at the University of Tokyo, December 11 2006
- [110] Atsushi Taruya: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer”; 6th International LISA Symposium (NASA Goddard, June 19-23, 2006)
- [111] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: “Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise”; 6th International LISA Symposium (NASA Goddard, June 19-23, 2006)
- [112] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields”; International Workshop on ‘Cosmic-rays and High Energy Universe’ (Aoyama-gakuin university, Japan, 5-6, March, 2007)
- [113] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in dense matter”; Tours Symposium VI (Tours, 5-8/9/2006)
- [114] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in supernova cores”; 21st century COE International Symposium on neutrino processes and stellar evolution (Tokyo, 9/2/2007)
- [115] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering cross section of neutrinos and nuclear pasta in supernova cores”; Twenty years after SN1987A (Hawaii, 23-25/2/2007)
- [116] Shunsaku Horiuchi & Shin’ichiro Ando: “Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background”; High Energy Astrophysics in the Next Decade (Tokyo Metropolitan University, 2006 June)
- [117] K. Sato, T. Takiwaki, K. Kotake, S. Yamada: “Magneto-rotational collapse of stellar cores and jet-like explosion”; 23rd Texas Symposium, University of Melbourne, 2006, December
- [118] Kohji Yoshikawa: The EDGE General Meeting “Non-equilibrium Ionization States of the Warm–Hot Intergalactic Medium” (CNR Headquarter, Rome, December 19-21, 2006)
- [119] Shuntaro Mizuno, Kazuya Koyama, and David Wands: “Slow-roll corrections to inflaton fluctuations on a brane” Inflation+25 (Institut D’Astrophysique de Paris, June, 2006)
- [120] Shuntaro Mizuno and Kazuya Koyama, “Scalar field perturbations in brane-world cosmology with induced gravity” Brane-World Gravity: Progress and Problems (Institute of Cosmology and Gravitation, Portsmouth, UK, September 18-29, 2006)
- 招待講演
- [121] S. Mukohyama: “Gravity in a Higgs phase”; QUARKS-2006, 14th International Seminar on High Energy Physics, St. Petersburg, Russia, May 2006
- [122] S. Mukohyama: “A Higgs phase of gravity in string theory”; IR Modifications of Gravity, Perimeter Institute, Canada, November 2006
- [123] S. Mukohyama: “Higgs phase of gravity”; General Relativity Trimester IHP Workshop “High Energy, Cosmology and Strings”, Institut Henri Poincaré, Paris, December 2006
- [124] S. Mukohyama: “Gravity in a Higgs phase”; APCTP-TPI Meeting “Gravity, Cosmology, and Astrophysics - II” University of Alberta, Edmonton, Canada, December 2006

- [125] J. Yokoyama: “Inflation with a running spectral index in supergravity,” Workshop on Inflation+25, Institut d’Astrophysique de Paris, France, July 2006.
- [126] J. Yokoyama: “Inflation with a running spectral index in supergravity,” APCTP General Relativity and Gravitation Miniworkshop, Jeju Island, Korea, September 2006.
- [127] J. Yokoyama: “Features in the primordial power spectrum: a running spectral index and formation of primordial black holes,” Galileo Galilei Institute, Astroparticle physics and cosmology program, Florence, Italy, October 2006.
- [128] J. Yokoyama: “Time variation of the proton-electron mass ratio and fine structure constant in runaway dilaton,” Galileo Galilei Institute, Astroparticle physics and cosmology program, Florence, Italy, November 2006.
- [129] J. Yokoyama: “Features in the primordial power spectrum: a running spectral index and formation of primordial black holes,” 2006 International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPa 2006,), presented at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 15-17, 2006
- [130] J. Yokoyama: “Cosmological creation of supermassive particles,” Astronomy and astrophysics in the extreme universe, RIKEN, March 2007.
- [131] K. Ichiki, K. Takahashi, N. Sugiyama, H. Hanayama, H. Ohno: “Generation of Large-Scale Magnetic Fields from Primordial Density Fluctuations”; 2006 International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPa 2006,), presented at National Taiwan University, Taipei, Taiwan, November 15-17, 2006
- [132] K. Ichiki: “Generating Large-scale Magnetic Fields from Cosmological Density Fluctuations”; The 4th COE Symposium, The 21st Century Center-of-Excellence Program Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy at Tohoku university, June, 2006
- [133] Yasushi Suto: “Three-point correlation functions and bispectra of SDSS galaxies: implications for linear and quadratic biasing coefficients”; The 2nd KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korean Institute for Advanced Study, Seoul, September 20-21, 2006)
- [134] Yasushi Suto: “Predicting signatures of planetary rings around extrasolar transiting planets”; The 2nd KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korean Institute for Advanced Study, Seoul, September 20-21, 2006)
- [135] Yasushi Suto: “From Far East to Far Infra-Red: galaxy clustering and Galactic extinction map”; SDSS collaboration meeting (Seoul National University, September 22-24, 2006)
- [136] Yasushi Suto: “Exploring dark energy in the universe through baryon acoustic oscillation”; KEK Annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH07)(KEK, Tsukuba, March 1-3, 2007)
- [137] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”; 4th Korean Astrophysics Workshop (KASI, Korea, 17, May, 2006)
- [138] Hajime Takami: “Propagation of Extremely-high-energy Cosmic Rays”; International Symposium on ‘Astronomy Astrophysics of Extreme Universe’ (RIKEN, Japan, 22, March, 2007)
- (国内会議)
一般講演
・ RESCEU 研究会 (鬼怒川コンベンションホール、2006年9月4日)
- [139] 向山信治:「重力のヒッグス相での宇宙論」
- [140] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一:「6次元ブレーンモデルにおける de Sitter ブレーンの安定性」
- [141] 仙洞田雄一:「Randall-Sundrum 膜宇宙におけるインフレーションへの始原的ブラックホールからの制限」
- [142] 横山順一: 「原始ブラックホールと元素合成」
- [143] 市來淨興:「高エネルギー γ 線で初期磁場を探る」
- [144] 白田 晶人、須藤 靖、日影 千秋、吉田 直紀、白水 徹也:「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」
- [145] 西道啓博, 矢幡和浩, 日影千秋, 加用一者, 樽家篤史, 須藤靖, Yipeng Jing, Ravi K. Sheth:「銀河バイアスの非線形性とバイスペクトル: 摂動論・シミュレーション・SDSS 銀河」
- [146] 成田 憲保, 他:「すばる & MAGNUM 望遠鏡による系外惑星トランジットの同時分光・測光観測」
- [147] 樽家 篤史: “Quasi-Equilibrium Evolution of N-body System”
- [148] 高見 一、佐藤 勝彦:「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の相関」
- [149] 諏訪雄大、滝脇知也、固武慶、佐藤勝彦:「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」
- [150] 堀内俊作、安藤真一郎:「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」
- [151] 水野 俊太郎、小山 和哉:「Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity」
・ 日本物理学会 2006 年秋季大会 (ハワイ・奈良女子大・千葉大学、2006 年 9 月)
- [152] 向山信治: “Cosmology with Ghost Condensation”
- [153] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一:「6次元 Warped Flux Compactification ブレーンモデルにおける de Sitter ブレーンの安定性およびその性質」

- [154] 仙洞田雄一, 長滝重博, 佐藤勝彦: 「Randall-Sundrum 宇宙論における始原的ブラックホールからのインフレーションへの制限」
- [155] 樽家 篤史: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer 3”
- [156] 姫本 宣朗, 樽家 篤史: “Detection method for stochastic gravitational-wave backgrounds with modified cross-correlation analysis”
- [157] 高見 一, 佐藤 勝彦: 「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の相関」
- [158] 園田英貴, 渡邊元太郎, 佐藤勝彦, 泰岡顕示, 戎崎俊一: 「超新星コアにおけるパスタ相のニュートリノオパシティ」
- [159] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」
- [160] 斎藤 俊, 樽家 篤史: “Quantum signature of CMB polarization anisotropy generated during inflation”
- [161] 高水 裕一, 工藤 秀明, 斎藤 俊: 「ハゲドロン領域での初期宇宙、熱平衡の実現とその応用」
- [162] 水野 俊太郎, 小山 和哉: 「Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity」
- ・日本天文学会 2006 年秋季大会 (九州国際大学、2006 年 9 月)
- [163] 市来浄與, Yong-Yeon Keum: 「ダークエネルギー・ニュートリノ間相互作用に対する宇宙背景輻射からの制限」
- [164] 西道啓博, 矢幡和浩, 日影千秋, 加用一者, 樽家篤史, 須藤靖, Yipeng Jing: 「銀河バイアスの非線形性とバイスペクトル: 摂動論とシミュレーション・SDSS 銀河」
- [165] 滝脇知也: 「磁気駆動超新星爆発、その機構とニュートリノ重力波放射」
- [166] 村山 真紀, 成田 憲保, 他: 「アストロバイオロジー教育のすすめ I. 小学生に対する教育効果」
- [167] 樽家 篤史: 「スペース干渉計を用いた高周波帯域での宇宙背景重力波のマッピング」
- [168] 矢幡 和浩, 米原 厚憲, 須藤 靖, Edwin Turner, Tom Broadhurst, Douglas, P. Finkbeiner: 「SDSS 銀河及びクエーサーを用いた銀河系内ダストマップの検証」
- [169] 吉川 耕司: 「銀河間ガスの非平衡電離過程を考慮したダークバリオンのシミュレーション」
- ・RESCEU 研究会 (ホテル伊豆高原、2007 年 2 月)
- [170] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一: 「de Sitter プレーンの熱力学的性質」
- [171] 市来浄與, 高橋智: “Cosmological Constraints on Generalized Dark Energy Models”
- [172] 西道啓博, 大室裕史, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 山本一博, Yipeng Jing: 「バリオン音響振動で探るダークエネルギー: 銀河バイアスと非線形成長の影響」
- [173] 樽家 篤史: 「背景重力波の偏向観測」
- [174] 高見 一, 村瀬 孔大, 長滝 重博, 佐藤 勝彦: “Cosmogenic Neutrinos as a Probe of the Transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays”
- [175] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ放射」
- [176] 斎藤 俊, 樽家 篤史, 市来 浄與: “Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy”
- ・「超新星を舞台とする高エネルギー物理現象」(東京大学、2007 年 2 月)
- [177] 滝脇知也: “Magneto-driven Explosions of Core-Collapse Supernovae”
- [178] 園田英貴: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in supernova cores”
- [179] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: “Gravitational Wave Background from Population III Stars”
- ・日本物理学会 2006 年春季大会 (首都大学・鹿児島大学、2007 年 3 月)
- [180] 向山信治: 「超弦理論とインフレーション」
- [181] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一: 「de Sitter プレーンの熱力学的性質」
- [182] 樽家 篤史, 瀬戸 直樹, Asantha Cooray: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds with a space interferometer”
- [183] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ放射」
- [184] 斎藤 俊, 樽家 篤史, 市来 浄與: “Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy”
- [185] 堀内俊作, 安藤真一郎: 「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」
- [186] Jaume Gomis, 松浦俊司: “Holographic Surface Operator”
- [187] 園田英貴, 渡邊元太郎, 佐藤勝彦, 滝脇知也, 泰岡顕示, 戎崎俊一: 「超新星コアにおけるパスタ相の存在量とその影響」
- ・日本天文学会 2007 年春季大会 (東海大学、2007 年 3 月)
- [189] 市来浄與, 井上進, 高橋慶太郎: 「ガンマ線バーストを用いて宇宙最小磁場を探る」
- [190] 大室裕史, 西道啓博, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 山本一博, Yipeng Jing: 「バリオン音響振動で探るダークエネルギー: 摂動論を用いた非線形成長と赤方偏移歪みの影響」

- [191] 滝脇知也:「磁気超新星からのニュートリノ・重力波放出」
- [192] 成田 憲保、他:「アストロバイオロジー教育のすすめ II. 高校生に対する教育効果」
- [193] 成田 憲保、他:「トランジット惑星系 TrES-1 における初めての Rossiter 効果の観測結果」
- [194] 堀内俊作:「暗黒物質対消滅ニュートリノを用いた暗黒物質の制限」
- ・その他
- [195] 大室裕史, 西道啓博, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 山本一博, Yipeng Jing, 須藤靖: “Perturbative approach to BAO”; 「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」研究会 (東京大学, 2006 年 11 月 7 日)
- [196] 西道啓博, 大室裕史, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 中道将司, 野村英範, 山本一博: 「バリオン振動の重力非線形進化: 摂動論的アプローチ」; Hyper Suprime-Cam をめぐるサイエンス検討会 (岩松旅館, 2007 年 3 月 12-14 日)
- [197] 滝脇知也:「磁気駆動超新星からのニュートリノ・重力波放出とジェット放射」; 2007 年度ブラックホール天文学研究会 (京都大学, 2007 年 2 月 12 日)
- [198] 成田 憲保、他:「すばる & MAGNUM 望遠鏡による系外惑星トランジットの同時分光・測光観測」; 2006 年度天体・天体物理学若手夏の学校、(パノラマランド 木島平、2006 年 8 月 2 日)
- [199] 樽家 篤史, 工藤 秀明, 姫本 宣朗: 「DECIGO で探る宇宙背景重力波」; DECIGO ワークショップ (国立天文台、2006 年 5 月 11 日)
- [200] 樽家 篤史: 「バリオン音響振動」; 阪上研合宿 (湯河原、2007 年 3 月 3-4 日)
- [201] 樽家 篤史, 瀬戸 直樹: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds”; TAMA データ解析ミーティング (大阪市立大学、2007 年 3 月 8 日)
- [202] 樽家 篤史: 「バリオン音響振動の非線形重力進化～非摂動論的アプローチ～」; Hyper Suprime-Cam サイエンス検討会 (作並温泉、2007 年 3 月 12-14 日)
- [203] 高見 一、佐藤 勝彦: 「最高エネルギー宇宙線の伝搬—到来方向分布が示唆するソースの特徴—」; 「高エネルギー天体現象と粒子加速の理論」研究会 (大阪大学、2006 年 11 月 9-11 日)
- [204] 高見 一、佐藤 勝彦: 「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の空間的相関」; 理論懇シンポジウム (立教大学、2006 年 12 月 25-27 日)
- [205] 高見 一、佐藤 勝彦: 「最高エネルギー宇宙線の伝搬と到来方向分布が示唆するソースの性質」; 名古屋大学 STE 研シンポジウム (名古屋大学、2007 年 1 月 29-31 日)
- [206] 諏訪雄大、滝脇知也、固武慶、佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」; 「すざく時代」のブラックホール天文学 (京都大学基礎物理学研究所、2007 年 2 月 13-15 日)
- [207] 堀内俊作、安藤真一郎: 「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」; 理論懇シンポジウム (立教大学、2006 年 12 月 25-27 日)
- 招待講演
- [208] 向山信治: 「重力のヒッグス相での宇宙論」; 天文天体夏の学校 (2006 年 8 月)
- [209] 向山信治: 「Cosmology and String Theory」; 弦理論研究会 (立教大学、2006 年 12 月)
- [210] 市来浄典: 「宇宙の磁場の起源: 密度揺らぎからの磁場生成とその観測的な応用について」; 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月)
- [211] 市来浄典: 「初期宇宙プラズマの密度揺らぎと磁場生成」; 物理における安定性と不安定性, KEK, (2007 年 3 月)
- [212] 須藤 靖: 第 2 回 FMOS GTO ワークショップ 「分光サーベイでダークエネルギーを探る意義」 (京都大学宇宙物理学教室、2006 年 7 月 13 日)
- [213] 須藤 靖: 天文天体物理学若手の会 夏の学校 「トランジット系外惑星研究の魅力」 (パノラマランド 木島平、2006 年 8 月 2 日)
- [214] 須藤 靖: 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム 「宇宙のダークエネルギー」 (立教大学、2006 年 12 月 26 日)
- [215] 樽家 篤史: 「宇宙マイクロ波背景放射」; 東北大学院生 GP 合宿 (2006 年 9 月 13-14 日)
- (セミナー)
- [216] 佐藤 勝彦: 「超新星爆発とニュートリノ」、超新星からのニュートリノ検出 20 周年記念講演会、安田講堂 2 月 17 日
- [217] 佐藤 勝彦: 「宇宙の誕生 — インフレーションからビッグバンへ」 — JAXA 宇宙学校講演会 2007 年 3 月 26 日
- [218] 佐藤 勝彦: 「時間と空間のデザイン」— 相対論と宇宙の創生— 総合博物館講演会 2006 年 9 月 11 日
- [219] 佐藤 勝彦: 「アインシュタインと宇宙の創生」 札幌市民大学 2006 年 5 月 30 日
- [220] 佐藤 勝彦: 「宇宙創生と進化のシナリオ」 経済団体連合会講演会、2006 年 7 月 7 日
- [221] 佐藤 勝彦: 「宇宙はいかに始まったか?」 — 現代物理学の描く創世記— スーパーサイエンススクール講演、藤島高校、2006 年 6 月 23 日
- [222] 佐藤 勝彦: 「相対性理論とブラックホール」朝日カルチャーセンタ講演、2006 年 7 月 29 日 (東京)、30 日 (大阪)
- [223] S. Mukohyama, “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, Tokyo Institute of Technology, Japan, April 2006.
- [224] S. Mukohyama, “Gravity in a Higgs Phase”, Rikkyo University, Japan, June 2006.
- [225] S. Mukohyama, “Gravity in Higgs Phase”, University of Tsukuba, Japan, October 2006.

- [226] S. Mukohyama, “A Higgs Phase of Gravity in String Theory”, Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, Canada, November 2006.
- [227] S. Mukohyama, “Higgs Phase of Gravity”, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, January 2007.
- [228] S. Mukohyama, “The Strig Cosmology of KKLE Models”, Maryland Center for Fundamental Physics, University of Maryland, USA, February 2007.
- [229] S. Mukohyama, “Conformal Inflation and Mass Hierarchy”, High Energy Theory Group, Harvard University, USA, March 2007.
- [230] S. Mukohyama, “Cosmology with warped flux compactification”, Cosmology Group, Simon Fraser University, Canada, March 2007.
- [231] S. Mukohyama, “Ghost condensation and gravity in Higgs phase”, Gravity Group, The University of British Columbia, Canada, March 2007.
- [232] J. Yokoyama: “Thermal dissipation in the early universe,” Particle Physics Seminar, Seoul National University, May 2006.
- [233] 横山順一: 「WMAP 3年目の結果と宇宙論」 首都大学東京 素粒子論セミナー 2006年5月24日。
- [234] 横山順一: 東大ビッグバンセンター公開講演会宇宙最大のなぞ: ダークエネルギー「始めも終わりもインフレーション」(小柴ホール、2006年12月22日)
- [235] 市来 淨興: 「宇宙の晴れ上がり時期の宇宙磁場生成およびガンマ線バーストを用いた宇宙磁場検出の可能性について」; 早稲田大学 理論宇宙物理学研究室セミナー (2006年11月)
- [236] 市来 淨興: “Small is Beautiful: probing weakest cosmological magnetic fields with gamma-ray bursts”; National Taiwan University, Taiwan, Cosmology seminar, May, 2006
- [237] 市来 淨興: “Small is Beautiful: probing weakest cosmological magnetic fields with gamma-ray bursts”; Institute of Astronomy, National Central University, Colloquium in Astronomical Department, May, 2006
- [238] Yasushi Suto: KASI colloquium “Transiting extra-solar planets: spin-orbit misalignment and rings” (Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, September 26, 2006)
- [239] 須藤 靖: 東京大学5月祭講演会「夜空の向こう ～宇宙の果てから太陽系外惑星へ～」(2006年5月28日)
- [240] 須藤 靖: 埼玉県立川越高校 SSH 特別講義「夜空の向こうの物理学」(2006年6月17日)
- [241] 須藤 靖: 第5回 RESCEU 夏の学校「太陽系外惑星のロシター効果」(鬼怒川温泉コンベンションホール、2006年9月4日)
- [242] 須藤 靖: 早稲田大学物理学教室セミナー「太陽系外惑星と生命: 第二の地球を探す」(2006年10月27日)
- [243] 須藤 靖: 日本物理学会 2006 年度公開講座新原子反原子の創造 「元素の起源と宇宙の歴史」(東京工業大学、2006年11月11日)
- [244] 須藤 靖: 東大ビッグバンセンター公開講演会宇宙最大のなぞ: ダークエネルギー「宇宙の組成を探る」(小柴ホール、2006年12月22日)
- [245] 白田 晶人: 「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」; 大阪市立大学宇宙物理(重力)コロキウム (2006年11月24日)
- [246] 白田 晶人: 「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」; 国立天文台宇宙論セミナー (2007年1月25日)
- [247] Tomoya Takiwaki: 「Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae」; Moscow University (August 2006)
- [248] Tomoya Takiwaki: 「Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae」; Russian academy of science (August 2006)
- [249] 滝脇知也 「Magneto-driven Explosions of Core-Collapse Supernovae」; 東京大学 天文学専攻 (11月22日)
- [250] 成田 憲保: 「宇宙の中の地球」; 東京都千代田区九段小学校 (2006年6月13日)
- [251] 成田 憲保: 「太陽系外惑星の環境と生命を想像しよう」; 東京都千代田区九段小学校 (2006年6月16日)
- [252] 成田 憲保: 「もうひとつの地球を探して」; サマーサイエンススクール in 妙高高原 2006 (2006年8月28日)
- [253] 成田 憲保: 「太陽系以外の地球型惑星を探す最新の試み」; 科学技術館ユニバースゲスト (2006年12月23日)
- [254] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波～future prospects for direct detection～」; 東北大学 天文学教室談話会 (2006年5月25日)
- [255] 姫本 宣朗: 「Detecting a stochastic background of gravitational waves in presence of non-Gaussian noise」; 東京大学 坪野研究室セミナー (2006年6月13日)
- [256] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波～future prospects for direct detection～」; 早稲田大学 理論宇宙物理学研究室セミナー (2006年7月24日)
- [257] 樽家 篤史: 「背景重力波の非等方性を探る」; 東京大学 坪野研究室セミナー (2006年10月18日)
- [258] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波～future prospects for direct detection～」; 東京大学 駒場キャンパス (2006年10月26日)
- [259] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波」; 国立天文台 (2007年2月23日)
- [260] 吉川 耕司: 国立天文台 理論部 宇宙論セミナー “Hunting for the Warm-Hot Intergalactic Medium” (2006年11月2日)

- [261] 水野 俊太郎：「DGP ブレーンモデルにおける宇宙論的摂動」；早稲田大学 宇宙物理学研究室セミナー（2006年6月5日）
- [262] 水野 俊太郎：「ブレーンワールドシナリオにおける宇宙論的摂動」；広島大学 宇宙物理学研究室セミナー（2007年1月9日,10日）

2 銀河進化理論

——観測データ解析に基づいた宇宙の創成進化の理論的研究——（茂山・野本・梅田・鈴木・須田）

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

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

遠方のクエーサーから発せられる光のスペクトルには重元素によって作られた吸収線が検出されている。スペクトルの解析から得られる元素組成比と赤方偏移の関係を理論的に解釈することによって、宇宙初期における重元素の創成史を探ることができる。最近では、遠方の超新星が数多く見つかっている。超新星を標準光源として仮定することによって宇宙の幾何学的な性質を導こうという試みもある。この研究には遠方の超新星と近傍の超新星の性質の差異を知ることが重要である。また、遠方の天体として着目されている γ 線バーストについて、その起源と超新星の関連について研究している。特に、近年注目されている極超新星と呼ばれる非常に爆発エネルギーの大きな超新星の爆発モデルを計算し、観測と比較することでその特徴を明らかにしつつある。極超新星は非常に大量の重元素を放出するので銀河の化学進化における役割も究明する必要がある。極超新星の1つSN 1998bwは γ 線バーストと同時期に空のほぼ同じ方角で起こった。また、SN 2003dhはGRB030329の残光の中に見え始めそのスペクトルはSN 1998bwと良く似ていた。そこで、これら2つの現象がどのように結びつくのかという観点で研究を進めている。

近傍の古い星のスペクトルにも重元素によって作られる吸収線が検出されている。これらの星の中には太陽に比べて20,000分の1以下の量の重元素しか持っていない星も存在している。このことは、おそらく我々の銀河で最初に生まれた星が超新星爆発を

した時の状況さえ推測できる手がかりを含んでいることを示唆している。

このプロジェクトでは以上のような観測と比較しうる理論的なモデルの構築を目指している。そのために、宇宙初期に形成されたと考えられるほとんど重元素を含まないガスから形成された星の進化モデルを構築し、現在超新星爆発を起している星との違いを研究する。さらに、これらの星がどのように形成されるのか、超新星爆発を起した後に、重元素がどのように星間ガスにばらまかれ、次の世代の星に受け継がれて行くのかを3次元数値流体計算によって調べる。軽元素については、超新星爆発時の衝撃波が星表面を通過する直後の加速を詳しく調べ、その星間空間での輸送過程を解析し、軽元素合成への寄与を定量的に調べる。このようにして、宇宙に存在する元素の創成史を明らかにしていく。このような研究によって得られた知見をもとに銀河よりも大きなスケールの銀河団中に存在する高温ガスに含まれる重元素の起源についても研究する。

2.1 系外銀河

二体衝突による円盤銀河形成

これまでの円盤銀河形成の理論には色々な困難がある。例えば「角運動量カタストロフィー」と呼ばれている問題である。最近、ガスを豊富に持った銀河同士の衝突によって円盤を形成すると言う新しいシナリオが提案された。この研究ではN体計算と流体力学的なシミュレーションによってこのシナリオの妥当性を調べる。

2.2 銀河系

銀河初期における炭素過剰星の起源

銀河系ハローに属する星で $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ となる重元素含有量が少ない星に炭素含有量が多い星が多く見られ、その中にs-process元素の増大が見られる星と見られない星が存在する。これらの星は宇宙初期において中質量星との連星をなしており、中質量星内部での物質混合と連星間の物質輸送を反映したものであると考えることができる。超低金属量の恒星進化と銀河ハロー内の組成分布から宇宙初期の初期質量関数を推定し、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ では、太陽質量の10倍程度にピークを持つような質量関数であったという結論が導かれた。The Astrophysical Journalに発表済み。[12]

データベースで探る超金属欠乏星の起源

近年の大型地上望遠鏡による高分散分光観測により、銀河系内に1000個以上見つかった超金属欠

乏星の詳細な観測データが蓄積されている。観測によって導出された元素組成や大気モデル、等価幅などのデータは主に学術論文上に分散されたままになっており、統計的な議論を行うにはデータの収集と扱いにおいてかなりの労力が必要である。そこで、金属欠乏星の観測データのみを集めたデータベースを構築することにより、銀河系においてどのような星形成史、化学進化があったのかを追う試みを始めた。データの入力、利用を Web 上で行うシステムの開発により金属欠乏星の組成分布などの様々な属性について統計的な議論が可能となった。

超新星が駆動する星形成を取り込んだ銀河系形成シミュレーション

ΛCDM シナリオに基づく構造形成の計算から銀河系の様な銀河ができそうな領域を抜き出して初期条件とし、SPH 法コードを用いて銀河初期の化学力学進化を調べる。CDM に支配されたガス中ではいわゆる Schmidt law に基づく星形成の他に、超新星爆発によって駆動される星形成があることを仮定し、ハローに属する星の重元素量に対する分布を調べ、観測を再現できるかを試験している。また、2つの星形成モードがどのように働くと、銀河系の各部分に属する星の重元素量に関する分布が観測と合うのかも調べる。

球状星団 ω Centauri における二重主系列の起源

球状星団は銀河系の階層的構造形成において何らかの役割を果たしたと考えられ、銀河初期の重要な情報を握っている可能性がある。その中で特異な性質を持つ ω Centauri は、近年 Hubble 宇宙望遠鏡によって2つの主系列を持つことがわかった。この発見は、ω Centauri の星は極端にヘリウムの多い組成を持つことを示唆するが、従来提唱されてきた特異組成の星形成起源ではなく、AGB 星からの質量降着によって説明可能であることを示した。The Astrophysical Journal Letters に発表済み。[13]

すざく X 線観測で探る末期の恒星進化

低、中質量は AGB 段階の最後に質量放出によって白色矮星へと進化すると考えられているが、質量放出のメカニズムについてはまだよくわかっていない。AGB 段階での熱パルスによって徐々に外層が失われ、最終段階で秒速 1000km 程度の fast wind が吹くと考えられている。この星風がその前に放出されたガスに衝突することによって X 線が放射されると考えられ、すざくによって星風ガスの組成が観測された。星風の組成分布からは fast wind によるヘリウム対流層の剥離が初めて示唆され、superwind から fast wind への進化について、中心星の性質について詳細な議論を行った。The Astrophysical Journal に投稿準備中。[56]

銀河の化学進化のモデル

小林 (Max-Planck-Institute) との共同研究。Massive Star の Supernova による Nucleosynthesis Yields を Mass と Metallicity の関数として新たに計算して table として提供し、銀河の化学進化の新たなモデル計算に適用した。[27, 47]

2.3 元素の起源

銀河初期における軽元素の起源

Ic 型に分類される超新星の外層は炭素と酸素からできていて爆発直後に相対論的な速度までに加速され、星間物質中の水素やヘリウムと破砕反応を起こし、Li、Be、B を生成する。最近、 $[Fe/H] \sim -3$ といった低金属量の星に 6Li が検出され、その量はビッグバン元素合成で予想されるよりも何桁も多かった。そこで、その起源として Ic 型超新星での 6Li 合成を考えた。重元素をほとんど持たない高速で自転している大質量星の進化に関する最近の理論計算によると、自転に伴う物質混合の影響で外層が炭素過剰になり質量放出が激しく起こることが示唆されている。超新星爆発直前には He 層をもほとんど失い Ic 型超新星として爆発すると期待される。また、このような星の外層では酸素や炭素の他に窒素も過剰に存在する。すると、星の周りには大量の He が存在するので、 $N+He$ や $C+He$, $O+He$ の破砕反応の他に $He+He$ の核融合反応も起き Li, Be を合成すると考えられる。そのような過程を計算した結果、観測された ${}^6L/O$, Be/O を再現できることがわかった。[6, 51, 52, 53, 54, 87, 90, 116, 126, 134, 141]

種族 III 超新星の相対論的ジェットと金属欠乏星の元素組成

前田 (総合文化)、岩本 (JAERI) との共同研究。相対論的多次元流体力学コードを用いて、大質量星の中心から高速なジェットを放出する計算を行った。注入する全エネルギーを一定にして、最終的に星間空間に放出される超新星の yield のエネルギー注入率に対する依存性を調べた。その結果、yield はエネルギー注入率の大きい場合が Extremely Metal-Poor Stars の元素組成に、小さい場合が Hyper Metal-Poor Stars に、その中間の場合が C-rich Extremely Metal-Poor Stars に対応していると考えることが可能であることを示した。[15, 20, 35, 38, 41, 58, 59, 60, 72, 73, 77, 97, 98, 99, 89, 100]

8-10 M_{\odot} 星における s 過程と r 過程

岩本 (JAERI)、石丸 (工学院大)、T. C. Beers (MSU) との共同研究。連星系における 8-10 M_{\odot} 星の質量放出および超新星爆発による伴星の元素組成

を推定した。進化の最終段階の s 過程および超新星爆発の際の r 過程により、伴星は両過程をあわせた元素組成をもつ可能性がある。このシナリオによって、最近発見されたこのような特徴をもつ超金属欠乏星の起源が説明される。[41]

超新星ニュートリノ風の準解析的モデル

超新星ニュートリノ風の遷音速解が外層により減速される効果を、ランキン-ユゴニオ関係式を用いて導入した。この効果により、元素合成の結果と太陽系の r 過程元素組成がよりよく一致することを示した。[136]

2.4 超新星爆発 ejecta の流体力学

星の表面を通過する相対論的衝撃波による加速

2005 年度に我々は平行平板ではあるが、衝撃波が星の大気を超相対論的に進む場合の自己相似解を見だして、*The Astrophysical Journal* に発表した。この解に星の大気が球対称である効果を逐次近似によって取り入れた解と、衝撃波が表面を通過後、熱エネルギーに対して粒子の静止エネルギーが無視できなくなった場合の加速の様子を特殊相対論的流体力学の数値計算によって調べ、*The Astrophysical Journal* に発表した。[9, 139]

超新星 ejecta と星周物質の衝突によるエネルギー損失

超新星爆発によって高速度で膨張する ejecta は、星周物質と衝突し、様々な現象をもたらす。赤色超巨星段階での速度の遅い星風と青色超巨星段階での速度の速い星風の衝突によって星周物質が高い密度を持つ場合に、強い放射によって運動エネルギーのかなりの部分が失われることを数値計算によって示した。この過程による超新星の明るさの変化や宇宙再電離のイオン化光子への寄与などの環境への影響を調べる。[131]

波面でエネルギーが付加されたり抜き取られる衝撃波が星の表面を通過する自己相似解

例えば超新星爆発によって星の内部に発生した衝撃波が表面に近づいたとき衝撃波によって加熱されたガスが放射する光子によってエネルギーが抜き取られる。また、Ia 型超新星では表面近くでは爆轟波になっていて衝撃波で加熱されたガスによって核融合反応が起こりエネルギーが付与される。このような衝撃波の伝播を近似的に記述する自己相似解を非相対論的流体力学の範囲で求めた。*The Astrophysical Journal* に発表済み。[10]

2.5 Ia 型超新星

Ia 型超新星残骸の中心にある伴星を同定する方法

爆発から数 100 年経った Ia 型超新星残骸は自由膨張している大量の鉄を含んでいる。その幾らかは中性で基底状態にあると期待される。もし、残骸の中に取り残された伴星のスペクトルを観測すると、そのスペクトルには星の手前にある中性の鉄による吸収線が可視光領域にも見えるはずであることを見出した。鉄は $\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$ ほどで膨張しているので吸収線は中心波長から青い方にだけ広がる非対称な形に見える。もし、星が残骸の後ろ側にあれば吸収線は中心波長に関して対称になる。従って、吸収線の形態によって星と残骸の相対的な位置関係が推測できる。我々は、若い超新星が星間物質と衝突して出す X 線によって鉄がイオン化される過程を定量的に計算し、どれくらいの中性の鉄が残骸中に残っているかを調べた。この原理に基づいて、Tycho の超新星残骸で「すばる」FOCAS による分光観測を行い、 5σ レベルの ejecta によると考えられる吸収線を Tycho E と呼ばれる超新星残骸の中心付近に位置する星のスペクトルに検出した。結果は *Publication of Astronomical Society of Japan* に受理された。[7, 11, 55, 95, 127, 132, 133, 140]

新星 GK Per の星周物質と Ia 型超新星の星周物質

蜂巢（総合文化）、加藤（慶大）との共同研究。新星 GK Per の星周物質の起源と、その形状が最近 ESO のグループによって観測された Ia 型超新星 SN 2006X の星周物質の形状と良く似ていることを発見した。新星 GK Per が Ia 型超新星に進化し損った連星系であることを示す。single degenerate scenario を補強する結果である。

質量降着する白色矮星の熱的不安定性と Ia 型超新星の親星のモデル

斉尾（東北大）、加藤（慶大）、蜂巢（総合文化）との共同研究。質量降着する白色矮星の表面での定常水素燃焼の安定性の線形解析によって、Starrfield の最近のモデルの誤りを指摘した。その後、Starrfield とのやりとりなどに基づいて論文を改訂し、掲載が決定した。[46]

Ia 型超新星の 3 次元スペクトルモデル

P. A. Mazzali (Trieste 天文台)、前田（東大総合文化）との共同研究。Ia 型超新星の初期スペクトルに見られる CaII の吸収線は、その速さと強さが超新星の明るさや他のイオンの速度などと相関がなく、Ia 型超新星の多様性として注目されている。この多様性が爆発の 3 次元構造に起因すると考え、独自

に 3 次元輻射輸送コードを開発し、様々な 3 次元構造を仮定して Ia 型超新星の初期スペクトルを理論的に計算した。その結果、観測されている頻度を説明するには非常に厚いトーラスか、光球を隠す程度の大きさの複数の “blob” が必要なことが分かった。[31, 37, 67, 68]

Ia 型超新星の初期スペクトルに見られる多様性

P.A. Mazzali (Trieste 天文台)、S. Benetti (Padova 天文台) らとの共同研究。近年、観測数が増えてきた Ia 型超新星の最大光度以前のスペクトルは、超新星爆発の際に最も外側に放出された物質の様子を知るための有効なプローブとなる。観測されたスペクトルと爆発モデルから理論的に計算したスペクトルとを比較することで、超新星最外層の元素組成や温度分布を調べた結果、(1) 膨張速度が遅い超新星には核燃焼を経験していない炭素が存在すること、(2) 時速 10,000 - 20,000 km の範囲では、光球の速度が超新星の見えかたを支配すること、(3) 最も顕著な多様性を見せる CaII の高速度吸収線は内側の性質とは無関係であることが明らかになった。[33]

Ia 型超新星の元素合成における金属量依存性

チャンドラセカール質量モデルに基いた元素合成計算を、各金属量の progenitor(進化計算の結果へリウム燃焼終了時の化学組成)を用いて元素合成計算を行い、各元素の金属量依存性を調べている。これにより、Ia 型超新星の明るさのばらつきの原因追求や、銀河の化学進化の再検討などへの応用が可能になる。金属量の違いは星中の物質の陽子・中性子数の違いとして表れ、金属量が多いほど中性子の割合が多くなる。解析中のデータから、Mn や Ni といった中性子過剰な安定核を主たる同位体にもつ元素は金属量依存性が大きい傾向にある。逆に、安定な Cr は主に陽子・中性子数の等しい質量数が 52 の Fe 原子核が崩壊してできるので、Ni(質量数 56)と金属量依存性がほぼ等しく金属量依存性は小さい。[74]

Ia 型超新星 SN 2005ke の X 線の光度曲線のモデル

蜂巣(総合文化)との共同研究。Ia 型超新星 SN 2005ke から X 線と紫外線が観測された。これらは星周物質が存在することを示している。観測されている X 線の光度曲線を、ejecta と星周物質の衝突のシミュレーションを行なうことにより、ejecta と星周物質の密度分布などを求めた。[21]

Ia 型超新星 SN 2002ic の光度曲線のモデル

蜂巣(総合文化)、Deng(北京天文台)との共同研究。スペクトル中に水素を示す Ia 型超新星 SN 2002ic の光度曲線を、周囲に星周物質が存在している白色矮

星の爆発というモデルによって説明した。質量放出率が約 $10^{-2} (v_w/1000 \text{ km/s}) M_\odot/\text{yr}$ の星風によって作られた星周物質が約 $3M_\odot$ 存在すれば観測をうまく説明できる光度が得られる。さらに星周物質が極方向に低密度、赤道方向に高密度に分布するモデルを考えることで、スペクトルの高速度成分も説明できるようになる。

2.6 超新星の観測とモデル

特異な Ib 型 超新星 SN 2006jc の観測とモデル

学術振興会の日印共同事業に基づく Anupama & Sahu (Bangalore, India)、川端(広島大)、および、Limongi (Rome) との共同研究。極めて特異な Ib 型超新星 SN 2006jc の観測データの解析とその Wolf-Rayet explosion model の構築を行なっている。[25, 30]

特異な SN2005bf の後期光度曲線の Magnetar-Driven モデル

前田(総合文化)、川端(広島大)、服部(国立天文台)、P. Mazzali (Trieste 天文台) との共同研究。超新星 SN2005bf の光度曲線は爆発後 10 日程度で最初のピークを持ち、少し減光したが再び増光し始め、爆発後 40 日間に絶対等級で -18 等程度という非常に遅く明るい第二のピークを示した。ピーク後の減光は非常に早く通常のモデルでは説明ができなかった。我々は、最初のピークは ^{56}Ni の崩壊、第二のピークは中性子星(マグネター)からのエネルギーとするモデルで再現した。[44, 69]

XRF060218 に付随した超新星 2006aj の後期のすばる観測と爆発モデル

前田(総合文化)、川端(広島大)、服部(国立天文台)、峯崎(天文センター)、J. Deng (NAOC)、P. Mazzali、E. Pian (Trieste 天文台) との共同研究。X-Ray Flash(XRF)060218 に付随した超新星 2006aj の後期スペクトルをすばるで観測し、親星の質量が $20M_\odot$ 程度であること、 ^{58}Ni の過剰とから、中性子星(マグネター)を形成した爆発であるというアイデアを補強する結果を得た。[18, 24, 34, 146, 147]

すばる望遠鏡による Ib/Ic 型超新星の観測

前田(総合文化)、川端(広島大)、服部(国立天文台)、J. Deng (NAOC)、P. Mazzali、E. Pian (Trieste 天文台) との共同研究。Ib/Ic 型超新星の後期スペクトルを多数観測し、爆発の非球対称の度合を推定している。[29, 34, 44]

Swift 衛星による超新星の X-ray, UV, Optical 観測

Swift Supernova team led by S. Immler (NASA/GSFC) との共同研究。超新星の早期の X-ray, UV, Optical 観測を Swift 衛星によって観測し、Ia 型 SN 2005ke を含む circumstellar interaction の研究を行なっている。[21, 43]

2.7 極超新星

極超新星における多次元輻射輸送計算

前田啓一(教養総合文化)との共同研究。ガンマ線バーストに付随する極超新星は、ジェット状に爆発することが示唆されてきた。しかし、このような非球対称な超新星がどのような放射を行うか、どのように観測されるかは十分に調べられていなかった。我々は多次元輻射輸送計算コードを用いて、極超新星が爆発初期(爆発後 30 日間程度)にどのような放射をするかを正確に計算した。そのスペクトルは極超新星 SN 1998bw に似ており、ジェットを正面から見ない場合でも、スペクトルは極超新星の特徴を持つことが分かった。[22, 62, 75, 76]

ガンマ線バーストと金属欠乏星の関連性

前田(総合文化)、岩本(JAERI)との共同研究。ガンマ線バースト 060505, 060614 は近傍で発見されたにもかかわらず、付随した超新星が観測されなかった。その観測から超新星の明るさに上限が与えられた。そのような超新星・ガンマ線バーストの存在は、金属欠乏星を再現する超新星モデルから予言されたものであった。相対論的多次元流体力学コードを用いて、超新星・ガンマ線バーストにおける相対論的ジェットのエネルギー注入率にばらつきが存在すると、ガンマ線バースト、金属欠乏星をともに説明できることを示し、その関連性を指摘した。[137]

2.8 大質量星の進化

種族 III の巨大質量星の進化、爆発、元素合成

宇宙の初期に水素とヘリウムからなるガスから形成された第一世代星(種族 III 星)は、重元素を含まないため、accretion によって数百太陽質量の巨大質量星に成長できる可能性が指摘されている。本研究では、accretion rate を様々な値に設定して、このような星がどのような進化をたどるかをしらべている。100 M_{\odot} 以上の巨大質量星の寿命は長くても 300 万年程度だが、accretion によって質量が増えていく星では、低質量の phase があるため、寿命が延びる。これにより、比較的 accretion rate が小さい場合でも巨大

質量星に成長することが可能であることがわかった。今後は、accretion rate の違いによる星の最終的な質量や、最終状態(Core-Collapse か Pair Instability Supernova か)などを調べる。[32, 64, 65, 66]

< 新聞記者発表 >

- [1] 野本憲一 他: 「星の一生の最期に新たな形態が存在ー中性子星の誕生が引き起こすガンマ線バーストと超新星の発見ー」2006/8/28 東京大学理学系研究科 記者会見(7社出席)毎日新聞、日経新聞、産経新聞、東京新聞、科学新聞、日刊工業新聞、共同通信、時事通信などにて記事掲載
- [2] 野本憲一 他: 「超新星爆発の光による重元素生成の原理を解明」2006/9/12 東京大学理学系研究科 HP プレスリリース読売新聞にて記事掲載、
- [3] 野本憲一: 2006/11/20 産経新聞(科学欄、インタビュー記事) ”知の先端、東大大学院教授 野本憲一さん、超新星爆発の仕組み解明”
- [4] 野本憲一: 2007/3/18 毎日新聞(コラム「余録」) ”超新星”
- [5] 野本憲一: 2007/3/24 朝日新聞(コラム「窓、論説委員室から」) ”超新星メール”

< 報文 >

(原著論文)

- [6] Nakamura, K., Inoue, S., Wanajo, S., & Shigeyama, T., "Light-Element Production in the Circumstellar Matter of Energetic Type Ic Supernovae", 2006, ApJ, 643, L115-L118
- [7] Ozaki, J., & Shigeyama, T., "A Method to Identify the Companion Stars of Type Ia Supernovae in Young Supernova Remnants", ApJ, 644, 954-958
- [8] Nakamura, K., & Shigeyama, T., "Self-similar solutions for the interaction of relativistic ejecta with an ambient medium", 2006, ApJ, 645, 431-435
- [9] Kikuchi, R., & Shigeyama, T., "Relativistic Flows after Shock Emergence", 2007, ApJ, 657, 860-869
- [10] Suzuki, A., & Shigeyama, T., "Self-similar Solutions for the Emergence of Energy-varying Shock Waves from Plane-parallel Atmospheres", 2007, ApJ, 661, 385-393
- [11] Ihara, Y., Ozaki, J., Doi, M., Shigeyama, T., Kashikawa, N., Komiyama, Y., & Hattori, T., "Searching for a companion star of Tycho's type Ia supernova with optical spectroscopic observations", 2007, PASJ, in press
- [12] Komiyama, Y., Suda, T., Minaguchi, H., Shigeyama, T., Aoki, W., & Fujimoto, M. Y., "The Origin of Carbon-Enhancement and Initial Mass Function of Extremely Metal-Poor Stars in the Galactic Halo", 2007, ApJ, 658, 367-390

- [13] Tsujimoto, T., & Shigeyama, T., & Suda, T., "Surface pollution of main-sequence stars through encounters with AGB ejecta in ω Centauri", 2007, *ApJ*, **654**, L139–L142
- [14] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T. 2006, "HE 1327-2326, an Unevolved Star with $[\text{Fe}/\text{H}] < -5.0$. I. A Comprehensive Abundance Analysis", *ApJ*, **639**, 897-917.
- [15] Aoki, W., Honda, S., Beers, T. C., Takada-Hidai, M., Iwamoto, N., Tominaga, N., Umeda, H., Nomoto, K., Norris, J. E., & Ryan, S. G. 2007, "Spectroscopic Studies of Extremely Metal-poor Stars with the Subaru High-Dispersion Spectrograph. IV. The -Element-Enhanced Metal-poor Star BS 16934-002", *ApJ*, **660**, 747-761.
- [16] Fröhlich, C., Hauser, P., Liebendörfer, M., Martínez-Pinedo, G., Thielemann, F.-K., Bravo, E., Zinner, N. T., Hix, W. R., Langanke, K., Mezzacappa, A., & Nomoto, K. 2006, "Composition of the Innermost Core-Collapse Supernova Ejecta", *ApJ*, **637**, 415-426.
- [17] Fröhlich, C., Liebendörfer, M., Martínez-Pinedo, G., Thielemann, F.-K., Bravo, E., Zinner, N. T., Hix, W. R., Langanke, K., Mezzacappa, A., & Nomoto, K. 2006, "Composition of the Innermost Core Collapse Supernova Ejecta and the ν p-Process", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 333 - 338
- [18] Fugazza, D., D'Avanzo, P., Malesani, D., Della Valle, M., Pian, E., Chincarini, G., Stella, L., Tagliaferri, G., Deng, J., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, "Supernova 2006aj = GRB 060218", *Central Bureau Electronic Telegrams*, ed. D. W. E. Green, **410**, 1.
- [19] Gerardy, C. L., Meikle, W. P. S., Hoefflich, P. A., Nomoto, K., Motohara, K., & Kotak, R. 2006, "Infrared Spectroscopy of Thermonuclear Supernovae", *Supernovae: One Millennium After SN1006, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 9*, #19.
- [20] Hayakawa, T., Iwamoto, N., Kajino, T., Shizuma, T., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, "Principle of Universality of γ -Process Nucleosynthesis in Core-Collapse Supernova Explosions", *ApJ*, **648**, L47-L50.
- [21] Immler, S., Brown, P. J., Milne, P., The, L.-S., Petre, R., Gehrels, N., Burrows, D. N., Nousek, J. A., Williams, C. L., Pian, E., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Chevalier, R. A., Mangano, V., Holland, S. T., Roming, P. W. A., Greiner, J., & Pooley, D. 2006, "X-Ray Observations of Type Ia Supernovae with Swift: Evidence of Circumstellar Interaction for SN 2005ke", *ApJ*, **648**, L119-L122.
- [22] Maeda, K., Mazzali, P. A., & Nomoto, K. 2006, "Optical Emission from Aspherical Supernovae and the Hypernova SN 1998bw", *ApJ*, **645**, 1331-1344.
- [23] Maeda, K., Nomoto, K., Mazzali, P. A., & Deng, J. 2006, "Nebular Spectra of SN 1998bw Revisited: Detailed Study by One- and Two-dimensional Models", *ApJ*, **640**, 854-877.
- [24] Maeda, K., Kawabata, K., Tanaka, M., Nomoto, K., Tominaga, N., Hattori, T., Minezaki, T., Kuroda, T., Suzuki, T., Deng, J., Mazzali, P. A., & Pian, E. 2007, "SN 2006aj Associated with XRF 060218 at Late Phases: Nucleosynthesis Signature of a Neutron Star-driven Explosion", *ApJ*, **658**, L5-L8.
- [25] Kawabata, K. S., Maeda, K., Tanaka, M., Tominaga, N., Nomoto, K., & Hattori, T. 2007, "Supernova 2006jc in UGC 4904", *IAUC 8833*, 3.
- [26] Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., Totani, T., Ohta, K., Iye, M., Hattori, T., Aoki, W., Furusawa, H., Hurley, K., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Komiyama, Y., Mizumoto, Y., Nomoto, K., Noumaru, J., Ogasawara, R., Sato, R., Sekiguchi, K., Shirasaki, Y., Suzuki, M., Takata, T., Tamagawa, T., Terada, H., Watanabe, J., Yatsu, Y., & Yoshida, A. 2006, "An optical spectrum of the afterglow of a γ -ray burst at a redshift of $z = 6.295$ ", *Nature*, **440**, 184-186.
- [27] Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K., Tominaga, N., & Ohkubo, T. 2006, "Galactic chemical evolution: Oxygen through Zinc", *ApJ*, **653**, 1145-1171.
- [28] Mazzali, P. A., Deng, J., Nomoto, K., Sauer, D. N., Pian, E., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., & Filippenko, A. V. 2006, "A neutron star-driven X-ray flash associated with supernova SN 2006aj", *Nature*, **442**, 1018-1020.
- [29] Mazzali, P. A., Deng, J., Pian, E., Malesani, D., Tominaga, N., Maeda, K., Nomoto, K., Chincarini, G., Covino, S., Della Valle, M., Fugazza, D., Tagliaferri, G., & Gal-Yam, A. 2006, "Models for the Type Ic Hypernova SN 2003lw associated with GRB 031203", *ApJ*, **645**, 1323-1330.
- [30] Minezaki, T., Yoshii, Y., & Nomoto, K. 2007, "Supernova 2006jc in UGC 4904", *IAUC 8833*, 2.
- [31] Motohara, K., Maeda, K., Gerardy, C. L., Nomoto, K., Tanaka, M., Tominaga, N., Ohkubo, T., Mazzali, P. A., Fesen, R. A., Höflich, P., & Wheeler, J. C. 2006 "The Asymmetric Explosion of Type Ia Supernovae as Seen from Near-Infrared Observations", *ApJ*, **652**, L101-L104.
- [32] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Suzuki, T., Tsuruta, S. & Rees, M. J. 2006,

- “Core-Collapse Very Massive Stars: Evolution, Explosion, and Nucleosynthesis of Population III 500–1000 M_{\odot} Stars”, *ApJ*, **645**, 1352-1372.
- [33] Pastorello, A., Sauer, D., Taubenberger, S., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Kawabata, K. S., Benetti, S., Elias-Rosa, N., Harutyunyan, A., Navasardyan, H., Zampieri, L., Iijima, T., Boticella, M. T., Di Rico, G., Del Principe, M., Dolci, M., Gagliardi, S., Ragni, M., & Valentini, G. 2006, “SN 2005cs in M51 I. The first month of evolution of a subluminous SN II plateau”, *MNRAS*, **370**, 1752-1762.
- [34] Pian, E., Mazzali, P. A., Masetti, N., Ferrero, P., Kloke, S., Palazzi, E., Ramirez-Ruiz, E., Woosley, S. E., Kouveliotou, C., Deng, J., Filippenko, A. V., Foley, R., Fynbo, J., Kann, D. A., Li, W., Hjorth, J., Nomoto, K., Patat, F., Sauer, D. N., Sollerman, J., Vreeswijk, P. M., Guenther, E. W., Levan, A., O’Brien, P., Tanvir, N., Wijers, R. A. M. J., Dumas, C., Hainaut, O., Wong, D. S., Baade, D., Wang, L., Amati, L., Cappellaro, E., Castro-Tirado, A. J., Ellison, S., Frontera, F., Fruchter, A. S., Greiner, J., Kawabata, K., Ledoux, C., Maeda, K., Möller, P., Nicastro, L., Rol, E., & Starling, R. 2006, “An optical supernova associated with the X-ray flash XRF 060218” *Nature*, **442**, 1011-1013.
- [35] Sadakane, K., Arai, A., Aoki, W., Arimoto, N., Takada-Hidai, M., Ohnishi, T., Tajitsu, A., Beers, T. C., Iwamoto, N., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “Chemical Abundances in the Secondary Star of the Black Hole Binary V4641 Sgr (SAX J1819.3-2525)”, *PASJ*, **58**, 595-604.
- [36] Sauer, D. N., Mazzali, P. A., Deng, J., Valenti, S., Nomoto, K., & Filippenko, A. V. 2006, “The properties of the ‘standard’ Type Ic supernova 1994I from spectral models”, *MNRAS*, **369**, 1939-1948.
- [37] Tanaka, M., Mazzali, P. A., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “Three-Dimensional Models for High Velocity Features in Type Ia Supernovae”, *ApJ*, **645**, 470-479.
- [38] Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Tanaka, M., Iwamoto, N., Suzuki, T., & Mazzali, P. A. 2007, “The Connection between Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars: Black-Hole forming Supernovae with Relativistic Jets”, *ApJ*, **657**, L77-L80.
- [39] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2007, “Supernova Nucleosynthesis in Population III 13 – 50 M_{\odot} Stars and the Abundance Patterns of Extremely Metal-Poor Stars”, *ApJ*, **660**, 516-541.
- [40] Tomita, H., Deng, J., Maeda, K., Yoshii, Y., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Suzuki, T., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Aoki, T., Enya, K., & Suganuma, M. 2006, “The Optical/Near-Infrared Light Curves of SN 2002ap for the First 1.5 Years after Discovery”, *ApJ*, **644**, 400-408.
- [41] Wanajo, S., Nomoto, K., Iwamoto, N., Ishimaru, Y., & Beers, T. C. 2006, “Enrichment of Very Metal Poor Stars with Both r-Process and s-Process Elements from 8–10 M_{\odot} Stars”, *ApJ*, **636**, 842-847.
- [42] Wang, L., Baade, D., Höflich, P., Wheeler, J. C., Kawabata, K., Khokhlov, A., Nomoto, K., & Patat, F. 2006, “Premaximum Spectropolarimetry of the Type Ia SN 2004dt”, *ApJ*, **653**, 490-502.
- [43] Immler, S., Brown, P. J., Milne, P., Dessart, L., Mazzali, P. A., Landsman, W., Gehrels, N., Petre, R., Burrows, D. N., Nousek, J. A., Chevalier, R. A., Williams, C. L., Koss, M., Stockdale, C. J., Kelley, M. T., Weiler, K. W., Holland, S. T., Pian, E., Roming, P. W. A., Pooley, D., Nomoto, K., Greiner, J., Campana, S., & Soderberg, A. M. 2007, “X-Ray, UV, and Optical Observations of Supernova 2006bp with Swift: Detection of Early X-Ray Emission”, *ApJ*, in press
- [44] Maeda, K., Tanaka, M., Nomoto, K., Tominaga, N., Kawabata, K., Mazzali, P. A., Umeda, H., Suzuki, T., & Hattori, T. 2007, “The Unique Type Ib Supernova 2005bf at Nebular Phases: Further Peculiarities”, *ApJ*, in press
- [45] Mazzali, P. A., Foley, R. J., Deng, J., Patat, F., Pian, E., Baade, D., Bloom, J. S., Filippenko, A. V., Perley, D. A., Valenti, S., Wang, L., Kawabata, K., Maeda, K., & Nomoto, K. 2007, “Keck and ESO-VLT View of the Symmetry of the Ejecta of the XRF/SN 2006aj”, *ApJ*, **661**, 892-898
- [46] Nomoto, K., Saio, H., Kato, M., & Hachisu, I. 2007, “Thermal Stability of White Dwarfs Accreting Hydrogen-rich Matter and Progenitors of Type Ia Supernovae”, *ApJ*, **664**, in press (astro-ph/0603351)
- [47] Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Kobayashi, C., & Maeda, K. 2006, “Nucleosynthesis Yields of Core-Collapse Supernovae and Hypernovae, and Galactic Chemical Evolution”, *Nuclear Physics A*, **777**, 424-458.
- [48] Wanajo, S. 2006, “The rp-Process in Neutrino-driven Winds”, *ApJ*, **647**, 1323-1340.
- [49] Wanajo, S. 2006, “The r-Process in the Proto-Neutron-Star Winds with Anisotropic Neutrino Emission”, *ApJ*, **650**, L79-L82.
- [50] Wanajo, S., & Ishimaru, Y. 2006, “r-Process Calculations and Galactic Chemical Evolution”, *Nuclear Physics A*, **777**, 676-699.

- [51] Shigeyama, T., Nakamura, K., Wanajo, S., & Inoue, S., 2006, "Light Element Production in Type Ic Supernovae", in *New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, AIP Conference Proceedings, Volume 847, 105-110
- [52] Nakamura, K., Inoue, S., Wanajo, S., Suzuki, T., & Shigeyama, T., 2006, "Light Elements Produced by Nitrogen-rich Type Ic Supernovae", in *New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, AIP Conference Proceedings, Volume 847, 446-448
- [53] Nakamura, K., Inoue, S., Wanajo, S., Suzuki, T., & Shigeyama, T., 2006, "Light Element Production in the Circumstellar Matter of Type Ic Supernovae at Low Metallicity" in *International Symposium on Nuclear Astrophysics - Nuclei in the Cosmos - IX*, eds. Mengoni, A. et al. (SISSA: Proceedings of Science)
- [54] Nakamura, K., & Shigeyama, T., 2006, "Type Ic Supernovae as Sources of Cosmic Rays", in *Cosmic Particle Acceleration, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 1, #35*
- [55] Ozaki, J. & Shigeyama, T., 2006, "Internal states of young type Ia supernova remnants and its suitable model", in *Extreme Universe in the Suzaku Era*, eds. K. Hayashida, et al. (PTP Supplement), in press
- [56] Suda, T., Murashima, M. Kokubun, M., Makishima, M. & Fujimoto, M. Y., 2006, "How the fast stellar wind blowing — A lesson from the recent X-ray observations of planetary nebulae", in *Extreme Universe in the Suzaku Era*, eds. K. Hayashida, et al. (PTP Supplement), in press
- [57] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T. 2006, "An abundance study of the most iron-poor star HE1327-2326 with Subaru/HDS", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 53-58.
- [58] Hayakawa, T., Iwamoto, N., Kajino, T., Shizuma, T., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, "Universality of the p-process nucleosynthesis in supernova explosions and scaling laws for p- and s-process nuclei in the solar system abundances", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 339-344.
- [59] Iwamoto, N., Umeda, H., Nomoto, K., Tominaga, N., Thielemann, F.-K., Hix, W. R. 2006 "Explosive Nucleosynthesis in Different Ye Conditions", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 409-411.
- [60] Iwamoto, N., Umeda, H., Tominaga, N., Nomoto, K., & Maeda, K. 2006, "The First Chemical Enrichment in the Universe and the Formation of Hyper Metal-Poor Stars", *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki, et al (Tokyo: Universal Academy Press), 289-290.
- [61] Kusakabe, M., Iwamoto, N., & Nomoto, K. 2006, "The p-Process in the Carbon Deflagration Model for Type Ia Supernovae and Chronology of the Solar System Formation", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 424-426.
- [62] Maeda, K., Kawabata, K., Nomoto, K., & Mazzali, P. A. 2006, "Hypernovae 1998bw and 2003jd: A Link to Gamma-Ray Bursts", *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 259-260.
- [63] Nomoto, K. 2006, "SN Ia Progenitor Models", *Supernovae: One Millennium After SN1006, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 9, #8*.
- [64] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J. 2006, "Explosion of Very Massive Stars and the Origin of Intermediate Mass Black Holes", in *IAUS 238: Black Holes: From Stars to Galaxies — Across the Range of Masses*, eds. V. Karas & G. Matt, 55.
- [65] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., Maeda, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J. 2006, "Evolution, Explosion of Population III Very Massive Stars — Their Roles as First Generation Stars", *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 293-294.
- [66] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., Suzuki, T., Maeda, K., Tsuruta, S. & Rees, M. J. 2007, "Core-Collapse Very Massive Stars: Evolution, Explosion, and Nucleosynthesis of Population III 500–1000 M_{\odot} Stars", *Energy Budget in the High Energy Universe*, eds. K. Sato & J. Hisano (Singapore: World Scientific), 365-368.
- [67] Tanaka, M., Mazzali, P. A., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, "Aspherical Ejecta of Type Ia Supernovae Inferred From High Velocity Features", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 485-487.
- [68] Tanaka, M., Nomoto, K., Maeda, K., & Mazzali, P. A. 2006, "Aspherical Explosion Models for Type Ia Supernovae", *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki,

- et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 263-264.
- [69] Tanaka, M., Tominaga, N., Nomoto, K., Maeda, K., Mazzali, P. A., & Deng, J. 2007, "The Properties of the Unique Type Ib Supernova 2005bf and Implications for the Difference between Type Ib/c Supernovae", *Energy Budget in the High Energy Universe*, eds. K. Sato & J. Hisano (Singapore: World Scientific), 369-372.
- [70] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, "Nucleosynthesis in Population III Supernovae: Comparison with Abundances of Extremely Metal-Poor Stars", *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 291-292.
- [71] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, "Population III Core-Collapse Supernova Yields and Extremely Metal-Poor Star Abundance Pattern", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 488-490.
- [72] Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Iwamoto, N., & Nomoto, K. 2007, "Explosive Nucleosynthesis Induced by Relativistic Jets in Population III Supernovae", *Energy Budget in the High Energy Universe*, eds. K. Sato & J. Hisano (Singapore: World Scientific), 361-364.
- [73] Umeda, H., Tominaga, N., Iwamoto, N., Nomoto, K., & Maeda, K. 2006 "The Abundance Pattern and Formation of Extremely Metal-Poor Star", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 65-70.
- [74] Nomoto, K., Tanaka, M., Kawabata, K. S., Sahu, D. K., & Anupama, G. C. 2007, "Type Ia Supernovae: Progenitors and Peculiarity", *AIP Conference Proceedings: The Multicoloured landscape of Compact Objects and their Explosive Origins*, eds. L. Burderi, et al. (New York: American Institute of Physics), in press
- [75] Nomoto, K., Tominaga, N., Tanaka, M., & Maeda, K. 2007, "Diversity of the GRB-Supernova Connection: X-Ray Flashes and Dark Hypernovae", *AIP Conference Proceedings: The Multicoloured landscape of Compact Objects and their Explosive Origins*, eds. L. Burderi, et al. (New York: American Institute of Physics), in press
- [76] Nomoto, K., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., Suzuki, T., Deng, J.S., & Mazzali, P.A. 2007, "Diversity of the supernova-gamma-ray burst connection", *IL Nuovo Cimento*, **121**, in press
- [77] Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Iwamoto, N., & Nomoto, K. 2007, "Explosive Nucleosynthesis induced by Relativistic Jets in Population III Supernovae", *Massive Stars: From Pop III and GRBs to the Milky Way*, eds. M. Livio (Maryland: Cambridge University Press), in press
- [78] Wanajo, S. 2006, "The rp-Process in Core-collapse Supernovae", *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies*, eds. S. Kubono et al. (New York: American Institute of Physics), 345-350.
- [79] Wanajo, S., & Ishimaru, Y. 2006, "Actinide Production in Supernovae and Nucleocosmochronology", *The 59th Yamada conference: Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology*, eds. H. Suzuki et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 289-290.
- [80] Wanajo, S. 2007, "The rp-Process in Core-collapse Supernovae", *Nuclei in the Cosmos IX*, eds. A. Mengoni et al. (Proceedings of Science - <http://pos.sissa.it/>)
- [81] Wanajo, S., & Ishimaru, Y. 2007, "The Weak r-Process in Core-collapse Supernovae", *Nuclei in the Cosmos IX*, eds. A. Mengoni et al. (Proceedings of Science - <http://pos.sissa.it/>)
- (国内雑誌)
- [82] 茂山俊和, "超新星とは何か", 丸善, 理科年表オフィシャルサイト徹底解説.
- [83] 野本憲一, "超新星・ガンマ線バースト関係の新展開" 丸善, パリティ, 2006年12月号 (Vol. 21, No. 12), 42-44
- [84] 野本 憲一, 野本 陽代 訳, 日経サイエンス 2007年1月号 (Vol. 37, No.1) p.32-40, 「超新星爆発はこう起きる」 W.Hillebrandt, H.-T. Janka, E. Muller
- [85] 野本憲一, 田中雅臣, "星の一生の最期に新たな形態が存在", 東京大学大学院理学系研究科, 理学部ニュース, 38巻4号.
- [86] 田中雅臣, 富永望, 野本憲一, "謎のガンマ線バーストに新たな光が ~新種の超新星の観測~, 岩波, 科学, 2006年6月号, 585-588.
- (学位論文)
- 博士
- [87] 中村航; Light Element Production by Interactions between Type Ic Supernova Ejecta and the Circumstellar Matter (Ic型超新星爆発によって加速された物質と星周物質との相互作用による軽元素合成)
- (編書)
- [88] Kubono, S., Aoki, W., Kajino, T., Motobayashi, T., & Nomoto, K. (ed.) 2006, *AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (New York: American Institute of Physics) pp. 1-529
- < 学術講演 >
- (国際会議)

一般講演

- [89] Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Iwamoto, N., & Nomoto, K.: “Explosive Nucleosynthesis Induced by Relativistic Jets in Population III Supernovae”, *Massive Stars: From Pop III and GRBs to the Milky Way*, Baltimore, 2006/5/8-11.
- [90] Nakamura, K., ”Light Element Production in the Circumstellar Matter of Type Ic Supernovae at Low Metallicity”, *Nuclei in the Cosmos IX*, CERN, Geneva, Switzerland, 2006/6/25-6/30
- [91] Wanajo, S., “The rp-Process in Core-collapse Supernovae”, *Nuclei in the Cosmos IX*, Geneva, 2006/6/25-30
- [92] Wanajo, S., Ishimaru, Y.: “The Weak r-Process in Core-collapse Supernovae”, *Nuclei in the Cosmos IX*, Geneva, 2006/6/25-30
- [93] Wanajo, S., “r-Process Nucleosynthesis”, *The First Stars and Evolution of the Early Universe*, Seattle, 2006/7/3-7
- [94] Wanajo, S.: “Nucleosynthesis in Neutrino-Driven Winds of Core-Collapse Supernovae”, *2nd German-Japanese Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics*, RIKEN, 2006/10/4-7
- [95] Ozaki, J. & Shigezumi, T., 2006, ”Internal states of young type Ia supernova remnants and its suitable model” *Extreme Universe in the Suzaku Era*, eds. K. Hayashida, et al. (PTP Supplement), Kyoto, Japan, 2006/12/4-12/8
- [96] Suda, T., Murashima, M. Kokubun, M., Makishima, M. & Fujimoto, M. Y., 2006, ”How the fast stellar wind blowing — A lesson from the recent X-ray observations of planetary nebulae”, *Extreme Universe in the Suzaku Era*, eds. K. Hayashida, et al. (PTP Supplement), Kyoto, Japan, 2006/12/4-12/8
- [97] Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Tanaka, M., Iwamoto, N., Suzuki, T., & Mazzali, P. A.: “Nucleosynthesis in Supernovae with Relativistic Jets: The implication on Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars”, *SUPERNOVAE CONFERENCE 2007*, Tokyo, 2007/2/1-3.
- [98] Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Tanaka, M., Iwamoto, N., Suzuki, T., & Mazzali, P. A.: “Relativistic Jet-Induced Supernovae associated with Gamma-Ray Bursts and Extremely Metal-Poor Stars”, *Neutrino Processes and Stellar Evolution*, Tokyo, 2007/2/7-9.
- [99] Tominaga, N., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Tanaka, M., Iwamoto, N., Suzuki, T., & Mazzali, P. A.: “Nucleosynthesis in Jet-induced Supernovae”, *Paths to Exploding Stars: Accretion and Eruption*, Santa Barbara, 2007/3/19-23.
- [100] Umeda, H., Yoshida, T., Iwamoto, N., Tominaga, N., & Nomoto, K.: “Neutrino process nucleosynthesis in core-collapse supernovae”, *Neutrino Processes and Stellar Evolution*, Tokyo, 2007/2/7-9.
- 招待講演
- [101] Nomoto, K., “Hypernovae and their Nucleosynthesis”, invited talk at International Conference “Millennium of SN 1006”, Hangzhou, China, 2006/5/19
- [102] Nomoto, K., “Supernova-GRB Connection”, invited review talk at Congress “SWIFT and GRBs: Unveiling the Relativistic Universe”, Venice, 2006/6/07
- [103] Nomoto, K., “A model for SN 2006aj/GRB 060218: a neutron star-driven XRF in a low mass type Ic supernova”, invited talk at International Astronomy Meeting “The Multicoloured Landscape of Compact Objects and their Explosive Origins”, Cefalu’, Sicily, 2006/6/13
- [104] Nomoto, K., “Progenitors of Type Ia Supernovae: Circumstellar Interaction, Rotation, and Steady Hydrogen Burning”, invited talk at International Astronomy Meeting “The Multicoloured Landscape of Compact Objects and their Explosive Origins”, Cefalu’, Sicily, 2006/6/14
- [105] Nomoto, K., “Hypernova Nucleosynthesis”, invited talk at the Institute for Nuclear Theory program on “The First Stars and Evolution of the Early Universe”, Univ. of Washington, 2006/7/06
- [106] Nomoto, K., “SN Ia Progenitor Models”, invited talk at JD09 ”Supernovae: One Millennium after SN 1006”, XXVI IAU General Assembly, Prague, 2006/8/17-18
- [107] Nomoto, K.: ”X-Ray Flash - Supernova Connection: A model for SN 2006aj/ GRB 060218”, International Conference *The Extreme Universe in the Suzaku Era*, Kyoto, Japan, 2006/12/4.
- [108] Nomoto, K., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., & Umeda, H. 2007, “Nucleosynthesis in Core Collapse Supernovae and GRB–Metal-Poor Star Connection”, *AIP Conference Proceedings: Supernova 1987A: 20 Years After – Supernovae and Gamma-Ray Bursters*, eds. S. Immler, et al. (New York: American Institute of Physics), in press
- [109] Nomoto, K.: “Luminous Supersoft X-Ray Sources: Type Ia Progenitors or Not?”, invited talk at KITP Workshop: *Accretion and Explosion: the Astrophysics of Degenerate Stars*, Santa Barbara, 2007/3/02.
- [110] Nomoto, K.: “Short History of Supernova Research”, invited talk at KITP Conference: *Paths to Exploding Stars: Accretion and Eruption*, Santa Barbara, 2007/3/21.
- [111] Nomoto, K.: “Neutron-rich Nucleosynthesis in Type Ia’s: Constraints from Near IR Nebular

Observations”, invited talk at KITP Conference: *Paths to Exploding Stars: Accretion and Eruption*, Santa Barbara, 2007/3/22.

(国内会議)

一般講演

- [112] 須田 拓馬; 低・中質量の超金属欠乏星の進化と内部での物質混合, 「宇宙黎明期の恒星の進化と元素合成過程」研究会, 北海道大学, 2007/02/22-23.
- [113] 須田 拓馬; 宇宙開闢史解読のための金属欠乏星データベース, 「宇宙黎明期の恒星の進化と元素合成過程」研究会, 北海道大学, 2007/02/22-23.
- [114] 須田 拓馬; 球状星団 ω Cen の二重主系列、組成異常、青い水平分枝の起源, 「宇宙黎明期の恒星の進化と元素合成過程」研究会, 北海道大学, 2007/02/22-23.
- [115] 梅田秀之: “超金属欠乏星での爆発的核種合成”, 研究会「宇宙黎明期の恒星の進化と元素合成過程」, 北海道大学, 2007/2/22-23.
- [116] 中村 航; 金属欠乏星の超新星爆発にともなう軽元素合成, 第 6 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, ホテル伊豆高原コンベンションホール, 2007/02/18-20.
- [117] 須田 拓馬; 球状星団 ω Cen の二重主系列の起源と物質混合, 第 6 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, ホテル伊豆高原コンベンションホール, 2007/02/18-20.
- [118] 田中雅臣: “Multi-Dimensional Simulations of Radiative Transfer in Aspherical Hypernovae”, 研究会「超新星を舞台とする高エネルギー物理現象」, 東京大学, 2007/2/1-3.
- [119] 和南城伸也: “超新星非等方ニュートリノ加熱風における r 過程元素合成”, 研究会「超新星を舞台とする高エネルギー物理現象」, 東京大学, 2007/2/1-3.
- [120] 富永望: “ジェット状超新星爆発が結ぶガンマ線バーストと金属欠乏星”, 研究会「ガンマ線バーストの新しいフロンティア」, 京都大学, 2007/1/16-18.
- [121] 富永望: “大質量星の超新星爆発: ガンマ線バーストと金属欠乏星”, 研究会「理論懇シンポジウム」, 立教大学, 2006/12/25-27.
- [122] 須田 拓馬; 球状星団におけるヘリウム降着と物質混合モデル - ω Cen に見られる二重主系列、組成異常、青い水平分枝星の起源, 第 19 回理論懇シンポジウム「理論天文学の進歩」, 立教大学, 2006/12/25-27.
- [123] 梅田秀之: “系外惑星の親星の金属の起源と金属過剰星の進化、爆発”, 特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」第 3 回大研究会, 東京大学, 2006/12/11-13.
- [124] 富永望: “金属欠乏星から探る超新星爆発・ガンマ線バースト”, 研究会「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」, 東京大学, 2006/11/7-10.
- [125] 茂山 俊和; 金属欠乏星に残る Pop III thermonuclear supernova の痕跡, 第 5 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 鬼怒川コンベンションホール, 2006/09/3-5.
- [126] 中村 航; 金属欠乏星の Ic 型超新星爆発にともなう軽元素合成, 第 5 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 鬼怒川コンベンションホール, 2006/09/3-5.
- [127] 尾崎 仁; Tycho の超新星残骸における物理量の推定, 第 5 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 鬼怒川コンベンションホール, 2006/09/3-5.
- [128] 須田 拓馬; データベースで探る金属欠乏星の起源, 第 5 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 鬼怒川コンベンションホール, 2006/09/3-5.
- [129] 和南城伸也: “超新星 r 過程元素合成と初代星”, 「初代星・初代銀河形成研究会」, 国立天文台, 2006/9/4-5.
- [130] 富永望: “金属欠乏星と種族 III 超新星における元素合成”, 研究会「広視野・多天体分光でさぐる銀河系・局部銀河群小研究会」, 国立天文台, 2006/4/26-27.
- 日本天文学会 2007 年春季年会、東海大学湘南キャンパス 2007/3/28-30
- [131] 菊地 礼奈, 茂山 俊和: “爆発のエネルギーを超新星残骸から見積もるときの星周物質の影響”, K06a
- [132] 尾崎 仁, 茂山 俊和: “若い SNR Ia 中のイオン化状態”, K07a
- [133] 井原 隆, 尾崎 仁, 土居 守, 茂山 俊和, 柏川 伸成, 小宮山 裕, 服部 堯: “超新星残骸 Tycho における FeI の吸収測定と Ia 型超新星伴星探査”, K11a
- [134] 中村 航, 茂山 俊和: “重い金属欠乏星の爆発にともなう軽元素合成”, N03a
- [135] 小宮 悠, 藤本 正行, 羽部 朝男, 須田 拓馬: “銀河形成過程の超金属欠乏星への影響”, R27a
- [136] 黒田仰生, 和南城伸也, 野本憲一: “ニュートリノ駆動風中における衝撃波の元素合成への影響”, K21a
- [137] 富永望, 前田啓一 (総合文化), 梅田秀之, 野本憲一, 田中雅臣, 岩本信之 (原研), P. A. Mazzali (MPA): “ガンマ線バーストと金属欠乏星: GRB 060505、GRB 060614 の起源”, K18a.
- [138] 和南城伸也, H.-Th. Janka, F. S. Kitaura (MPA): “低質量超新星爆発における元素合成”, K08a.
- 日本天文学会 2006 年秋季年会、九州国際大学 2006/9/19-21
- [139] 菊地 礼奈, 茂山 俊和: “衝撃波により加速された星の外層の発展: 数値計算と自己相似解の比較”, K15a
- [140] 尾崎 仁, 茂山 俊和: “X 線での観測に基づいた Tycho’s SNR 中の物理量の推定”, K16a
- [141] 中村 航, 茂山 俊和: “金属欠乏星による軽元素合成の新しい可能性”, N30a
- [142] 茂山 俊和, 辻本 拓司, 須田 拓馬: “球状星団 Omega Centauri に見られる 2 つの主系列の起源について”, R48a
- [143] 須田 拓馬, 勝田 豊, 山田 志真子, 小宮 悠, 徂徠和夫, 藤本 正行: “データベースを用いた金属欠乏星の性質”, N31a

- [144] 西村 高德、合川 正幸、須田 拓馬、藤本 正行、山本 一幸、太田 雅久: ”中低質量超金属欠乏星での α 粒子/中性子捕獲反応経路”、 N32a
- [145] 小宮 悠、藤本 正行、徂徠 和夫、勝田 豊、山田 志真子、須田 拓馬:”ハロー超金属欠乏星から探る銀河系史への連星の影響”、 R31a
- [146] 田中雅臣, 富永望, 前田啓一, 野本憲一, P. A. Mazzali, E. Pian, J. Deng, 川端弘治: ”XRF 060218/SN 2006aj と極超新星の可視光スペクトル”、 K12a.
- [147] 富永望, 田中雅臣, 前田啓一 (総合文化), 野本憲一, 梅田秀之, P. A. Mazzali (MPA), E. Pian (Trieste Obs.), J. Deng (NAOC), 川端弘治 (広島大): ”XRF 060218/SN 2006aj の質量・爆発エネルギー・元素合成”、 K13a.
- [148] 和南城伸也: 超新星非等方ニュートリノ加熱風における r 過程元素合成, K08a.

招待講演

- [149] 野本憲一: ”赤、それは鉄がつむぐ色”、ロレアル賞連続ワークショップ「色ー科学と芸術の出会い」, 福岡アジア美術館, 2006/5/27.
- [150] 野本憲一: ”Nucleosynthesis in the First Supernovae”, 「初代星・初代銀河形成研究会」, 国立天文台, 2006/9/4-5.
- [151] 野本憲一: ”第一世代天体における元素合成”, 物理学会シンポジウム「第一世代天体に迫る」, 奈良女子大, 2006/9/20-22.
- [152] 野本憲一: ”超新星とガンマ線バースト”、基研研究会「ガンマ線バーストの新しいフロンティア」, 京都大学, 2007/1/16.
- [153] : 野本憲一: ”GRB-Supernova Connection”, 研究会「超新星を舞台とする高エネルギー物理現象」, 東京大学, 2007/2/2.
- [154] 野本憲一: ”大質量星の進化と超新星における元素合成”, 物理学会シンポジウム「大質量星の重力崩壊と高エネルギー天体: SN1987A の 20 周年によせて」, 首都大学東京, 2007/3/27.

(セミナー)

- [155] 須田拓馬; 「種族 III 星の同定と宇宙初期における質量関数」, 東大天文学教室談話会, 2006/05/09
- [156] 須田拓馬; 「恒星進化から探る宇宙初期の質量関数と金属欠乏星データベース」, 東大物理学教室宇宙理論研究室セミナー, 2006/05/18
- [157] 須田拓馬; 「種族 III 星の生き残り探査と宇宙初期における質量関数」, 国立天文台コロキウム, 2006/05/29
- [158] Nomoto, K., “First Star - Hypernova Connection: Explosive Nucleosynthesis and Abundance Patterns of Extremely Metal-Poor Stars”, Colloquium, Indian Institute of Astrophysics, Bangalore (India), 2007/1/02.

3 可視光近赤外観測

——活動銀河核の多波長モニター観測 (MAGNUM) プロジェクト—— (吉井・峰崎)

MAGNUM プロジェクトでは活動銀河核の多波長モニター観測をはじめとして、複数の観測プロジェクトを継続して進めている。観測成果についてはそれぞれについて項目をあらためて報告する。

観測を遂行するためには不断の保守作業が必要である。本年度はとくに MAGNUM 望遠鏡のスループット向上を計るべく、副鏡鏡面のアルミニウムの再蒸着を行なった。とりはずした副鏡を隣島のすばる観測所ヒロ施設に持ち込んで再蒸着作業を行なった。同時に主鏡の洗浄作業も行なった。また観測室や倉庫として使っているコンテナの天井の塗装が傷んでおり、放置してさびが進行すると雨漏りの危険も予想されたため、コンテナの再塗装作業を行った。その他、望遠鏡各部の保守作業や一部の部品、PC 類の交換作業を行なった。

また MAGNUM 望遠鏡が設置されているハワイ大学ハレアカラ観測所にある複数の研究プロジェクトについて、プロジェクト間協力が押し進められることとなった。とくに MAGNUM プロジェクトからは 2000 年の観測開始当初から運用を続けている赤外線雲モニターのデータを提供し、それをハレアカラ観測所内の各プロジェクトで共有することとなった。複数の研究プロジェクトが将来的には遠隔観測を遂行することを計画しており、その実現のために重要な役割を果たすことが期待される。その他にも気象データのプロジェクト間共有も開始した。

MAGNUM 自動観測システム用赤外線全天雲モニターの開発および 5 年間の運用実績の評価

運用実績の評価

MAGNUM 望遠鏡の無人自動運用支援用に独自に開発し 2000 年にハワイ州マウイ島ハレアカラサイトに立ち上げた赤外線雲モニターは、屋外設置可能かつメンテナンスフリーで波長 $10\mu\text{m}$ 帯での全天の雲の熱放射を長期モニター出来るという、観測施設の天候監視用として画期的なシステムである。そのため、コピー機がハワイのマウナケアサイト、チリのアタカマサイト、国内の岡山観測所、木曾観測所等にも設置されている。複数の観測施設を有するハレアカラ、マウナケア等のサイトでは施設間でモニターデータが共有され、サイト全体にとって天候監視の目として欠かせない役割を果たしている。

赤外線雲モニターは運用開始から 6 年を経過した現在においても尚安定して稼働している。取得した数年

分のモニターデータを他の気象データや MAGNUM 望遠鏡による可視近赤外線観測データと共に解析し、その運用上の性能とハレアカラ天気傾向を評価したところ以下のことが分かった。

まず雨センサーデータとの比較から、雨センサーによる雨滴検出時の 96% に際しては、雲モニターによる曇天判断によって事前にドーム閉封処が出来ていることが確認された。また MAGNUM 望遠鏡による標準星の観測フラックスとの比較から、雲モニターによる薄雲検出限界から生じる測光フラックスの不定性は 2–3% 程度であることが分かった。さらに 2001 年から 2005 年の 5 年間に観測データは快晴率 56% および部分的観測可能率 19% を示し、すばる望遠鏡における観測ログと比較するとハレアカラサイトがマウナケアサイトとほぼ同等の晴天率を持つことが分かった。

この赤外線雲モニターの設計製作方法、データ処理手法、性能評価、そしてハレアカラサイトにおける 5 年間のデータの統計をまとめ、欧文査読ジャーナルに掲載受理された (Suganuma et al. 2007, PASP, in press)。

近傍 1 型セイファート銀河核のダストトーラス内縁の観測的研究

MAGNUM 望遠鏡による 2001 – 2003 年の可視・近赤外モニター観測データより、近傍 1 型セイファート銀河、NGC 5548, NGC 4051, NGC 3227, NGC 7469 において、V バンド変光に対する K バンド変光の明瞭な時間遅延を検出した。時間遅延量の定量化において相関解析アルゴリズムの改良および新手法の誤差シミュレーションの開発を行い、解析結果の信頼性を向上させることに成功した。得られた遅延時間を文献データと共に可視光度 vs. 遅延時間の平面にプロットすると、遅延時間は可視光度の 0.5 乗に非常に良く相関し、さらにこれらは同一天体の広幅輝線強度変光の時間遅延の上限付近に存在することが確認された。これらの結果から、(1) ダストトーラスに内縁が存在し、中心放射源の光度によって決定されること、(2) ダストトーラス内縁半径が広輝線領域の半径の外縁付近に存在すること、すなわち活動銀河核の統一モデルの描像を、これまでに無く強く示すことができた (Suganuma et al. 2006, ApJ, 639, 46)。10 月に西安で開かれた国際研究会 “The Central Engine of Active Galactic Nuclei” に参加し、この成果を広くアピールし多数の研究者と議論を交わした。また他参加者の講演において我々の論文が高い頻度で引用され、MAGNUM に対する注目と期待を確認した。

1 型 AGN 可視赤外変動成分解析

活動銀河核中心には巨大ブラックホールが存在し、その周りに降着円盤が形成されていると考えられている。またその外側には、昇華温度にまで温められたダストトーラスが取り巻いていると考えられている。

降着円盤の存在はほぼ確実と考えられているが、降着円盤がどの程度外側まで広がって存在しているかについてこれまで観測的に研究された事はなかった。降着円盤も外周へ行くに従って温度が低下し主に赤外線放射するようになるが、ダストトラスからの強烈な赤外線放射に埋もれてしまうため、これまで観測することができなかつたためである。

比較的良好に見通せる可視の波長帯においても観測される降着円盤のスペクトルが理論的予想と一致しないなどの議論がある。まして近赤外波長帯においてどの程度の放射があるのかは未知数であり、赤外線観測による正確なダスト放射変動の測定には、降着円盤スペクトルの決定が必要である。

我々は可視赤外交成成分解析を用いることで、近赤外波長域において降着円盤とダストトラス放射の分離が可能になることを見出した。この新しい解析手法によって、降着円盤とダストトラスそれぞれのスペクトルカラーや、ダストトラスの温度構造に関する情報を得ることができる。この手法を近傍1型セイファート銀河 MCG +08-11-011 に適用した。

その結果降着円盤は主に赤外線を放射する領域まで広がって存在していることが明らかになり、そのスペクトルは理論予想とよく一致する事が明らかになった。またダストトラス成分については、トラスに温度構造があり、 H バンドの光は K バンドより内側から放射されている事も明らかになった。この研究結果をまとめ論文として出版した。

また多数の1型活動銀河核について可視赤外交成成分解析によって抽出されたダストトラス成分と降着円盤成分の放射強度の比を調べたところ、天体に依らずどんな明るさでも値がほぼ一定であることがわかった。これはダストトラスの中心を見込む立体角が明るさによらず一定であることを示唆している。

Markarian 744 における可視・赤外交成遅延時間の変化について

MAGNUM プロジェクトでは、活動銀河核 (AGN) の可視変光に対する近赤外交成の遅延時間からその絶対光度を求め宇宙論パラメータに制限を加えることを目的として、数十天体の AGN の測光モニター観測を継続中である。我々は Markarian 744 に関して 2002 年 4 月から 2005 年 7 月まで可視と赤外交成の変光曲線を求め、赤外交成の遅延時間と可視絶対等級を高い精度で求めることに成功した。参照星を用いた相対測光により相対誤差 $\sim 1\%$ 以下の精度を達成し、表面輝度分布フィッティングコード GALFIT (Peng et al. 2002) をもちいて測光半径に含まれる母銀河成分を差し引いた。得られた変光曲線から 2003 年と 2005 年にバースト的な変光が検出され、さらに可視変光 (V バンド) に赤外交成 (K バンド) が追随している様子がはっきりと確認された。可視変光に対する赤外交成の遅延時間を Cross Correlation Function (CCF) 解析によって評価し、さらに変光遅延時間の誤差を変光情報をもちいたモンテカルロシミュレーション

(Minezaki et al. 2004; Suganuma et al. 2006) によって推定した。その結果我々は、可視赤外交成遅延時間を 2003 年のバーストに対して $19.4_{-5.8}^{+7.6}$ 日、2005 年のバーストに対して $21.4_{-4.6}^{+5.2}$ 日と決定した。

この結果と Nelson (1996) による約 10 年前の変光曲線から評価した赤外交成遅延時間 31.7 ± 6.9 との比較を行なった。遅延時間の誤差を考慮すると、遅延時間が変化していない可能性を棄却することはできないが、我々の遅延時間は約 10 日ほど短くなっている。この間に V バンド平均絶対等級は Nelson の -16.81 等から我々の -16.20 等へと 0.61 等暗くなっている。これは、降着円盤からの可視紫外光が減光するに従ってダストトラス内径が小さくなった現象を捕えている可能性がある。

MAGNUM プロジェクトによるセイファート銀河の可視赤外交成の観測と変光遅延時間の評価

我々は、MAGNUM プロジェクトにおいて測光モニターを行なっている活動銀河核の中から十分なモニター期間が得られた近傍セイファート銀河 Markarian 110, 335, 509 を選んで測光を行ない、可視と赤外交成の変光曲線を得た。これらのセイファート銀河は赤方偏移が 0.025 から 0.035 の範囲に位置し、可視絶対光度と赤外交成の遅延時間の相関図 (Minezaki et al. 2004) 上において近傍セイファート銀河とクエーサーの間をうめるような光度をもつ天体である。

2005 年度の年次報告ではこれらの活動銀河核の VK バンド間変光遅延時間の評価について報告したが、さらに遅延時間の誤差評価および母銀河成分を含まない活動銀河核絶対等級の評価を行なった。遅延時間の誤差については、観測による変光情報をもちいたモンテカルロシミュレーション (Minezaki et al. 2004; Suganuma et al. 2006) で評価した。母銀河成分の差し引きについては、銀河の表面輝度分布フィッティングコード GALFIT (Peng et al. 2002) で評価した。その結果、Markarian 110 については平均絶対等級 -20.54 等、遅延時間 61.3 ± 10.0 日、Markarian 335 については平均絶対等級 -20.76 等、遅延時間 138.2 ± 27.0 日、Markarian 509 については平均絶対等級 -21.87 等、遅延時間 89.5 ± 11.2 日という値が得られた。

Markarian 110, Markarian 335 については、Minezaki et al. (2004) による可視絶対光度と遅延時間の相関から予想される変光遅延時間とほぼ一致する結果となった。このことにより近傍セイファート銀河からクエーサーまで連続的に可視絶対光度と遅延時間の相関が成立していることが確かめられた。また Markarian 509 については相関からやや外れた遅延時間を持つことが示されており、その原因について検討中である。

低光度セイファート銀河 NGC4395 の可視赤外線日 内変光の観測

近傍活動銀河核 NGC4395 は絶対光度 $M_V \approx -11$ mag, 中心ブラックホール質量 $M_{BH} = 3.6 \times 10^5 M_\odot$ (CIV 広幅輝線の reverberation mapping による) という, セイファート 1 型銀河としてはもっとも小さい光度と中心ブラックホール質量を持つユニークな天体であり, X 線, 紫外線, 可視光において数時間以下のタイムスケールにもなる非常に速い変光現象が観測されている。

われわれは 2004 年 5 月 1 日に行なった NGC4395 活動銀河核の集中的なモニター観測により, 近赤外線 J, H バンドにおける数時間スケールでの変光現象を初めて検出した。さらにその後も長期的な可視赤外線モニター観測を続け, 数日から数ヶ月のタイムスケールにおける大きな変光現象を確認した。集中モニター観測と長期モニター観測の結果を総合して検討した結果, 数時間のタイムスケールで変光する近赤外線放射成分は NGC4395 活動銀河核の降着円盤の外側領域を起源とするものであること, いっぽうでより長いタイムスケールで変光する別の近赤外線放射成分が存在し, それはダストトーラス起源の熱放射 (放射温度は $T = 1320 - 1710\text{K}$) 成分であることがわかった。さらに可視および近赤外線放射の速い変光の波長間時間差から降着円盤の外側領域の大きさを見積もると, それはほぼ同時期に観測が行なわれた CIV 広幅輝線放射領域の大きさよりもやや小さいことがわかった (Minezaki et al. 2006, ApJ, 643, L5)。

さらに H β 輝線の reverberation mapping 観測によってこの低光度・低質量セイファート銀河 NGC4395 と通常のセイファート銀河とのスケール関係を探るため, イスラエル工科大学の Kaspi 教授, Laor 教授らとの共同観測を 2006 年 3 月に行なった。現在データ解析を継続中である。

中質量ブラックホール Seyfert 銀河 GH04 の多波 長モニター観測

銀河中心ブラックホール (BH) 質量が $M_{BH} \leq 10^6 M_\odot$ と見積もられている活動銀河核はこれまで NGC4395 と POX52 の 2 つしか知られていなかったが, SDSS DR1 のデータから新たに 4 個の候補天体が見出された (Barth et al. 2005)。これらの中質量 BH セイファート銀河を多波長モニター観測することは, AGN の内部構造や変動の様子が, 単に大質量 BH セイファート銀河のスケールダウンになっているのかそれともスケール以外の差異が存在するのか, という興味深い問題に知見をもたらすことが期待される。また中質量 BH セイファート銀河の光度は小さいので, MAGNUM プロジェクトの主目的である, 活動銀河核の可視絶対等級 M_V と可視変光に対する赤外変光の遅延時間 Δt の関係を, 低光度側に拡張することも期待される。

そこで候補天体のひとつである GH04 ($M_{BH} \sim 7.4 \times 10^5 M_\odot$) に着目し, 可視 (V バンド) と赤外 (K

バンド) のモニター観測を約 5 ヶ月に渡り行った。その結果可視変光に対する赤外変光の明らかな遅延を検出し, その遅延時間は CCF 解析によって $\Delta t = 19 \pm 4$ 日と見積もられた。ここで得られた遅延時間は過去の観測結果による $M_V - \Delta t$ 関係 (Minezaki et al. 2004) から予想される値と良く一致し, $\Delta t \propto L^{0.5}$ 関係が低光度 AGN においても成立する結果となった。

MAGNUM による遠方 1 型 AGN の観測

MAGNUM が解明を目指している宇宙膨張の制限には, より遠方の活動銀河核の観測が必要になってくる。MAGNUM では, 宇宙論的遠方を含む多数の活動銀河核の可視赤外モニター観測を継続して行っており, 順次解析を進めているところである。

宇宙論的遠方にある活動銀河核では, 可視変光に対する赤外変光の遅延時間から中心降着円盤とダストトーラス間距離を決定するに際して特別な注意が必要になる。まず赤方偏移効果により, 近赤外線バンドにおいてダスト放射が減少するのに対し降着円盤からの近赤外線放射が増加し, ダストトーラス放射変動への降着円盤成分の混入が大きくなってしまう。前述の可視赤外変動成分解析の手法は, 観測した近赤外線放射から降着円盤成分を除去しダスト放射成分を取り出す事ができるので, この遠方活動銀河核の場合にも有効であると期待できる。

そこで可視赤外変動成分解析の手法を用いた, 宇宙論的遠方での活動銀河核の構造を解明する研究を進めている。まず MAGNUM によって可視赤外時間遅延が検出された最遠方天体である 1 型活動銀河 RXJ 2138.2+0112 ($z = 0.344$) を対象に解析を進めており, まとまり次第論文として投稿する予定である。

北黄極領域における遠方 ($z \geq 1$) 活動銀河核のモニター観測

MAGNUM プロジェクトの最終的な目標は, 宇宙論的距離にある活動銀河核までの距離を測定し, H_0 , Ω_M , Ω_Λ などの宇宙論パラメーターを制限し, 暗黒エネルギーを精査することである。そのため MAGNUM 望遠鏡と赤外線天文衛星「あかり」を組み合わせた観測を実現するために, MAGNUM 望遠鏡による先行観測を推進した。

活動銀河核までの距離から宇宙論パラメーターなどを決めるには, その効果がより強く現れる, 遠方 ($z \geq 1$) の天体を利用する必要がある。そのような遠方天体から放射された近赤外線は赤方偏移のため地上からは観測が困難な中間赤外域にシフトする。そのため, 距離を決定するために可視域と組み合わせる赤外域の観測には, 赤方偏移のためスペース望遠鏡を使うことがたいへん重要である。そこで我々は MAGNUM 望遠鏡と, 2006 年 2 月に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」を併用することを構想・推進してきた。

今年度の成果としては, 可視域での先行モニター観測をさらにすすめ光度曲線のスパンを大幅に拡大で

きたことが挙げられる。赤外域での変光は可視域での変光より年単位の遅れをもって追従することが期待される。そのため先行観測によるデータは単なる試験的観測として意義があるだけでなく、今後観測する赤外域での光度曲線と比較することで可視変光に対する赤外変光の遅延時間を検出できるという点で本質的な意義を持つものである。観測天体はサーベイヤーである「あかり」でモニター観測を行えるよう、周回軌道の極にあたる北黄極領域に分布するものから選んだ。データを解析した結果、大半の天体において有望な変光を検出することができている。「あかり」は現在、液体ヘリウムが残存しており遠赤外線での観測が可能な phase-2 の状態にあり、予定された観測を順調に消化している。そして来年度には液体ヘリウムが尽き、遠赤外線の観測が出来ない phase-3 に突入するが、phase-3 は機械式冷凍機の寿命の続くかぎり長期的に継続されるため、MAGNUM と組み合わせる活動銀河核のモニター観測にたいへん適している。これらの結果・状況を受け、今後は「あかり」の phase-3 において活動銀河核のモニターを開始できるよう準備をすすめていく。

近傍セイファート銀河の H β 輝線 reverberation mapping 観測との共同観測

2004 年度末から 2005 年度始めにかけてオハイオ州立大学の Peterson 教授を中心として近傍セイファート銀河の H β 広幅輝線の reverberation mapping 観測を行なった。この観測では同手法による広幅輝線領域の大きさの測定と中心ブラックホール質量の測定の精度を大きく向上させる目的で、1 ヶ月以上の期間中ほぼ毎日の集中的な観測を行なった。MAGNUM 望遠鏡では共同観測により広幅輝線の reverberation mapping 観測の精度向上に貢献するとともに、広幅輝線領域とダストトラスの構造を精密に比較するため、同時期に可視赤外線モニター観測を行なった。

観測した近傍セイファート銀河のうち NGC4151, NGC4593, NGC5548 については観測期間中に大きな変光が検出され、可視連続光成分の変光と H β 広幅輝線の変光の時間差の測定に成功した。H β 広幅輝線放射の変光の時間差と中心ブラックホール質量はそれぞれ、 $6.6^{+1.1}_{-0.8}$ 日、 $4.57^{+0.57}_{-0.47} \times 10^7 M_{\odot}$ (NGC4151)、 3.73 ± 0.75 日、 $9.8 \pm 2.1 \times 10^6 M_{\odot}$ (NGC4593)、 $6.3^{+2.6}_{-2.3}$ 日、 $6.54^{+0.26}_{-0.25} \times 10^7 M_{\odot}$ (NGC5548) と測定された (Bentz et al. 2006, ApJ, 651, 775; Denney et al. 2006, ApJ, 653, 152; Bentz et al. 2007, ApJ accepted)。それぞれのセイファート銀河のダストトラスと広幅輝線放射領域の比較については解析を継続中である。また、次期の共同観測計画についても進行中である。

超新星の可視赤外線多波長モニター観測

超新星の可視から近赤外線までの広い波長範囲での観測は、理論的なモデル光度曲線を観測データと比較するにあたり、観測的な輻射光度曲線をより正確に求めるために重要である。そこで MAGNUM 望

遠鏡を用いて超新星の可視近赤外線多波長モニター観測を行なっている。ここではそれらについてまとめて報告する。

極超新星とされる Ic 型超新星 SN2002ap についての長期間にわたる精密な可視近赤外線多波長モニター観測の結果について、Tomita et al. ApJ, 644, 400 に報告した。その詳細については別項にて報告している。

特異な性質が見られる Ib 型超新星 SN2005bf について観測を行ない、他の観測結果と合わせ理論的モデルと比較検討し、その progenitor と超新星爆発の性質について Tominaga et al. 2005, ApJ, 633, 97 に報告している。本年度はさらに追加観測を行なった。

その他に SN2005ke, SN2006X の観測を行った。

MAGNUM による SN2002ap の観測

SN 2002ap は Ic 型に分類される超新星であるが、典型的な Ic 型超新星に比べ爆発エネルギーが大きく、大きな膨張速度をもった特異なスペクトルから hypernova と呼ばれる天体である。また Ic 型超新星はソフト GRB や XRF との関連が注目されており、近年とりわけ精力的に研究されるようになった天体のひとつである。

MAGNUM ではこの SN 2002ap を可視から近赤外線までの多波長で、爆発当初から 1 年半に渡る長期モニター観測を実行した。単一の望遠鏡、観測装置から得られたデータはこれまでに類を見ないほど高精度なものであり、SN 2002ap は過去最もよく観測された超新星のひとつとなった。観測結果からは、爆発の非対称性や全体に対する大きな近赤外線放射の寄与などが明らかになった。この観測と得られた結果を論文として出版した。

これまで超新星の近赤外線観測が不足していたこともあり、MAGNUM による高精度近赤外線データは大変貴重なデータとなっている。今回の観測で得られた良質のデータは既にいくつかの超新星、GRB の研究に利用されており、今後も関連する研究に大いに役立つものと期待される。

ガンマ線バースト残光の可視赤外線多波長観測

MAGNUM 望遠鏡を用いて活動銀河核のモニター観測以外にもいくつかの観測プロジェクトを遂行している。ここではハワイ大学との共同研究であるガンマ線バースト残光の可視赤外線多波長観測について報告する。

ガンマ線バースト現象は現在確認されているものとも遠方の銀河・クエーサに匹敵する、あるいはそれ以上の遠方の宇宙でも発生していると考えられており、宇宙初期の状態を探るための重要な手段として認識されてつづいてきた。そこでそのような遠方のガンマ線バーストを検出するために、ガンマ線バースト残光の可視赤外線多波長観測を行なっている。遠方ガンマ線バーストの場合には赤外線波長域において

短波長側のフラックスの急減(「ドロップアウト」)が存在することが期待される。MAGNUM 望遠鏡は常に可視・近赤外線撮像装置が運用状態にあるのでガンマ線バースト残光が明るいうちに観測が可能のため、この種の観測に有利である。実際に $z = 6.29$ のガンマ線バースト GRB050904 の残光をバースト発生後 ~ 0.5 日の時点で観測することに成功し、可視光の R, I バンドでは残光は検出されず赤外線の J, H, K バンドで残光が検出されるという「ドロップアウト」が期待通りに観測された (Price et al. 2006, ApJ, 645, 851)。

以降も多数のガンマ線バースト残光の観測を継続しており、the gamma ray bursts coordinates network に報告している。

銀河団による重力レンズクエーサー「SDSS J1004+4112」のモニター観測

重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 は銀河ではなく 1 つの銀河団によって重力レンズされたクエーサーであり、したがって銀河団、特に銀河団の中心部分の詳細な質量分布を直接的に構築できる非常に有用な天体である。しかしレンズ天体が銀河団であるがゆえに質量モデルの構築のためのパラメータ数が多く、通常の場合のように「レンズされた像の位置」や「レンズされた像の明るさの比」、および「レンズ現象を引き起こしている天体の位置」の情報のみからレンズ天体の質量分布を一意的に導出するのは不可能であり、より多くの(観測から得られる)制限を必要とする。理論的な見積もりによると各レンズ像(レンズされたクエーサー像)の光路差の測定値がその制限の 1 つとして有用であることが示されており、そこで我々は MAGNUM 望遠鏡を用いて各レンズ像、特により遠い位置にあるレンズ像の time delay の測定を目的として観測を行った。この time delay の値は最長でおおよそ数日から数千日程度と見積もられているため未だ確定的な観測値は得られていないが、これらの観測データは同天体のチャンドラ望遠鏡による X 線観測との比較となる可視光観測のデータとしても用いられており、各レンズ像の明るさの比が可視と X 線で大きく異なるのを示すことに成功しその結果を報告した (Ota et al. 2006, ApJ, 647, 215)。今後さらにチャンドラ望遠鏡による X 線観測の時間が得られた際にもそれに対応する可視光観測としてこの観測によるデータを用いる予定である。

Tully-Fisher 関係に及ぼす、超新星フィードバックに伴う力学応答の効果

回転する銀河の絶対光度と回転速度の間に Tully-Fisher (TF) 関係とよばれるスケールリング則があることは、よく知られている。経験則である TF 関係の物理的起源を解明することは、銀河の形成と進化のメカニズムを理解するうえできわめて重要である。

近年、CDM 宇宙モデルに基づき、いわゆる準解析的アプローチに基づく銀河形成モデル(「三鷹モデル」)

が開発されてきた。このモデルは海外のグループによるモデルでは今まで考慮されていなかったプロセスを取り入れており、初めて矮小銀河の性質を説明するのに成功している。しかし依然として TF 関係については、観測と比較して傾きが合わないことと、全体的に暗くなるという問題が残されていた。モデルにおける TF 関係の傾きは超新星フィードバックの強さに依存するので、フィードバックが強く働く低質量銀河での TF 関係は、大質量銀河のものとは傾きがずれてしまう。但しフィードバックは、観測される光度関数を説明するうえでは必要不可欠である。さらにこの問題は、諸外国の準解析的モデルでも共通しており、解決が急務とされていた。矮小銀河では重力ポテンシャルが浅いため、超新星爆発により暖められて銀河ガスが銀河外へ放出される。すなわち超新星フィードバックの割合が大きいと考えられるが、それだけ力学的応答の度合も高くなるとも予想される。従って力学応答は、低質量銀河の形成を議論する際には欠かせないプロセスであると考えられる。今回、ディスク銀河における、星形成に伴う大量の超新星爆発が誘発するガスの銀河からの放出に対する銀河の星の分布への力学的応答を考慮することにより、超新星フィードバックが強く働く矮小銀河においても TF 関係が再現可能かどうかを検証した。

我々はまず、球対称のダークハロー内に軸対称の密度分布を持つ薄いディスク状のバリオンを置いた 2 成分モデルによって、超新星フィードバックによって銀河外へ掃きだされたガスの質量と、銀河サイズおよび回転速度の変化量との関係を導いた。フィードバックの仕方としては、adiabatic な場合と instantaneous な場合の 2 通りを考慮した。次にその結果を、三鷹モデルに組み込む前段階として、CDM シナリオに基づくダークハローのスケールリング則とフィードバックの質量依存性から、TF 関係に及ぼす力学応答の効果について考察した。その結果、超新星フィードバックに伴う力学応答の大きさは、バリオンとダークマターそれぞれの密度プロファイル、および両者の質量比、サイズ比に依存していることが分った。ダークマターに対するバリオンの密度が濃いほど、力学応答は強く現れる傾向が見られた。そして TF 関係の傾きは、フィードバックの強さだけでなく、力学応答の強さにも大きく依存することが分った。力学応答が強いほど、従来のモデルからの補正は大きくなる傾向が見られた。我々が得た結果に、標準的な CDM 宇宙モデルにおけるパラメータを代入すると、低質量銀河の領域においても、TF 関係が良く再現できることが確かめられた。今年度は、さらにサイズ等級関係についても調べ、TF 関係と無矛盾に成り立つパラメータ領域があることを考察した。

超新星爆発による星形成の連鎖による化学進化を考慮した銀河進化モデル

昨今の様々な観測機器による大量の観測結果を使って、銀河進化を解釈する際には、星間物質の化学進化と恒星等の力学進化を同時に扱うモデルが必要である。従来、我々を含む様々な研究グループがおこなっ

てきた SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) による化学力学銀河進化モデルでは, 星間物質の化学進化の取り扱いが原始的な手法にとどまっていた. 従来の手法では, $10^6\text{--}7M_{\odot}$ の恒星の集団を SSP (Single Stellar Population) として扱っていたため, 化学進化の時間解像度には限界があった. そのため, 銀河形成初期に形成された重元素の少ない恒星 (主としてハロー星) をうまく再現できない. 化学進化は主に超新星爆発によって進行していくため, 超新星爆発のモデル化が必要であるが, 従来の手法では, 銀河形成初期または宇宙初期の星間物質の進化を精密にモデル化するのに必要な解像度を得ることができない.

我々は, SPH 法による化学力学銀河進化モデルに, サブグリッドモデルとして「超新星爆発による星形成の連鎖」を導入することで, 化学進化の精密化をおこなっている. 「超新星爆発による星形成の連鎖」とは, 超新星爆発によって形成された殻状構造が力学的に不安定になり次の世代の星を形成し, それが連鎖反応のように続いていくことである (Tsujimoto, Shige-yama & Yoshii 1999). SPH 法による銀河モデルでは, 星間物質を $10^6\text{--}7M_{\odot}$ の粒子 (ガス粒子) の集まりとしてモデル化する. 我々は, 上記のような星形成の連鎖反応がこのガス粒子内部で起こっていると仮定して, ガス粒子内部の星形成と化学進化をモデル化した. さらに, 統一的な銀河形成モデルを構築するために, 以下のような改良を加えた. 「超新星爆発による星形成の連鎖」による星形成と化学進化は, 星間物質の重元素量が少なく星間物質の放射冷却率が低い時に効果的である. 一方で, 星間物質の重元素量が増加し, 銀河進化が進んだ状況においては, 銀河円盤で観測されている, 星間物質密度のべき乗に比例する星形成過程が効果的になるため, 従来の化学力学銀河進化モデルでは, それを再現する星形成モデルを採用してきた. 本研究では, 二つの星形成モデルを場合を統合して, 連鎖反応による星形成化学進化が卓越する銀河進化の初期段階から, 銀河円盤が形成される銀河進化後半までを統一的にモデル化した.

結果, 銀河進化の初期に形成されたハロー星の重元素量分布を再現することに成功した. 観測されたハロー星の重元素量 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) 分布は, ヒストグラムのピーク値がおおよそ -1.6 である. 我々のモデルでは, 連鎖反応による星形成で得られたハロー星の重元素量分布のピーク値は, パラメータに応じておおよそ -1.4 から -1.8 と変化する. この対応するハロー星を選択し, それらの星の軌道離心率を計算し, 観測データより得られたハロー星の軌道離心率を比較すると, おおよそ一致する分布が得られた. ハロー星の軌道離心率は, 個々のハロー星が形成されたタイミングにおける, 銀河全体の進化に依存しており, 星形成の増加の様子が異なると, モデルにおけるハロー星の軌道離心率が多少変化することがわかってきた. このように, SPH 法による化学力学進化モデルにサブグリッドモデルを導入することで, これまでよりより詳細に銀河進化を調べることが可能になった.

低赤方偏移クエーサーにおける FeII 輝線の観測, 高赤方偏移クエーサーサーベイ

太陽系近傍空間に存在する Mg (α 元素) は II 型超新星起源であり, Fe は主に Ia 型超新星起源であると考えられている. 前身星の寿命の違いから, Mg による星間ガスの汚染が始まった時からかなり遅れて Fe の汚染が始まったはずである. この遅れ時間は 10-20 億年と評価されている. 標準的な宇宙モデル ($H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$) では, 赤方偏移 z が $z \sim 3.2\text{--}5.6$ の時代に宇宙の年齢は Fe 汚染の遅れ時間と等しくなる. したがって, ある赤方偏移を境に Fe/Mg 組成比は大きく変化 (ブレイク) することが予想される. しかし, $z = 6.4$ の時代まで遡って FeII/MgII の測定がなされているが, 明確なブレイクは見つかっていない. その理由として, (1) 観測の精度が不十分, (2) FeII/MgII 輝線は Fe/Mg 組成比以外の因子に大きく依存している, などが考えられる.

我々は, Fe/Mg 組成比以外の因子による影響を調べるために, 14 個の低赤方偏移 ($z = 0.1\text{--}0.6$) クエーサーについて, 高品位のスペクトルを取得した. そして, 紫外線から可視光 ($1000\text{--}7000 \text{ \AA}$) を含めた波長域をカバーする FeII 輝線放射スペクトルを抽出することに成功した. このように広い波長域をカバーする FeII 輝線スペクトルが観測された例はほとんどなく, 本研究で得られた結果は複雑な FeII 原子モデルをテストするための貴重な基礎データを与えるものである.

様々な観測量との相関を調べた結果, (1) FeII/MgII は輝線幅 (FWHM) と逆相関する, (2) X 線光子指数 Γ も輝線幅 (FWHM) と逆相関する, (3) FeII/MgII は SMBH (超大質量ブラックホール) 質量と逆相関する, (4) X 線光子指数 Γ も BH 質量と逆相関する, ことなどがわかった. 以上のことは, SMBH 質量が減少すると, 降着円盤からの放射スペクトルが柔らかくなり, 相対的に紫外線光子が増大し, FeII 輝線の放射を強くすると考えれば良い. 光電離コード CLOUDY によるシミュレーションによる結果もこの考えを支持している. 本研究により Fe/Mg 組成比以外の因子の正体 (SMBH 質量) がわかった意義は大きく, Fe/Mg 組成比の進化に関する研究に新たな知見をもたらした.

補償光学を用いた高赤方偏移銀河の形態の観測的研究

我々は, すばる望遠鏡の補償光学 (AO) と赤外線観測装置 IRCS を用い, 高分解撮像による高赤方偏移銀河の研究をすすめてきた. まず, 北銀極方向にある視野 1 平方分角のブランクフィールド (Subaru Super Deep Field; SSDF) において, K' バンド ($2.12\mu\text{m}$) で, 27 時間に及ぶ長時間積分を行った結果, これまでで最も深く ($K' \sim 24.7$ 等) ハッブル宇宙望遠鏡を超える高い空間分解能 (FWHM ~ 0.18 秒) を持つデータを取得することに成功した. この観測で得られた $z \leq 3$ の銀河の光度プロファイルのフィッティングから, 検出された高赤方偏移銀河のサイズと形態のパラメータ (Sersic index) を決定した. AO による高空間分解能, 高感度により, $z = 2\text{--}3$ でもこのような

ことが初めて可能となった。 $z \sim 3$ までの銀河のサイズ光度関係を、観測的バイアスを考慮した近傍銀河のサンプルと比較し、その表面輝度の進化を検証した結果、サイズ光度関係上で、 $z \sim 3$ までのほとんどの銀河は、近傍銀河のサンプルの取り得る範囲に分布していることが分かった。ただし、今回のサンプル銀河の中で、比較的星質量の重い($\sim 10^{10} M_{\odot}$) $z \geq 3$ の3つの銀河については、近傍銀河のサンプルよりも、同光度で比較するとサイズが小さく、表面輝度の進化があるのではないかと考えられる。しかし、統計量が十分でないため、今後のより広域での観測が期待される。

また秋山を中心として、同じくすばる AO を使って、 $z \sim 3$ の明るい星形成銀河であるライマンブレイク銀河の K' バンドにおける形態の詳細な解析を行った。観測したライマンブレイク銀河は、星質量が $10^{10} M_{\odot}$ 以上のものが多く、 $10^{10} M_{\odot}$ 以下の中小質量銀河を多くサンプルした SSDF での観測成果と相補的なものである。この結果、 $z < 1$ では楕円銀河の様な de Vaucouleurs 則で表される銀河と、ディスク銀河の様な exponential 則で表される銀河が混在しているのに対し、 $z \sim 3$ のライマンブレイク銀河の形態はディスク銀河が主であることが分かった。また、その表面輝度は現在の銀河よりも明るく、表面星質量密度が $z = 0 - 1$ の銀河と比べて非常に高いことを明らかにした。この結果は、これら大質量の星形成銀河が、 $z = 1 - 3$ の間で急速に進化したことを示唆している。

トランジット惑星系における高精度モニター観測による Rossiter-McLaughlin 効果の観測

トランジットを起こす太陽系外惑星系では、惑星が公転周期ごとに主星の前面を通過する。このとき惑星が主星の自転による吸収線の広がり隠してしまうため、トランジット中の主星の視線速度は見かけ上ケプラー運動によるものからずれて観測される。この効果は古くから食連星の観測によって知られており、発見者の名前にちなんで Rossiter-McLaughlin 効果(以下 RM 効果: Rossiter 1924; McLaughlin 1924)と呼ばれている。この RM 効果による視線速度のずれは、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角 λ などのパラメータを用いて記述することができる(Ohta, Taruya, & Suto 2005)。この λ という量は惑星の形成と進化の過程を反映しており、hot Jupiter がどのように形成されたのかについて手がかりを与えてくれる貴重な観測量である。我々のグループではトランジット惑星系での RM 効果の検出を目指し、マウイ島・ハレアカラにあるマグナム望遠鏡/MIP とハワイ島・マウナケアにあるすばる望遠鏡/HDS またはケック望遠鏡/HIRES を同時に用いて、2006年に2つのトランジット惑星系 TrES-1 と HD 189733 のトランジット観測を行った。その結果、我々は2つの惑星系でそれぞれ世界で初めて RM 効果を検出し、 λ の制限をつけることに成功した。本研究による観測は MAGNUM 望遠鏡および MIP によるトランジット惑星系の初めての観測であった。MAGNUM の高

精度・高感度のモニター能力を活かし、いずれの観測においても可視光波長域の V バンドで有意な変光を検出した。その結果、光度曲線における減光の中心、深さなどのパラメータを決定でき、すばる望遠鏡/HDS による分光モニターの結果と組み合わせることで、RM 効果のモデリングの精度を大きく高める効果を果たした。MAGNUM による観測では MIP の特性を活かし、赤外線波長域の K バンドでも同時にモニターを行い、有意な減光を検出した。今後の課題として、可視光波長域と赤外線波長域での同時モニターというユニークな手法の活用が期待される。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T.: HE 1327-2326, an Unevolved Star with $[Fe/H] < -5.0$. I. A Comprehensive Abundance Analysis; *ApJ*, **639**, 897-917, (2006)
- [2] Bentz, M. C., Denney, K. D., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J., Ghosh, H., Horne, K., Kuehn, C., Minezaki, T., Onken, C. A., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Pronik, V. I., Richstone, D. O., Sergeev, S. G., Vestergaard, M., Walker, M. G., & Yoshii, Y.: A Reverberation-based Mass for the Central Black Hole in NGC 4151; *ApJ*, **651**, 775-781, (2006)
- [3] Denney, K. D., Bentz, M. C., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J., Ghosh, H., Horne, K. D., Kuehn, C., Minezaki, T., Onken, C. A., Pronik, V. I., Richstone, D. O., Sergeev, S. G., Vestergaard, M., Walker, M. G., & Yoshii, Y.: The Mass of the Black Hole in the Seyfert 1 Galaxy NGC 4593 from Reverberation Mapping; *ApJ*, **653**, 152-158, (2006)
- [4] Minezaki, T., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Enya, K., Suganuma, M., Tomita, H., Koshida, S., Yamauchi, M., & Aoki, T.: First Detection of Near-Infrared Intraday Variations in the Seyfert 1 Nucleus NGC 4395; *ApJ*, **643**, L5-L8, (2006)
- [5] Ota, N., Inada, N., Oguri, M., Mitsuda, K., Richards, G. T., Suto, Y., Brandt, W. N., Castander, F. J., Fujimoto, R., Hall, P. B., Keeton, C. R., Nichol, R. C., Schneider, D. P., Eisenstein, D. E., Frieman, J. A., Turner, E. L., Minezaki, T., & Yoshii, Y.: Chandra Observations of SDSS J1004+4112: Constraints on the Lensing Cluster and Anomalous X-Ray Flux Ratios of the Quadruply Imaged Quasar; *ApJ*, **647**, 215-221, (2006)
- [6] Price, P. A., Cowie, L. L., Minezaki, T., Schmidt, B. P., Songaila, A., & Yoshii, Y.: Cosmologi-

- cal Implications of the Very High Redshift GRB 050904; *ApJ*, **645**, 851-855, (2006)
- [7] Suganuma, M., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Tomita, H., Aoki, T., Koshida, S., & Peterson, B. A.: Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies; *ApJ*, **639**, 46-63, (2006)
- [8] Tomita, H., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Suganuma, M., Aoki, T., Koshida, S., & Yamauchi, M.: Multiple Regression Analysis of the Variable Component in the Near-Infrared Region for Type 1 AGN MCG +08-11-011; *ApJ*, **652**, L13-L16, (2006)
- [9] Tomita, H., Deng, J., Maeda, K., Yoshii, Y., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Suzuki, T., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Aoki, T., Enya, K., & Suganuma, M.: The Optical/Near-Infrared Light Curves of SN 2002ap for the First 1.5 Years after Discovery; *ApJ*, **644**, 400-408, (2006)
- [10] Tsuzuki, Y., Kawara, K., Yoshii, Y., Oyabu, S., Tanabé, T., & Matsuoka, Y.: Fe II Emission in 14 Low-Redshift Quasars. I. Observations; *ApJ*, **650**, 57-79, (2006)
- [11] Winn, J. N., Johnson, J. A., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., Henry, G. W., Roussanova, A., Holman, M. J., Enya, K., Narita, N., Suto, Y., & Turner, E. L.: Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733; *ApJ*, **653**, L69-L72, (2006)
- [12] Bentz, M. C., Denney, K. D., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J., Ghosh, H., Horne, K. D., Kuehn, C., Minezaki, T., Onken, C. A., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Pronik, V. I., Richstone, D. O., Sergeev, S. G., Vestergaard, M., Walker, M. G., & Yoshii, Y.: NGC 5548 in a Low-Luminosity State: Implications for the Broad-Line Region; *ApJ*, (2007) in press
- [13] Narita, N., Enya, K., Sato, B., Ohta, Y., Winn, J. N., Suto, Y., Taruya, A., Turner, E. L., Aoki, W., Tamura, M., Yamada, T., & Yoshii, Y.: Measurement of the Rossiter-McLaughlin Effect in the Transiting Exoplanetary System TrES-1; *PASJ*, (2007) in press
- [14] Suganuma, M., Kobayashi, Y., Okada, N., Yoshii, Y., Minezaki, T., Aoki, T., Enya, K., Tomita, H., & Koshida, S.: The Infrared Cloud Monitor for the MAGNUM Robotic Telescope at Haleakala; *PASP*, (2007) in press
- (会議集録)
- [15] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T.: An abundance study of the most iron-poor star HE1327-2326 with Subaru/HDS; Proc. of AIP Conference **847** "Origin of Matter and Evolution of Galaxies", 53-58, (2006)
- (サーキュラー)
- [16] Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L. L., Kakazu, Y., & Yoshii, Y.: GRB 060510b: NIR observations; GRB Coordinates Network, Circular Service, **5099**, (2006)
- [17] Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L. L., Kakazu, Y., & Yoshii, Y.: GRB 060428b: optical afterglow candidate; GRB Coordinates Network, Circular Service, **5019**, (2006)
- [18] Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L. L., Kakazu, Y., & Yoshii, Y.: GRB 060306: MAGNUM observations.; GRB Coordinates Network, Circular Service, **4854**, (2006)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] Suganuma, M., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Tomita, H., Aoki, T., Koshida, S., & Peterson, B. A.: Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies; The Central Engine of Active Galactic Nuclei, Xi'an, China, 2006/10/16-21.
- [20] Narita, N., Enya, K., Sato, B., Ohta, Y., Taruya, A., Suto, Y., Winn, J. N., Turner, E. L., Aoki, W., Tamura, M., Yamada, T., & Yoshii, Y.: Simultaneous Spectroscopic & Photometric Observations of a Transit of TrES-1b; The Third Workshop on Development of Extrasolar Planetary Science, Tokyo, Japan, 2006/12/11-13.
- (国内会議)
- 学会発表
- [21] 峰崎 岳夫 (東京大物理), 千葉 征司 (東北大理), 井上 開輝 (近畿大理工), 柏川 伸成 (国立天文台), 片ざ 宏一 (宇宙航空研究開発機構): 「多重像クエーサの間赤外撮像に基づく冷たい暗黒物質の性質 (II)」日本天文学会 2006 年秋季年会, (九州国際大学, 2006 年 9 月)
- [22] 坂田 悠, 峰崎 岳夫, 吉井 譲, 富田 浩行, 青木 勉 (東大天文センター), 小林 行泰, 菅沼 正洋 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (JAXA/ISAS), 越田 進太郎 (東大理天文): 「MAGNUM プロジェクト (1) 中質量ブラックホール Seyfert 銀河 GH04 の多波長モニター観測」日本天文学会 2006 年秋季年会, (九州国際大学, 2006 年 9 月)

- [23] 富田 浩行, 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 越田 進太郎, 山内 雅浩 (東大理), 小林 行泰, 菅沼 正洋 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (宇宙機構), B. A. Peterson(ANU): 「MAGNUM プロジェクト (2) I 型 AGN 可視赤外変動成分解析によるダストトランスの研究」 日本天文学会 2006 年秋季年会, (九州国際大学, 2006 年 9 月)
- [24] 成田 憲保 (東大), 塩谷 圭吾 (宇宙研), 佐藤 文衛 (岡山観測所), 太田 泰弘, 樽家 篤史, 須藤 靖 (東大), Loshua. N. Winn(MIT), Edwin L. Turner(Princeton), 青木 和光, 田村 元秀, 山田 亨 (国立天文台), 吉井 讓 (東大): 「トランジット惑星系 TrES-1 における初めての Rossiter 効果の観測結果」 日本天文学会 2007 年春季年会, (東海大学, 2007 年 3 月)

一般講演

- [25] 吉井 讓: 「MAGNUM プロジェクトの現状」 第 5 回宇宙における時空・物質・構造の進化研究会, (鬼怒川, 2006 年 9 月 3-5 日)
- [26] 小山 博子, 長島 雅裕, 吉井 讓: 「ディスク銀河の力学応答と Tully-Fisher 関係」 滞在型研究会 準解析的手法による銀河形成研究の展望, (長崎大学, 2006 年 12 月 3-8 日)
- [27] 峰崎 岳夫: 「First Detection of Near-Infrared Intraday Variations in the Seyfert 1 Nucleus NGC4395」 第 5 回宇宙における時空・物質・構造の進化研究会, (鬼怒川, 2006 年 9 月 3-5 日)
- [28] 峰崎 岳夫: 「多重像クエーサの中間赤外線撮影に基づく冷たい暗黒物質の性質」 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部赤外線天文グループコロキウム, (宇宙科学研究本部 (神奈川), 2006 年 10 月 26 日)
- [29] 峰崎 岳夫: 「MAGNUM プロジェクト現状報告」 第 6 回宇宙における時空・物質・構造の進化研究会, (伊豆高原, 2007 年 2 月 18-20 日)

4 サブミリ波観測

——ミリ波・サブミリ波による分子雲の形成・進化の探究—— (山本(智)・岡)

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲(星間雲)が存在している。星間雲の中でも密度が比較的高いものが星間分子雲で、恒星が形成される場所として銀河系における物質循環の主要経路にあたる。本研究室では、星間分子雲に存在する原子・分子に着目して、電波望遠鏡による観測的研究を行っている。これらを通して、星間分子雲の構造、形成、進化、および星形成を物質的視点から研究している。

サブミリ波、テラヘルツ領域(波長1 mmから0.1 mm)は天文学において十分に開拓されていない波長域である。本研究室では、わが国ではじめてサブミリ波望遠鏡(口径1.2 m)を富士山頂に設置して観測を行ってきた。さらに、天文学教育研究センターと国立天文台が中心となって推進しているASTE(Atacama Submillimeter Telescope Experiment)にも参加するとともに、わが国が北米、欧州とともに建設しているALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)計画にも協力している。

一方、テラヘルツ帯での観測を開拓するために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ(HEB)ミクス素子の開発を行っている。研究室内に専用の素子製造装置を導入し、ミクス素子の開発研究を進めている。この素子を用いて、1.47 THzにある窒素イオンの微細構造スペクトル線($^3P_1 - ^3P_0$)の広域観測を実現することで、銀河系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、プラズマ相が星間分子雲の形成と進化に与える役割を解明する。この研究を通してテラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

これらの研究とともに、国内外の電波望遠鏡を用いて星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成にともなう化学進化に着目し、種々の分子スペクトル線による観測を展開している。また、岡らは銀河系中心部の観測的研究を行っている。

4.1 富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡(口径1.2 m)は1998年に富士山頂に設置してから7シーズンにわたる運用で、かつてない規模での中性炭素原子サブミリ波スペクトル線($^3P_1 - ^3P_0$, 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$, 809 GHz)の観測を展開してきた。その結果を一酸化炭素分子の分布と比較することにより、星間分子雲の形成、進化を研究してきた。この望遠鏡は2005年8月に閉鎖し、現在、撤去作業を行っている。2006年度は望遠鏡下部機器室を解体撤去した。[2]

4.2 HEB ミクス素子の開発

サブミリ波帯では、ヘテロダイナ検出素子としてSIS(superconductor - insulator - superconductor)ミクス素子が広く用いられてきた。しかし、このミクスでは周波数が超伝導ギャップのエネルギーを超えると、急激に性能が低下する。たとえばNbを用いたものでは750 GHzが限界の周波数となる。従って、テラヘルツ帯の観測のためには新しいミクス素子の開発が求められる。

本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ(HEB)ミクス素子の開発を進めている。HEBミクス素子は電磁波の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鋭敏に検知するものである。そのためには、素子内に生じた熱電子を中間周波信号の周期よりも速く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。熱電子の冷却方法として、(1)拡散によって電極へ逃がす方法(拡散冷却)と、(2)フォノンとの相互作用を介して基板にエネルギーを逃がす方法(格子冷却)の2つの方法がある。我々はNbを用いた拡散冷却型のHEBミクス素子と、NbTiNを用いた格子冷却型のHEBミクス素子の開発を行っている。

エッチング装置の導入と立ち上げ

HEB素子製作の自由度を広げるために、武田先端知クリーンルームにICPドライエッチング装置を導入した。初期性能確認実験として、CF₄によるNbのエッチングを行ったところ、エッチングレートは100 nm/min程度と妥当であり、再現性も良いことが確認できた。実際の素子製作工程においては、マイクロブリッジ部分でNb-Auの2層薄膜から上部のAuだけ削り取る必要がある。ガスをArのみにすることで、選択比を10:1以上確保し、かつ、エッチングレートは50 nm/min程度を得た。本装置では溝幅が0.2 μm程度になっても十分に直線的に掘ることができ、幅も設計通りに制御できることが確認された。

新しい素子製作プロセス

これまでのリフトオフのみで行う素子製作では、NbのパターンとAuのパターンを別々に形成していたので、成膜したNbの表面に自然酸化膜の層が形成されてしまう問題があった。この表面酸化を抑制するため、Nbの成膜後に真空装置から取り出すことなくAuを成膜することにした。この新プロセスでは、Nbの上にあるAuをエッチングで完全に除去する必要がある。その際のオーバーエッチを防ぐためにNbとAuの間に2 nm程度の薄いTi層を挟み、エッチングのストッパーとした。TiはAuとNbの密着性を高める効果も期待される。このような方法で作成したNbブリッジの面抵抗は、15 nmの膜厚で20 Ω/sq.程度となり、他のグループのものと比較しても、良い膜質を得られていたことが確認された。その結果、素子のインピーダンスは理想値付近に制御することが可能となった。[21][23]

Nb HEB 素子の評価

ミクサとしての性能評価は、800 GHz 帯で行った。導波管マウントに素子を装着し、小型 GM 2 段冷凍機を用いたデュワーで冷却した。当初の性能評価試験では、Nb の膜厚が 40 nm の素子を用い、中間周波出力信号 (IF : 1.5 GHz) が局部発振信号 (LO : 800 GHz) の ON-OFF で 4 dB 以上の反応を示したものの、素子のインピーダンスが低すぎたため定在波の影響が強く現れ、ミクサ性能の測定には至らなかった。そこで、Nb の厚みを 15 nm まで薄くした素子を用いて性能評価を行ったところ、ミクサとしての性能を確認でき、Y-factor 0.15 dB (受信機雑音温度 $T_{rx} = 6500$ K(DSB)) を得た。この素子は、冷却試験 5 回を行ってもまったく劣化せず、耐久性にも優れていることもわかった。機械式冷凍機を用いた実用的な環境で、ミクサとしての動作を確認できたことは、将来的に HEB 素子を用いた観測を行う上で意義が大きい。

その後、IF アンプをアイソレーター付きのものに変更することで、性能向上を図った。それにより、IF 帯域での定在波はなくなり、広い帯域で性能を得られるようになった。現在では Y-factor 0.3 dB ($T_{rx} = 3000$ K(DSB)) の性能を得ている。Nb を用いた HEB ミクサで 4.2 K 冷却時における性能としてはほぼ世界的水準に達したと言える。[29]

NbTiN 薄膜の T_c 測定

NbTiN はバルク状態の超伝導転移温度 (T_c) が 16 K 程度と Nb よりも高く、また、石英基板上に成膜できるので、THz 帯 HEB ミクサ素子の超伝導材料として注目されている。本研究では NbTiN を薄膜化したときの T_c を系統的に調べた。測定にあたっては、GM2 段冷凍機を用いた冷却デュワーを用いた。温度と抵抗のそれぞれのモニターを GPIB を介して計算機で読み取ることができるようにし、転移温度付近で連続的な温度-抵抗 曲線を測定できるようにした。NbTiN 薄膜は NbTi 合金をターゲットにして、 $N_2 + Ar$ バッファガスによる反応性スパッタで成膜する。その T_c は膜厚の減少に伴い低くなる傾向にあるが、膜厚によって N_2 分圧を最適化することで、その減少を極力抑えることができることがわかった。その結果、6 nm で 9.6 K の T_c を得た。これは NbTiN 薄膜の T_c としては非常に良好な値であり、これを用いてミクサ素子製作を行った。[22]

NbTiN HEB の評価

NbTiN 薄膜を用いて 800 GHz 帯の格子冷却型 HEB ミクサ素子を製作した。素子の設計および製作プロセスは Nb を用いた HEB ミクサ素子の方法を踏襲して進めた。その際、NbTiN 薄膜の上に金を成膜すると剥離してしまう現象が起こった。この問題は NbTiN と金の間にバッファ層として Ti を挿入することで解決した。また、厚さ 10 nm 以下の NbTiN 薄膜は、基板洗浄に用いる水酸化ナトリウム水溶液や成膜前の Ar 逆スパッタによってエッチングを受けてしまうことが判明した。それらの影響を調べて製

作プロセスにフィードバックすることにより、HEB ミクサ素子を安定して製作できるようになった。製作した HEB 素子は液体ヘリウムによる冷却試験において正常な直流電気特性を示した。更にその素子を機械式冷凍機デュワーに搭載して行った冷却試験においてもその電気特性は保たれることが確認された。引き続いてミクサとしての性能測定を行ったところ、hot-cold(77 K) の切り替えに対して最大で 0.65 dB の応答を示した。これは受信機雑音温度に換算すると $T_{rx} = 1300$ K 程度に相当し、我々の製作した HEB ミクサがこれまでに報告されている実験例と比べても遜色の無いものであることが示された。以上の実験結果は 3 回の冷却サイクルに対して再現性が見られ、耐久性も確認できた。[28]

NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

名古屋大学の前澤氏、筑波大学の山倉氏、中井氏と共同で、NbTiN 薄膜を用いた準光学 HEB ミクサの開発に取り組んでいる。準光学ミクサでは誘電体レンズを用いて、電磁波をミクサに集光する。そのためのミクサマウントを製作し、機械式冷凍機による冷却試験を行なった。懸念されていた機械式冷凍機の振動によるボンディングのはずれ、ミクサ素子の破損、誘電体レンズのひび割れ、熱接触不良などの問題は発生しないことがわかった。また、ミクサマウントに NbTiN 薄膜のみを成膜したテスト素子を装填し、外部から 250GHz の信号を入射したところそのテスト素子の電流電圧特性に変化が見られた。このことから冷却した状態でも誘電体レンズにより電磁波が集光されていることが確認できた。

4.3 星形成領域の観測的研究

大質量星形成領域における複雑な有機分子:NGC2264 における $HCOOCH_3$ の分布

大質量星形成領域において、 $HCOOCH_3$ や C_2H_5CN などの複雑な有機分子は、ホットコアを特徴づける分子として知られている。昨年度、我々は非常に若い中小質量星形成領域である NGC1333IRAS4B からこれらの分子を検出し (Sakai et al. 2006)、複雑な有機分子が中小質量原始星の進化のごく初期段階から存在していることを明らかにした。そこで、改めて近傍の大質量星形成領域において $HCOOCH_3$ 分子の振舞いを調べたところ、NGC2264 においてこれと似た傾向を見出した。NGC2264 において、最も明るい IRS1 方向からは複雑な有機分子が検出されなかったのに対して、IRS1 よりも若い領域であるといわれている MMS3 方向から $HCOOCH_3$ 分子を検出した。したがって、進化の速度が速い大質量原始星の進化段階を調べる上で、複雑な有機分子が良い指標となる可能性が出てきた。しかし一方で、ミリ波干渉計による観測で、 $HCOOCH_3$ 分子の分布のピークは、MMS3 の 3 mm 連続波ピークからわずかにずれていることも明らかになった。これは Orion-KL における "hot core" と "compact ridge" の関係によく似ており、星

形成領域における複雑な有機分子の振る舞いを明らかにする上で非常に重要な例である。[6][8] [12][13]

^{13}C 同位体種を用いた CCS と CCCS の生成メカニズムの解明

炭素鎖分子 CCS のスペクトル線は分子雲コア進化の初期過程を調べるために広く用いられている。しかし、CCS の生成メカニズム自体は未だによくわかっていない。以前、我々は ^{13}CCS と C^{13}CS を暗黒星雲コア TMC-1 で探索した (野辺山 45 m, 1999-2000 年, 池田ら)。その結果、 $\text{C}^{13}\text{CS}(J_N = 3_2 - 2_1)$ は検出できた一方で、 ^{13}CCS は検出されなかった。これは、CCS の生成過程において、2つの炭素原子が非等価であることを意味する。また、 ^{13}CCS の存在量は星間空間における $[^{13}\text{C}]/[^{12}\text{C}]$ 比よりも遥かに低く、 ^{13}CCS が希釈されていることが示唆される。分子雲コアでこのような例は他にはなく、もしこれが正しければ星間化学の分野で重要な発見である。

そこで、この結果を別の回転輝線 ($J_N = 2_1 - 1_0$) でも確認するとともに、 ^{13}CCS の検出を目指してアメリカ国立電波天文台の GBT (口径 100 m) を用いて高感度観測を行った。その結果、 C^{13}CS の輝線強度は ^{13}CCS の 4.2 倍もあることを示した。さらに、別の暗黒星雲コアである L1521E でも ^{13}CCS が有意に少ないことを示し、この現象が天体に固有のものでないことを確認した。従って、これまで提案されている様々な生成ルートの中で、 ^{13}C 同位体種の存在量の非対称性を説明できる $\text{CH} + \text{CS} \rightarrow \text{CCS} + \text{H}$ 反応が最も有力な主要生成経路として絞り込まれた。その場合、 ^{13}CCS の希釈の原因は ^{13}CH の希釈によることになるが、これは CO でよく知られている光解離の self-shielding による効果と考えられる。さらに、CCS に加えて CCCS の同位体種の観測も行い、 $^{13}\text{CCCS}$ でも希釈が起こっていることを示した。もし、CCCS が $\text{CH} + \text{CCS}$ で生成されているならば、 $^{13}\text{CCCS}$ の希釈は ^{13}CH の希釈で自然に説明される。これらの結果から、CH を介した C_nS の成長という新しい炭素鎖分子の生成過程が見えてきた。

小質量原始星 L1527 における炭素鎖分子高励起輝線の検出

小質量原始星 L1527 におけるホットコア分子の観測の過程において、我々は偶然、炭素鎖分子 H_2CCCS の高励起輝線 ($J = 10 - 9, E_u = 24 \text{ K}$) を検出した (野辺山 45 m 望遠鏡)。これまでこの分子は、TMC-1 など星形成を伴わない分子雲で検出されていたが、星形成領域でこの分子が検出されたのは初めてである。 C_4H_2 の様々な遷移の観測から、その回転温度は $12.3 \pm 0.8 \text{ K}$ と計算され、TMC-1 に比べて非常に高いことがわかった。また、その柱密度も TMC-1 と比べて $1/5$ と、星形成領域としては異常に多いことがわかった。さらに、他の炭素鎖分子の観測を行ったところ、 $\text{C}_4\text{H} (N = 9 - 8, E_u = 21 \text{ K})$ や $e\text{-C}_3\text{H}_2 (4_{3,2} - 4_{2,3}, E_u = 29 \text{ K})$, $l\text{-C}_3\text{H}_2 (4_{1,3} - 3_{1,2}, E_u = 23 \text{ K})$, $\text{CH}_3\text{CCH} (J = 5 - 4, K = 2, E_u = 41 \text{ K})$ など、多くの炭素鎖分子高励起輝線を検出した。その中で

も特に、 C_4H は $1.5 \text{ K} (T_{\text{MB}})$ という非常に強い強度で検出された。そこで、 C_4H のプロフィールマップを作成したところ、原始星方向でその積分強度が最大になっていることが明らかになった。しかも、中心星に向かってその線幅が 0.3 km/s から 0.6 km/s と太くなっていく現象が見られ、 C_4H が中心星にむかって落ち込んで行くガスの中に存在している可能性が高いことがわかった。

一般に炭素鎖分子は、炭素がまだ CO に固定される前の非常に若いフェーズでのみ豊富に存在し、星形成が始まる段階では急速に存在量が減少すると考えられている。しかし、もし、L1527 原始星の収縮のタイムスケールが他の小質量星形成領域に比べて短く自由落下に近いとすると、化学進化と物理進化の相対的な速さの違いによってこのようなことが起こる可能性がある。さらに、原始星付近で CH_4 が星間塵から蒸発し、炭素鎖分子が再生成されている可能性も考えられる。従って、これらの炭素鎖分子高励起輝線の起源の解明は、星間化学だけでなく星形成の研究においても重要であると考えられる。

小質量原始星 L1527 における陰イオン C_6H^- の検出

昨年 12 月、暗黒星雲 TMC-1 と晩期型星 IRC+10216 で、初めて陰イオン分子 C_6H^- の存在が明らかになった (McCarthy et al. 2006)。これに引き続き、我々は、L1527 原始星から C_6H^- の検出に成功した。これは星形成領域における初めての陰イオンの検出という意味だけでなく、長い炭素鎖を持つ分子が、通常は存在しないと考えられてきた星形成領域に豊富に存在していたという点でも驚きであった。この結果は、L1527 原始星が化学進化の速度よりも速い収縮によって作られた可能性を支持する。一方、L1527 における $[\text{C}_6\text{H}^-]/[\text{C}_6\text{H}]$ 比が、TMC-1 に比べて約 10 倍も高いことは特に注目に値する。L1527 では C_6H^- は TMC-1 よりも高密度な領域に存在していると考えられ、高密度領域における陰イオンの役割の重要性が浮き彫りになった。

L1527 原始星におけるラインサーベイ

最近、観測の高感度化に伴い、低質量星形成領域の化学が新しい展開を見せている。その代表的なものは、 HCOOCH_3 をはじめとする複雑な有機分子の検出、2 個以上の重水素原子を含む分子の検出、および炭素鎖分子の高励起輝線の検出である。特に、小質量原始星 L1527 での炭素鎖分子 C_4H_2 の高励起輝線の検出は、炭素鎖分子に関わる新しい星間化学現象として注目される。そこで我々は、低質量星形成領域の化学組成の多様性とその起源を探究する目的で、L1527 における高感度ラインサーベイをスタートさせた。本年度観測できた帯域は 1 GHz のみに限られたが、高感度の観測を行った結果、 C_mH_n 系の炭素鎖分子や、その ^{13}C 同位体、 HC_nN 系分子の非常に高励起な輝線など、多くの分子輝線を検出することができた。これらの輝線の強度はほとんどが 10 mK から 100 mK であったため、従来の観測に比べて 1 桁高い感度を実現したことで初めて検出が可能となった。このように今回の観測から、先入観にと

らわれない無バイアスサーベイ、特に、ミリ波帯におけるサーベイの重要性が再認識された。

大質量星形成領域における重水素濃縮

星間分子雲中の分子には、重水素原子が多く含まれることが知られており、重水素濃縮と呼ばれる。水素と重水素の宇宙元素存在度比が 10^{-5} 程度であるのに対して、分子中での存在比は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ という高い割合になっている。その中でも、低質量星形成領域では重水素濃縮度が特に高く、大質量星形成領域では低い傾向が見られているが、その原因としては、星形成を起こす前のコアの温度の違いを反映していることが考えられる。しかし、現在のところ、低質量星形成領域と大質量星形成領域における重水素濃縮度の違いを系統的に調べた例はほとんどない。そこで、おもに気相反応で生成される DNC/HNC 及び HDCS/H₂CS に着目し、野辺山 45m 望遠鏡による観測を進めている。

4.4 銀河系中心部の観測的研究

クエーサーやセイファート銀河に代表される活動銀河核 (AGN) からの強烈な放射は、銀河中心にある 10^{6-10} 太陽質量もの巨大ブラックホールへの質量降着に起因する。そのような巨大ブラックホールは大部分の銀河中心に存在することが、最近の研究から明らかになってきた。そのうち殆どの銀河中心核は、活動性の低い、低光度 AGN と呼ばれる範疇に属する。そして、私たちの銀河系の中心核 Sgr A* もまた、370 万太陽質量の巨大ブラックホールを擁する低光度 AGN である。規模にして少なくとも 10 桁に渉る中心核活動性の多様性は、巨大ブラックホールの形成過程とともに、銀河物理学における重要かつ未解決の問題である。

銀河系構造の一部としての中心部分は、星の強い集中と大量の星間物質の存在によって特徴付けられる特異な領域である。銀河系中心核から半径数百パーセクの領域は Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれ、銀河系円盤部と比較して高温・高密度の分子ガスが広がっている。同領域には、衝撃波起源の分子が空間的に広がって分布する事が知られている。このように特異な星間ガスの物理状態・化学組成の起源もまた未解明である。

我々はこの銀河系中心領域に対して、ミリ波・サブミリ波分子輝線による高分解能・広域サーベイ観測というアプローチを取り、同領域の特異な物理状態・化学組成の起源および中心核への質量供給過程の解明を目指している。さらに、これを一つのケーススタディとして、一般の銀河系中心核活動性の包括的理解と、中心核巨大ブラックホールの形成・進化過程の解明を目指している。なお本研究は、国立天文台 ALMA 推進室の長谷川哲夫氏、東京大学理学部天文学教育研究センターの亀谷和久氏、田中邦彦氏らとの共同研究である。

高速度コンパクト雲の同定

以前岡らは、国立天文台野辺山の 45m 電波望遠鏡によって取得した一酸化炭素 (CO) の $J=1-0$ 回転輝線 (115 GHz) による広域サーベイデータ内に、速度幅が非常に広く空間的にコンパクトな分子雲を多数発見した (高速度コンパクト雲; High-velocity Compact Cloud; HVCC)。これはそれぞれ局所的な爆発現象によって加速された分子ガス成分と考えられ、同領域の星間ガスの特異性を解明する手がかりであると我々は考えている。

今回永井らは、この CO $J=1-0$ データセットに対して、均一な条件下で系統的な HVCCs の同定作業を行った。自らの開発した専用の計算コードによって、速度幅 $\geq 50 \text{ km s}^{-1}$ 、直径 $\leq 5 \text{ pc}$ の条件下で 84 個の HVCCs を同定し、それらの統計的性質を調べた。同定された HVCCs の運動エネルギーは、 10^{49-52} erg の広範囲に渉り、大部分は単一の超新星爆発では賅えない規模のものであった。この事は、特に energetic な HVCCs の位置には大質量 (10^{5-6} 太陽質量) の星団が存在し、度重なる超新星爆発によって星間ガスが加速されているものと推測される。このような銀河系中心核近傍の大質量星団は、中間質量ブラックホールの母胎となる可能性が指摘されており、それらが中心核へ沈降することによって中心核ブラックホールが成長するというシナリオが提唱されている。

ASTE 望遠鏡による広域サーベイ

我々は、衝撃波で加熱された分子ガス成分を銀河系中心の広い領域から効率的に検出する目的で、Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) を用いた CO $J=3-2$ 輝線 (346 GHz) による広域サーベイ観測を進めている。この輝線は $J=1-0$ 輝線に比べて、より高温の分子ガスに対して感度を持つ。これまで 2 シーズンの観測を行い、15908 点のスペクトルを取得した。サーベイ領域は、銀経 -1° から $+1.7^\circ$ 、銀緯 $\pm 0.3^\circ$ の範囲にわたり、CMZ の主要な部分をほぼ完全にカバーしている。[3][9] [14][15]

・高励起ガスの検出とその分布 CO $J=3-2/J=1-0$ 強度比 ($R_{3-2/1-0}$) が 1.5 を超える、高励起ガス領域を多数見出した。Sgr A、高速度コンパクト雲 CO 1.27 ± 0.01 , CO $-0.41 \sim 0.23$ 、超新星残骸 G 0.9 ± 0.1 それぞれの周辺では、空間的にやや広がった高励起ガス成分が検出された。それ以外にも、CMZ 全域にわたって空間的にコンパクトな高励起ガス領域 (ホット・スポット) を多数検出した。これらホット・スポットの約半数は既に同定されている HVCCs と一致し、速度幅等の特徴も含め衝撃波起源が疑われるものが全体の 88% にのぼる。この事は、HVCCs の起源を超新星爆発とした我々の推測を支持するものである。[18]

・物理状態分布の把握 CO $J=3-2$, $J=1-0$, $^{13}\text{CO } J=1-0$ の 3 輝線データセットを用いて、Large Velocity Gradient (LVG) モデルに基づいた回転準位励

起状態の解析を行い、CMZにおける物理状態の大局的分布を導くことに成功した。計算には最小二乗法を用い、最適解の探索には最急降下法 (steepest descent method) を採用した。3つの輝線が 1σ 以上で検出されたデータ点のうち、69% について温度・密度・柱密度を決定できた。HVCCsを除けば、温度はCMZ全域にわたってほぼ一様で、密度には幾分の非一様性が見出された。[4]

・「大きな」中心核円盤の発見 銀河系中心核 Sgr A* は、Circumnuclear Disk (CND) と呼ばれる半径約2パーセクの分子リング状構造に取り囲まれている。その外側には二つの巨大分子雲 M-0.02-0.07, M-0.17-0.08 が付随するが、それらとCNDとの物理的關係は判然としていなかった。今回岡らは、 $R_{3-2/1-0}$ の詳細な解析から、直径約10パーセク程度の広がりを持つ楕円状の高励起分子ガス領域を検出した。この高励起ガス領域は、二つの巨大分子雲に挟まれるように分布し、約 110 km s^{-1} の速度で回転する一体の構造の姿に見える。これは、これまで認識されていなかった、CNDを含む「大きな」中心核円盤 (Large Nuclear Disk; LND) を検出した可能性が高い。LNDの質量は20-60万太陽質量で、 $30-60 \text{ km s}^{-1}$ の降着運動を伴う。この事は、このLND(+CND)が定常的構造ではなく、約十万年後には中心核へと落下する運命にあることを意味する。[25]

NRO45m 望遠鏡による追観測

COミリ波・サブミリ波輝線サーベイ結果の中で特に興味深い領域について、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 (NRO)45m 電波望遠鏡を使用した追観測を進めている。観測輝線は、高密度領域に感度をもつ HCN, HCO^+ $J=1-0$ 輝線 (90 GHz 帯)、衝撃波領域の良いトレーサである SiO 分子の $J=1-0$ (43 GHz), $J=2-1$ 輝線 (87 GHz) である。速度コンパクト雲やホット・スポット等の特徴的構造が、衝撃波起源である事の確固たる証拠とする事が出来る。

・Proto-Superbubbleの発見 $l = 1.3^\circ$ 複合体は、特異的に銀緯方向に広がった分布を示し、内部には高速度コンパクト雲 CO $1.27+0.01$ を始め大きな速度幅を持つ領域が発見されている。今回我々は、NRO45m 望遠鏡で高密度・衝撃波トレーサの観測を行う事によって、力学的に擾乱を受けた高密度分子ガスの検出を試みた。その結果、高密度トレーサの空間/速度分布は大きな速度分散と複数の膨張シェルからなるバブル状の構造で特徴付けられる事が分かった。そして、このバブル状構造の多くに、高速度かつコンパクトな SiO スポットが付随していることが明らかになった。これらの観測事実は、領域全体が複数の超新星爆発によって広く攪乱を受けていることを示し、スターバースト銀河で見られるスーパーバブル構造へと進化する初期の段階を見ているものと解釈される。膨張シェルの力学的エネルギー ($> 10^{52} \text{ erg}$) からは、 $10^{-3}-2 \text{ yr}^{-1}$ 程度の頻度の超新星爆発が必要であると試算され、これは同領域に 10^{5-6} 太陽質量の大質量星団が埋もれている事を示唆している。[5][19]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Hirota and S. Yamamoto, "Molecular Line Observations of Carbon-Chain-Rich Core L492", *ApJ*, **646**, 258-268 (2006).
- [2] T. Sakai, T. Oka, and S. Yamamoto, "Atomic Carbon in the AFGL 333 Cloud", *ApJ*, **649**, 268-279 (2006).
- [3] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, "A CO $J=3-2$ Survey of the Galactic Center", *PASJ*, **59**, 15-24 (2007)
- [4] M. Nagai, K. Tanaka, K. Kamegai, & T. Oka, "Physical Conditions of Molecular Gas in the Galactic Center", *PASJ*, **59**, 25-32 (2007)
- [5] K. Tanaka, K. Kamegai, M. Nagai, & T. Oka, "High Resolution Mappings of the $L=1.3 \text{ deg}$ Complex in Molecular Lines : Discovery of a Proto-Superbubble", *PASJ*, **59**, 323-334 (2007)
- [6] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Methyl Formate in the NGC2264 IRS1 Region", *ApJ*, **660**, 363 (2007)
- [7] Sakai, N., Ikeda, M., Morita, M., Sakai, T., Takano, S., Osamura, Y., & Yamamoto, S. "Production Pathways of CCS and CCCS Inferred from their ^{13}C Isotopic Species", *ApJ*, in press (2007)

(会議集録)

- [8] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Complex Organic Molecules in an Early Stage of Protostellar Evolution", *Science with ALMA: a new era for Astrophysics*, Springer, Astrophysics and Space Science (ApSS) Journal, in press (2007)
- [9] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, "A Large-scale CO $J=3-2$ Survey of the Galactic Center", *Journal of Physics: Conference Series*, **54**, 67-71 (2006)

(国内雑誌)

- [10] 岡 朋治: 「銀河系内の中性炭素原子」、*天文月報*, **99**, 190-196 (2006)

(学位論文)

- [11] 森田将: 「炭素同位体種で探る星間分子雲における CCS の生成過程」(修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [12] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Exploring an Early Stage of Protostellar Evolution with Complex Organic Molecules", *Complex Molecules in Space: Present status and prospects with ALMA* (May 2006, Fuglsocentret, Denmark)

- [13] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. “Complex Organic Molecules in an Early Stage of Protostellar Evolution”, Science with ALMA: a new era for Astrophysics (November 2006, Madrid, Spain)
- [14] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, “ASTE Observations of the Galactic Center: A Large-scale $J=3-2$ Survey”, Galactic Center Workshop 2006: From the Center of the Milky Way to Nearby Low-Luminosity Galactic Nuclei, (Cologne, Germany, April, 2006)
- [15] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, “A Large-scale CO $J=3-2$ Survey of the Galactic Center”, Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies (Okinawa, Japan, June, 2006)
- [16] M. Nagai, T. Oka, S. Yamamoto, Y. Moriguchi, Y. Fukui, & Y. Sekimoto, “A High-Velocity [CI] Wing Emission toward the M17 Molecular Cloud”, Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies (Okinawa, Japan, June, 2006)
- (国内会議)
- 一般講演:日本天文学会秋季年会 (九州国際大学、2006/9)
- [17] 坂井 南美、酒井 剛、山本 智: 「大質量星形成領域における複雑な有機分子:NGC2264 における HCOOCH_3 の分布」、P20a
- [18] 岡 朋治、永井 誠、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心 Central Molecular Zone における高励起ガスの分布とその起源」、Q08a
- [19] 田中邦彦、亀谷和久、永井 誠、岡 朋治: 「銀河系中心 $l = 1.3^\circ$ 領域の高密度分子ガスの分布」、Q09a
- [20] 永井 誠、岡 朋治、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心 $L = 0.9^\circ$ Anomaly の HCN 、 HCO^+ 輝線観測」、Q11a
- [21] 新保謙、芝祥一、森田将、坂井南美、岡朋治、山本智、P. G. Ananthasubramanian、前澤裕之、奥寺勇: 「HEB ミクサ素子製作のための自動重ね描画の開発」、V25a
- [22] 坂井 南美、前澤 裕之、佐野 崇、丹代 卓也、新保 謙、芝 祥一、山本 智: 「NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の膜厚依存性」、V26c
- [23] 芝 祥一、新保 謙、中村 友哉、P. G. Ananthasubramanian、前澤 裕之、山本 智 : 「HEB ミクサ素子製作における Nb の表面酸化層の抑制」、V27b
- 一般講演:日本天文学会秋季年会 (東海大学、2007/3)
- [24] 坂井 南美、酒井 剛、廣田 朋也、山本 智: 「L1527 原始星における炭素鎖分子 H_2CCCC 高励起輝線の検出」、P40a
- [25] 岡 朋治、永井 誠、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心核 Sgr A* を取り囲む「大きな」中心核円盤の発見」、Q15a
- [26] 池田 正史、森田 将、坂井 南美、酒井 剛、高野 秀路、山本 智: 「 ^{13}CCS および C^{13}CS における $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の異常と CCS の生成過程 (1)」、Q28a
- [27] 坂井 南美、森田 将、池田 正史、酒井 剛、高野 秀路、山本 智: 「 ^{13}CCS および C^{13}CS における $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の異常と CCS の生成過程 (2)」、Q29b
- [28] 新保謙、森田将、芝祥一、坂井南美、山本智、前澤裕之: 「NbTiN 薄膜を用いた格子冷却型 HEB ミクサの開発」、V40a
- [29] 芝 祥一、新保 謙、森田 将、山本 智、前澤 裕之 : 「HEB ミクサ素子の開発と性能評価」、V41a

同じ仕組みの少し大規模な装置 CAST が、欧州原子核研究機構 (CERN) において 2002 年より実験を始めてわれわれを追いかけているが、彼らもまだこの領域には到達できていない。

5 暗黒物質観測

——太陽アクシオン観測と暗黒物質探索実験—— (菱輪・井上)

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

5.1 アクシオンヘリオスコープ実験

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

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捕えるために、高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心磁場 4T、長さ 2.3m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捕えられていないが、質量 0.27eV 以下のアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 6.8 - 10.9 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ という上限値を得ることに成功している。

現在は 1-2eV 程度の質量のアクシオン探索のために低温高密度ヘリウムガスを利用した装置のアップグレードを行っている。このアップグレードは、ヘリウムガスを磁場領域に詰めることで光子に仮想的な質量を持たせ、より大きな質量のアクシオンを捉えることを可能にするが、eV オーダーの質量領域探索の実験ではヘリウムガスの圧力を様々な値に設定する必要に迫られることになる。そのために我々はガス圧自動制御装置の製作を行い、現在までに低温高密度のヘリウムの自動制御、及び装置から発生する強磁場へ耐性を示すことに成功している。この実験により、大統一理論 (GUT) が予想するアクシオンの質量、結合定数の領域の実験的検証が、このような実験としては初めて行える予定である。

5.2 暗黒物質探索実験

我々はこれまで LiF および NaF をターゲットにした極低温熱量計型検出器 (ボロメータ) や放射性不純物の少ない $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレータを用いた、暗黒物質候補の超対称性ニュートラリーノ直接探索実験を東京大学宇宙線研究所の神岡宇宙素粒子研究施設で行なってきた。これらの実験は、すべて原子核中の核子のスピン期待値が大きいとされるフッ素-19 を含むため、原子核のスピンに依存した (SD, spin dependent) 相互作用を通して暗黒物質を検出するのに特化した検出器である。探索の結果、暗黒物質は未発見ではあるが、物質との相互作用の SD-断面積に対して世界最高水準の制限をつけてきた。これらの検出器の大きさはすべておよそ数十グラムに過ぎない。このことは、現在の世界の最高感度の暗黒物質探索実験と競うには、決して何トンもの大質量の検出器は必要でないことを示している。

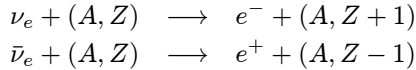
現在の状況は、暗黒物質と検出器物質との相互作用断面積がきわめて小さいために、その信号が放射線バックグラウンドに埋もれてしまっていると考えられる。したがって、現在より厳しい上限値を与えるためには放射線バックグラウンドイベントを減らすことがもっとも重要である。バックグラウンドを減少しないで検出器の質量を大きくすることは、単にバックグラウンドイベントを増加させるだけで、暗黒物質による微弱な信号が埋もれたままである状況は変わらないので、まったく無意味である。現在は、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレータでバックグラウンドイベントを減少させるための検出技術の開発研究、およびエネルギー閾値を下げるための開発研究を行っており、神岡における暗黒物質探索実験は休止中であるが、開発研究の成果ができれば再開する予定である。

5.3 レーザー共鳴イオン化質量分析法によるニュートリノ検出

太陽ニュートリノのうち p-p 反応によるものや原子炉の放出しているような低エネルギー (MeV 程度あるいはそれ以下) の電子ニュートリノ・反電子ニュートリノの有効な検出手段は、現在のところ有機液体シンチレータと放射化学的手法に限られると言って良い。そのうち、塩素やガリウムをターゲットとした従来の放射化学的手法ではニュートリノ捕獲による生成核が適当な半減期を持つ必要があり、使えるターゲットには制限がある。エネルギー閾値の低い、もしくは断面積の大きい多様な検出ターゲットが使用可能な新しいニュートリノ検出法が開発できれば、低エネルギー太陽ニュートリノあるいは原子炉から

の反電子ニュートリノの精密観測が可能になる。特に、原子炉実験では KamLAND 実験が成功したことを受けて、混合角 θ_{13} の測定など、さらに精密なニュートリノ振動の検証ができる意義は大きい。

特定元素が電子ニュートリノまたは反電子ニュートリノと荷電カレント反応をおこした場合、



のように原子番号が ± 1 だけ異なる別の元素に転換される。この原子を LASER を用いて選択的に共鳴イオン化する。まず、原子の基底状態から中間の励起状態まで LASER 光により励起させ、次に別の又は同じ LASER 光により原子をイオン化させる。最初の基底・励起状態間のエネルギーレベル差は各元素に特有なものなので、LASER 光の波長をその元素のエネルギーレベル差に合わせることでその元素のみを選択的にイオン化させることができる。イオン化された元素は、Q-Mass Spectrometer (四重極質量分析計、QMS) もしくは Time of Flight Mass Spectrometer (TOF 質量分析計) により同位体識別を行うことで不純物と分けることができる。このレーザー共鳴イオン化と質量分析計による同位体識別をセットにした微量元素検出法をレーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS) という。

RIMS 手法の微量元素検出能力を検証するためにアルカリ金属元素であり共鳴イオン化を行いやすいカリウムに着目し、(図 5.1) に示すように黒鉛のつぼ中で炭酸カリウムを 900 度程度に加熱して得られた微量カリウム原子を RIMS により検出した。用いたレーザーは 404.7nm 波長可変 CW の外部共振器型半導体レーザーで、回折格子に取り付けられているピエゾ素子にかかる電圧を少しずつ変えることでレーザー波長の微調整を行った。質量分析計には四重極質量分析計 (QMS) を用いた。同位体シフトによる ^{39}K と ^{41}K のレーザー共鳴波長の違いから、ピエゾ素子にかかる電圧を調節して ^{39}K と ^{41}K の分離を行うことができた。また、(図 5.1) のセットアップでの検出効率は 2×10^{-12} と極めて低い値となったが、パルスレーザーなどの大強度レーザーの利用と、Atom Buncher もしくは超音速分子線バルブ (PSV) による試料の局在化によりこの効率を大幅に改善できると考えている。

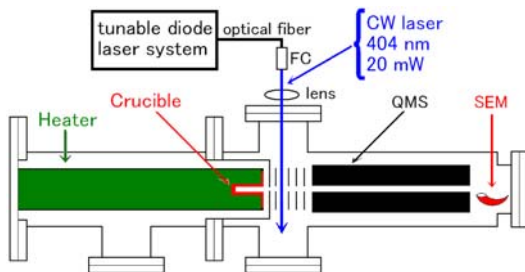


図 5.1: RIMS を用いた微量カリウム原子検出

今後は、検出効率に重点を置いてレーザー共鳴イ

オン化質量分析器を完成させていくつもりである。

5.4 原子炉ニュートリノモニター

原子炉格納容器の外側に置いて、原子炉の熱出力あるいは核燃料の燃焼状況などの運転状況をモニターする装置を開発している。核分裂反応の際に放出される反電子ニュートリノ (以下「ニュートリノ」と略記する) をプラスチックシンチレータにより検出し、その検出率とエネルギースペクトルにより原子炉運転状況をモニターする。ニュートリノは炉心から格納容器の外側までの遮蔽物をほとんど素通りするので、通常の放射線のほとんどない人間の作業する場所でモニター可能である。

IAEA (国際原子力機関) が NPT (核兵器不拡散条約) 締約国の原子力活動に対し、平和的利用から核兵器製造等の軍事的目的に転用されないことを確保することを目的としておこなわれる保障措置システムとして、ニュートリノによる原子炉運転モニターが有力な手段である

一般に原子炉ニュートリノを検出するには、有機液体シンチレータを使う。シンチレータ中に含まれる陽子 (水素原子核) に対してニュートリノが衝突して生成される陽電子と中性子を遅延同時計数法により検出する方法がとられている。中性子を検出するために、中性子を吸収してガンマ線を放出するガドリニウムを液体シンチレータに混ぜる。ニュートリノの反応断面積はきわめて小さいので、常識的には莫大な量のシンチレータが必要とされる。しかし、十分近距離ではそこそこの大きさの検出器でも十分である。たとえば熱出力 3GW の原子炉の炉心から 30 メートル程度の場所に設置すれば、有効体積 1 立方メートル程度の検出器でも一日に数百から数千個 (検出器の効率に依存する) のニュートリノを検出することができる。

この検出率より熱出力のモニターが可能である。また、検出ニュートリノ数が十分に確保でき、かつそのエネルギースペクトルがある程度の分解能で測定できるならば、燃料棒中のプルトニウムの量も相応の精度で推定できる可能性がある。新しい核燃料にはプルトニウム-239 は含まれないが、原子炉の運転を続けるうちに燃料棒中のウラン-238 がプルトニウム-239 へと転換されることによりプルトニウム-239 は増加してゆくが、本来のウラン-235 が燃焼して発生するニュートリノとプルトニウム-239 の燃焼によるニュートリノでは前者の平均のエネルギーの方が高いことと、熱出力あたりの放出ニュートリノ数も (燃料原子数が同じならば) 前者の方が多くなることにより、ニュートリノのエネルギースペクトルを知れば、原理的には燃料中のそれらの量が推定できるわけである。

しかし、ガドリニウム入りの有機液体シンチレータは性能の長期安定性に問題があること、また可燃性液体であるので発電用原子炉では原子炉建屋内への持ち込みに規制を受ける場合があること、可搬性を持たせることがむずかしいこと、などいくつかの問題点がある。これに対して、われわれは、液体シ

ンチレータの代わりにプラスチックシンチレータを使用して上記の諸問題を回避しようとしている。プラスチックシンチレータは、有機液体シンチレータと類似の性能を有し、確立した技術により性能が均質で寸法の大きな物が市販されているので大変都合が良い。ガドリニウムは、ニュートリノ反応の生成物である中性子を吸収して高エネルギーガンマ線を放出するのでニュートリノ検出には重要な要素であるが、液体シンチレータを使用する場合のように混入するのではなく、ガドリニウム箔をブロック状のプラスチックシンチレータの間にはさむことで同様な性能が得られることが、既にわれわれによるコンピュータシミュレーションで判明している。

原子炉ニュートリノモニターは、ニュートリノ振動実験にも有用である。ニュートリノ混合角 θ_{13} の測定のための原子炉近距離 (\sim km) でのニュートリノ実験が世界でいくつか計画されているが、このような実験ではニュートリノ検出率の測定誤差をおよそ 1% 以下にしなければならない。そのため、原子炉ニュートリノ振動実験では、ニュートリノ振動が無視できるような原子炉のなるべく近くに検出器を設置し、原子炉ニュートリノの絶対量を測定する。その際、小型で安全で可搬性があり原子炉建屋の中に設置できる原子炉ニュートリノモニターが使えれば、原子炉 1 基ごとの建屋の中で原子炉の至近距離にこれを設置して、より正確なニュートリノ量の測定が可能となる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Iwata, Y. Inoue, M. Minowa: A new method of alpha ray measurement using a Quadrupole Mass Spectrometer, arXiv:0704.1944

(学位論文)

- [2] 太田良介: 太陽アクシオン探索用ヘリウムバッファ中のガス密度自動制御装置の開発、平成 18 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。
 [3] 林寛仁: 粒子検出器としてのレーザー共鳴イオン化質量分析器の開発、平成 18 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [4] M. Minowa: Dark Matter Searches, Talk at the Informal Meeting, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006) Kyoto, 5 August 2006.

(国内会議)

一般講演

- [5] 蓑輪 眞: 低エネルギーニュートリノ実験の方法、ビッグバンセンター夏の研究会、鬼怒川 2006 年 9 月 3 日。

- [6] 秋本祐希: Tokyo Axion Helioscope で使用する安全弁の He 温度における動作確認とリーク量測定、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 20 日。
 [7] 太田良介: 太陽アクシオン探索に用いる He ガス管中の密度安定化について、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 20 日。
 [8] 岩田圭弘: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量カリウム原子検出 I、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 21 日。
 [9] 林寛仁: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量カリウム原子検出 II、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 21 日。
 [10] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いたニュートリノ検出、第 2 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2006 年 11 月 6 日。
 [11] 井上慶純: Axion Search、埼玉大学大学院理工学研究科素粒子研究室セミナー、埼玉大学 2006 年 12 月 8 日。
 [12] 岩田圭弘: 微量カリウム原子検出によるレーザー共鳴イオン化質量分析器の開発、第 13 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2007 年 2 月 26 日。
 [13] 太田良介: 太陽アクシオン望遠鏡テストランによる He 密度制御試験、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 25 日。
 [14] 中田量子: プラスチックシンチレータを用いた小型反電子ニュートリノ検出器の開発、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 25 日。
 [15] 水本哲矢: PIN フォトダイオードの X 線検出に関する特性、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 27 日。
 [16] 林寛仁: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法の開発、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス、2007 年 3 月 27 日。
 (セミナー)
 [17] 蓑輪 眞: 暗黒物質探索実験、名古屋大学物理学教室 ORIU-COE 「若手分野横断セミナー」、名古屋大学 2006 年 7 月 27 日。

6 銀河と宇宙構造の研究

——銀河と宇宙構造の研究—— (岡村・嶋作・土居)

6.1 高赤方偏移銀河と大構造の研究

赤方偏移 $z = 6.96$ の銀河の発見

家正則, 柏川伸成 (国立天文台), 太田一陽 (理研) らとの共同研究. $z \simeq 7$ に赤方偏移した Lyman α 輝線を検出する狭帯域フィルター NB973 (FWHM = 200 Å, 中心波長 = 9755 Å) を製作し, Subaru Deep Field (SDF) で深い撮像観測を行った. 発見された候補天体 (合計 2 個) をすばる望遠鏡で分光観測した結果, 1 個は $z = 6.96$ にあることが分かった. もう 1 個も $z \simeq 7$ の可能性がある. $z \simeq 7$ での銀河の数密度は, $z \simeq 6.6$ での数密度の 18–36% しかないことが分かった. もしこの密度の低下が宇宙空間の中性度の上昇によるものである場合, $z = 7$ での中性度は 63–83% と見積もられる. [4]

赤方偏移 $z \simeq 6.5$ にある Lyman α 輝線銀河 (LAEs) の性質

柏川伸成 (国立天文台), Matt A. Malkan, Chun Ly (UCLA), 土居守 (天文センター) らとの共同研究. SDF における $z = 6.5$ の LAEs の性質を調べ, 宇宙空間の再イオン化を考察した. すばる望遠鏡と Keck 望遠鏡で新たに得られたスペクトルを含む合計 17 天体の分光サンプルと, 合計 58 天体の測光サンプルを使用した. 得られた主な結果は以下の通りである. (i) $z = 6.5$ におけるライマン α 輝線の光度関数は $z = 5.7$ のものより 0.75 mag ほど暗い. これは, $z = 6.5$ では宇宙の再イオン化が完了していなかったことを意味するのかもしれない. (ii) 視野内の LAEs の分布は一様であった. [5],[6],[10]

$z = 5.7$ の銀河のライマン・アルファ等価幅の測定

早期宇宙における銀河での星形成の様子を調べるため, SDF にある赤方偏移 $z \simeq 5.7$ の Lyman α 輝線銀河 (LAEs) のライマンアルファ等価幅 (EW) を測定した. 先行研究において, $z \simeq 5.7$ の LAEs は紫外連続光の暗いものほど EW が大きく, 星形成が

特異な銀河があることが示唆されていた. しかし, 絶対等級で $M_{UV} = -19.5$ 等より暗い LAEs についてはノイズに埋もれてしまい, EW を測定することができなかった. そこで本研究では, 紫外連続光成分が 2σ 限界より暗い 12 天体を合成した画像を解析することで, 統計的な性質を評価した. 解析の結果, 下限値として $EW \approx 200\text{\AA}$ (紫外絶対等級は -18.5 等) という値を得た. この結果は, 紫外連続光成分が暗い LAEs の中に, 大質量星の割合が高い銀河, 金属量が極めて少ない銀河, あるいは年齢が非常に若い銀河, もしくはこれらの条件のいくつかが当てはまるような銀河が存在していることを示唆している.

赤方偏移 $z \sim 3$ の Lyman-break 銀河 (LBGs) のクラスタリングの性質

関口和寛, 古澤久徳 (国立天文台), 大内正己 (STScI) らとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Field-South 領域 (SXDF-S) における広視野の可視近赤外撮像データ (U, B, V, R, i, z, J, K) を用いて, $z \sim 3$ LBGs のサンプルを構築しそのクラスタリングの性質を調べた. 観測領域内において $z \leq 25.5$ の計 572 個の LBGs を検出した. その内 J バンドで検出できたものは 46 個, K バンドで検出できたものは 107 個であった. このサンプルを使って, 角度二体相関関数を用いてクラスタリングの強さを調べ相関強度を求めた. クラスタリングの強度を近赤外光度, 可視光光度の関数として求めた結果, 近赤外光度が明るい場合は可視光光度に依らずクラスタリング強度は大きい一方, 近赤外光度が暗い場合は可視光光度が暗くなるにつれてクラスタリング強度が小さくなることが分かった.

Lyman α 輝線銀河 (LAEs) の光度関数

大内 (STScI), SXDS チームなどとの共同研究. すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) を用いて, $z = 3.1, 3.7, 5.7$ の Lyman α 輝線に対応する狭帯域フィルター (NB503, NB570, NB816) で Subaru/XMM-Newton Deep Field を撮像し, これら 3 つの赤方偏移での LAE の光度関数を調べた. その結果, 少なくとも $z = 3.1$ と $z = 3.8$ の間では光度関数はほとんど同一であることが分かった.

$z \sim 3-5$ における, 広がった Ly α 輝線天体の探査

SXDS チーム, 菅井肇, 松田有一 (京都大学), Johan Fynbo, Kim Nilsson (Dark Cosmology Centre, コペンハーゲン大学), Palle Møller (ESO) らとの共同研究. すばる望遠鏡の Suprime-Cam と中間帯域フィルターを用いて, Ly α blob (LAB) とよばれる広がった Ly α 輝線天体を探査した. Subaru/XMM-Newton Deep Field South (SXDF-S) を探査することにより, この種の天体が初期宇宙に一般的に存在していること, また高密度領域に強く偏在していることを示した. また VLT/VIMOS を用いた分光観測により, こ

れらが非常に大きな等価幅を持っていることを示し、また約半数については輝線光度と速度幅に正の相関があることを示した。これは銀河形成のごく初期段階にある可能性を示唆するものである。これを受け、さらなる追観測の計画を開始した。まず、輝線成分の深い撮像を行うことで、形態や面輝度プロファイルから輝線の物理的起源を調べるべく、すばる/Kyoto 3DII を用いた深い撮像を提案し、採択された (S06B-098: 地震によりキャンセル)。翌 S07B 期ではそれを拡大し、Suprime-Cam の狭帯域フィルター NB570 も用い、2 視野に渡る撮像で環境効果を探る観測を提案している。次に、中間帯域フィルターによる探査を隣接する領域 (SXDF-C) にも行い、サンプルを拡大する観測を提案した。これにより、現在知られている LAB の数をさらに倍増させ、数密度に関する統計的な議論を可能とする計画である。さらに、現在あるサンプル中で性質の異なる 2 種類の天体を分類するため、VLT/FORS2 による深い分光観測を提案している。今後、コペンハーゲン/ESO のグループと共同で、同種の探査を COSMOS 領域にも拡大する予定である。[9]

Subaru Deep Field における BzK 銀河のクラスタリングの性質

本原顕太郎 (天文学教育研究センター)、柏川伸成 (国立天文台) らとの共同研究。CDM に基づく銀河形成モデルでは、銀河はダークハロー (DH) の中に形成され、その進化は DH の質量に強く依存すると考えられている。DH の質量とクラスタリング強度には正の相関関係があるため、DH のクラスタリングを反映する銀河のクラスタリング強度から、その銀河が属する DH の質量を推定できる。我々は Subaru Deep Field (SDF) の可視 B_z バンドと近赤外 K バンドの深い撮像データを用いて $z \sim 2$ の銀河を選び出し、そのクラスタリング強度の測定から、 $z \sim 2$ にある銀河の形成と進化を DH との関連を軸に調べた。 $z \sim 2$ の銀河として、 $B-z$ 、 $z-K$ のカラーを利用して選出される BzK 銀河を使った。SDF の深いデータによって、初めて暗い ($K_{AB} < 23.2$) 星生成 BzK 銀河のクラスタリング強度を測定することができた。そして、明るい星生成 BzK 銀河のクラスタリング強度を測定した Kong et al. (2006) の結果とあわせて、BzK 銀河の性質の光度依存性を調べた。得られた主な結果は次のとおりである。(1) 明るい銀河ほどクラスタリングが強く、重い DH に属している。(2) 星質量が大きくなると共に、属する DH の質量は急激に増加する。(3) 暗い星生成 BzK 銀河は近傍のそれほど重くない銀河にしか進化せず、明るい星生成 BzK 銀河は銀河団の中にある非常に重い銀河に進化する。[16]

Spitzer/IRAC による BzK 銀河の赤外測光観測

本原顕太郎 (天文学教育研究センター)、C. Ly, M.A. Malkan (UCLA) らとの共同研究。Spitzer 宇宙望遠鏡に搭載されている赤外線カメラ IRAC を使っ

て、Subaru Deep Field の深く広視野な赤外撮像観測を行った (PI, Malkan)。この赤外データの Point Spread Function はかなり広がっているため、隣接する天体がある場合にはそれらが重なり合ってしまう。重なり合った天体の明るさを精度よく測光するためには、それらを分離する必要がある。我々は、大量の重なり合った天体どうしを分離し、精度よく測光することに成功した。その結果、分離する必要のない孤立した銀河も含めて約 75% の BzK 銀河について、精度よく測光できた。ここで、BzK 銀河とは $B-z$ 、 $z-K$ のカラーを利用して選出される赤方偏移 (z) が 2 付近にいる銀河である。今後は、この赤外データを使って、 $z \sim 2$ の銀河の静止系近赤外の性質や星質量を調べていくつもりである。

赤外線天文衛星あかりによる深宇宙探査

松原英雄 (JAXA)、あかり深探査グループとの共同研究。あかり衛星の特性と、相補的な Spitzer 宇宙望遠鏡の特性を考慮して、あかりによる深宇宙探査に適した天域を選定した。黄道の北極領域は $2-26 \mu\text{m}$ での深いサーベイに適し、南極領域は $50-180 \mu\text{m}$ における指向観測に適していると判断した。[7]

6.2 銀河進化と環境効果

RDCS1252-2927 銀河団 ($z = 1.24$) の研究

児玉忠恭 (国立天文台)、鍛冶澤賢 (国立天文台)、Richard Bower (ダーラム大学)、Ricardo Demarco (JHU)、Alexis Finoguenov (MPE)、Chris Lidman (ESO)、Piero Rosati (ESO) らとの共同研究。現在までに知られている最も遠方の X 線銀河団の一つ、RDCS1252-2927 ($z = 1.24$) を、すばる主焦点カメラとイギリス赤外望遠鏡の WFCAM、NTT 望遠鏡 SOFI を用いて広く深く撮像した。銀河団と同じ赤方偏移にいてと思われる銀河を抽出すると、 $z = 1.24$ の銀河団を取り巻くように分布する、多数の小さな銀河群を発見した。巨大銀河団にいる赤い銀河は、その明るさと色の間に非常にタイトな関係 (色等級関係) を示すことが知られているが、銀河団を取り囲む銀河群では、この色等級関係が $K_{s,AB} = 22$ で途切れていることがわかった。これより暗く赤い銀河はほとんど存在しない。これは、銀河の星形成活動が大質量銀河から止まり、時間とともにより低質量の銀河がとめていくという “down-sizing” 現象を示唆する。さらに、この “down-sizing” は低密度環境で遅れている。すなわち、銀河は環境に依存した down-sizing 的な進化をすることがわかった。

$z < 1$ 銀河団を取り巻く大規模構造の分光フォローアップ

児玉忠恭 (国立天文台), 星貴子 (明星大学), 柏川伸成 (国立天文台) らとの共同研究. 我々はすばるの主焦点カメラを用いて, CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) を取り巻く大規模構造をすでに発見した. しかしながら, 測光的に発見した構造は投影効果のために信頼性が低い. そこで, 我々はすばる FOCAS を用いて分光フォローアップ観測を行った. その結果, 発見された全ての構造が本物であることを確認した. これは, 現在までに知られている大規模構造の中で, 最も巨大なものの一つである. さらに, 様々な環境にいる赤い銀河の典型的なスペクトルを作り, その星形成史を探ったところ, 銀河の星形成は 1 Gyr 以下の短いタイムスケールで終息したことが示唆された. これは銀河同士の相互作用が星形成を止める引き金となったことを意味しているのかもしれない. [21]

PISCES プロジェクトの推進

Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru (PISCES) は国立天文台の児玉忠恭を中心とした, すばる望遠鏡による遠方銀河団の撮像分光サーベイである. Suprime-Cam の広い視野を活かし, 銀河団の中心領域から周辺領域に渡る広範囲な銀河環境を観測することで, 銀河進化と環境との関係を系統的に研究することを目的としている. 注意深く選ばれた $0.4 < z < 1.3$ の 15 個の銀河団を観測対象としている. 2006 年度は 2 つの銀河団 (RXJ0848 と RDCS1252) を FOCAS と Gemini-S の GMOS を用いて分光フォローアップ観測をした. これらのデータを現在解析中である. [20]

色等級関係の形成と銀河団リッチネスの関係

児玉忠恭 (国立天文台) との共同研究. 我々は, すばる主焦点カメラを用いて RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の十分に深い多色測光観測を行った. 測光的赤方偏移の手法を用いて銀河団メンバーの候補を選出してみると, 銀河団コアから伸びるフィラメント状の構造が見つかった. また, この銀河団の色等級関係は暗い側で未完成であることが分かった. これは $z \sim 0.8$ の時代において, 明るい銀河はその多くが星形成を止めているのに対して, 暗い銀河についてはまだ多くが星形成を行っているというダウンサイジングな星形成史を示唆する. さらに我々は, 同時代 ($z \sim 0.8$) の銀河団を比較することで, 色等級関係は X 線で非常に明るい銀河団においてのみ, 暗い側まで成立していることを発見した. これは, 同時代の銀河団であってもリッチな環境ほど進化がすすんでいることを示唆する.

遠方銀河団のスペースからの赤外線観測

児玉忠恭 (国立天文台) との共同研究. 我々は, 主にすばる望遠鏡を用いた可視光による遠方銀河団の観測をもとに, 星形成史の環境依存性に注目し, 特に銀河群環境が星形成史を解き明かすうえで重要であ

ると考えている. 赤外線を使えば, 遠方の銀河団銀河の星質量を正確に求められるだけでなく, ダストに隠された星形成を直接見ることができる. そこで我々は, 広い視野をもつ赤外線衛星「あかり」を利用して, すでに可視光の多色測光データのある RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の銀河団中心から, 銀河群環境を含むその周囲の構造について, 近赤外から遠赤外までの幅広い波長域で十分に深い観測を行った. 現在そのデータを解析中である.

うみへび座 I 銀河団の銀河の光度関数の暗い端の振舞い

山野井瞳, 八木雅文, 家正則, 小宮山裕 (国立天文台), 濱部勝 (日本女子大), 土居守 (天文センター), 古澤久徳 (ハワイ観測所) との共同研究. すばるの主焦点カメラを用いて, 近傍銀河団の一つ, うみへび座 I 銀河団を撮像し, 銀河の光度関数を -10 mag という暗い絶対等級まで求めた. その結果, 光度関数の暗い側の傾きは, 他の銀河団の値よりも急であることが分かった. うみへび座 I 銀河団は richness (富裕度) の低い銀河団であることから, この結果は, richness の低い銀河団ほど暗い銀河の割合が高いことを示しているようである. また, この銀河団は赤い矮小銀河が卓越しており, その光度関数は -16 mag 以下で上昇することが分かった. [24]

局所超銀河団中の円盤銀河のスピン軸の向きの研究

F.-X. Hu (紫金山天文台) らとの共同研究. この分野の研究の歴史と手法を解説し, 最新の研究から得られた知見をまとめたレビュー論文を出版した. [3]

6.3 銀河に属さない惑星状星雲

かみのけ座銀河団の銀河間空間にある惑星状星雲の探査

安田直樹 (宇宙線研究所), 柏川伸成 (国立天文台), Gerhard, O. (マックスプランク研究所), Arnaboldi, M. (トリノ天文台), Freeman, K. C. (ストロムロ山天文台) との共同研究. 銀河団中で, 特定の銀河に属さず銀河間空間に存在する星の種族がある. この銀河間空間種族の星の性質と起源を明らかにするためには, 銀河間空間にある惑星状星雲を利用するのが極めて有効である. 我々は現在, かみのけ座銀河団を対象として研究を進めている. 多スリット分光撮像法 (MSIS) という新しい観測手法を考案した. 最初の観測で, 40 個の惑星状星雲が検出され, 手法の有効性が示された. かみのけ座銀河団のような進化の進んだ高密度の銀河団中心でも, なお銀河間空間にある星は十分混じり合っていないことがわかり, この銀河団がマーキングで形成されてきた過程が, ある程度描き出せそうな興味深い結果が得られている. [13],[15]

6.4 スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS)

スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) の推進

SDSS Collaboration (日本グループは Japan Participation Group: JPG として参加) と共同で進めている。2003 年 4 月に第 1 次データ公開を行って以来、2004 年 3 月に第 2 次、2004 年 10 月に第 3 次、2006 年 1 月に第 4 次、2006 年 6 月に第 5 次のデータ公開を行った。当初計画されていたサーベイは第 5 次の公開をもって完了した。第 5 次の公開データには、8,000 平方度の撮像データ (2.15 億個の天体) と 5,740 平方度中の 1,048,960 天体のスペクトルが含まれている。

現在は第二期のサーベイが進行中である。このサーベイを SDSS-II と呼び、当初のサーベイを SDSS-I と呼んで区別している。SDSS-II では、Sloan Legacy Survey, SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration), Sloan Supernova Survey という 3 つのサーベイを行う。日本のグループは引き続き SDSS-II にも参加している。SDSS-II は 2008 年に終了する予定である。[1],[14]

6.5 機器開発

宇宙空間での使用を目的としたサンプルフィルターの耐性試験

田中幹人, 小宮山裕 (国立天文台) ら HOP/VWFI チームとの共同研究。スペース仕様のフィルターのサンプルを作成し、真空サイクル試験, 熱サイクル試験, 放射線照射試験を行ってその性能が劣化しないかを検証し、結果をまとめて出版した。[2]

すばる望遠鏡 Suprime-Cam 用グリズム分光装置の開発

土居 守 (センター), 小宮山裕, 古澤久徳 (国立天文台), 谷口義明 (愛媛大), 山室智康 (オプトクラフト) との共同研究。すばる望遠鏡の主焦点全面を覆い尽くす Suprime-Cam の全視野をカバーするグリズムを開発し、これまで広帯域及び狭帯域フィルターを用いて深い撮像観測が行われている Subaru Deep Field (SDF), Subaru/XMM-Newton Field (SXDF)、及び COSMOS Field を中心にスリットレス分光観測を行い、各領域数万個と予想される輝線銀河を検出し、その輝線から赤方偏移を $\Delta z \sim 0.01$ の精度で測定する研究を計画した。グリズムは、視野中にあるすべての天体のスペクトルが一挙に撮影できる「無バイアス性」という長所を有する代わりに、スリットレス

分光に固有の問題点も有している。それらを列挙すると、(1) 波長分解能をあまり高く出来ない、(2) 波長分解能が天体の大きさに影響される、(3) 空の明るさが明るい (観測波長範囲のすべての波長の空の光が画素に落ちる)、(4) 2 つ以上の天体のスペクトルが重なることが多い、等々である。これらの問題を十分検討し、最大の課題である明るい広視野主焦点を覆い尽くすグリズム分光装置を設計する。計画全体としては、可視光の短波長側と長波長側を分担する青玉と赤玉の二つを作成する。今年度はまず赤玉を設計した。2007 年 4 月に性能試験観測を行う予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Adelman-McCarthy, Jennifer K., Agueros, M.A., Allam, Sahar S., Anderson, Kurt S.J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., Baldry, Ivan K., Barentine, J.C., Berlind, A. & 131 coauthors including Okamura, S. & Shimasaku, K. 2006, "The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey", *Ap. J. Suppl.*, **162**, 38-48.
- [2] Hayashi, M., Tanaka, M., Komiyama, Y., Okamura, S., Tsuneta, S., Noguchi, M., Nakagiri, M., Kano, R., Kimura, T. 2006, "Tolerance test of a sample filter for use in space", *Publ. National Astron. Obs. Japan*, **9**, 21-53.
- [3] Hu, F. X., Wu, G. X., Song, G. X., Yuan, Q. R., Okamura, S. 2006, "Orientation of Galaxies in the Local Supercluster: A Review", *Astrophys. Space Sci.*, **302**, 43-59 .
- [4] Iye, M., Ota, K., Kashikawa, N., Furusawa, H., Hashimoto, T., Hattori, T., Matsuda, Y., Motokuma, T., Ouchi, M., & Shimasaku, K. 2007, "A galaxy at a redshift $z = 6.96$ ", *Nature*, **443**, 186-188.
- [5] Kashikawa, N. et al. (40 authors including Shimasaku, K. & Okamura, S.), 2006, "Clustering of Lyman Break Galaxies at $z = 4$ and 5 in the Subaru Deep Field: Luminosity Dependence of the Correlation Function Slope", *Ap. J.*, **637**, 631-647.
- [6] Kashikawa, N. et al. (19 authors including Shimasaku, K. & Okamura, S.), 2006, "The End of the Reionization Epoch Probed by Ly α Emitters at $z = 6.5$ in the Subaru Deep Field", *Ap. J.*, **648**, 7-22.
- [7] Matsuhara, H. et al. (28 coauthors including Okamura, S.) 2006, "Deep Extragalactic Surveys around the Ecliptic Poles with AKARI (ASTRO-F)", *Publ. Astr. Soc. Japan*, **58**, 673-694 .
- [8] Nakata, F. et al. (14 coauthors including Okamura, S. & Shimasaku, K.) 2006, "Large-scale clumpy structure in Lynx region (Nakata+, 2005)", *VizieR On-line Data Catalog: J/MNRAS/357/1357*.

- [9] Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., & Yoshida, M. 2006, "Systematic Survey of Extended Ly α Sources over $z \sim 3 - 5$ ", *Ap. J.*, **648**, 54-66.
- [10] Shimasaku, K. et al. (17 authors including Okamura, S.), M. 2006, "Ly α Emitters at $z = 5.7$ in the Subaru Deep Field", *Publ. Astr. Soc. Japan*, **58**, 313-334.
- [11] Yagi, M., Nakamura, Y., Doi, M., Shimasaku, K. & Okamura, S. 2006, "Morphological classification of nearby galaxies based on asymmetry and luminosity concentration", *M. N. R. A. S.*, **368**, 211-220.
- [12] Yoshida, M. et al. (38 authors including Shimasaku, K. & Okamura, S.) 2006, "Luminosity Functions of Lyman Break Galaxies at $z \sim 4$ and $z \sim 5$ in the Subaru Deep Field", *Ap. J.*, **653**, 988-1003.
- [13] Arnaboldi, M., Gerhard, O., Okamura, S., Kashikawa, N., Yasuda, N., & Freeman, K.C. 2007, "Multi Slit Imaging Technique: Catalog of Intracluster Planetary Nebulae in the Coma Cluster", *Publ. Astr. Soc. Japan*, in press.
- [14] Fukugita, M. et al. (12 coauthors including Okamura, S.) 2007, "A Catalogue of Morphologically Classified Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey: North Equatorial Region", *A. J.*, in press.
- [15] Gerhard, O., Arnaboldi, M., Freeman, K., Okamura, S., Kashikawa, N., & Yasuda, N. 2007, "The Kinematics of Intracluster Planetary Nebulae and the On-Going Subcluster Merger in the Coma Cluster Core", *Ap. J.*, submitted
- [16] Hayashi, M., Shimasaku, K., Motohara, K., Yoshida, M., Okamura, S., & Kashikawa, N. 2007, "Luminosity dependent clustering of star-forming BzK galaxies at redshift 2", *Ap. J.*, **660**, 72-80.
- [17] Lah, P. et al. (14 coauthors including Okamura, S) 2007, "The HI content of star-forming galaxies at $z = 0.24$ ", *M. N. R. A. S.*, **376**, 1357-1366.
- [18] Ly, C., Malkan, M. A., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Doi, M., Nagao, T., Iye, M., Kodama, T., Morokuma, T., & Motohara, K. 2007, "The Luminosity Function and Star Formation Rate between Redshifts of 0.07 and 1.47 for Narrowband Emitters in the Subaru Deep Field", *Ap. J.*, **657**, 738-759.
- [19] Sasaki, S.S. et al. (28 coauthors including Okamura, S.) 2007, "A Potential Galaxy Threshing System in the Cosmos Field", *Ap. J. Suppl.*, in press.
- [20] Tanaka, M., & 7 coauthors, 2007, "A Deficit of Faint Red Galaxies in the Possible Large-Scale Structures around the RDCS1252.9-2927 cluster at $z = 1.24$ ", *M. N. R. A. S.*, **377**, 1206-1214.
- [21] Tanaka, M., Hoshi, T., Kodama, T., & Kashikawa, N., 2007, "A Huge Filamentary Structure at $z = 0.55$ and Star Formation Histories of Galaxies at $z < 1$ ", *M. N. R. A. S.*, submitted.
- [22] Taniguchi et al. (30 coauthors including Okamura, S.) 2007, "The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Subaru Observations of the HST COSMOS Field", *Ap. J. Suppl.*, in press.
- [23] Yagi, M., Komiyama, Y., Yoshida, M., Firisawa, H., Kashikawa, N., Koyama, Y. & Okamura, S. 2007, "The Remarkable 60 x 2 kpc Optical Filament Associated with a Poststarburst Galaxy in Coma Cluster", *ApJ*, **630**, 1209-1214.
- [24] Yamanoi, H., Tanaka, M., Hamabe, M., Yagi, M., Okamura, S., Iye, M., Shimasaku, K., Doi, M., Komiyama, Y., & Furusawa, H. 2007, "The Galaxy Luminosity Function down to $M \sim -10$ in the Hydra I Cluster", *A. J.*, **134**, 56-63.
- (学位論文)
- [25] 田中賢幸, "The Build-up of the Colour-Magnitude Relation" (博士論文)
- (会議集録)
- [26] Arnaboldi, M., Gerhard, O., Freeman, K. C., Kashikawa, N., Okamura, S., Yasuda, N. 2006, "Kinematic Substructures in the Coma Cluster Core as traced by Intracluster Planetary Nebulae", *IAU Symp.*, **234**, 337-340.
- (著書)
- [27] 岡村定矩 2007: 「人類の住む宇宙」(分担編著) (「シリーズ 現代の天文学」第1巻), 日本評論社.
- [28] 岡村定矩, 柴橋博資 2006, 「理科年表」(天文部, 分担執筆), 丸善.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [29] Kodama, T., Tanaka, M., Kajisawa, M., Koyama, Y., Nakata, F. & Hoshi, T.: "Panoramic Views of Cluster Evolution since $z=3$ ", *International Astronomical Union Symposium no. 235*, Prague, Czech Republic, 2006/8/14-17
- [30] Koyama, Y., Kodama, T., Tanaka, M., Shimasaku, K. & Okamura, S.: "Down-sizing as a Function of Cluster Richness at $z \sim 0.8$ ", *A New Zeal for Old Galaxies*, Rotorua, New Zealand, 2007/3/26-30.
- [31] Shimasaku, K.: "High-redshift galaxies from Subaru deep surveys", *Cosmology with wide-field photometric and spectroscopic galaxy surveys*, University of Tokyo, Japan, 2006/11/9,10.

- [32] Tanaka, M., Kodama, T.,: “The Build-up of the Colour-Magnitude Relation” *Galaxy Evolution Across the Hubble Time, International Astronomical Union. Symposium no. 235*, Prague, Czech Republic, S235, 2006/8/14-17.

招待講演

(国内会議)

一般講演

- [33] 小山佑世: “遠方銀河団 あかり観測の展望”, 「スペースからの赤外線観測による最新の天文学」研究会, ぐんま天文台, 2007/3/12-14.
- [34] 嶋作一大: “高赤方偏移のライマンアルファ輝線銀河の観測”, レーザーガイド補償光学によるサイエンスワークショップ, 総合研究大学院大学, 2007/3/26,27
- [35] 田中賢幸: “ $z > 1.3$ 銀河団の概観”, FMOS-GTO ワークショップ, 京都大学, 2006/7/12-7/13
- [36] 田中賢幸: “The Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 宇宙研究所ランチセミナー, 宇宙研究所, 2006/10/3
- [37] 田中賢幸: “遠方銀河団の広視野観測” 「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」研究会東京大学,2006/11/7-11/10
- [38] 田中賢幸: “The Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 談話会, 京都大学宇宙物理学専攻,2006/11/17
- [39] 田中賢幸: “The Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 談話会, 東北大学天文学専攻,2006/12/18
- [40] 田中賢幸: “The Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 談話会, 東京大学天文学専攻,2006/12/19
- [41] 林将央: “BzK 銀河のクラスターリングの解析において分光データを用いた赤方偏移分布の重要性”, FMOS GTO ワークショップ, 京都大学, 2006/7/12
- [42] 林将央: “BzK 銀河のクラスターリングから探る $z \sim 2$ の星形成銀河の形成と進化”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台, 2007/1/30
- [43] 吉田 真希子: “SXDS と UKIDSS Ultra Deep Survey に基づく $z \sim 3$ の Lyman-break 銀河のクラスターリングの性質”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台, 2007/1/30.
- [44] 吉田 真希子: “Subaru/XMM Newton Deep Field における $z \sim 3$ の LBGs のクラスターリングの性質”, 第 5 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 栃木県日光市, 2006/9/5.

(学会発表)

日本天文学会 2006 年秋季年会, 北九州国際大学 (2006/09/19-21)

- [45] 小山佑世, 児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸: RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の測光観測, X20a.
- [46] 田中賢幸, 他: CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) の分光観測, X18a

- [47] 田中賢幸, 他: RDCSJ1252 銀河団 ($z = 1.24$) の多色測光観測, X21b

- [48] 仲田史明 (国立天文台), 児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸 (東京大学), 他: CL0939+4713 銀河団 ($z = 0.41$) 周辺の大規模構造, X19a

- [49] 林将央, 嶋作一大, 吉田真希子, 岡村定矩: BzK 銀河のクラスターリングから探る $z \sim 2$ の銀河の形成と進化, X15a.

- [50] 室園 浩司, 岡村定矩, 嶋作一大, 斎藤智樹, 吉田真希子 他: SXDF 領域における $z > 3$ LAEs (Lyman α emitters) の光度関数, X09a

- [51] 吉田 真希子, 嶋作 一大, 岡村定矩: Subaru/XMM-Newton Deep Field-South における $z \sim 3$ の Lyman-break 銀河のクラスターリングの性質, X14a

日本天文学会 2007 年春季年会, 東海大学 (2007/03/28-30)

- [52] 林将央, 嶋作一大, 吉田真希子, 岡村定矩: Spitzer/IRAC による BzK 銀河の赤外測光観測, X25b.

- [53] 吉田 真希子, 嶋作 一大, 岡村定矩: Subaru/XMM-Newton Deep Field-South における $z \sim 3$ の Lyman-break 銀河のクラスターリングの性質 II, X21a.

<一般講演など>

(一般講演)

- [54] 岡村定矩: 「宇宙って何だか知っていますか？」ライオンズクラブ国際協会 336-D 地区 第 52 回年次大会記念講演 (下関市教育委員会共催), 下関市シーモールホール, 2006/4/1.

- [55] 岡村定矩: 「ビッグバンへの宇宙旅行」, 五高月例会, 学士会館, 2006/5/17.

- [56] 岡村定矩: 「深宇宙探査の最前線」, 専修大学自然科学研究所第 7 回公開講演会, 専修大学, 2006/7/1.

- [57] 岡村定矩: 「宇宙の果ては見えたか」, 防長クラブ例会, 品川和彊会館, 2006/9/22.

- [58] 岡村定矩: 「ビッグバンへの宇宙旅行」, 常磐陸士 61 期会, アミュゼ柏, 2006/10/21.

- [59] 岡村定矩: 「深宇宙探査の最前線」, 日本学術会議中部地区会議学術講演会, 三重大学, 2006/11/17.

- [60] 小山佑世: “すばる望遠鏡で遠い宇宙を探る”, 大分臨海ロータリークラブ第 1608 回例会卓話, 大分全日空ホテル, 2006/09/25.

(解説記事・論評など)

- [61] 岡村定矩 2006: 「惑星は 8 つ」, 理学のキーワード, 理学系研究科ニュース

- [62] 岡村定矩 2007: 「プラハの暑い夏」, 教室の窓, 2007 年 1 月, 東京書籍

7 気球観測による反物質探査, 衛星による X線・ γ 線観測

——飛翔体による観測データを用いた宇宙の研究—— (牧島・山本(明)・国分・佐貫)

7.1 気球による反物質探査

7.1.1 はじめに

BESS 気球実験は、大立体角、高精度超伝導マグネットスペクトロメータによる反粒子、反物質の探索を通して初期宇宙における素粒子像を探るとともに、一次宇宙線、大気宇宙線等の精密観測を太陽活動の変化による変調効果に焦点をおきつつ系統的に推進している。東京大学、KEK、神戸大学、ISAS/JAXA、NASA、メリーランド大、デンバー大が協力し、実験が推進されている。平成 18 年度は、南極周回気球観測実験・第一回 (H16 年実施) のデータ解析をほぼ完了するとともに、これまでの観測データを系統的に纏めた。また南極周回実験・第二回 (平成 19 年度実施を計画) にむけ、測定器の改良、実験準備を進めた。

7.1.2 宇宙線反陽子流束の精密観測

BESS-Polar 実験では、1 GeV 以下の宇宙線反陽子スペクトルの精密観測が最も重要なテーマである。1 GeV 以下の低エネルギー領域で、前回の太陽活動極小期 (1995-1997) に観測された平坦なスペクトルが、高い統計精度で再現されるか、または二次粒子スペクトルとして精密に理解されるかが焦点である。

BESS-Polar 第一回観測 (BESS-Polar-I, 2004) で収集された宇宙線イベントの解析には、1 年以上を要した。一部の TOF カウンタ・光電子増倍管の高電圧部の放電によって、立体角が $2/3$ に減少したこと、周回軌道が極点寄りになり観測時間が予定よりも短かった (8.5 日) もの、9 億の観測イベントのなかから、大気頂上での運動エネルギーとして 0.1-1.28 GeV の範囲で、432 イベントの反陽子流束を検出することに成功した。観測イベントの一例を、図 7.1 に示す。従来の BESS 実験 1 フライトデータの約 4 倍に相当する統計量により統計精度が大幅に向上した。また中間 TOF (MTOF) を用いた解析によって、エネルギースペクトル範囲を 0.1 GeV まで広げること成功した。図 7.2 に BESS-Polar 実験によって得られた反陽子スペクトルを示す。前回の太陽活

動極小期 (BESS95+97) の観測値、理論計算との比較を示す。BESS-Polar-I における観測値は、この太陽活動変調を考慮した二次起源モデルとよく整合し、原始ブラックホール等の一次起源反陽子の兆候は観測されていない。BESS-Polar-I は太陽活動の極大から極小期への過渡期であり、一次起源反陽子が存在しても、二次起源反陽子スペクトルに隠れるレベルである。この結果は、太陽活動極小期に実施を予定している BESS-Polar-II (2007 年予定) における観測結果と比較される、重要な基盤データとを提供した。BESS-Polar-I 実験およびその解析は、松田晋弥氏の博士論文 (平成 18 年度) となった。

BESS-Polar

Event Time: 14.15.55.245
Run: 104 Event: 2438704 (04) Size: 1978 FADC: 1216 FEND: 730
Trigger: 000111111 JET: 39 IDC: 4 UTOF: 1 MTOF: 1 LTOF: 1

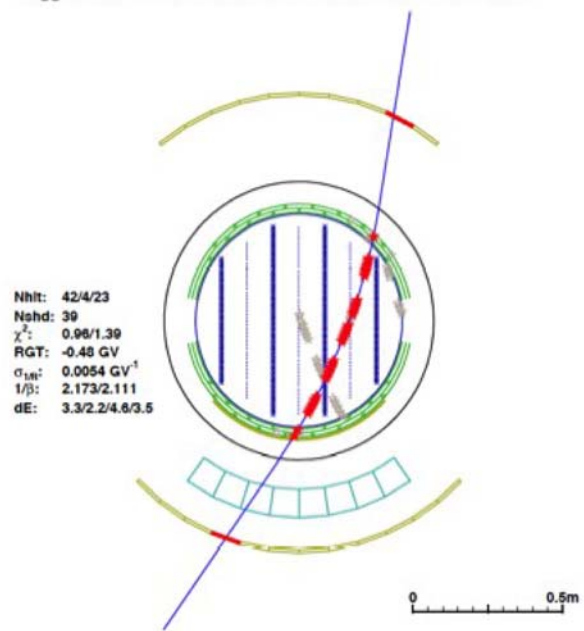


図 7.1: BESS-Polar-I における低エネルギー反陽子観測イベント。

7.1.3 宇宙線陽子スペクトルと太陽活動による変調

BESS 実験では、反陽子の観測とともに、陽子流束の観測を継続し、宇宙線物理学の基盤となる陽子、ヘリウム流束の精密観測データを提供している。

太陽活動変調を半周期以上にわたり観測し、理論モデルとの比較を行った。太陽磁場極性が反転する 2000 年までは、Force Field Model が実験データと良く整合しているが、極性反転後、2002 年、2004 年には、わずかなずれが観測された。さらなるモデル検証が求められる。

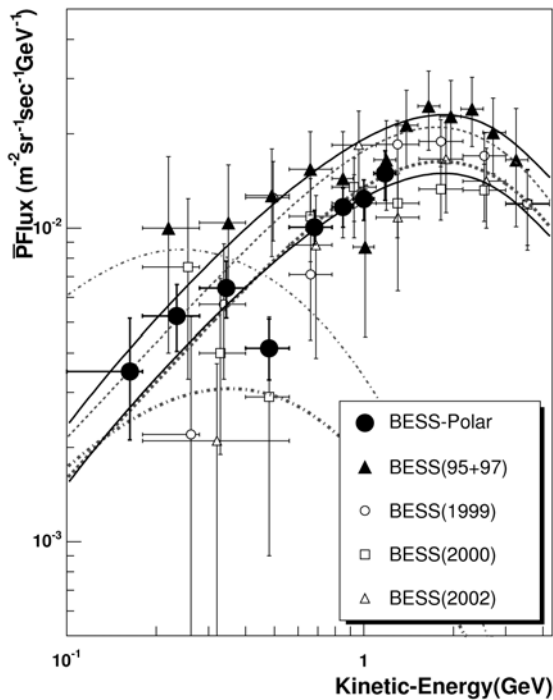


図 7.2: BESS-Polar-I における低エネルギー宇宙線反陽子スペクトル。それまでの観測結果およびモデル計算との比較。Standard Leaky Box Model による星間での二次反陽子生成に Spherically Symmetric Model により太陽変調を考慮した計算値が、これまでの観測結果と良い整合を示す。

7.1.4 反陽子／陽子比の太陽活動変調の電荷効果

反陽子、陽子比は、電荷極性が反転した質量が同一の粒子であることから、太陽活動変調の電荷効果をみるのに、非常に適したプローブとなる。図 7.3 に、BESS-Polar-I およびそれまでの観測で得られた反陽子／陽子比 (@ 0.7 GeV) 比を示す。また太陽活動変調の電荷効果について、二つのドリフトモデル計算との比較を示している。太陽活動極大期における太陽磁場極性反転に伴う、反陽子／陽子比の急激な変化を、BESS 実験が捉え、その後、2002、2004 年には、緩やかに変化していく様子を観測し続けており、特に Bieber 等によるモデル予測と良い整合性を示している。

7.1.5 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力にり、1987 年に実験準備を開始して以来、間もなく 20 年の歴史を刻む。第一回の観測をカナダで開始してから、合計 10

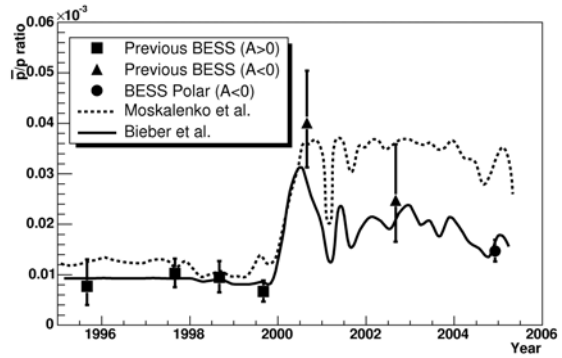


図 7.3: 宇宙線反陽子／陽子比 (@ 0.7 GeV) における太陽活動による変調の効果。2000 年に、太陽磁極の極性反転による急激な変化を明確に捉え、その後、緩やかな変化を観測した。Bieber 等による、ドリフトモデル計算が、観測値と良く整合する。

回の観測を成功させ、宇宙起源反粒子の探索を続けるとともに、宇宙線の絶対流束の精密観測データの提供、そして太陽活動による宇宙線流束が受ける変調を継続的に観測し続けてきた。来年度には、第二回南極周回気球実験を計画している (図 7.4)。BESS 超伝導スペクトロメータによる大立体角・精密観測、南極における長時間観測、太陽活動極小期における観測を重ね合わせ、かつてない統計精度で、宇宙起源反粒子の存在を探る実験に臨む予定である。

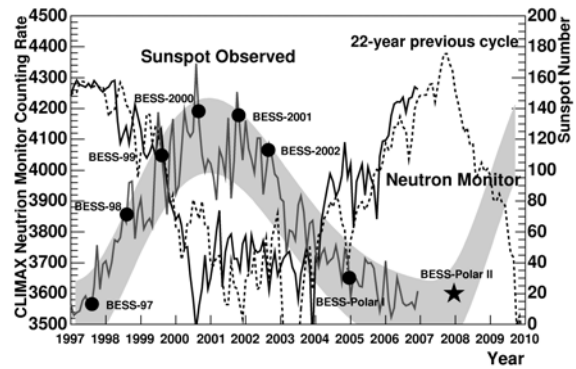


図 7.4: 太陽活動による黒点と中性子線 (宇宙線) 流束の変化。BESS 実験のこれまでの観測および 2007 年度の観測計画との関係を示す。

7.2 衛星による X 線・ γ 線観測

7.2.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況

○ 宇宙 X 線衛星「すざく」 [6, 169, 170]

2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた日本 5 機目の宇宙 X 線衛星「すざく」は、2006 年 4 月から公募体制に移行し、JAXA、NASA、および ESA で競争的に選ばれた観測提案にもとづき順調に観測を続けている。我々は国分、川原田、中澤 (当時 JAXA) らを中心に、衛星の運用を支援し、搭載された HXD 装置の運用を担当するとともに、初期に得られた衛星チームの占有データ (占有権は 2007 年 5 月末まで)、および公募観測で獲得したデータの解析を続けた。

○ 硬 X 線検出器 (HXD) とその運用 [7, 8]

「すざく」に搭載された硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、我々が JAXA、広島大、埼玉大、理研、金沢大、阪大、青学大、Stanford 大などと協力して開発した装置で、撮像機能は持たないが、10–600 keV の広帯域で世界最高レベルの感度を実現している。昨年度に引き続き、本研究室は HXD の運用とその軌道上校正に、中心的な役割を担った [44, 46, 85, 84, 96, 125, 138, 160]。また校正データベースを全世界に公開し、データ処理ソフトウェアの開発と公開に努めた。

HXD は個々のイベントの到来時刻を 61 μsec の精度で計測する機能をもつ。榎戸らは理研などと共同し、かにパルサーを *RXTE* 衛星や電波望遠鏡などと同時に観測し、時刻づけ精度を確認した [77, 105]。

○ HXD のバックグラウンド [8, 103, 126, 127]

HXD は 10–70 keV の検出素子として 2 mm 厚のシリコン PIN ダイオードを用い、その背後には、50–600 keV を受け持つ GSO シンチレータを置く。それらのバックグラウンドは、軌道上で 2~3 倍の変動を示すため、それを精度よくモデル化し観測データから差し引く必要がある。

PIN は BGO シンチレータで堅くシールドされているため、優れた低バックグラウンド特性をもつが、そのカウント数は地磁気緯度に相関して変動する。そこで北口らは、UC Berkeley、JAXA などと協力し、モンテカルロツール MGGPOD を用いて評価を進めた結果、宇宙線が大気突入して作る中性子が衛星高度まで逆流し、PIN バックグラウンドの主因となっている可能性を突き止めた [139]。

GSO のバックグラウンドは、地磁気緯度に相関する成分に加え、南大西洋地磁気異常帯を通過するさいに検出器が陽子照射で放射化することによる成分 (短期、長期) の寄与が大きい [35]。山田らは GSO バックグラウンドデータに対し、フラクタル次元解析および主成分解析を行い、それらを独立に変動するスペクトル成分に分解する試みを続けている [78, 140]。

○ シリコン PIN ダイオードの放射線照射試験

HXD-PIN は 500 V の逆バイアスを印可して空乏化しているが、打ち上げから今日まで、64 個の PIN のうち 2 個でリーク電流の増加が起き、その系統の

高圧を 400 V に下げる必要が生じた。これは放射線損傷に起因する可能性があるため、川原田らを中心に 3 月と 4 月に工学部総合試験所にて、フライト品相当の 4 個の PIN ダイオードに、軌道上で約 10 年間に浴びる線量に相当する ^{137}Cs を照射し、特性の変化を検証した。現在データ解析中である。

7.2.2 星と太陽の物理学

○ 進化した星での炭素合成 [28, 80, 83, 114, 73]

昨年度に村島らは「すざく」 CCD カメラ (XIS) の優れた特性を活かし、惑星状星雲 (進化した星の最終形態) BD+30° 3639 を観測し、X 線を放射するプラズマの炭素と酸素の比が、宇宙組成比を 90 倍も凌駕することを発見した。これはヘリウムから炭素が合成される現場を、世界で初めて捉えた結果である。今年度は、ビッグバンセンターの須田、北大の藤本らと協力し、成果の公表に努めた。

○ 中質量星からの X 線放射 [48, 49, 30]

低質量星は磁気コロナ、大質量星は星風を起源とする X 線を放射するが、中質量星はどちらの機構も欠くため、X 線が微弱と考えられていた。柳田らは *Chandra* 衛星の公開データを用い、多数の星形成領域に含まれる中質量星を研究した結果、若い中質量星 (2~10 M_{\odot}) は、巨大な X 線フレアを含む活発な X 線放射を示すこと (図 7.5) を突き止めた。これら若い星は、周囲の降着円盤との間に磁気架橋をもつか、連星に伴う磁気活動を起こしていると考えられる。これは柳田の博士学位論文となった [55]。

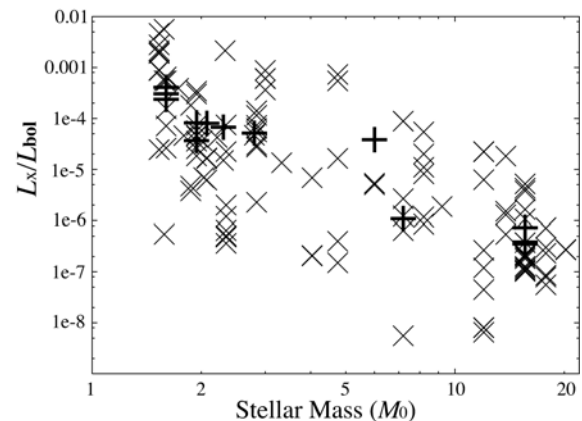


図 7.5: X-ray to bolometric luminosity ratios of intermediate-mass stars, observed in nearby star-forming regions observed with *Chandra*. Thick crosses indicate those sources which produced X-ray flares [55].

○ 「すざく」による太陽フレアの研究

HXD シールド部は、0.05–5 MeV の広帯域で全天を監視する、WAM (Wide-Band All-Sky Monitor) 機能も有する [45, 47, 161, 97, 161]。我々は埼玉大、青学大、理研、広島大、JAXA などと共同し、WAM による観測を進めた結果、2007 年 4 月末までに 120

例を越すガンマ線バーストを [98, 113]、また太陽極小期にもよらず 20 例を越す太陽フレアを検出した [141]。2006 年 12 月には、数例の X クラスのフレアから、数 MeV までのスペクトルを得た。

堅固にシールドされた HXD を利用し、太陽フレアに伴う中性子の探査も開始した。天文台の古徳と協力し、フレアのガンマ線が太陽表面でコンプトン散乱される効果の研究を進め、投稿論文とした [25]。

7.2.3 コンパクト天体からの X 線放射

○ X 線パルサー [68, 172]

強磁場中性子星はパルサーとも呼ばれ、回転駆動と降着型に分類できる。今年度は HXD の時刻付け検証を兼ねて、回転駆動パルサーの代表として、「すざく」による、かにパルサーの詳しい観測を続けたほか、SN1987A でのパルサー探しを続行した。「すざく」第 2 期公募観測には、マグネター天体の観測時間を得た。

降着型パルサーでは X 線スペクトル中に、電子サイクロトロン共鳴構造が現れ、磁場計測に利用できる場合がある [29, 27, 108]。榎戸らは理研と協力し、降着型パルサー Her X-1 の「すざく」データを解析した結果、既知の ~ 38 keV のサイクロトロン基本共鳴に加え、その倍波共鳴を確認できた。

○ 白色わい星での加速現象 [66, 72, 154]

回転駆動パルサーに比べ、強磁場白色わい星は、磁場は弱い、誘導起電力の強さでは遜色ない場合がある。理研の寺田らと協力し、高速自転する強磁場白色わい星 AE Aqr の「すざく」データを、昨年度に続き解析した。その結果、 ~ 40 keV までの硬 X 線が、33 秒の周期でパルスしており、そのパルス波形は、質量降着に伴う熱的 X 線とは異なり、かにパルサーに似た鋭い二山構造をもつことを突き止めた。

○ ブラックホール連星

広島大の高橋 [弘]、立教大の北本、JAXA の堂谷、理研の久保田らと協力し、A. Zdziarski の協力も得て、「すざく」で観測したブラックホール連星の解析を進めた [12, 86, 67, 62, 109, 110, 111]。降着円盤を上から見ている Cyg X-1 と、横から見ている GRO J1655-40 [101, 165] の比較に焦点を当てた結果、ともに Low/Hard 状態にあった 2 天体のスペクトルは、それぞれ 2 種類の光学的厚みをもつ熱的コンプトン過程を考えると、0.5-200 keV の広帯域にわたり統一的に説明できることを発見した [24, 132]。図 7.6 は 2 天体のスペクトルの比であり、 > 30 keV で比が徐々に上昇することから、GRO J1655-40 の方が系統的に大きな光学的厚みを持ち、よってコンプトン雲はやや扁平と考えられる [50]。低エネルギー側では、Cyg X-1 の方が低温円盤が見えやすいため、比が 1 より低下する。

山田らは、速い時間変動にともない、Cyg X-1 の広帯域スペクトルがどのように変化するか、新たな視点から研究を開始した。

○ ULX 天体

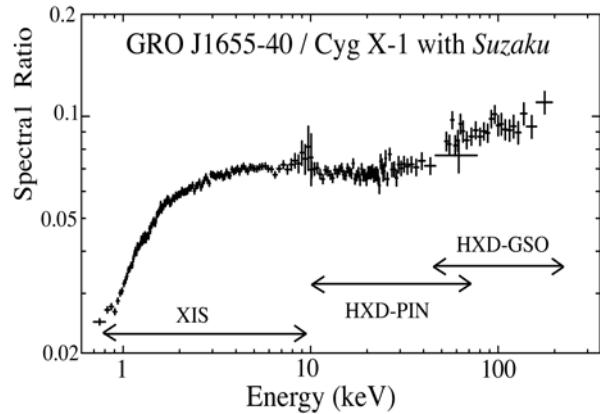


図 7.6: Ratios of the *Suzaku* spectra of two black-hole binaries, GRO J1655-40 and Cyg X-1. The deviation of the ratios from a constant is thought to reflect the inclination difference between the two objects. [50]

ULX (Ultra-Luminous compact X-ray) 天体は、中質量ブラックホールの有力候補で、我々は広島大の水野、理研の久保田や磯部、理科大の宮本などと協力し、総合的に研究している [61, 62, 131]。「すざく」や *XMM-Newton* を用いて NGC 1313 銀河にある 2 つの ULX などを研究した結果、それらが太陽の数十倍の質量をもつ中質量ブラックホールであるという描像を一段と強化し [16, 20]、2 つの一方にはハイパーノバの残骸とおぼしきプラズマの放射が伴う可能性を突き止めた [150, 133]。

理研の磯部らと協力し、「すざく」が NGC 4945 銀河に発見したトランジェント ULX が、回転ブラックホールである可能性を得た [112, 151]。宮脇らは「すざく」HXD を用い、M82 銀河にある ULX を 10 keV 以上で検出することに成功した [153, 134, 62, 50]。これは ULX から初めての、硬 X 線の検出である。

○ 活動銀河核 (AGN)

伊藤らは理研の磯部や Durham 大の C. Done らと協力し、「すざく」の試験観測期間に観測された 2 型セイファート NGC 4945 の解析を進めた [71, 87, 100, 118, 75]。その硬 X 線は数十分で強く変動することから、ぶ厚い吸収体を通過した AGN 放射が硬 X 線の大部分を占め、遠方の大きな散乱体から戻ってくる硬 X 線は微弱であることを突き止めた。この結果、吸収体は視線方向に限って存在するという、新しい可能性が強まった [75, 135]。

伊藤を PI とし、低光度 AGN の代表として、M81 と NGC 4258 を「すざく」で観測した [136]。

7.2.4 広がった宇宙プラズマからの X 線

○ 銀河系に付随するディフューズ X 線放射

昨年度は、JAXA、京大などと共同して、「すざく」を用いた銀河系ディフューズ X 線の研究を進め、

銀河中心を含む銀経 $\pm 1.5^\circ$ 銀緯 $\pm 0.5^\circ$ の領域から、高温の強い熱的放射に加え光子指数 2 ~ 3 程度の非熱的放射を検出することに成功した [65]。図 7.7 に、そのスペクトルを示す。XIS では、強いイオン輝線を伴う高温 ($\sim 10^8$ K) の熱的放射が受かっている。視野中心に点源がある場合 (実線) に比べ、視野の大きな HXD が、ずっと強い信号を受けていることから、放射はディフューズである可能性が高い。

湯浅、国分らは今年度、HXD の視野内に混入する可能性のある点源の強度を、他の衛星などの情報を用いて推定し、それらの影響を差し引いても硬 X 線放射が残ることを検証した [115, 63, 79, 99, 115, 116, 155, 156]。このことから、星間空間で広く粒子加速が起きており、たとえば超熱的電子が制動放射で硬 X 線を放射していることが示唆される。

以上を受け「すざく」第 1 期と第 2 期の公募観測では、国分を PI とし、より広い領域をマッピング観測する作業が進んでいる [63, 65]。この研究は、XIS の優れたエネルギー分解能と広がった放射に対する高い感度、HXD のもつ高感度と絞られた視野、XIS と HXD の連続したエネルギー帯など、「すざく」の特徴を活かした重要な観測テーマである。

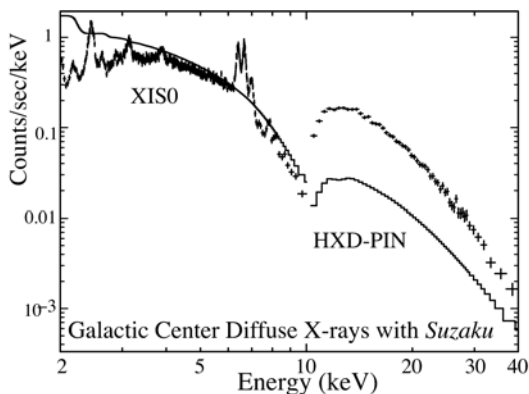


図 7.7: *Suzaku* spectra of the Galactic Center region. The XIS detects hot plasma emission with intense atomic lines, whereas the HXD observes non-thermal signals possibly from accelerated electrons. The solid curves indicate a prediction when a point source with a certain intensity is present at the field-of-view center.

○ 球状星団の運動に伴う衝撃波

2005 年度に岡田が着手した、球状星団が銀河系ハロー内を運動するさいの X 線放射を、論文として投稿した [23]。衝撃波で準相対論的な超熱的な電子と、相対論的な逃走電子が作られている可能性が高い。対象天体の中から 47 Tuc を選び、湯浅を PI として「すざく」に観測時間を確保した。

○ 銀河と銀河団プラズマの相互作用

牧島らは、「銀河団プラズマ中を運動する銀河は、プラズマから磁気流体的な抵抗を受け、銀河団ポテンシャルの底に沈む」という独創的な描像を提唱し

ており、その論文で受賞した [3]。この描像を検証するには、銀河と銀河団の相互作用をさまざまな角度から検討する必要がある。

今年度は理研の太田らと協力して、「すざく」によるケンタウルス銀河団のデータを解析し、プラズマは大きなバルクな速度をもたず、静水圧平衡にあると考えてよいことを確立した [19, 122]。首都大の佐藤らが主導した、「すざく」による Abell 1060 銀河の観測では、銀河団の中心でプラズマ加熱が起きている兆候を得た [22, 120]。銀河の運動の熱化が起きている兆候かもしれない。

北口らは理研の太田、埼玉大の浦田、天文台の児玉らと協力し、「すばる」で観測した遠方銀河団の可視光データを用い、X 線分布で規格化した銀河団の可視光の広がり、宇宙の進化とともに減少する効果を探査している。

○ 銀河団プラズマ中の重元素の研究

X 線観測により銀河団プラズマ中の重イオンの特性 X 線を検出すると、宇宙における元素合成が探査できる。「すざく」XIS の優れた軟 X 線特性のお蔭で、酸素輝線の研究が大幅に進展した。川原田、理科大の松下、都立大の佐藤らは「すざく」の観測を通じ、多くの銀河団において、プラズマ中の鉄イオンは酸素イオンより強く中心に集中することを示した [18, 22, 106, 120, 123, 74, 144]。宇宙初期には銀河は現在より外側まで分布しており、当時の II 型超新星で作られた酸素は空間的に広がる一方で、銀河は宇宙年齢かけ、Ia 型超新星による鉄を放出しつつ、重力ポテンシャルの中心への落下してきたことが示唆される。川原田らはこの結果をさらに強化すべく、「すざく」に遠方銀河団 MS 1512.4+3647 の観測時間を獲得した。

○ 銀河群および銀河団からの非熱的 X 線

銀河団や銀河群は、宇宙線の加速現場の候補として注目されている。中澤 (当時 JAXA)、牧島、広島大の深沢らは、「あすか」GIS のデータを再解析し、複数の銀河群から非熱的な放射の徴候を得た [21]。

昨年に続き「すざく」HXD を用いて、銀河団からの非熱的放射の探査も進められた。広島大との協力で、Abell 3376 銀河団では、非熱的信号に対して厳しい上限値を得た [124]。川原田、中澤らは、強い電波ハローをもつ別の衝突銀河団 Abell 3667 銀河団を「すざく」で観測し、データ解析を進めている [158]。

北口らは静穏な銀河団に注目し、「すざく」HXD-PIN を用いて、ケンタウルス座銀河団、Abell 1060、およびペルセウス座銀河団を、10 keV 以上で検出することに成功した [102, 76, 157]。信号は熱的なものと解釈でき、異常に高温な成分などは見られない。

7.2.5 雷雲からのガンマ線の観測

雷雲中の電場は、 $\gtrsim 100$ kV/m に達する。大気中では粒子衝突が激しいため、電子は容易に加速されないが、宇宙線などで高速 (> 10 keV) の電子が作られると、それらは加速されるほどクーロン散乱されにくくなり、大気分子によってアバランシェ増幅

を繰り返す。その結果、相対論的な「逃走電子」が発生し、制動放射でガンマ線を放射すると期待される。じっさい雷に伴う放射線の増加が、原子力発電所の放射能モニターを含め、国内外で報告されている。

榎戸、山田、湯浅らは、理研の土屋らと協力し、自律型の放射線検出器を製作し、東京電力の協力を得て、2006年12月下旬にそれを柏崎刈羽原発の建物の屋上に設置した。3インチ径の円筒状 NaI シンチレータに、BGO のアクティブシールドを付加したものの2台を用意し、プラスチックシンチレータ、可視光の雷光検出器、雷鳴の音検出器なども製作した。

遠隔運転していたところ、2007年1月7日の早朝、強い冬型気圧配置に伴う寒雷が活発になり、約40秒にわたり放射線の増加を検出した(図7.8)。プラスチックシンチレータには増加が無いので、到来したのはガンマ線であり、それらは雷雲中で > 10 MeVに加速された電子からの放射と解釈できる[92, 145, 166]。ガンマ線が落雷と同期せず、落雷に先行したことは興味深い。結果は榎戸の修士論文となり[56]、第1回の理学系研究科・研究奨励賞を受賞した[2]。

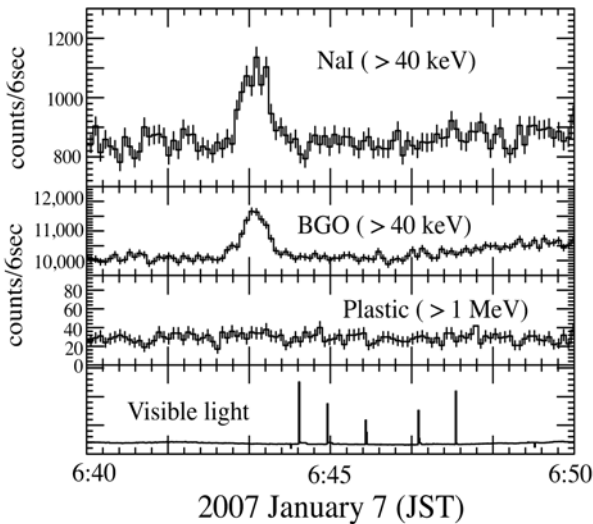


図 7.8: Count-rate histories of three scintillators, installed at Kashiwazaki, Niigata. An episode of prolonged gamma-ray emission from thunderclouds was observed on 2007 January 7. The spectrum extends up to ≈ 10 MeV. The bottom panel, output of an optical sensor, recorded five lightning discharges.

7.2.6 将来に向けての技術開発

○ アバランシェフォトダイオード (APD) の開発

我々は、東工大、広島大などと共同で、アバランシェフォトダイオード (APD) を開発している。佐藤らはリバース型 APD (5×5 mm², Hamamatsu S8664-55) のノイズ特性を調べるとともに、²⁴¹Am を直接に照

射することで、電子増幅の信号に加え、正孔の増幅信号を検出することに成功した。電子の増幅率を M_e 、正孔の増幅率を M_h とすると、 $(M_h - 1)/(M_e - 1) \approx 0.013$ が成り立ち、逆バイアス 400 V で、 $M_e \approx 80$ 、 $M_h \approx 2.0$ を得た [57]。12 個の 3×3 mm² の APD を一列に並べた spl4651 を使い、大型 BGO 結晶シンチレータからガンマ線蛍光を読み出すことに成功した [95, 143]。これらは佐藤の修士論文となった [57]。

○ Space Wire / Space Cube の利用法の開発

SpaceWire は、次世代衛星の標準的なデータ収集・機器制御プロトコルとして、世界的に開発が進められている。Space Cube は、それに適合した超小型の宇宙用 CPU で、OS として TRON などを搭載できる。我々は、湯浅、国分らを中心に、JAXA (高橋 [忠]、小高ら)、シマフジ電気などと協力し、その開発を行っている。今年度は、C++ 言語により Space Wire の汎用のデータ収集ソフトウェア群を作成するとともに、位置検出型ガンマ線検出器の読み出し (次項) に応用した [142]。

坪野研究室による、Space Wire / Space Cube を用いたスペース重力波の技術実証のための小型衛星プラットフォーム計画 (SWIM) にも、JAXA などとともに協力している [146, 147, 148, 149]。

○ 撮像型ガンマ線検出器の開発

伊藤らは昨年度に続き、薄い短冊型の GSO 結晶を重ねたものを、1次元の半導体光検出器で読み出すことで、 ~ 0.4 mm の位置分解能をもつ、1次元の位置検出ガンマ線検出器を開発した [37, 42, 82]。

湯浅らは昨年平栗らの成果を受け、4 mm 角の柱状 LaBr₃ 結晶を 10×10 で並べ、位置有感フォトチューブ (浜松 H9500) に付け、256 本の信号を専用ヘッドアンプ (クリアパルス 80158) を通して、Space Wire で読み出すことに成功した [142]。

柳田らは、これら撮像検出器に用いる無機シンチレータの開発を続け [81, 162, 36]、多結晶シンチレータに関する講演により受賞した [1, 41]。

○ NeXT 衛星に向けての準備 [90, 164, 43]

日本の多くの機関と協力して、「すざく」の後継機 NeXT (NEw X-ray Telescope) ミッションの提案を進めている。これは、 ~ 70 keV まで集光できるスーパーミラーに、硬 X 線の撮像検出器を組み合わせたものを主力装置とし、「すざく」HXD をさらに改良して撮像機能をもたせた軟ガンマ線検出器や、「すざく」で実現できなかったカロリメータを搭載するものである。2012 年頃の打ち上げを目ざしており、JAXA 宇宙理学委員会では、ASTRO-G (電波干渉計) 計画に続く理学ミッションとして認定されている。

< 受賞 >

- [1] 柳田健之、日本セラミックス協会特定セッション (第 19 回秋季シンポジウム、2006 年 9 月) 若手優秀発表賞
- [2] 榎戸輝揚、第 1 回理学系研究科研究奨励賞・修士の部 (2007 年 3 月)
- [3] 牧島一夫ほか、第 11 回日本天文学会欧文研究報告論文賞 (2006 年 3 月 29 日), Makishima *et al.*: *Publ.*

Astr. Soc. Jp. **53**, 401–420, “X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies” に対し

< 報文 >

(原著論文)

- [4] A. Yamamoto, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, K. Kim, T. Kumazawa, M.H. Lee, Y. Makida, S. Matsuda, J.W. Mitchell, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, S. Orito, J.F. Ormes, T. Sanuki, K. Sakai, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “The BESS Program”, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **116**, 62 (2007)
- [5] Y. Shikaze, S. Haino, K. Abe, H. Fuke, T. Hams, K.C. Kim, Y. Makida, S. Matsuda, J.W. Mitchell, A.A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J.F. Ormes, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, K. Yoshimura: “Measurements of 0.2 to 20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer”, *Astroparticle Phys.*, in press (2007), Doi; 10.1016/2007.05.001
- Publ. Astr. Soc. Japan Vol. **59**, 「すざく」特集号
- [6] Mitsuda, K., (5 名), Makishima, K., (49 名), Kokubun, M., *et al.*: “The X-Ray Observatory Suzaku”, S1-S7
- [7] Takahashi, T., (以下順不同) Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hirakuri, S., Isobe, N., Itoh, T., Iyamoto, N., Kasama, D., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kotoku, J., Kubota, A., Makishima, K., Matsumoto, Y., Miyawaki, R., Mizuno, T., Murashima, M., Nakazawa, K., Niko, H., Okada, Y., Ota, N., Sugiho, M., Takahashi, H., Takahashi, I., Tamura, T., Tashiro, M., Terada, Y., Yanagida, T., *et al.*: “Hard X-Ray Detector (HXD) on Board Suzaku”, S35-S51
- [8] Kokubun, M., Makishima, K., (以下順不同) Nakazawa, K., Terada, Y., Tamagawa, T., Kubota, A., Isobe, N., Takahashi, I., Takahashi, H., Hong, S., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Kitaguchi, T., Enoto, T., Sato, M., Yamada, S., Yuasa, T., *et al.*: “In-Orbit Performance of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku”, S53-S76
- [9] Hamaguchi, K., Petre, R., (11 名), & Kokubun, M.: “Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Carina Nebula”, S151-S161
- [10] Miyata, E., Katsuda, S., Tsunemi, H., Hughes, J. P., Kokubun, M., & Porter, F. S.: “Detection of Highly-Ionized Carbon and Nitrogen Emission Lines from the Cygnus Loop Supernova Remnant with the Suzaku Observatory”, S163-S170
- [11] Ueno, M., Sato, R., Kataoka, J., Bamba, A., Harus, I., Hiraga, J., Hughes, J.P., Kilbourne, C., Koyama, K., Kokubun, M., (12 名): “A Suzaku Observation of the Low-Ionization Fe-Line Emission from RCW 86”, S171-S176
- [12] Kubota, A., (10 名), Makishima, K., Yamada, S., Kohmura, T., & Angelini, L.: “Suzaku Discovery of Iron Absorption Lines in Outburst Spectra of the X-Ray Transient 4U 1630-472”, S185-S198
- [13] Matsumoto, H., Ueno, M., Bamba, A., (10 名), Hiraga, J., Yamauchi, S., Hughes, J. P., Senda, A., Kokubun, M., Kohmura, T., & Porter, S.: “Suzaku Observations of HESS J1616-508: Evidence for a Dark Particle Accelerator”, S199-S208
- [14] Bamba, A., Koyama, K., Hiraga, J. S., Hughes, J. P., Kohmura, T., Kokubun, M., (7 名), Yuasa, T., Maeda, Y., Matsumoto, H., Senda, A., Takahashi, T., Tsuboi, Y., Yamauchi, S., & Yuasa, T.: “Discovery of a Possible X-Ray Counterpart to HESS J1804-216”, S209-S214
- [15] Yamauchi, S., Ebisawa, K., Bamba, A., Ishida, M., Iwasawa, K., Tanaka, Y., Kokubun, M., (4 名): “Discovery of a New X-Ray Transient Source in the Scutum Region with Suzaku”, S215-S220
- [16] Mizuno, T., Miyawaki, R., Ebisawa, K., Kubota, A., Miyamoto, M., Winter, L., Ueda, Y., Isobe, N., (4 名), Kokubun, M., Kotoku, J., Makishima, K., (5 名), Tamagawa, T., & Terashima, Y.: “Suzaku Observation of Two Ultraluminous X-Ray Sources in NGC 1313”, S257-S267
- [17] Yaqoob, T., (6 名), Itoh, T., Kelley, R., Kokubun, M., (9 名): “Precision Fe K α and Fe K β Line Spectroscopy of the Seyfert 1.9 Galaxy NGC 2992 with Suzaku”, S283-S299
- [18] Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hughes, J., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., (3 名): “Suzaku Observation of the Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the Fornax Cluster”, S327-S338
- [19] Ota, N., Fukazawa, Y., Fabian, C., Kanemaru, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kelley, R., Kitaguchi, T., Makishima, K., (7 名): “Suzaku Observations of the Centaurus Cluster: Absence of Bulk Motions in the Intracluster Medium”, S351-S359
- Publ. Astr. Soc. Japan, 特集号以外
- [20] Tsunoda, N., Kubota, A., Namiki, M., Sugiho, M., Kawabata, K., & Makishima, K.: “Detailed Spectral Study of an Ultra-Luminous Compact X-Ray Source, M81 X-9, in the Disk-Dominated State”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **58**, 1081-1088 (2006)
- [21] Nakazawa, K., Makishima, K., & Fukazawa, Y.: “Hard X-Ray Properties of Groups of Galaxies as Observed with ASCA”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **59**, in press (2007)

- [22] Sato, K., (5 名), Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Ota, N., Nakazawa, K., (6 名): “X-Ray Study of Temperature and Abundance Profiles of the Cluster of Galaxies Abell 1060 with Suzaku”, *ibid.*, in press (2007)
- [23] Okada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., & Makishima, K.: “Chandra Detections of Diffuse X-ray Emission From Globular Clusters”, *ibid.*, in press (2007)
- [24] Takahashi, H., Kitamoto, S., (5 名), Kubota, A., Makishima, K., Itoh, T., Kokubun, M., (16 名), “Low/Hard State Spectra of GRO J1655-40 Observed with Suzaku”, *ibid.*, in press (2007)
- [25] Kotoku, J., Makishima, K., Matsumoto, Y., Kohama, M., Terada, Y., & Tamagawa, T.: “Effects of Compton scattering on the Gamma Ray Spectra of Solar flares”, *ibid.*, in press (2007)
- Astrophysical Journal
- [26] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., Itoh, K., Iyomoto, N., Takahashi, I., & Kaneda, H.: “The XMM-Newton Examination of Energetics in the East Lobe of the Nearby Radio Galaxy Fornax A (NGC 1316)”, *Astrophys. J.*, **645**, 256-263 (2006)
- [27] Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K., & Niko, H.: “A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with *RXTE*”, *Astrophys. J.* **646**, 1125-1138 (2006)
- [28] Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., (7 名): “*Suzaku* Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639”, *Astrophys. J. Lett.*, **647**, L131-L134 (2006)
- [29] Terada, Y., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Enoto, T., Kokubun, M., Kitaguchi, T., (21 名): “Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0535+262 Observed with *Suzaku*”, *Astrophys. J. Lett.* **648**, L139-L142 (2006)
- [30] Ezo, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: “The Discovery of Diffuse X-Ray Emission in NGC 2024, One of the Nearest Massive Star-forming Regions”, *Astrophys. J.* **649**, L123-L128 (2006)
- Advances in Space Research
- [31] A. Yamamoto, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, K. Kim, M.H. Lee, Y. Makida, S.Matsuda, J.W.Mitchell, A.Moiseev, J.Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, S. Orito, J.F. Ormes, T. Sanuki, K. Sakai, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, N. Thakur, Y. Takasugi, K.Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, T.Yoshida, & K. Yoshimura: “Search for Primordial Antiparticle with BESS” *Adv. Space Res.*, in press (2007), doi: 10.1016/j.asr.2007.04.069.
- [32] K. Yoshimura, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, K. Kim, M.H. Lee, Y. Makida, S. Matsuda, J.W. Mitchell, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, J.F. Ormes, K. Sakai, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Tanaka, K. Tanizaki, N. Thakur, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “BESS-Polar Experiment”, *Adv. Space Res.*, in press (2007), doi: 10.1016/j.asr.2007/05.043.
- [33] M. Sasaki, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, K. Kim, M.H. Lee, Y. Makida, S. Matsuda, J.W. Mitchell, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, S. Orito, J.F. Ormes, T. Sanuki, K. Sakai, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “Search for Antihelium with BESS”, *Adv. Space Res.*, in press (2007)
- [34] H. Fuke, Y. Tadaki, K. Abe, S. Haino, Y. Makida, S. Matsuda, J.W. Mitchell, A. A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J.F. Ormes, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “Search for fractionally charged particles in cosmic rays with BESS spectrometer”, *Adv. Space Res.*, in press (2007)
- IEEE Transactions
- [35] Ozaki, M., Watanabe, S., Terada, Y., Itoh, T., Kitasunezuka, M., Kishishita, T., Ishisaki, Y., Takahashi, T. “Framework for a Geant4-based Simulator of the Radiation Background and Detector Responses of the Space X-ray Observatory *Suzaku*”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 1310 (2006)
- [36] Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., & Shigeta, T.: “The Temperature Dependence of Gamma-Ray Responses of YAG:Ce Ceramic Scintillators”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 2404 (2006)
- [37] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Honda, T., Makishima, K., Tanaka, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Nakazawa, K., & Takahashi, T.: “Developments of a New 1-Dimensional γ -Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 2983 (2006)
- [38] Y. Makida, T. Kumazawa, H. Fuke, A. Yamamoto, and T. Yoshida. “Ballooning of an ultra-thin superconducting solenoid for particle astrophysics in Antarctica”, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **16**, No.2, 477 (2006)
- [39] Y. Makida, R. Shinoda, J. Suzuki, A. Yamamoto, and S. Mizumaki: “Cryogenics performance of

ultra-thin superconducting solenoids for cosmic-ray observation with ballooning”, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, in press (2007).

● Nuclear Instruments and Methods

- [40] Nakazawa, K., Takeda, S., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Sawamoto, N., Tajima, H., Itoh, T., & Kokubun, M., “A high-Energy Resolution 4 cm-Wide Double-Sided Silicon Strip Detector”, *Nucl. Inst. Meth. A*, **573**, 44-47 (2007)
- [41] Yanagida, T., Itoh, T., Takahashi, H., Sato, M., Enoto, T., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T., & Ito, T.: “Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillator to $(\text{YGd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$ for Gamma-ray Detectors”, *Nucl. Inst. Meth. A*, in press (2007)
- [42] Itoh, T., Yanagida, T., Kokubun, M., Sato, M., Miyawaki, R., Makishima, K., Takashima, T., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Shimura, N., & Ishibashi, H.: “A 1-Dimensional γ -ray Position Sensor based on GSO:Ce Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *Nucl. Inst. Meth. A*, in press (2007)
- (会議集録)
- [43] Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kataoka, J., Kokubun, M., Makishima, K., (6名), Tamagawa, T., Terada, Y., *et al.*: “Hard X-ray Imager for the NeXT Mission”, *SPIE* **6266**, 62662H (2006)
- [44] Fukazawa, Y., (5名), Makishima, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Kitaguchi, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M. (9名), Terada, Y., Tamagawa, T., Kubota, A., *et al.*: “Inflight Calibration & Performance of the Hard X-ray Detector (HXD) onboard *Suzaku*”, *SPIE* **6266**, 62662L (2006)
- [45] Yamaoka, K., Sugita, S., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Terada, Y., Tamagawa, T., (10名), Miyawaki, R., Enoto, T., Kokubun, M., Makishima, K., & Murakami, T.: “In-Orbit Performance of the *Suzaku* Wideband All-Sky Monitor”, *SPIE* **6266**, 626643 (2006)
- [46] Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M., Makishima, K., Takahashi, T., Nakazawa, K., *et al.*: “In-Orbit Calibration of the Hard X-ray Detector (HXD-II) onboard *Suzaku*”, *SPIE* **6319**, 63190U (2006)
- [47] Yamaoka, K., Sugita, S., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Terada, Y., Endo, Y., Hong, S., Abe, K., Onda, K., Tashiro, M., Enoto, T., Miyawaki, R., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Wide-Band All-Sky Monitor Observations of GRB Prompt Emissions”, *AIP Conf. Proc.* **836**, 201-204 (2006)
- [48] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “*Chandra* Observations of OB stars in the Cygnus OB2 Association”, *Active OB-Stars: Laboratories for Stellar and Circumstellar Physics*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **361** p. 533 (2007)
- [49] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “Large X-ray Flares from B-type Stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 Observed with *Chandra*”, *ibid.*, p.533 (2007)
- [50] Makishima, K.: “X-ray Study on Stellar/ Intermediate Mass Black Holes”, *Prog. Theor. Phys.*, in press (2007)
- 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2007)
- [51] 長谷川雅也、鈴木純一、田中賢一、堀越 篤、野崎光昭、松田晋弥、槇田康博、山本 明、吉村浩司、篠田遼子、坂井賢一、西村 純、福家英之、山上隆正、吉田哲也、 T. Hams, J.W. Mitchell, A.A. Moiseev, M. Sasaki, R.E. Streitmatter, K.C. Kim, M-H. Lee, Z.D. Myers, E.S. Seo, J.F. Ormes, N. Thakur: 「BESS-Polar-II : 実験計画と準備状況」、p. 158.
- [52] 松川庸介、折戸玲子、楠本?、長谷川雅也、鈴木純一、田中賢一、堀越篤、野崎光昭、松田晋弥、槇田康博、山本 明、吉村浩司、篠田遼子、坂井賢一、西村 純、福家英之、山上隆正、吉田哲也、T. Hams, J.W. Mitchell, A.A. Moiseev, M. Sasaki, R.E. Streitmatter, K.C. Kim, M-H. Lee, Z.D. Myers, E.S. Seo, J.F. Ormes, N. Thakur: 「BESS-Polar-II : TOF 用 PMT 気密容器の開発-低温低圧動作試験結果-」、p. 162.
- [53] 篠田遼子、坂井賢一、西村 純、鈴木純一、田中賢一、野崎光昭、長谷川雅也、松田晋弥、槇田康博、山本 明、吉村浩司、福家英之、山上隆正、吉田哲也、折戸玲子、楠本 ?、松川庸介、堀越 篤、T. Hams, J.W. Mitchell, A.A. Moiseev, M. Sasaki, R.E. Streitmatter, K.C. Kim, M-H. Lee, Z.D. Myers, E.S. Seo, J.F. Ormes, N. Thakur: 「BESS-Polar-II: マグネットの開発」、p. 166.
- (学位論文 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻))
- [54] Matsuda, Shin'ya: “Measurement of cosmic-ray low-energy antiproton flux in a long-duration flight over Antarctica”, 博士学位論文 (2006年9月)
- [55] Yanagida, Takayuki: “Investigation of X-ray Flares from Intermediate Mass Stars”, 博士学位論文 (2007年3月)
- [56] 榎戸輝揚: 「雷雲電場における粒子加速の観測的研究」、修士学位論文 (2007年3月)
- [57] 佐藤光浩: 「1次元 APD アレイの宇宙利用に向けた基礎実験」、修士学位論文 (2007年3月)

< 学術講演 >

(国際会議)

- 招待講演
- [58] Yamamoto, A.: “The BESS Program”, The 3rd International Conference on Particle and Fundamental Physics in Space (SparcPart), Beijing (2006).
- [59] Yamamoto, A.: “Search for Primordial Antiparticle with BESS”, The 36th COSPAR Scientific Assembly (2006 July 16-23, Beijing)
- [60] Yoshimura, K.: “BESS-Polar Experiment”, The 36th COSPAR Scientific Assembly (2006 July 16-23, Beijing)
- [61] Makishima, K., Kubota, A., Miyawaki, R., & Mizuno, T.: “Observational Evidence for Intermediate-Mass Black Holes: Ultra-Luminous X-ray Sources”, IAU Symp. 238, *Black Holes from Stars to Galaxies* (2006 Aug. 21-25, Prague)
- [62] Makishima, K.: “X-ray Study on Stellar/ Intermediate Mass Black Holes”, *The Extreme Universe in the Suzaku Era* (2006 Dec. 4-8, Kyoto)
- [63] Kokubun M., Yuasa, T., Tamura, K., Makishima K., (11 名), Bamba, A., Senda, A., *et al.*: “Hard X-ray Investigation of the Galactic Center Region with *Suzaku*”, *ibid.*
- [64] Yamamoto, A.: “Search for Primordial Antiparticle and Precise Measurement of Cosmic-rays”, Int. Workshop on Cosmic-rays and High Energy Universe (2007, Tokyo).
- 6th INTEGRAL Workshop, *The Obscured Universe* (2006 July 2-8, Moscow) 一般講演/ポスター発表
- [65] Kokubun, M., Makishima, K., Takahashi, T., & the *Suzaku* Team: “Hard X-ray view of the Milky Way Galaxy obtained with the HXD onboard *Suzaku*”, (口頭)
- [66] Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Makishima, K., Dotani, T., Gallo, L., Naik, S., & Enoto, T.: “A High-Sensitivity *Suzaku* Observation of Possible Non-Thermal Emission from a White Dwarf”
- [67] Takahashi, H., (5 名), Kubota, A., Miyawaki, R., Yamaoka, K., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., (10 名): “*Suzaku* Broadband Observations of Galactic Black Hole Binaries”, (口頭)
- [68] Enoto, T., Terada, Y., Miyawaki, R., Kokubun, M., Makishima, K., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., *et al.*: “Wide-band study of X-ray pulsars with *Suzaku*”, (ポスター)
- 36th COSPAR Scientific Assembly (2006 July 16-23, Beijing) 一般講演/ポスター発表
- [69] Sasaki, M. *et al.*, “Search for Antihelium, Progress with BESS”
- [70] Takahashi, H., & Makishima, K.: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”
- [71] Isobe, N., Griffiths, R., Itoh, T., Anabuki, N., Awaki, H., Dewangan, G., Madejski, G., Makishima *et al.*: “*Suzaku* observation of nearby Seyfert 2 galaxy NGC 4945”
- [72] Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Makishima, K., Gallo, L., Naik, S., & Enoto, T.: “Possible *Suzaku* Detection of Non-Thermal X-ray Signals from a Rotating Magnetized White Dwarf”
- The Extreme Universe in the *Suzaku* Era (2006 年 12 月 4-8 日, 京都) ポスター発表
- [73] Suda, T., Fujimoto, M., Murashima, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “How the Fast Stellar Wind Blowing—A Lesson from the Recent X-ray Observations of Planetary nebulae”
- [74] Kawaharada, M., Sato, M., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kanemaru, T., Ota, N., Tamagawa, T., *et al.*: “*Suzaku* Study of Spatial Oxygen Distribution in the Centaurus Cluster”
- [75] Itoh, T., Isobe, N., Awaki, H., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Hard X-ray Observation of Nearby Seyfert 2 Galaxy: NGC 4945”
- [76] Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Nakazawa, K., Yamasaki, N., Ota, N., *et al.*: “*Suzaku* Study of Hard X-ray Emission from Relaxed Galaxy Clusters”
- [77] Enoto T., Terada Y., Ishisaki Y., Miyawaki R., Kokubun M., Makishima, K., Itoh M., & Hasinger, G.: “The HXD Timing Calibrations and Applications to X-ray Pulsars”
- [78] Yamada, S., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., Kubota, A., *et al.*: “Fractal dimensional and principal component analyses”
- [79] Yuasa, T., Kokubun, M., Makishima, K., Tamura, K., Onuki, K., Nakazawa, K., Takahashi, T., Bamba, A., Senda, A., Koyama, K. *et al.*: “HXD-PIN Studies of the Diffuse Hard X-ray Emission from the Galactic Center”
- その他の一般講演
- [80] Kokubun, M., Murashima, M., Makishima K., *et al.*: “*Suzaku* detection of a highly carbon enriched plasma in BD +30 3639”, IAU Symp. No.234, *Planetary Nebulae in Our Galaxy and Beyond* (2006 Apr. 3-7, Hawaii)
- [81] Yanagida, T., Itoh, T., Takahashi, H., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T., & Ito, T.: “Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillator to (Y,Gd)₃Al₅O₁₂(Ce) for Gamma-ray Detectors”, *Symp. Rad. Meas. and Appl.* (2006 May 23-25, Univ. Michigan)
- [82] Itoh, T., Yanagida, T., Kokubun, M., Sato, M., Miyawaki, R., Makishima, K., Takashima, T., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Shimura, N., Ishibashi, H.: “A 1-Dimensional γ -ray Position Sensor based on GSO:Ce Scintillators Coupled to a Si Strip Detector” *ibid.*

- [83] Makishima, K., Murashima, M., Kokubun, K., *et al.*: “He-Burning Products in the Planetary Nebula BD+30 3639”, 208th Amer. Astr. Soc. Meeting (2006 June 6, Calgary)
- [84] Kokubun, M., & the *Suzaku* HXD team: “Calibration Status of *Suzaku* Hard X-ray Detector”, *Int'l W. G. on Cross-Calibration and the Definition of X-ray Standards* (2006 June 14-16, Iceland)
- [85] Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M., Makishima, K., Takahashi, T., *et al.*: “In-orbit calibration of the Hard X-ray Detector (HXD-II) onboard *Suzaku*”. *SPIE* (2006 Aug. 13-17, San Diego)
- [86] Kubota, A., Dotani, T., (8名), Makishima, K., Yamada, S., *et al.*: “*Suzaku* Observation of the Black Hoke Transient 4U 1630–47: Discovery of Absorption Lines”, IAU Symposium 238, *Black Holes from Stars to Galaxies* (2006 Aug. 21-25, Prague)
- [87] Itoh, T., Isobe, N., Awaki, H., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Observations of Nearby Seyfert 2 Galaxies”, *ibid.*
- [88] Kokubun, M. *et al.*: “The Current Status of HXD on board *Suzaku*”, *Amer. Astr. Soc. HEAD Meeting* (2006 Oct. 4-7, San Francisco)
- [89] Bautz, M., Arnaud, K., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Henry, P., Hughes, J., Kawaharada, K., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Observations of Abell 1795”, *ibid.*
- [90] Kokubun, M., Hirakuri, S., Kubo, S., Enoto, T., Itoh, T., Kitaguchi, T., Yamada, S., Yanagida, T., Yuasa, T., Takahashi, H., Watanabe, S., Takahashi, T., and Makishima, K.: “Development of an Active Gamma-ray Imaging Spectrometer with Pixelated Scintillators”, *IEEE Nucl. Science Symp.* (2006 Oct.29-Nov.4, San Diego)
- [91] Yoshida, A. *et al.*: “The First BESS-Polar Flight in Antarctica”, 25th Int. Symposium Space Tech. and Sci. (2006, Kanazawa).
- [92] Tsuchiya, H., Enoto T., Yamada, S., Yuasa, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Nakamura S., Okano, M., Kato, H., & Makishima, K.: “Observation of High-Energy Gamma Rays from a Winter Thundercloud”, *Shock Formation under Extreme Environments in the Universe* (2007 Feb. 20-22, Titiech, Tokyo)
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (2006年9月20~23日、奈良女子大)
- [93] 折戸玲子ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar 実験による宇宙線陽子流束の精密測定」、21aSH-7
- [94] 松田晋弥ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar 実験における低エネルギー宇宙線反陽子流束測定」、21aSH-8
- [95] 佐藤光浩、榎戸輝揚、柳田健之、牧島一夫、国分紀秀ほか: 「シンチレータと組合せた1次元APDアレイの基礎特性評価」、22pSH-6
- [96] 国分紀秀、川原田円、牧島一夫、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、寺田幸功、玉川徹、久保田あやほか: 「『すざく』衛星搭載硬X線検出器(HXD)主検出部の現状II」、23aSH-8
- [97] 寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、山岡和貴、(13名)、国分紀秀E、榎戸輝揚、洪秀徴ほか: 「『すざく』衛星搭載硬X線検出器(HXD)広帯域全天モニター部の現状II」、23aSH-9
- [98] 恩田香織、田代信、浦田裕次、(10名)、寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、榎戸輝揚F、洪秀徴ほか: 「ガンマ線バーストを用いた『すざく』衛星搭載硬X線検出器全天モニター(HXD/WAM)とSwift/BAT検出器の相互校正」、23aSH-10
- [99] 田村健一、村上弘志、牛尾雅佳、国分紀秀、小山勝C、高橋忠幸ほか: 「『すざく』衛星によるSgr B2領域からの硬X線スペクトルの解析」、23aSH-11,
- [100] 磯部直樹、伊藤健、牧島一夫、栗木久光、Richard Griffithsほか: 「『すざく』衛星による2型セイファート銀河の観測」、23aSH-13
- [101] 高橋弘充、深沢泰司、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、久保田あやほか: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星系GRO J1655-40の観測」、23pSH-4
- [102] 北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、太田直美、深沢泰司、川埜直美、中澤知洋ほか: 「『すざく』衛星による銀河団からの硬X線放射の探査」、23pSH5
- [103] 牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、田村健一、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、深沢泰B、寺田幸功ほか: 「『すざく』衛星搭載硬X線検出器(HXD/PIN)の軌道上バックグラウンドの再現性」、23pSH-6
- [104] 馬場彩、小山勝二、平賀淳子、国分紀秀、(4名)、千田篤史、高橋忠幸、山内茂雄、湯浅孝行ほか: 「『すざく』によるHESS未同定天体HESS J1804-216の観測」、23pSH-7
- [105] 榎戸輝揚、寺田幸功、石崎欣尚、宮脇良平、千田篤史、海老沢研、国分紀秀、牧島一夫ほか: 「X線パルサーを用いた『すざく』衛星硬X線検出器の時刻校正」、23pSH-9
- [106] 川原田円、北口貴雄、国分紀秀、牧島一夫、太田直美ほか: 「銀河団中の重元素および銀河の空間分布から探る銀河団の進化」、23pSH11
- 日本天文学会・秋の年会 (2006年9月19~21日、九州国際大学)
- [107] 山内茂雄、海老沢研、馬場彩、岩澤一司、田中靖郎、石田学、国分紀秀、小山勝二、高橋弘充、坪井陽子: 「すざく衛星による銀河面領域観測時に発見されたトランジェント天体」、J21b
- [108] 中島基樹、三原建弘、牧島一夫: 「電子サイクロトロン共鳴線高調波のX線光度に依存した変動」、J24a
- [109] 山田真也、国分紀秀、牧島一夫、久保田あや、J. Cotnam、堂谷忠靖、C. Doneほか: 「『すざく』による4U 1630-47の硬X線放射」、J26a

- [110] 保田知則、深沢 泰司、高橋弘充、久保田あや、山田真也、牧島一夫、J.Cottam、堂谷忠靖、C.Done ほか:『すざく』によるブラックホール天体 4U1630-472 High State の X 線連続成分の時間変動」、J25a
- [111] 久保田あや、J. Cottam、堂谷忠靖、C. Done、小谷太郎、上田佳宏、A. C. Fabian、保田知則、高橋弘充、深沢泰司、山岡和貴、山田真也、牧島一夫ほか:『すざく』による 4U 1630-472 の共鳴吸収線の発見と長期時間発展、J27a
- [112] 磯部直樹、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、宮脇良平、水野恒史ほか:『すざく』が NGC 4945 銀河中に見つけたブラックホール候補天体」、J28a
- [113] 大野雅功、高橋拓也、深沢 泰司、山岡和貴、杉田聡司、玉川徹、寺田幸功、鈴木素子、田代信、浦田裕次、阿部圭一、恩田香織、鈴木正信、洪秀徴、国分紀秀、榎戸輝揚ほか:『すざく』衛星搭載広帯域全天モニタ (HXD/WAM) による GRB 観測の現状」、J55a
- [114] 藤本正行、須田拓馬、村島未生、国分紀秀、牧島一夫:“How the fast stellar wind blowing – A lesson from the recent X-ray observations of planetary nebulae”, N26a
- [115] 湯浅孝行、国分紀秀、牧島一夫、田村健一、大貫宏祐、中澤知洋、高橋忠幸、馬場彩、千田篤史、小山勝二:『すざく』による銀河面・銀河中心からの硬 X 線ディフューズ放射の解析」、Q33a
- [116] 海老沢研、村上弘志、(6 名)、田中靖郎、岩沢一司、馬場彩、千田篤史、平賀純子、国分紀秀ほか:『すざく』による銀河面リッジ X 線放射の観測」、Q40a
- [117] 栗木久光、池田真也、田中雄二、磯部直樹、伊藤健、牧島一夫ほか:『すざく』衛星による Compton thick 2 型セイファート銀河 Mrk3 の観測」、S15a
- [118] 伊藤 健、高橋弘充、国分紀秀、牧島一夫、栗木久光、磯部直樹、渡辺伸ほか:『すざく』衛星による明るい 2 型セイファート銀河の硬 X 線観測」、S17a
- [119] 寺島雄一、穴吹直久、林田清、(5 名)、国分紀秀、伊藤健、久保田あや、A. Markowitz、岡島崇、J. Reeves ほか:『すざく』衛星によるセイファート銀河 NGC 4051 の広帯域 X 線スペクトル変動の観測」、S20a
- [120] 佐藤浩介、山崎典子、石崎欣尚、石田学、大橋隆哉)、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、太田直美、中澤知洋:ほか「すざく衛星で観測された銀河団 A 1060 の温度構造と重元素分布」、T02a
- [121] 竹井洋、満田和久、藤本龍一、田村隆幸、山崎典子、大橋隆哉、(6 名)、国分紀秀、佐藤光浩ほか:『すざく』による銀河団 A2218 の観測」、T03a
- [122] 太田直美、深沢泰司、川埜直美、牧島一夫、川原田円、北口貴雄、佐藤光、松下恭子、金丸武弘、浦田裕次、村瀬弘一、中澤知洋ほか:「すざく衛星による Centaurus 銀河団中のガスバルク運動測定」、T04a
- [123] 松下恭子、大橋隆哉、鶴剛、深沢泰司、戸塚都、山崎典子、中澤知洋、田村隆幸、太田直美、浦田裕次、北口貴雄、牧島一夫ほか:「すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測 – 重元素の分布と起源 –」、T05a
- [124] 川埜直美、深澤泰司、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、中澤知洋、山崎典子、太田直美、佐藤浩介、大橋隆哉ほか:『すざく』衛星による銀河団からの非熱的硬 X 線放射の探査」、T06a
- [125] 国分紀秀、川原田円、牧島一夫、寺田幸功、山岡和貴、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、田代信ほか:『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (II)」、W74a
- [126] 牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、田村健一、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、川埜直美、深沢泰司、磯部直樹ほか:『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD/PIN) の軌道上バックグラウンドの系統的評価」、W75a
- [127] 山崎智紀、平澤歩、高橋弘充、深沢泰司、山田真也、伊藤健、北口貴雄、国分紀秀、牧島一夫、鈴木正信、田代信、磯部直樹、寺田幸功ほか:『すざく』搭載硬 X 線検出器 GSO シンチレータのゲイン履歴補正およびバックグラウンドモデル化の現状」、W76a
- 大気球シンポジウム (2007 年 1 月、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部)
- [128] 長谷川雅也ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar-II: 実験計画と準備状況」
- [129] 松川庸介ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar-II: TOF 用 PMT 気密容器の開発-低温低圧動作試験結果-」
- [130] 篠田遼子ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar-II: マグネットの開発」
- 「すざく時代のブラックホール天文学」研究会 (2007 年 2 月 14 日、京都大学基礎物理学研究所)
- [131] 牧島一夫:「ブラックホール連星と ULX 天体の統一的な解釈」(口頭)
- [132] 高橋弘充、平澤歩、(12 名)、国分紀秀、伊藤健、牧島一夫、(6 名):『すざく』衛星によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」(口頭)
- [133] 宮本将雄、吉田鉄生、松下恭子、久保田あや、牧島一夫、水野恒史:「XMM-Newton 衛星を用いた NGC 1313 内の超高度 X 線源の解析」(口頭)
- [134] 宮脇良平、牧島一夫、水野恒史、久保田あや、鶴剛ほか:『すざく』による M82 銀河 X-1 のスペクトル解析」(ポスター)
- [135] 伊藤健、C. Done、牧島一夫、磯部直樹、栗木久光、渡辺伸、高橋忠幸、R. Griffiths ほか:“Suzaku Observation of Sey. 2 AGN in NGC 4945” (ポスター)
- [136] 山田真也、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、宮脇良平:『すざく』衛星による低光度活動銀河核 M81 の観測」(ポスター)
- 日本物理学会・春の年会 (2007 年 3 月 25~28 日、首都大学)
- [137] 山本明ほか BESS-Collaboration: 「BESS-Polar-II: 太陽活動極小期における南極周回気球での宇宙線長時間観測」、26pSA-14
- [138] 国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、川原田円、牧島一夫、寺田幸功、玉川徹ほか:『すざく』衛星硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (III)」、26aSF-3

- [139] 北口貴雄、川原田円、牧島一夫、小高裕和、国分紀秀、高橋忠幸、尾崎正伸、寺田幸功ほか：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) のバックグラウンドシミュレーション」、26aSF4
- [140] 山田真也、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、山岡和貴、高橋弘充、深沢泰司ほか：「統計的手法による『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器のバックグラウンドのモデル化」、26aSF-5
- [141] 鈴木正信、佐藤優美、浦田裕次、田代信、寺田幸功、山岡和貴、蓑島敬、横山央明、高橋忠幸、牧島一夫ほか：「X 線衛星『すざく』広帯域全天モニター (WAM) を用いた太陽フレアの観測と性能評価」、26aSF-6
- [142] 湯浅孝行、牧島一夫、国分紀秀、小高裕和、高島健、高橋忠幸、能町正治：「アレイ型 LaBr_3 を用いた撮像型ガンマ線検出器の SpaceWire による読み出し」、26pSF-12
- [143] 佐藤光浩、榎戸輝揚、柳田健之、牧島一夫、国分紀秀ほか：「シンチレータと組合せた 1 次元 APD アレイの基礎特性評価 [2]」、26pSF-13
- [144] 床井和世、佐藤浩介、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉、中澤知洋、国分紀秀、川原田円、(3 名)、太田直美、磯部直樹ほか：「『すざく』で観測された銀河群 HCG62 の温度と重元素分布の研究」、26pSF-14
- [145] 榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、中村聡史、加藤博、土屋晴文：「雷雲電場における粒子加速の検証に向けた放射線検出器の製作設置およびその初期観測」、27aSF-4
- [146] 高橋忠幸、高島健、笠羽康正、国分紀秀、吉光徹雄、渡辺伸ほか：「小型衛星搭載用宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM)」、28pSG-1
- [147] 安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、穀山渉、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか：「宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 I (概要)」、28pSG-2
- [148] 石徹白晃治、安東正樹、森脇成典、穀山渉、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか：「宇宙実験実証プラットフォームを用いた超小型重力波検出器の開発 II (信号処理系)」、28pSG-3
- [149] 穀山渉、安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか：「宇宙実験実証プラットフォームを用いた超小型重力波検出器の開発 III (制御系)」、28pSG-4
- 日本天文学会・春の年会 (東海大平塚、2007 年 3 月 28 ~ 30 日)
- [150] 宮本将雄、吉田鉄生、松下恭子、水野恒史、久保田あや、牧島一夫ほか：「XMM-Newton 衛星を用いた NGC1313 内の超光度 X 線源の系統的解析」、J44a
- [151] 磯部直樹、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、宮脇良平、水野恒史ほか：「『すざく』が発見した大光度 X 線源 *Suzaku* J1305-4931 の質量と回転」、J46b
- [152] 平澤歩、高橋弘充、深澤泰司、牧一夫、高橋忠幸、三谷烈史、国分紀秀ほか：「『すざく』衛星による低質量 X 線連星系 GX 349+2 の観測」、J50c
- [153] 宮脇良平、牧島一夫、水野恒史、久保田あや、鶴剛：「『すざく』による M 82 銀河 X-1 のスペクトル解析」、J57a
- [154] 寺田幸功、林多佳由、石田学、岡田俊策、中村良子、馬場彩、向井浩二、堂谷忠靖、S.Naik、L.Gallo、榎戸輝揚、牧島一夫：「『すざく』を用いた白色矮星における非熱的放射の探査」、J62a
- [155] 国分紀秀、田村健一、中澤知洋、内山泰伸、村上弘志、高橋忠幸、湯浅孝行、牧島一夫、小山勝二ほか：「すざく搭載硬 X 線検出器 (HXD) による銀河中心領域の観測 (1)」、Q17a
- [156] 田村健一、国分紀秀、内山泰伸、牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、中澤知洋、村上弘志、渡辺伸、小山勝二ほか：「すざく搭載硬 X 線検出器 (HXD) による銀河中心領域の観測 (2)」、Q18a
- [157] 北口貴雄、川原田円、牧島一夫、太田直美、中澤知洋、国分紀秀、山崎典子ほか：「『すざく』衛星による銀河団からの硬 X 線放射の分光観測」、T01a
- [158] 川原田円、北口貴雄、牧島一夫、中澤知洋、田村隆幸、川埜直美、深沢泰司、滝沢元和、井上進：「『すざく』XIS 検出器による衝突銀河団 Abell 3667 の観測」、T08a
- [159] 金丸武弘、太田直美、玉川徹、蓮池和人、林田清、内山秀樹、古澤彰浩、牧島一夫ほか：「すざく衛星によるペルセウス銀河団の高温ガスバルク運動の測定 (2)」、T11b
- [160] 中澤知洋、釜江常好、国分紀秀、高橋忠幸、高橋弘充、田代信、玉川徹、寺田幸功、能町正治、深沢泰司、牧島一夫ほか：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (III)」、W15a
- [161] 山岡和貴、杉田聡司、田代信、浦田裕次、阿部圭一、恩田香織、鈴木正信、佐藤優美、寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、深沢泰司、大野雅功、高橋拓也、浅野哲也、上原岳士、榎戸輝揚、牧島一夫、高橋忠幸、中澤知洋、国分紀秀、洪秀徹ほか：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 広帯域全天モニター部 (HXD-WAM) の現状 (III)」、W16a
- その他
- [162] 柳田健之、伊藤健、佐藤光浩、榎戸輝揚、国分紀秀、牧島一夫、高橋弘充、柳谷高公、八木秀喜、繁田岳志、伊東孝之「透光性セラミックスを用いた放射線検出用シンチレータの開発」第 19 回秋季セラミックシンポジウム/フォトセラミックス (2006 年 9 月)
- [163] 榎田康博ほか：「飛翔体による雨中観測用超伝導マグネットの開発 (10)：南極二周回飛翔を目指したクライオスタットの開発」、第 75 回低温工学・超電導学会 (2006 年度秋季、熊本大学)
- [164] 国分紀秀ほか NeXT SGD チーム：「NeXT 搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) 開発の現現状」、第 7 回宇宙科学シンポジウム (2006 年 12 月 21~22 日、宇宙科学研究所) p3-04
- [165] 高橋弘充、深沢泰司、水野恒史、平澤歩、北本俊二、須藤敬輔、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、A. Parmar、国分紀秀ほか：「『すざく』によるブラックホール連星系 GRO J1655 - 40 の観測」、同上 p4-07

- [166] 榎戸輝揚、土屋晴文、山田真也、湯浅孝行、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、中村聡史、加藤博、牧島一夫：「日本海側の冬季雷雲にともなう X 線/ガンマ線の観測」、第 8 回惑星圏研究会 (2007 年 3 月 22-23 日、東北大学、)
- (セミナー、講演会、談話会)
- [167] 牧島一夫：「宇宙は巨大な実験室」、理学系大学院教育先導プログラムにもとづく「クラスター講義」の一環 (2006 年 6 月 30 日、東京大学理学系研究科)
- [168] 牧島一夫：「星の誕生と死」、Super Science High-school 講演会 (2006 年 7 月 15 日、埼玉県立川越高校)
- [169] 牧島一夫：「『すざく』1 年の観測成果」、東大理学系ビッグバン宇宙国際研究センター研究会 (2006 年 9 月 4 日、鬼怒川)
- [170] Kokubun, M.: “Initial Results from the First Year of Suzaku”, Seminar at the Stanford Linear Accelerator Center (2006 Oct. 11)
- [171] 牧島一夫：「宇宙空間からの宇宙物理学・天文学」、宇宙開発委員会・計画部会・宇宙科学 WG 審議会での説明 (2006 年 11 月 8 日、東京)
- [172] 牧島一夫： “Observation of Neutron Stars”, COE21 Workshop on Strongly Correlated Many-Body Systems (2007 年 1 月 16 日、東大理学系)

II

2006年度 ビッグバン宇宙国際研究センター全般に関する報告

1 教員，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

佐藤 勝彦（センター長／教授）
 横山 順一（教授）
 茂山 俊和（助教授）
 樽家 篤史（助手）
 向山 信治（助手）
 S. I. Blinnikov（外国人客員教授）
 須田 拓馬（機関研究員）
 小合 徳幸（教務補佐員）
 永田 竜（教務補佐員）
 永野 早百合（時間雇用職員）
 南澤 三恵子（時間雇用職員）

研究プロジェクト及び協力研究者

- | | | | |
|---|-------|-------|-------------|
| 1. 初期宇宙進化論 | 須藤 靖 | 柳田 勉 | 渡利 泰山 |
| 2. 銀河進化理論 | 野本 憲一 | 鈴木 知治 | |
| 3. 可視光近赤外観測 | 吉井 譲 | 峰崎 岳夫 | |
| 4. サブミリ波観測 | 山本 智 | 岡 朋治 | |
| 5. 暗黒物質観測 | 蓑輪 眞 | 井上 慶純 | |
| 6. 銀河と宇宙構造の研究 | 岡村 定矩 | 嶋作 一大 | |
| 7. 気球観測による反物質探査,
衛星による X 線・ γ 線観測 | 牧島一夫 | 山本 明 | 国分 紀秀 佐貫 智行 |

2 シンポジウム・研究会

2.1 ビッグバン宇宙国際研究センター第一回公開講演会 「宇宙最大のなぞ：ダークエネルギー」

日時：2006年12月22日(金) 18:00 - 20:00

場所：東京大学本郷キャンパス 理学部1号館中央棟2階 小柴ホール（東京都文京区本郷）

プログラム

- 佐藤 勝彦 センター長挨拶 (10分)
- 須藤 靖 宇宙の組成を探る (55分)
- 横山 順一 はじめも終わりもインフレーション (55分)

2.2 第5回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会

日時：2006年9月3日(日) (午後) - 9月5日(火) (午前)

場所：鬼怒川コンベンションホールシルク（栃木県日光市鬼怒川温泉）

<http://www.kinugawaonsenhotel.com/>

プログラム

9月3日(日)

13:30 - 15:30 afternoon session I (座長 須藤)

- 佐藤 勝彦 はじめに (10分)
- 吉井 譲 マグナムプロジェクトの現状 (40分)
- 峰崎 岳夫 First Detection of Near-Infrared Intraday Variations in the Seyfert 1 Nucleus NGC 4395 (20分)
- 蓑輪 眞 低エネルギーニュートリノ実験の方法 (30分)
- 市来 淨與 高エネルギーガンマ線で初期磁場を探る (20分)

15:30 - 16:00 休憩

16:00 - 17:40 afternoon session II (座長 市来)

- 水野 俊太郎 Cosmological Perturbation in Brane-world cosmology (20分)
- 平松 尚志 Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies (20分)
- 木下 俊一郎 6次元ブレーンモデルにおける de Sitter ブレーンの安定性 (20分)
- 仙洞田 雄一 Randall-Sundrum 膜宇宙におけるインフレーションへの始原的ブラックホールからの制限 (20分)
- 横山 順一 原始ブラックホールと元素合成 (20分)

9月4日(月)

9:00 - 12:20 morning session (座長 樽家)

浜名 崇 weak lensing shear statistics の概要と現状と展望 (40分)

山本 一博 大規模構造を用いた加速宇宙模型のテスト (40分)

10:20 - 10:40 休憩

高橋 智 Shedding Light on the Dark Side of the Universe: Implications from CMB and all that (40分)

藤井 保憲 Dark energy, cosmological constant, and the scalar-tensor theory (40分)

向山 信治 重力のヒッグス相での宇宙論 (20分)

12:20 - 13:30 昼食

13:30 - 15:00 afternoon session I (座長 須田)

牧島 一夫 「すぎく」1年の観測成果 (40分)

辻本 拓司 フィールド星および球状星団に見られる特異な化学組成の解説 (30分)

茂山 俊和 金属欠乏星に残る Pop III thermonuclear supernova の痕跡 (20分)

15:00 - 15:20 休憩

15:20 - 16:40 afternoon session II (座長 茂山)

須田 拓馬 データベースで探る金属欠乏星の起源 (20分)

中村 航 金属欠乏星の Ic 型超新星爆発にともなう軽元素合成 (20分)

尾崎 仁 Tycho の超新星残骸における物理量の推定 (20分)

諏訪 雄大 第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与 (20分)

16:40 - 17:00 休憩

17:00 - 18:20 afternoon session III (座長 山口)

堀内 俊作 中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与 (20分)

高見 一 超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の相関 (20分)

須藤 靖 太陽系外惑星のロシター効果 (20分)

成田 憲保 すばる & マグナム望遠鏡による系外惑星トランジットの同時分光・測光観測 (20分)

9月5日(火)

9:00 - 10:20 morning session I (座長 向山)

吉田 真希子 Subaru/XMM-Newton Deep Field-South における $z \sim 3$ の Lyman-break 銀河のクラスターリングの性質 (20分)

西道 啓博 銀河バイアスの非線形性とバイスペクトル: 摂動論・シミュレーション・SDSS 銀河 (20分)

樽家 篤史 Quasi-Equilibrium Evolution of N-body systems (20分)

白田 晶人 銀河の3点統計を用いた宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する制限 (20分)

10:20 - 10:40 休憩

10:40 - 12:10 morning session II (座長 横山)

- 高橋 史宣 Gravitinos as a probe into inflation and SUSY breaking (30 分)
 山口 昌英 Cosmic strings with time-varying tension (20 分)
 松田 晋弥 第一回 BESS-Polar 実験成果及び次期計画 (40 分)

2.3 第6回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会

日時：2007年2月18日(日)(午後) - 2月20日(火)(午前)

場所：ホテル伊豆高原 (静岡県伊東市池) <http://www.hotelizukougen.com/>

プログラム

2月18日(日)

14:00 - 15:10 afternoon session I (座長 横山)

- 佐藤 勝彦 はじめに (10 分)
 須山 輝明 プレヒーティング中における揺らぎの生成・進化 (40 分)
 市来 浄興 Cosmological Constraints on Generalized Dark Energy Models (20 分)

15:10 - 15:40 休憩

15:40 - 16:40 afternoon session II (座長 市来)

- 水野 俊太郎 Primordial perturbations in spinor field driven inflation model (20 分)
 永田 竜 cosmic inversion from WMAP 3year data (20 分)
 市川 和秀 Constraint on the curvature of the universe from CMB, BAO, SN and GRB (20 分)

2月19日(月)

9:00 - 10:10 morning session I (座長 永田)

- 千葉 剛 Myths and Facts about $f(R)$ Gravity (30 分)
 斎藤 俊 Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background anisotropy (20 分)
 樽家 篤史 背景重力波の偏光観測(仮) (20 分)

10:10 - 10:40 休憩

10:40 - 12:00 morning session II (座長 水野)

- 平松 尚志 Scalar perturbations in Randall-Sundrum single brane model (20 分)
 木下 俊一郎 de Sitter ブレーンの熱力学的性質 (20 分)
 高見 一 Cosmogenic neutrinos as a probe of the transition from Galactic to extragalactic cosmic rays (20 分)
 西道 啓博 宇宙の大規模構造から見るバリオン音響振動: 非線形重力と赤方偏移歪み (20 分)

12:00 - 13:00 昼食

13:00 - 18:00 自由討論

2月20日(火)

9:00 - 10:00 morning session I (座長 茂山)

嶺重 慎 降着円盤の標準モデルを超えて (40分)

須田 拓馬 球状星団 ω Cen の二重主系列の起源と物質混合 (20分)

10:00 - 10:30 休憩

10:30 - 11:30 morning session II (座長 須田)

峰崎 岳夫 マグナムによる最近の観測結果 (20分)

中村 航 金属欠乏星の超新星爆発にともなう軽元素合成 (20分)

諏訪 雄大 第一世代星の重力崩壊とニュートリノ放射 (20分)

3 プレプリント・リスト

RESCEU-118/06

Large-scale clumpy structure in Lynx region (Nakata+, 2005), Nakata, F. Kodama, T. Shimasaku, K. Doi, M. Furusawa, H. Hamabe, M. Kimura, M. Komiyama, Y. Miyazaki, S. Okamura, S. Ouchi, M. Sekiguchi, M. Ueda, Y. Yagi, M., & Yasuda, N. (2006), VizieR On-line Data Catalog: J/MNRAS/357/1357

RESCEU-117/06

Atomic Carbon in the AFGL 333 Cloud, Takeshi Sakai, Tomoharu Oka, and Satoshi Yamamoto (2006), ApJ, 649, 268 - 279

RESCEU-116/06

Molecular Line Observations of Carbon-Chain-rich Core L492, Tomoya Hirota and Satoshi Yamamoto (2006), ApJ, 646, 258-268

RESCEU-115/06

Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733, Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Gregory W. Henry, Anna Roussanova, Matthew J. Holman, Keigo Enya, Norio Narita, Yasushi Suto, & Edwin L. Turner (2006), ApJ, 653, L69 - L72

RESCEU-114/06

Infrared Spectroscopy of Thermonuclear Supernovae, Gerardy, C. L., Meikle, W. P. S., Hoeflich, P. A., Nomoto, K., Motohara, K., & Kotak, R. (2006), Supernovae: One Millennium After SN1006, 26th meeting of the IAU, Joint Discussion 9, #19

RESCEU-113/06

Core-Collapse Very Massive Stars: Evolution, Explosion, and Nucleosynthesis of Population III 500 - 1000 M_{\odot} Stars, Takuya Ohkubo, Hideyuki Umeda, Keiichi Maeda, Ken'ichi Nomoto, Tomoharu Suzuki, Sachiko Tsuruta, and Martin J. Rees (2006), ApJ, 645, 1352 - 1372

RESCEU-112/06

Supernova 2006aj = GRB 060218, Fugazza, D., D'Avanzo, P., Malesani, D., Della Valle, M., Pian, E., Chincarini, G., Stella, L., Tagliaferri, G., Deng, J., Maeda, K., & Nomoto, K. (2006), ed. Green, D. W. E., Central Bureau Electronic Telegrams, 410, 1

RESCEU-111/06

Composition of the Innermost Core Collapse Supernova Ejecta and the p-Process, Fröhlich, C., Liebendörfer, M., Marínez-Pinedo, G., Thielemann, F.-K., Bravo, E., Zinner, N. T., Hix, W. R., Langanke, K., Mezzacappa, A., & Nomoto, K. (2006), AIP Conference Proceedings 847: Origin of Matter and Evolution of Galaxies, eds. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), 333 - 338

RESCEU-110/06

Protoclusters in the CDM Universe, Tamon Suwa, Asao Habe, and Kohji Yoshikawa (2006), The Astrophysical Journal, 646, L5 - L8

RESCEU-109/06

Non-equilibrium Ionization State of a Warm-Hot Intergalactic Medium, K. Yoshikawa and S. Sasaki (2006), Publ. Astron. Soc. Japan 58, pp641 - 656

RESCEU-108/06

Explosive Nucleosynthesis in GRB Jets Accompanied by Hypernovae, Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, Katsuhiko Sato (2006), Astrophys.J. 647, 1255 - 1268

RESCEU-107/06

Magnetohydrodynamic Simulations of A Rotating Massive Star Collapsing to A Black Hole, *Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Masa-aki Hashimoto, Katsuhiko Sato* (2006), *Astrophys.J.* 644, 1040 - 1055

RESCEU-106/06

R-Process Nucleosynthesis in MHD Jet Explosions of Core-Collapse Supernovae, *Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, Katsuhiko Sato* (2006), *Astrophys.J.* 642, 410 - 419

RESCEU-105/06

Searching for modified gravity with baryon oscillations: From SDSS to wide field multi-object spectroscopy, *Kazuhiro Yamamoto, Bruce A. Bassett, Robert C. Nichol, Yasushi Suto and Kazuhiro Yahata* (2006), *Phys. Rev. D* 74, 063525

RESCEU-104/06

Soft X-Ray Transmission Spectroscopy of a Warm/Hot Intergalactic Medium: Mock Observation of Gamma-ray Burst X-ray Afterglow, *Hajime Kawahara, Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Nobuyuki Kawai, Kazuhisa Mitsuda, Takaya Ohashi, Noriko Yamasaki* (2006), *Publ. Astron. Soc. Japan* 58, pp657 - 671

RESCEU-103/06

An Extrasolar Transiting Planet Search with Subaru Suprime-Cam, *Seitaro Urakawa, Toru Yamada, Yasushi Suto, Edwin. L. Turner, Yoichi Itoh, Tadashi Mukai, Motohide Tamura, Yiping Wang* (2006), *Publ. Astron. Soc. Japan* 58, pp869 - 881

RESCEU-102/06

Chandra Observations of SDSS J1004+4112: Constraints on the Lensing Cluster and Anomalous X-Ray Flux Ratios of the Quadruply Imaged Quasar, *Ota, N. Inada, M. Oguri, K. Mitsuda, G. T. Richards, Y. Suto, W. N. Brandt, F. J. Castander, R. Fujimoto, P. B. Hall, C. R. Keeton, R. C. Nichol, D. P. Schneider, D. E. Eisenstein, J. A. Frieman, E. L. Turner, T. Minezaki, Y. Yoshii* (2006), *Astrophys.J.* 647, 215 - 221

RESCEU-101/06

The Effect of Large-Scale Structure on the SDSS Galaxy Three-Point Correlation Function, *R. C. Nichol, R. K. Sheth, Y. Suto, A. J. Gray, I. Kayo, R. H. Wechsler, F. Marin, G. Kulkarni, M. Blanton, A. J. Connolly, J. P. Gardner, B. Jain, C. J. Miller, A. W. Moore, A. Pope, J. Pun, D. Schneider, J. Schneider, A. Szalay, I. Szapudi, I. Zehavi, N. A. Bahcall, I. Csabai, J. Brinkmann* (2006), *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 368, 1507 - 1514

RESCEU-100/06

Density fluctuations in one-field inflation, *M. Yamaguchi and J. Yokoyama* (2006), *Phys. Rev. D* 74, 43523

RESCEU-99/06

High-energy effects on the spectrum of inflationary gravitational wave background in braneworld cosmology, *Takashi Hiramatsu* (2006), *Physical Review D* 73, 084008

RESCEU-98/06

The r-Process in the Proto-Neutron-Star Winds with Anisotropic Neutrino Emission, *Wanajo, S.* (2006), *ApJ*, 650, L79 - L82

RESCEU-97/06

The rp-Process in Neutrino-driven Winds, *Wanajo, S.* (2006), *ApJ*, 647, 1323 - 1340

RESCEU-96/06

r-Process Calculations and Galactic Chemical Evolution, *Wanajo, S., Ishimaru, Y.* (2006), *Nuclear Physics A*, 777, 676 - 699

RESCEU-95/06

Enrichment of Very Metal Poor Stars with Both r-Process and s-Process Elements from 8-10 Msun Stars, *Wanajo, S., Nomoto, K., Iwamoto, N., Ishimaru, Y., Beers, T. C.* (2006), *ApJ*, 636, 842 - 847

RESCEU-94/06

Premaximum Spectropolarimetry of the Type Ia SN 2004dt, Wang, L., Baade, D., Höflich, P., Wheeler, J. C., Kawabata, K., Khokhlov, A., Nomoto, K., Patat, F. (2006), ApJ, 653, 490 - 502

RESCEU-93/06

The properties of the ‘standard’ Type Ic supernova 1994I from spectral models, Sauer, D. N., Mazzali, P. A., Deng, J., Valenti, S., Nomoto, K., Filippenko, A. V. (2006), MNRAS, 369, 1939 - 1948

RESCEU-92/06

Chemical Abundances in the Secondary Star of the Black Hole Binary V4641 Sgr (SAX J1819.3-2525), Sadakane, K., Arai, A., Aoki, W., Arimoto, N., Takada-Hidai, M., Ohnishi, T., Tajitsu, A., Beers, T. C., Iwamoto, N., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K. (2006), PASJ, 58, 595 - 604

RESCEU-91/06

An optical supernova associated with the X-ray flash XRF 060218, Pian, E., Mazzali, P. A., Masetti, N., Ferrero, P., Klose, S., Palazzi, E., Ramirez-Ruiz, E., Woosley, S. E., Kouveliotou, C., Deng, J., Filippenko, A. V., Foley, R., Fynbo, J., Kann, D. A., Li, W., Hjorth, J., Nomoto, K., Patat, F., Sauer, D. N., Sollerman, J., Vreeswijk, P. M., Guenther, E. W., Levan, A., O’Brien, P., Tanvir, N., Wijers, R. A. M. J., Dumas, C., Hainaut, O., Wong, D. S., Baade, D., Wang, L., Amati, L., Cappellaro, E., Castro-Tirado, A. J., Ellison, S., Frontera, F., Fruchter, A. S., Greiner, J., Kawabata, K., Ledoux, C., Maeda, K., Møller, P., Nicastro, L., Rol, E., Starling, R. (2006), Nature, 442, 1011 - 1013

RESCEU-90/06

SN 2005cs in M51 I. The first month of evolution of a subluminescent SN II plateau, Pastorello, A., Sauer, D., Taubenberger, S., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Kawabata, K. S., Benetti, S., Elias-Rosa, N., Harutyunyan, A., Navasardyan, H., Zampieri, L., Iijima, T., Botticella, M. T., Di Rico, G., Del Principe, M., Dolci, M., Gagliardi, S., Ragni, M., Valentini, G. (2006), MNRAS, 370, 1752-1762

RESCEU-89/06

Nucleosynthesis Yields of Core-Collapse Supernovae and Hypernovae, and Galactic Chemical Evolution, Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Kobayashi, C., Maeda, K. (2006), Nuclear Physics A, 777, 424 - 458

RESCEU-88/06

The Asymmetric Explosion of Type Ia Supernovae as Seen from Near-Infrared Observations, Motohara, K., Maeda, K., Gerardy, C. L., Nomoto, K., Tanaka, M., Tominaga, N., Ohkubo, T., Mazzali, P. A., Fesen, R. A., Höflich, P., Wheeler, J. C. (2006), ApJ, 652, L101 - L104

RESCEU-87/06

Models for the Type Ic Hypernova SN 2003lw associated with GRB 031203, Mazzali, P. A., Deng, J., Pian, E., Malesani, D., Tominaga, N., Maeda, K., Nomoto, K., Chincarini, G., Covino, S., Della Valle, M., Fugazza, D., Tagliaferri, G., Gal-Yam, A. (2006), ApJ, 645, 1323 - 1330

RESCEU-86/06

A neutron star-driven X-ray flash associated with supernova SN 2006aj, Mazzali, P. A., Deng, J., Nomoto, K., Sauer, D. N., Pian, E., Tominaga, N., Tanaka, M., Maeda, K., Filippenko, A. V. (2006), Nature, 442, 1018 - 1020

RESCEU-85/06

Nebular Spectra of SN 1998bw Revisited: Detailed Study by One- and Two-dimensional Models, Maeda, K., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Deng, J. (2006), ApJ, 640, 854 - 877

RESCEU-84/06

Optical Emission from Aspherical Supernovae and the Hypernova SN 1998bw, Maeda, K., Mazzali, P. A., Nomoto, K. (2006), ApJ, 645, 1331 - 1344

RESCEU-83/06

Galactic chemical evolution: Oxygen through Zinc, Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K., Tominaga, N., Ohkubo, T. (2006), ApJ, 653, 1145 - 1171

RESCEU-82/06

An optical spectrum of the afterglow of a γ -ray burst at a redshift of $z = 6.295$, *Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., Totani, T., Ohta, K., Iye, M., Hattori, T., Aoki, W., Furusawa, H., Hurley, K., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Komiyama, Y., Mizumoto, Y., Nomoto, K., Noumaru, J., Ogasawara, R., Sato, R., Sekiguchi, K., Shirasaki, Y., Suzuki, M., Takata, T., Tamagawa, T., Terada, H., Watanabe, J., Yatsu, Y., Yoshida, A.* (2006), *Nature*, 440, 184 - 186

RESCEU-81/06

X-Ray Observations of Type Ia Supernovae with Swift: Evidence of Circumstellar Interaction for SN 2005ke, *Immler, S., Brown, P. J., Milne, P., The, L.-S., Petre, R., Gehrels, N., Burrows, D. N., Nousek, J. A., Williams, C. L., Pian, E., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Chevalier, R. A., Mangano, V., Holland, S. T., Roming, P. W. A., Greiner, J., Pooley, D.* (2006), *ApJ*, 648, L119 - L122

RESCEU-80/06

Neutron-capture elements in the very metal-poor star HD122563, *Honda, S., Aoki, W., Ishimaru, Y., Wanajo, S., Ryan, S. G.* (2006), *ApJ*, 643, 1180 - 1189

RESCEU-79/06

Principle of Universality of γ -Process Nucleosynthesis in Core-Collapse Supernova Explosions, *Hayakawa, T., Iwamoto, N., Kajino, T., Shizuma, T., Umeda, H., Nomoto, K.* (2006), *ApJ*, 648, L47 - L50

RESCEU-78/06

Composition of the Innermost Core-Collapse Supernova Ejecta, *Fröhlich, C., Hauser, P., Liebendörfer, M., Martínez-Pinedo, G., Thielemann, F.-K., Bravo, E., Zinner, N. T., Hix, W. R., Langanke, K., Mezzacappa, A., Nomoto, K.* (2006), *ApJ*, 637, 415 - 426

RESCEU-77/06

Three-Dimensional Models for High-Velocity Features in Type Ia Supernovae, *Tanaka, M., Mazzali, P.A., Maeda, K., Nomoto, K.* (2006), *Astrophys. J.* 645, 470 - 479

RESCEU-76/06

Ballooning of an ultra-thin superconducting solenoid for particle astrophysics in Antarctica, *Y. Makida, T. Kumazawa, H. Fuke, A. Yamamoto, and T. Yoshida* (2006), *IEEE Trans. Appl. Superc.*, 16, No.2, 477

RESCEU-75/06

Developments of a New 1-Dimensional γ -Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector, *Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Honda, T., Makishima, K., Tanaka, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Nakazawa, K., Takahashi, T.* (2006), *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 53, 2983

RESCEU-74/06

The Temperature Dependence of Gamma-Ray Responses of YAG:Ce Ceramic Scintillators, *Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T.* (2006), *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 53, 2404

RESCEU-73/06

Framework for a Geant4-based Simulator of the Radiation Background and Detector Responses of the Space X-ray Observatory Suzaku, *Ozaki, M., Watanabe, S., Terada, Y., Itoh, T., Kitsunozuka, M., Kishishita, T., Ishisaki, Y., Takahashi, T.* (2006), *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 53, 1310

RESCEU-72/06

The Discovery of Diffuse X-Ray Emission in NGC 2024, One of the Nearest Massive Star-forming Regions, *Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., Matsuzaki, K.* (2006), *Astrophys. J.* 649, L123 - L128

RESCEU-71/06

Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0535+262 Observed with Suzaku, *Terada, Y., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Enoto, T., Kokubun, M., Kitaguchi, T., (21)* (2006), *Astrophys. J. Lett.*, 648, L139 - L142

RESCEU-70/06

Suzaku Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639, *Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., (7)* (2006), *Astrophys. J. Lett.*, 647, L131 - L134

RESCEU-69/06

A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with RXTE, *Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K., & Niko, H.* (2006), *Astrophys. J.* 646, 1125 - 1138

RESCEU-68/06

The XMM-Newton Examination of Energetics in the East Lobe of the Nearby Radio Galaxy Fornax A (NGC 1316), *Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., Itoh, K., Iyomoto, N., Takahashi, I., & Kaneda, H.* (2006), *Astrophys. J.*, 645, 256 - 263

RESCEU-67/06

Testing the see-saw mechanism at collider energies, *S.F. King, T. Yanagida* (2006), *Prog. Theor. Phys.* 114, 1035 - 1043

RESCEU-66/06

Conformally sequestered SUSY breaking in vector-like gauge theories, *M. Ibe, K.-I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara, T. Yanagida* (2006), *Phys. Rev. D* 73, 015004

RESCEU-65/06

More on conformally sequestered SUSY breaking, *M. Ibe, K.-I. Izawa, Yu Nakayama, Y. Shinbara, T. Yanagida* (2006), *Phys. Rev. D* 73, 035012

RESCEU-64/06

A Higher-dimensional origin of the inverted mass hierarchy for neutrino, *M. Tanimoto, T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 633, 567 - 572

RESCEU-63/06

Unification of dark energy and dark matter, *Fuminobu Takahashi, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 635, 57

RESCEU-62/06

Taming the runaway problem of inflationary landscapes, *Lawrence J. Hall, Taizan Watari, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Rev. D* 73, 103502

RESCEU-61/06

Minimal supergravity, inflation, and all that, *M. Ibe, K.-I. Izawa, Y. Shinbara, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 637, 21 - 26

RESCEU-60/06

Detailed Spectral Study of an Ultra-Luminous Compact X-Ray Source, M81 X-9, in the Disk-Dominated State, *Tsunoda, N., Kubota, A., Namiki, M., Sugiho, M., Kawabata, K., Makishima, K.* (2006), *Publ. Astr. Soc. Jp.* 58, 1081 - 1088

RESCEU-59/06

Gravitino overproduction in inflaton decay, *Masahiro Kawasaki, Fuminobu Takahashi, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 638, 8

RESCEU-58/06

Eluding the BBN constraints on the stable gravitino, *W. Buchmuller, K. Hamaguchi, M. Ibe, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 643, 124 - 126

RESCEU-57/06

The Polonyi Problem and Upper bound on Inflation Scale in Supergravity, *M. Ibe, Y. Shinbara, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Lett. B* 639, 534 - 540

RESCEU-56/06

The Gravitino-overproduction problem in inflationary universe, *Masahiro Kawasaki, Fuminobu Takahashi, T.T. Yanagida* (2006), *Phys. Rev. D* 74, 043519

RESCEU-55/06

Inflaton decay through supergravity effects, *Motoi Endo, Masahiro Kawasaki, Fuminobu Takahashi, T.T. Yanagida* (2006), Phys. Lett. B 642, 518 - 524

RESCEU-54/06

A New Inflation Model with Anomaly-mediated Supersymmetry Breaking., *M. Ibe, Y. Shinbara, T.T. Yanagida* (2006), Phys. Lett. B 642, 165 - 170

RESCEU-53/06

Spontaneous Non-thermal Leptogenesis in High-scale Inflation Models., *Motoi Endo, Fuminobu Takahashi, T.T. Yanagida* (2006), Phys. Rev. D 74, 123523

RESCEU-52/06

Effect of Primordial Magnetic Field on Seeds for Large Scale Structure, *Dai G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Ken'ichi Umezu, Hidekazu Hanayama* (2006), Physical Review D 74, 123518

RESCEU-51/06

Constraints on the Evolution of the Primordial Magnetic Field from the Small Scale CMB Angular Anisotropy, *Dai G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Toshitaka Kajino, Grant J. Mathews* (2006), ApJ 646, 719

RESCEU-50/06

Fe II Emission in 14 Low-Redshift Quasars. I. Observations, *Tsuzuki, Y., Kawara, K., Yoshii, Y., Oyabu, S., Tanab, T., and Matsuoka, Y.* (2006), ApJ, 650, 57 - 79

RESCEU-49/06

The Optical/Near-Infrared Light Curves of SN 2002ap for the First 1.5 Years after Discovery, *Tomita, H., Deng, J., Maeda, K., Yoshii, Y., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Suzuki, T., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Aoki, T., Enya, K., and Suganuma, M.* (2006), ApJ, 644, 400 - 408

RESCEU-48/06

Multiple Regression Analysis of the Variable Component in the Near-Infrared Region for Type 1 AGN MCG +08-11-011, *Tomita, H., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Suganuma, M., Aoki, T., Koshida, S., and Yamauchi, M.* (2006), ApJ, 652, L13 - L16

RESCEU-47/06

Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies, *Suganuma, M., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Tomita, H., Aoki, T., Koshida, S., and Peterson, B. A.* (2006), ApJ, 639, 46 - 63

RESCEU-46/06

Cosmological Implications of the Very High Redshift GRB 050904, *Price, P. A., Cowie, L. L., Minezaki, T., Schmidt, B. P., Songaila, A., and Yoshii, Y.* (2006), ApJ, 645, 851 - 855

RESCEU-45/06

First Detection of Near-Infrared Intraday Variations in the Seyfert 1 Nucleus NGC 4395, *Minezaki, T., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Enya, K., Suganuma, M., Tomita, H., Koshida, S., Yamauchi, M., and Aoki, T.* (2006), ApJ, 643, L5 - L8

RESCEU-44/06

The Mass of the Black Hole in the Seyfert 1 Galaxy NGC 4593 from Reverberation Mapping, *Denney, K. D., Bentz, M. C., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J., Ghosh, H., Horne, K. D., Kuehn, C., Minezaki, T., Onken, C. A., Pronik, V. I., Richstone, D. O., Sergeev, S. G., Vestergaard, M., Walker, M. G., and Yoshii, Y.* (2006), ApJ, 653, 152 - 158

RESCEU-43/06

A Reverberation-based Mass for the Central Black Hole in NGC 4151, *Bentz, M. C., Denney, K. D., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J., Ghosh, H., Horne, K., Kuehn, C., Minezaki, T., Onken, C. A., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Pronik, V. I., Richstone, D. O., Sergeev, S. G., Vestergaard, M., Walker, M. G., and Yoshii, Y.* (2006), ApJ, 651, 775 - 781

RESCEU-42/06

HE 1327-2326, an Unevolved Star with $[\text{Fe}/\text{H}] < -5.0$. I. A Comprehensive Abundance Analysis, *Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., and Kajino, T.* (2006), *ApJ*, 639, 897 - 917

RESCEU-41/06

Deep Extragalactic Surveys around the Ecliptic Poles with AKARI (ASTRO-F), *Matsuhara, H. et al. (28 coauthors including Okamura, S.)* (2006), *PASJ*, 58, 673 - 694

RESCEU-40/06

Clustering of Lyman Break Galaxies at $z = 4$ and 5 in the Subaru Deep Field: Luminosity Dependence of the Correlation Function Slope, *Kashikawa, N. et al. (40 authors including Shimasaku, K. and Okamura, S.)* (2006), *ApJ*, 637, 631 - 647

RESCEU-39/06

Orientation of Galaxies in the Local Supercluster: A Review, *Hu, F. X., Wu, G. X., Song, G. X., Yuan, Q. R., Okamura, S.* (2006), *APSC*, 302, 43 - 59

RESCEU-38/06

Tolerance test of a sample filter for use in space, *Hayashi, M., Tanaka, M., Komiyama, Y., Okamura, S., Tsuneta, S., Noguchi, M., Nakagiri, M., Kano, R., Kimura, T.* (2006), *PNAO*, 9, 21 - 53

RESCEU-37/06

The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, *Adelman-McCarthy, Jennifer K., Agueros, M.A., Allam, Sahar S., Anderson, Kurt S.J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., Baldry, Ivan K., Barentine, J.C., Berlind, A. and 131 coauthors including Okamura, S. and Shimasaku, K.* (2006), *ApJS*, 162, 38 - 48

RESCEU-36/06

Kinematic Substructures in the Coma Cluster Core as traced by Intracluster Planetary Nebulae, *Arnaboldi, M., Gerhard, O., Freeman, K. C., Kashikawa, N., Okamura, S., Yasuda, N.* (2006), *IAU Symp.*, 234, 337 - 340

RESCEU-35/06

Surface Pollution of Main-Sequence Stars through Encounters with AGB Ejecta in ω Centauri, *Tsujimoto, Takuji, Shigeyama, Toshikazu and Suda, Takuma* (2006), *The Astrophysical Journal*, 654, L139 - L142

RESCEU-34/06

Self-similar Solutions for the Interaction of Relativistic Ejecta with an Ambient Medium, *Nakamura, Ko and Shigeyama, Toshikazu* (2006), *The Astrophysical Journal*, 645, 431 - 435

RESCEU-33/06

Luminosity Functions of Lyman Break Galaxies at $z = 4$ and $z = 5$ in the Subaru Deep Field, *Yoshida, M. et al. (38 authors including K. Shimasaku and S. Okamura)* (2006), *ApJ*, 653, 988 - 1003

RESCEU-32/06

A galaxy at a redshift $z = 6.96$, *Iye, M., Ota, K., Kashikawa, N., Furusawa, H., Hashimoto, T., Hattori, T., Matsuda, Y., Morokuma, T., Ouchi, M., and Shimasaku, K.* (2006), *Nature*, 443, 186 - 188

RESCEU-31/06

Systematic Survey of Extended Ly α Sources over $z \sim 3 - 5$, *Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., and Yoshida, Michitoshi* (2006), *ApJ*, 648, 54 - 66

RESCEU-30/06

The End of the Reionization Epoch Probed by Ly α Emitters at $z = 6.5$ in the Subaru Deep Field, *Kashikawa, N. et al. (19 authors including Shimasaku, K. and Okamura, S.)* (2006), *ApJ*, 648, 7 - 22

RESCEU-29/06

Morphological classification of nearby galaxies based on asymmetry and luminosity concentration, *Yagi, M., Nakamura, Y., Doi, M., Shimasaku, K., and Okamura, S.* (2006), MNRAS, 368, 211 - 220

RESCEU-28/06

Ly alpha Emitters at $z = 5.7$ in the Subaru Deep Field, *Shimasaku, K. et al. (17 authors)* (2006), PASJ, 58, 313 - 334

RESCEU-27/06

Lepton asymmetry in the primordial gravitational wave spectrum, *Kiyotomo Ichiki, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama* (2007), Physical Review D **75**, 084017

RESCEU-26/06

Higgs phase of gravity in string theory, *Shinji Mukohyama* (2006)

RESCEU-25/06

Time variation of proton-electron mass ratio and fine structure constant with runaway dilaton, *T. Chiba, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama* (2007), Physical Review **D75**, 043516

RESCEU-24/06

Non-Gaussianity of the density distribution in accelerating universes II: N-body simulations, *Takayuki Tatekawa, Shuntaro Mizuno* (2007), JCAP **0702**, 015

RESCEU-23/06

Scale dependence of the primordial spectrum from combining the three-year WMAP, Galaxy Clustering, Supernovae, and Lyman-alpha forests, *Bo Feng, Jun-Qing Xia and Jun'ichi Yokoyama* (2007), JCAP **0705**, 020

RESCEU-22/06

The Remarkable 60×2 kpc Optical Filament Associated with a Poststarburst Galaxy in the Coma Cluster, *Masafumi Yagi, Yutaka Komiyama, Michitoshi Yoshida, Hisanori Furusawa, Nobunari Kashikawa, Yusei Koyama, and Sadanori Okamura* (2007), ApJ, 660, 1209 - 1214

RESCEU-21/06

Doubly covariant formula of deficit angle and its application to six-dimensional braneworld, *Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama, Shunichiro Kinoshita* (2006), Classical and Quantum Gravity **23**, 7199

RESCEU-20/06

Accelerating Universe and Cosmological Perturbation in Higgs Phase of Gravity, *Shinji Mukohyama* (2006)

RESCEU-19/06

Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background, *Shunsaku Horiuchi, Shin'ichiro Ando* (2006), PRD **74**, 103504

RESCEU-18/06

Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies, *Phys. Rev. D 75* (2007) 022003 *Takashi Hiramatsu and Kazuya Koyama* (2006), JCAP 0612, 009

RESCEU-17/06

Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer III: Reconstruction of a high-frequency skymap, *Atsushi Taruya* (2006), Phys.Rev.D **74**, 104022

RESCEU-16/06

Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise -A performance of generalized cross-correlation statistic-, *Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu* (2007), Phys. Rev. D **75**, 022003

RESCEU-15/06

Inflaton perturbations in brane-world cosmology with induced gravity, *Kazuya Koyama and Shuntaro Mizuno* (2006), JCAP, 0607, 013

RESCEU-14/06

Features in Dark Energy Equation of State and Modulations in the Hubble Diagram, *Jun-Qing Xia, Gong-Bo Zhao, Hong Li, Bo Feng, Xinmin Zhang* (2006)

RESCEU-13/06

Probing dynamics of dark energy with supernova, galaxy clustering and the three-year wilkinson microwave anisotropy probe (wmap) observations., *Gong-Bo Zhao, Jun-Qing Xia, Bo Feng, Xinmin Zhang* (2006)

RESCEU-12/06

Probing inflation and dark energy with current cosmological observations, *Jun-Qing Xia, Gong-Bo Zhao, Bo Feng, Xinmin Zhang* (2006)

RESCEU-11/06

Searching for CPT Violation with Cosmic Microwave Background Data from WMAP and BOOMERANG, *Bo Feng, Mingzhe Li, Jun-Qing Xia, Xuelei Chen, and Xinmin Zhang* (2006), Phys. Rev. Lett. 96, 221302

RESCEU-10/06

Light-Element Production in the Circumstellar Matter of Energetic Type Ic Supernovae, *Ko Nakamura, Susumu Inoue, Shiya Wanajo, and Toshikazu Shigeyama* (2006), The Astrophysical Journal, Vol. 643, L115-L118

RESCEU-9/06

A Method to Identify the Companion Stars of Type Ia Supernovae in Young Supernova Remnants, *Jin Ozaki and Toshikazu Shigeyama* (2006), The Astrophysical Journal, 644, 954-958

RESCEU-8/06

Measurements of atmospheric antiprotons, *K. Yamato et al.* (2006), Phys. Lett. B 632, 475 - 479

RESCEU-7/06

Mass spectrum of primordial black holes from inflationary perturbation in the Randall-Sundrum braneworld: a limit on blue spectra, *Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki, Katsuhiko Sato* (2006), JCAP, 0606, 003

RESCEU-6/06

Spontaneous Lorentz breaking at high energies, *Hsin-Chia Cheng, Markus A. Luty, Shinji Mukohyama, Jesse Thaler* (2006), Journal of High Energy Physics **0605**, 076

RESCEU-5/06

Weighing neutrinos in the presence of a running primordial spectral index, *Bo Feng, Jun-Qing Xia, Jun'Ichi Yokoyama, Xinmin Zhang, Gong-Bo Zhao* (2006), JCAP **0612**, 011

RESCEU-4/06

Power Spectrum of the Density Perturbations From Smooth Hybrid New Inflation Model, *Masahiro Kawasaki, Tsutomu Takayama, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama* (2006), Physical Review **D74**, 043525

RESCEU-3/06

The Japanese space gravitational wave antenna DECIGO, *S. Kawamura et al (including Y. Himemoto, T. Hiramatsu, K. Ichiki, A. Taruya, and J. Yokoyama)* (2006), Class.Quant.Grav. 23, S125-S132

RESCEU-2/06

Thermal background can solve the cosmological moduli problem, *Jun'ichi Yokoyama* (2006), Phys. Rev. Lett. 96, 171301

RESCEU-1/06

Relics of Metal-free Low-Mass Stars Exploding as Thermonuclear Supernovae, *Takuji Tsujimoto and Toshikazu Shigeyama* (2006), The Astrophysical Journal, 638, L109-L112