

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

Annual Report

2008

平成20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 2008 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	3
1.3	天体核・素粒子物理	7
1.4	その他	9
2	銀河進化理論	18
2.1	銀河系	18
2.2	超新星	19
3	可視光近赤外観測	21
3.1	活動銀河核	21
3.2	超新星など	24
4	サブミリ波観測	26
4.1	星形成領域の観測研究	26
4.2	低質量星形成領域のラインサーベイ	28
4.3	テラヘルツ帯観測技術の開拓	29
5	暗黒物質観測	32
5.1	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験	32
5.2	Hidden photon 探索実験の検討	32
5.3	レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発	33
5.4	原子炉ニュートリノモニター	34
5.5	暗黒物質検出器開発	35
5.6	量子ドットを用いた液体シンチレータの開発	35
6	銀河と宇宙構造の研究	37
6.1	高赤方偏移銀河	37
6.2	銀河進化と環境効果	38
6.3	機器・ソフトウェア開発	39
7	気球観測による反物質探査, 衛星による X 線・γ 線観測	43
7.1	衛星による X 線・ γ 線観測	43
7.1.1	「すざく」衛星の運用と稼働状況	43
7.1.2	フェルミガンマ線宇宙望遠鏡	43
7.1.3	質量降着するブラックホール	44
7.1.4	強磁場コンパクト天体	45
7.1.5	星間空間における高エネルギー現象	46
7.1.6	銀河団および銀河群の研究	47
7.1.7	雷雲における静電加速現象の研究	47
7.1.8	ASTRO-H 衛星計画およびその先	48
7.1.9	小型衛星計画への参加	50
7.2	気球による反物質探査	50
7.2.1	はじめに	50
7.2.2	BESS-Polar I 観測結果	51
7.2.3	BESS-Polar II のデータ解析	51
7.2.4	まとめ	51

II	2008 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	58
1	教員，職員，および研究員	60
2	シンポジウム・研究会	61
2.1	暗黒エネルギー研究国際ネットワーク (DENET)	61
2.2	JSPS-CNRS 二国間協力事業日仏合同ワークショップ「初期宇宙論」(日仏交流 150 周年記念事業) . . .	61
2.3	Cosmology Near and Far: Science with WFMOS	62
2.4	ビッグバン宇宙国際研究センター第三回公開講演会 「暗黒エネルギーと宇宙の未来」	64
2.5	第 8 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会：'Dark Energy in the Universe' サマースクール	64
2.6	第 7 回 RESCEU 国際シンポジウム 「RESCEU Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology」	66
3	プレプリント・リスト	69

I

プロジェクト別 2008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・樽家)

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

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

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

超弦理論における宇宙論

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚ましく進展し、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。その様なインフレーション模型においてはインフラトン場が重力と共形結合している場合があり、本研究ではその際に生成される宇宙の初期密度揺らぎのスペクトルの計算を行った。また、WMAP の観測結果を用いて特に D ブレーン・インフレーションモデルに対して制限を課した [3, 43, 107, 85, 97, 136, 158]。

超弦理論にもとづくインフレーションモデルからの初期密度揺らぎ

インフレーションを超弦・M理論の枠内で実現できるかは、近年の初期宇宙研究における中心的位置を占めている。なかでも最近提唱された興味深いインフレーションモデルとして、コンパクト化された曲がった内部空間中を相対論的な速度で運動するDブレーンによって引き起こされるものがある。このモデルではDブレーンと内部空間の端点に静止している反Dブレーン間の距離がインフラトンの自由度に対応し、その変化の度合いは通常のインフレーションのようにslow-rollとなっているわけではないのであるが、運動項がDBI作用と通常化のスカラー場から変更されていることによってインフレーションが引き起こされている。このモデルは単純な(1つのスカラー場運動で記述される)場合、内部空間の体積を小さくしなければならない要請と、インフレーション中に生成される重力波の量が少ななければならないという要請を同時に満たすことができないために観測から棄却されている。これに対し、我々はもともとの超弦理論の10次元から我々が観測する4次元へコンパクト化する際に現れる余剰次元で、単純なモデルで考えられていたのは別の方向も力学的な自由度となりうることに注目し、その自由度も考慮に入れたインフレーションモデルで生成される揺らぎを計算した。特に最近注目されている観測である初期揺らぎの非ガウス性を求め、これと生成される重力波の量から得られる制限を組み合わせたときに、新たに考慮に入れた自由度の効果でこのモデルがまだ観測結果からは排除されないということを示した。[4, 44, 105, 110, 90, 94, 134, 145, 203, 204]

Induced Gravity 理論におけるインフレーション

標準模型におけるヒッグス場が存在しない場合のインフレーションの可能性として、induced gravity理論におけるインフレーションを再考察した。その結果、曲率揺らぎのスペクトル指数は現在の観測値とよく一致すること、テンソル揺らぎも将来観測可能な振幅を持つこと、さらに再加熱温度が将来の重力波観測によって測定できる範囲にあること、を示した。[5, 132]

インフレーション宇宙における原始ブラックホール生成

宇宙初期に振幅の大きな密度揺らぎが存在した場合、密度が平均より十分高い領域はブラックホールへと崩壊する。このブラックホールは原始ブラックホールと呼ばれ、暗黒物質や中質量ブラックホールの起源のひとつの候補であると考えられている。われわれは、chaotic new inflation と呼ばれるモデルにおいては特定のスケールにおいて揺らぎの振幅の増幅が起き、宇宙背景放射を用いた大スケールの観測と矛盾することなく、暗黒物質などの起源となる

質量を持つ原始ブラックホールを十分な量だけ生み出すことが可能であることを示した。また、密度揺らぎの持つ非線形性による原始ブラックホールの生成量の変化を評価し、chaotic new inflation モデルにおいては生成量の有意な変化は得られないことを示した。[93, 6, 81]

MSSM インフレーション

MSSM インフレーションは最小超対称標準模型(MSSM)の平坦方向をインフラトンとしてインフレーションを起こすモデルであるが、初期条件の微調整がこのモデルの実現に必要なことが問題であった。われわれは、これまで無視されていた、インフラトンと結合する場へのエネルギーへの散逸の効果を考察し[82, 109, 143]、その効果では初期条件の微調整は緩和できないことを示した[46, 41, 88, 92, 103]。また、MSSM インフレーションの前に起こった偽真空インフレーションによって初期条件を調整するシナリオでは、量子揺らぎにより調整が乱され、確率的にしかMSSM インフレーションは実現しないことを示した[157]。

物質反物質非対称生成

Affleck-Dine 機構は現在の宇宙の物質反物質非対称の起源として有望なシナリオのひとつである。われわれは、Affleck-Dine 機構が複数の平坦方向によって引き起こされる場合に付いて考察を行い、ひとつの平坦方向のみによって引き起こされる可能性より複数のそれによって引き起こされる可能性の方が高いことを示した。また、その場合、宇宙の再加熱前に宇宙に熱的プラズマが存在する効果が生成される物質反物質非対称の量に影響を与えないことを示した。[7]

モジュライ場の揺らぎに関する宇宙論的制限

素粒子の統一理論である超重力理論や超弦理論には、他の場と重力相互作用し olmayan モジュライ場が存在し、その質量によっては、宇宙のエネルギー密度に対して過剰な寄与をしたり、元素合成後に崩壊して軽元素を破壊したり、等の悪影響を及ぼすことが知られている。本研究では、インフレーション中にこの場の質量がハッブルパラメタより十分軽い場合について、この場の持つ揺らぎが宇宙の進化に与える影響を、モジュライからコールドダークマターが生成する場合も含めて、さまざまな場合について考察した。それによってさらに強い制限が課されることを示した。[8]

Ekpyrotic シナリオにおける原始密度揺らぎ

超弦理論の影響を受け、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かわって、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。われわれは、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を調べた。その結果、有効的に複数の正準形のスカラ場を含む4次元理論で記述できるモデルにおいては、スケール不変に近いエントロピー揺らぎが生成され、ある条件を満たせば、それが自然に観測と直結するスケール不変に近い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。また、最近初期宇宙モデルを観測結果から識別するために盛んに研究されている揺らぎの非ガウス性についても考察を行った。その結果、このモデルでは揺らぎの生成期にスカラ場の slow-roll 条件が破れているため、観測による制限内ではあるものの、通常のインフレーションモデルから予言されるよりも大きな非ガウス性が得られることがわかった。これは Planck 衛星などによって、今後数年のうちに検知できる可能性のある興味深い結果である [62, 204]。

フラックスコンパクト化の安定性

フラックスコンパクト化は、フラックスにより余剰次元のコンパクト化および安定化を図り、高次元時空から4次元宇宙を実現するために有用なアイデアである。このようなフラックスコンパクト化のモデルの内、6次元ブレーン宇宙モデル [205] や Freund–Rubin コンパクト化 [106, 84, 96, 135, 146] について、その安定性を動的・熱力学的両側面から調べた。この結果、どちらのモデルについても線形摂動に対し不安定になる動的に不安定な時空は、4次元の de Sitter 時空に付随するエントロピーが低い系列に属する時空となっており、熱力学的にも不安定なものであることがわかった。以上のように、これらの系は熱力学的安定性と動的安定性に相関が存在することを示した。

動的ブラックホールにおける AdS/CFT 対応

AdS/CFT 対応は、重力理論と一つ次元の低い共形場理論の間にある種の対応関係を示唆する。この対応を用いて、非一様に膨張する4次元上の流体の性質を、動的な5次元ブラックホールを使って解析した。この結果、ブラックホール時空が正則である要請から、粘性等の流体の性質を特徴付けるパラメータが一意的に決定されることを示した [9, 10]。

1.2 観測的宇宙論

スカラ場・テンソル理論に基づくダークエネルギーモデル

現在のような低エネルギーで観測されているような加速膨張する宇宙を実現するのは理論的には大きな困難をとまなう。これに対するアプローチとして、重力理論が今の宇宙論的なスケールでは一般相対性理論から変更されるとするものがあり、それらの中で最も単純な理論は、重力と結合したスカラ場を導入したスカラ場・テンソル理論である。しかし、この理論は太陽系内の実験などによって、一般相対性理論からのずれはかなり厳しく制限されている。これに対し、われわれはこの理論にスカラ場のポテンシャルを導入し、スカラ場の質量が周りの物質の密度に応じて変化すること (Chameleon 機構) を用いて、宇宙論的なスケールではスカラ場の効果で加速膨張が実現し、太陽系のような小スケールではそのスカラ場の値が固定されて一般相対性理論を再現できるという、現在の観測結果と矛盾しないモデルを構築できることを示した [20, 83]。

質量パワースペクトルの非線形重力進化に対する精密理論テンプレートの構築

銀河分布のパワースペクトルに現れるバリオン音響振動は、「宇宙標準ものさし」として銀河分布の赤方偏移・距離関係の決定に有効で、次世代分光サーベイによるダークエネルギー探査の重要な手段の一つである。近年、N体シミュレーションなどによる系統的な研究から、非線形重力進化によってバリオン音響振動スケールが時間変化することが明らかになり、赤方偏移・距離関係の精度決定する上でバリオン音響振動の時間進化を正確に記述する理論テンプレートの構築が不可欠であると考えられている。昨年度、われわれは、乱流などの分野で知られる完結近似と呼ばれる手法を駆使し、バリオン音響振動の精密理論テンプレートに対する新しい計算手法の定式化を行った。本年度は、高次補正の影響を取り入れた計算手法を開発するとともに、赤方偏移歪みの影響を取り入れた精密理論テンプレートの作成を進めてきた。N体シミュレーションとの詳しい比較から、パワースペクトル、2点相関関数に対して、従来の摂動計算より適用範囲の広い理論テンプレートの構築が可能となり、パーセントレベルの精度が概ね達成できることがわかった。 [111, 150, 160, 172, 173, 197, 198, 206, 207, 208, 209, 210]

質量パワースペクトルに対する原始非ガウス性の影響

次世代の CMB 観測や銀河サーベイから宇宙初期に起こったとされるインフレーションを探る上で、原始非ガウス性の検出はきわめて重要なプロープと考えられている。近年、理論研究の進展から、原始非ガ

ウス性はゆらぎの生成メカニズムとインフレーションのモデルに大きく依存することが示され、原始非ガウス性の統計性を観測的に詳しく調べることで、インフレーションに対するより強い制限が得られることが明らかになってきた。CMB、大規模構造の観測から原始非ガウス性を検出するには、通常、パワースペクトルなどのような高次統計量を解析する。特に大規模構造の場合、重力非線形性に伴って現れる非ガウス性も存在するため、より注意深い解析が必要となる。本研究は、これまであまり考えられていなかったパワースペクトルに現れる原始非ガウス性の影響に注目、観測可能性について議論を行った。パワースペクトルのような2次の統計量でも、重力非線形性、銀河バイアスの非線形性を通じて原始非ガウス性の影響が現れうる。具体的な原始非ガウス性のモデルに基づき計算を行った結果、重力非線形性による原始非ガウス性の影響は、たかだかパーセントレベルでほぼその影響は無視できることがわかった。その一方、カーバトンや多成分スカラー場などによって生成される原始非ガウス性の場合、銀河バイアスの非線形性を通じて非常に強いスケール依存性が現れ、大スケールではこの効果が卓越することが明らかになった。このことは、銀河パワースペクトルの観測から原始非ガウス性に対する強い制限が得られることを示唆している。[17, 137]

修正重力理論における質量パワースペクトルの非線形進化

Ia型超新星の観測などで明らかになった宇宙の加速膨張を説明する1つの考え方として、重力理論の変更・修正というアイデアがある。この修正重力理論は、宇宙論的スケールでは一般相対論からずれる一方、観測的制限から、太陽系スケールでは一般相対論が実質的に回復するような理論であることが要請されている。近年、こうした修正重力理論がいくつも提唱されているが、宇宙膨張に関する観測と比較する限り、(一般相対論の)ダークエネルギーと見分けがつかない。しかしながら、構造形成、つまり、密度ゆらぎの重力進化を調べることで、修正重力理論とダークエネルギーの峻別が可能となる。本研究では、広いクラスの修正重力理論に対して、密度ゆらぎの重力進化を取り扱う摂動論の一般的定式化を行った。その定式化にもとづき、加速膨張を説明する2つの修正重力理論($f(R)$ モデル、Dvali-Gabadadze-Porrattiモデル)に対して、質量パワースペクトルの摂動計算を行った。こうした摂動計算をもとにパラメトライズド・ポストフリードマンの定式化を用いて非線形領域におけるパワースペクトルのふるまいを評価した結果、小スケールにいくと一般相対論からのずれは徐々に小さくなるが依然として顕著な違いが残ることが明らかになった。[163, 173]

背景重力波の検出法

背景重力波は、多数の波が折り重なってできた位相がランダムな重力波であり、初期宇宙をプローブ

する上で重要なターゲットと考えられている。背景重力波を用いることで、従来の電磁波観測からは得られない情報を手に入れることができる。とりわけ興味深い点は、宇宙初期の高エネルギー極限において、重力理論自体がパリティ対称性の破れを自然に含むことが予想されており、対称性の破れに伴って背景重力波にも特有の偏極(円偏極)が残る可能性があるということである。また、現在の宇宙の加速膨張を説明するアイデアとして、宇宙論的スケールで一般相対論が変更される可能性が議論されており、重力波自体もテンソル成分以外の自由度を持つ可能性が指摘されている。本研究では、背景重力波の持つさまざまな偏極成分を複数台のレーザー干渉計を用いて、分離・検出する一般的な手法について考察した。その手法に基づき、Advanced LIGO, LCGTなどの地上の次世代干渉計を用いて背景重力波の検出可能性について定量的な議論を行った。[16, 61]

背景重力波による再加熱温度の決定可能性について

背景重力波は原理的には宇宙のインフレーション期のような極初期宇宙を直接プローブできる。特にそのスペクトルは宇宙の膨張史、つまりは熱史に関する情報を含んでいる。われわれは、宇宙の再加熱期には物質優勢に近い宇宙になり、スペクトルの形が変わるといった性質に注目し、DECIGOやBBOといった次世代の重力波干渉計により、宇宙の再加熱温度が 10^{6-9} GeVほどであれば決定できる可能性を示し、素粒子物理に対するインパクトを議論した[28, 29]。

重力波観測による原始ブラックホール生成の検出可能性

原始ブラックホールを形成する密度揺らぎは非常に大きな振幅を持っている。このような大振幅の揺らぎは、高次摂動効果によって2次的に重力波を生成する。われわれは、この大振幅の密度揺らぎから生成される原始ブラックホールの生成量と重力波の振幅の両者を評価することで、2次的に生成された重力波の振幅と原始ブラックホールの生成量の関係を調べた。それにより、パルサーを用いた重力波に対する制限から、原始ブラックホールが中質量ブラックホールの主たる構成要素とはなり得ないこと、及び、将来予定されている宇宙空間における干渉計による観測を用いれば、原始ブラックホールが暗黒物質の主たる構成要素が否かを明らかにできることを示した。[19, 47, 42, 89, 104, 133, 144]

初期揺らぎのスペクトル再構築

インフレーション理論に基づいた構造形成シナリオの主張に依れば、物質分布の統計的性質は宇宙膨張の履歴を詳細に記録しており、初期宇宙研究における観測と理論の重要な接点となっている。そこで理論的な偏見を排して、可能な限り多くの情報を

抽出することが望ましい。マイクロ波背景放射の温度非等方性は、degree スケールにまで渡って極めて精密に測定されており、構造進化の初期状態を再構築するに足る情報を有しているため、あとは情報を適切に抽出するための解析手法の問題である。私たちは、従来のパラメータフィッティングでは原理的に見つけられない初期スペクトルの微細構造を調べる方法として、マイクロ波背景放射の非等方性を揺らぎの初期スペクトルへ逆写像する手法を開発してきた。私たちのグループでは、現状知られている複数の逆写像法全てを実現しており、異なる定式化に基づく複数の解析手法を用いたアプローチを可能にしている。WMAP ミッション 5 年目のデータリリースに際して、それらの再構築法を適用して初期スペクトルの計算結果を更新した。再構築した初期スペクトルにバンドパワー分解を適用して誤差評価を行った結果、これまでに報告されていない卓越した構造を 700Mpc スケール近辺に発見した。[22, 48, 86, 214]。

CMB の非等方性によるスカラー・テンソル理論の制限

近年様々な動機によって注目されてきたディラトン型修正重力理論は、しかしながら太陽系内の重力実験によって既に厳しく制限されており、弱重力場での一般相対論への補正は（存在したとしても）10 万分の 1 以下でなければならないとされている。軽いスカラー場が結合した理論の最も単純な例として Brans-Dicke 理論が知られているが、その拡張として、宇宙論的な進化を通じてスカラー場が自然に脱結合し一般相対論が実現されるモデルが提唱されている。私たちは、そのようなモデルにおけるスカラー場の初期宇宙での振る舞いに注目することで、観測的に許されるシナリオの制限を試みた。スカラー場の運動に伴う重力定数の時間変化がマイクロ波背景放射の揺らぎの音波スケールに与える影響を評価し、WMAP ミッションの最新データと照合することで、スカラー場の初期条件や結合関数の構造に幾らかの制限を得た。[91]。

CMB を用いた微細構造定数の時間変化の制限

近年、素粒子統一理論は急速に進展しつつあり、その中の多くのモデルが物理定数の時間変化を预言する。また、クエーサーの吸収線の観測から、過去の微細構造定数の値が現在のそれと異なっていたとする結果が示唆されており、他の独立な観測によって微細構造定数の時間変化を検証する試みは大変意義深い。われわれは、公開されたばかりの最新の CMB 温度揺らぎの観測結果 (WMAP 5 年目のデータ) を用いて再結合期の微細構造定数の値に制限を与え、現在の観測精度では有意な時間変化が検出されないことを確認した。[21, 45, 108, 147] また、微細構造定数だけでなく電子質量や陽子質量も同時に時間変化する、より現実的な統一理論に基づいたモデルで同様の解析を行い、その結果、微細構造定数の時間

変化の制限が従来より厳しくなることを明らかにした。[70, 159]

銀河団ガス内部の非一様性のモデル化とその観測的検証

銀河団を用いた宇宙論においては、銀河団の内部構造の複雑さ故に、精密なパラメータ測定が困難である。銀河団ガスの内部構造を統計的に記述し、モデル化することで、銀河団を用いた宇宙論の系統誤差を理解することを目指している。そのために、銀河団ガスの数値シミュレーションで得られた内部の温度、密度の不均一性が対数正規分布で良く近似できることを示し、銀河団ガスの内部構造を統計的に扱うモデルを構築した。このモデルを用いて、Sunyaev-Zeldovich 効果を用いたハッブル定数推定の系統誤差を評価したところ、Reese et al. (2002) 等の観測結果と WMAP 等の他の推定法との矛盾を良く説明した。

しかし、この対数正規モデルはあくまで数値流体シミュレーションに基づいたものであった。そこで、更に、実際の銀河団の X 線観測データから密度揺らぎの統計的情報を引き出す事を試みた。観測量は必然的に二次元投影されたものであるため、まず非一様性の三次元的統計的情報を二次元 X 線輝度分布から引き出す方法を開発した。その上で実際の銀河団の X 線観測データを解析した。

まず投影による効果を調べるために密度揺らぎが対数正規分布に従うような場合の X 線輝度分布を多数作成し、X 線輝度の動径分布からのゆらぎ、輝度揺らぎの分布関数を求めた。その結果、輝度揺らぎの分布関数も対数正規分布に従う事が分かった。また、輝度揺らぎの大きさと、密度揺らぎの大きさ、パワースペクトルの関係を求めた。さらに X 線輝度分布から密度揺らぎのパワースペクトルを推定するため、輝度揺らぎのパワースペクトルのベキと密度揺らぎのパワースペクトルのベキ間の関係を求めたところ、ほぼ同じである事が分かった。また系統誤差の可能性として温度揺らぎ、温度動径分布、密度動径分布、望遠鏡の角度分解能について検討を行った結果、どれも統計誤差に比べ大きくないことが分かった。次に実際の銀河団の Chandra 衛星による X 線データの解析を行った。クーリングコアを持たない銀河団という条件のもと、Chandra のアーカイブデータ中、最も光子統計の良い観測データを持つ銀河団である Abell3667 を選んだ。そして、X 線輝度揺らぎの分布を求めた所、対数正規分布が最も良く一致した。充分光子統計の良い観測データを用いたためポアソン統計による影響はほとんど無視できる。また、合成銀河団で得られた関係式をもちいて、(三次元) 密度揺らぎの大きさを推定した。この結果は銀河団ガスの密度揺らぎに対する対数正規モデルの兆候を確かめた初めての観測結果であると言える [23, 138, 151, 112]。

N 体シミュレーションを用いたバリオン音響振動の精密テンプレートの作成

再結合期以前の宇宙では光子とバリオンは強く結合しており、1つの流体のように振る舞う。バリオンの受ける重力と光子の受けよ射圧のため、この流体はバリオン音響振動 (BAO) と呼ばれる振動を起こし、その音波は再結合期まで進行する。現在観測できる宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ、及び、銀河分布の密度揺らぎには BAO の痕跡が残されている。近年、銀河赤方偏移探査の広視野化により、BAO の観測が報告されるようになってきた。

今後、銀河分布から BAO の特徴的距離をより正確に測定することができるようになれば、これを標準物差として利用することにより、宇宙の膨張史をこれまででない精度で再構築できると期待されている。そして、それは宇宙の加速膨張を支配する暗黒エネルギーの正体を明らかにするのに大きな役割を果たし得る。また、BAO の距離情報だけでなく、振動の大きさに関する情報も宇宙論的に重要であると考えられている。

近い将来の超大規模銀河探査を前に、銀河分布を記述する理論モデルの高精度化が至上命題となっている。より具体的には、密度揺らぎの非線形な重力進化、銀河の特異速度による赤方偏移揺らぎを正確にモデル化しなければならない。われわれは、N 体シミュレーションを用いてこの課題に取り組んだ。まず、N 体シミュレーション自身の精度を評価し、シミュレーションの体積の有限性から来る系統誤差を評価した。[24, 113] 次に、摂動理論を用いてこの系統誤差を取り除く方法を開発し、BAO のスケールでのパワースペクトルに対する重力非線形効果をサブパーセントレベルの精度で正確に取り扱うことに成功した。[114, 99, 174, 175, 139, 152, 199, 211] さらに、赤方偏移歪みの影響も考慮できるよう、この方法論を拡張し、達成した精度について議論した。[164]

また、BAO の振幅の非線形な時間進化に関しては、理論モデル、N 体シミュレーションを用いて簡単なフィッティング公式を開発し、これが密度揺らぎ自身の大きさとその成長率に強く依存することを発見した。[25] さらに、この公式とスローンデジタルスカイサーベイの LRG と呼ばれる銀河のパワースペクトルとを比較し、非線形進化の兆候を検出した。[26]

銀河の非線形パワースペクトルを用いたニュートリノ質量の制限

ニュートリノが質量をもつことは素粒子標準模型の限界を示す最初の証拠であり、ニュートリノがどの程度の質量を持つかは重要な問題である。非常に興味深いのは、ニュートリノ質量の総和の上限である、 $\sum m_\nu < 0.2 - 0.6 \text{eV}$ という制限が宇宙論的観測から得られていることである。

宇宙論的な観測からニュートリノの質量を制限できる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙

の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュートリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的なスケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在できず、重力を弱めるからである。 $\sum m_\nu 0.1 \text{eV}$ 程度の場合、その特徴的なスケールは偶然にもバリオン振動の現れるスケールであるので、将来の大規模な銀河サーベイ計画では、ニュートリノの質量をプローブできる可能性が非常に大きい。

しかし、その 100Mpc ほどのスケールでは重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこでわれわれは、摂動論な手法に基づき、有質量ニュートリノの効果を非線形パワースペクトルの計算に組み込むことに成功した。さらに、ニュートリノが成長を均す効果は重力の非線形進化により増幅され、この効果によりニュートリノ質量の制限が非常に強くなりうることを示した [27]。

さらに銀河バイアスや赤方偏移ゆがみによる非線形効果を取り入れてニュートリノの質量の予想される達成精度を見積もった。これは非線形効果をすべて考慮したという点では、初めての試みである [98, 115, 116, 117, 140, 153, 162, 176, 212, 213]。

CMB と大規模構造の相関で探る CMB に対する弱い重力レンズ効果

CMB はその温度ゆらぎと偏光の観測により、宇宙論パラメータは精密に測定され非常に成功をおさめたが、その一方で $z \sim 1000$ の宇宙の情報を見ていることに対応するためにダークエネルギーやニュートリノの質量など、より現在に近い宇宙の進化に影響を及ぼすものの情報を得ることができない。しかし、CMB 光子もまた宇宙の大規模構造によって弱い重力レンズ効果を受けるために、これを観測すれば CMB からそれらの情報を得ることができる。

CMB の観測のみから弱い重力レンズ効果を検出するのは非常に難しいが、大規模構造の観測量と相関をとることによってその検出効率は飛躍的に増加する。実際に WMAP と SDSS の相関から、この弱い重力レンズ効果を検出されたという報告がここ数年数例ある。

そこでわれわれは、次世代の CMB 観測衛星 Planck と、すばる望遠鏡の広視野撮像計画である HSC との相関によって、CMB に対する弱い重力レンズ効果が検出できること、さらに宇宙論パラメータの制限が十分に改善されることを示した [177]。

ロスター効果による視線速度変動の摂動公式に対する精度検証

これまで系外惑星は主にドップラー法によって発見されてきたが、最近主星の前を惑星が通過して食を起こすトランジット惑星系も多く見つかってきている。トランジット惑星系ではドップラー法だけでは得られない情報を引き出すことが可能である。主

星の視線速度がトランジット中に特徴的な変化を起こすロシター効果がその1つで、それにより主星の自転速度 $v \sin i$ と、主星の自転軸の向きと惑星の軌道公転軸の向きが天球面上でなす角度 λ を推定することができる。

Ohta et al.(2005) は、ロシター効果に対する解析的な公式 (OTS 公式) を導出した。一方で、Winn et al.(2005) は、高分解能の太陽スペクトルから出発してトランジットを起こしている際の星の模擬スペクトルを作成し、それを Keck での視線速度解析ルーチンにかけることでロシター効果に対する経験的な公式を導出した。その結果、 $v \sin i$ の見積もりに 10% 程度のずれがあると結論した。

このずれの原因はこれまでよく分かっていなかった。しかし今回のわれわれの研究で、ロシター効果に起因する視線速度変動に対して OTS 公式と実際の視線速度解析で異なる推定量を用いていたためにこのずれが引き起こされたのだということが明らかとなった。われわれはさらに、すばる HDS のデータ解析に関しても同様にトランジット中の星の模擬スペクトルを作成し、ヨードセル法を用いた視線速度解析の手続き (Sato et al. 2002) に従って視線速度の変化を求めた。それにより Winn et al.(2005) と同様のロシター効果に対する経験式、さらには主星の自転速度を系統的に変化させた場合の経験的な公式を得た。[165]

地球型惑星の反射光の時間変動

地球と同様の惑星の発見は系外惑星探査の一つのマイルストーンであるが、科学的には、そのような惑星をできる限り精密に測光・分光観測することで特性を探ることの重要性は高い。惑星の反射光は、惑星表面の各地点の反射特性を反映し、その時間変動は自転周期で繰り返す。われわれは、Ford, Seager & Turner (2001) などによる現在の地球のデータを用いた測光強度変動のシミュレーションを再現した。また、植物による反射が 750nm 付近で急激に大きくなるといういわゆるレッドエッジという特性に注目しつつ、反射光の時間変動から逆に地表面の様子を探るアプローチについて考察している。[166]

1.3 天体核・素粒子物理

マグネターの誕生とガンマ線バースト

大質量星の終焉はそのコアの重力崩壊にトリガーされる。その際、超新星やガンマ線バーストなど実に様々な爆発現象が起こることがわかってきている。その超新星の中でも観測で見つかる元素は違った様相をみせる他、ガンマ線バーストの中でもそのエネルギーや継続時間には大きなバリエーションがある。われわれはこの多様性を親星の性質の違いと理解し、特殊相対論的磁気流体シミュレーションを用いて親星と爆発現象の関係を明らかにしようとしている。

本年度は従来考えてきた磁場と自転の強さ違いに加えて、親星の質量や微分回転・剛体回転度などの違いも踏まえた多くのパラメータでこの崩壊現象を考察した。その結果、磁場による爆発は今まで考えられてきたパラメータ領域よりも広くなることがわかった。また、どのような時爆発が強くなるのか、その条件の詳細を明らかにした。[30, 118, 119, 100, 120, 178, 179, 141, 154, 215]

重力崩壊型超新星からの背景ニュートリノ放射の観測見込み

重力崩壊型超新星は大量の熱的ニュートリノを放出することが知られているが、地球上のニュートリノ検出器で熱的ニュートリノが検出できるほどこの地球近くで超新星は 1987 年以来起きていない。ところが、「超新星背景ニュートリノ放射」は、遠方に起きた過去のすべての超新星から放射された熱的ニュートリノの集計であり、その観測は近傍の超新星の発生を待つ必要がない。われわれは、まず、星の誕生の情報を記録する星形成率、次に星の一生の情報を記録する銀河外背景光子放射や星の質量密度、そして最後に星の末期の情報を記録する超新星発生レートを同時に評価し、最新の観測データに基づいた超新星背景ニュートリノ放射の観測見込について理論的に考察した。その結果、大質量星の誕生から末期までの一貫した描写が得られ、十分な超新星レートがあることと、これまでより小さい超新星発生レートの不確定性を示すことができたのである。近い将来に、超新星背景ニュートリノ放射が超新星の内部やニュートリノの物理のプロープになりうるということが結論付けられた [32, 167, 181, 66, 216, 217]。

強磁場を持つ星の重力崩壊型超新星からの非熱的ニュートリノ放射

近年、非常に強い表面磁場が一部の大質量星や中性子星に観測されており、その磁場起源について議論が続いている。星の磁場が保存されるという考え方 (これを fossil field と呼ぶ) がある一方で、中性子星の形成段階で磁場が増幅されるという考え方も主流になりつつあるが、いずれもまだ定説にはなっていない。それでわれわれは、相対論的陽子の核反応より生成され、超新星の中間的時間帯 (つまり、熱的ニュートリノ放出の後・可視光の放出の前) に放射されるニュートリノの放出に着目した。強磁場を保持した大質量星が超新星爆発すれば、星の磁場を利用した粒子加速と非熱的ニュートリノ放射が可能であり、超新星が銀河内で起こった場合、現在のニュートリノ検出器で検出可能であることを示した [31, 180, 66, 216]。これは星の表面下の磁場のプロープとなりうるだけでなく、磁場起源への示唆も得られる。

超新星コアにおける原子核パスタ形成

超新星爆発はコアの重力崩壊から始まる。そして、コアが非常に高密度になった際に原子核は融解して核物質となるが、その際に核子同士に働く強力は反発力によってコアの収縮が止まり、コアバウンスを起こして爆発に発展していくと考えられている。しかしながら、上記の過程において、原子核が如何にして融解し、一様な核物質と変化していくかは完全には理解されていない。原子核が融解していく過程においては、元々球形だった原子核が棒や板といった形状の原子核(原子核パスタ)へと変化していくと考えられているが、実際にどのようにして形状が変化していくのか、そのプロセスは不明であり、それと同時に本当に形成されるかどうかという問題自体も自明ではなかった。われわれはこの問題に対して、量子分子動力学法を用いて球状の原子核が一様な核物質へと転移していく過程のシミュレーションを行った。われわれは実際に球状から棒状や板状の原子核への相転移を観察し、超新星コア中において棒や板の原子核が動的に形成され得ることを示した [68]。

最高エネルギー宇宙線到来方向分布の予言

銀河系内・系外にはそれぞれ特有の形状を持った磁場が存在する。宇宙線は荷電粒子であるためこれら磁場によって飛行軌跡を曲げられる。よって、これらの磁場が到来方向に反映されることが期待される。最高エネルギー宇宙線源の情報を消し去ってしまうことが考えられる。われわれはまず構造磁場中の宇宙線伝搬を考えることにより、 $6 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上の宇宙線陽子が磁場から受ける曲がりは軽微であり、ソースの位置と到来方向のずれは 2-3 度程度であり、現在知られている最も妥当なソースの特徴を仮定すると Auger 実験で 5 年程度観測すればソースの位置が宇宙線到来方向分布として見えてくることを示した [33, 69]。次に銀河内磁場について考察し、数度での相関が見えるかどうかはまだ確定していない銀河磁場の方向反転のモデルに依存することを示し、曲がりが小さいモデルが真実であった場合、北半球で相関が見えやすいということを示した。

Auger 実験が示唆する最高エネルギー宇宙線ソースの性質

Auger 実験は非等方な最高エネルギー宇宙線分布を検出した。この非等方性は宇宙線源の分布と点源ソースの数についての情報を持っていることが期待される。われわれは銀河系内・系外の詳細な磁場モデルを仮定したシミュレーションを行い、Auger 観測所の結果と比較することで、宇宙線源の数密度が 10^{-4}Mpc^{-3} 程度であると見積もり、強力な宇宙線源候補だった特殊なタイプの活動銀河核は数が少なすぎて宇宙線源になり得ないことを示した [35, 69]。さらに、より低いエネルギーの超高エネルギー宇宙線で観測されている宇宙線分布の「等方性」はこの

数密度のソース分布からは生成することが難しいことを示し、もう一桁程度大きい数を持つ、放射最高エネルギーが 10^{20}eV に満たないソースがある可能性を指摘した [35, 69]。また、この等方性を再現するもう一つのシナリオとして宇宙線生成が突発的である場合を指摘し、宇宙線伝搬を考えることで突発的宇宙線ソースのレートについて世界で初めて上限と下限を見積もった [36, 69]。

最高エネルギー宇宙線と宇宙大規模構造との相関

Auger 実験は最高エネルギー宇宙線と特定の銀河系外天体との位置相関を指摘した。これをより一般化し、われわれは近傍銀河の分布(宇宙大規模構造)と宇宙線到来方向の相関を議論した [122, 101, 148, 69]。この結果、典型的な相関角は 10° 程度と見積もられ、銀河のかたまっている角度スケールとほぼ同程度であることから、最高エネルギー宇宙線は銀河系外の天体起源であることを示した。また、この相関角は実際の宇宙線源と到来方向のずれの最大値と解釈することができ、この事実からいくつかの銀河系外磁場モデルに制限を加えた。

GZK ニュートリノから探る最高エネルギー宇宙線の起源

最高エネルギー宇宙線はその伝搬中に宇宙背景放射光子と反応することによりエネルギーを失う一方で超高エネルギーのニュートリノを生成する。超高エネルギーの宇宙線の起源は 10^{17}eV 以上を銀河系外起源とするシナリオと 10^{19}eV 以上のみを銀河系外起源とするシナリオがあり現在のところどちらが正しいかははっきりしていないが、われわれは上記のニュートリノスペクトルが観測されればどちらのシナリオが正しいか探れることを示した [37, 69]。また、 10^{18}eV 付近のニュートリノスペクトルは上記起源のシナリオによらず、最高エネルギー宇宙線ソースの宇宙論的進化のシナリオにのみ依存することを示し、このニュートリノが $z = 1$ 程度の宇宙での最高エネルギー宇宙線の生成に関する情報を与えることを示した。

第一世代の重力崩壊とニュートリノ・重力波放射

宇宙で最初にできた星のことを第一世代と呼ぶ。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。そこでわれわれは、どのような星が最終的にどのような現象を引き起こすのかを詳細なシミュレーションを行って明らかにした。その結果を用いて、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。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、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 [38, 183, 223, 224, 225]。

ガンマ線バースト中心エンジンからの重力波

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象である。2004年に打ち上げられたSwift衛星をはじめ、非常に多くの観測があるものの、その中心メカニズムはいまだ明らかになっていない。ガンマ線バーストを起こすには非常に小さい角度に絞られた超相対論的なジェットが必要と考えられている。中心エンジンの候補として有力なのは、コラプサーと呼ばれるブラックホールと降着円盤の系である。しかし具体的にどういったメカニズムでGRBに不可欠なジェットを生成するのか、というのは光学的に厚いため光子での観測では制限を加えることができない。そのような中、本研究ではガンマ線バーストの中心エンジンから放出される重力波の強度を見積もった。その結果LISAを用いることで中心エンジンに制限を加えることができることを示した。また、ガンマ線バーストからの背景重力波についても計算を行い、観測可能性を議論した [123, 102, 124, 142, 149, 184, 185]。

コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノとガンマ線バースト中心エンジン

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

よってどれだけ効率が変化し、それによって、ニュートリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーを生成できるのかどうかを議論した [168, 186]。

磁気駆動型超新星爆発における元素合成

近年、重力崩壊型超新星爆発において回転や磁場といった多次元の効果がダイナミクスにどのような影響を与えるのか、ということが精力的に調べられてきている。特に、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星を形成するほど強い磁場を持つ大質量星は重量崩壊の際に原始中性子星を形成した後、ジェット状の磁気駆動型爆発を起こすことが分かっている。このようなジェットはガンマ線バーストとの関連から、近年非常に活発に議論されているものである。そのような背景の中本研究では、現実的状态方程式、ニュートリノ冷却を含んだ特殊相対論的磁気流体コードを用いてそのようなジェット状爆発を起こすモデルを計算し、ジェット中における元素合成を計算した。その結果を用いて、元素合成がどう進むのか、またどういった組成比を持って星の外に放出されるのか、を議論した [156]。

1.4 その他

佐藤勝彦教授が2009年3月31日付けで退官、明星大学および東京大学数物宇宙連携機構に赴任され、新たな研究生活を始められることになりました。

<受賞>

- [1] 稲田直久、第20回日本天文学会研究奨励賞、2009年3月26日
- [2] 大栗真宗、第3回日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2009年3月29日

<報文>

(原著論文)

- [3] Takeshi Kobayashi & Shinji Mukohyama: "Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5"; Physical Review D **79**, 083501 (2009)
- [4] F. Arroja, S. Mizuno and K. Koyama, "Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation," JCAP **0808**, 015 (2008).
- [5] N. Kaloper, L. Sorbo and J. Yokoyama, Phys. Rev. D **78**, 043527 (2008)
- [6] R. Saito, J. Yokoyama, R. Nagata: "Single-field inflation, anomalous enhancement of superhorizon fluctuations, and non-Gaussianity in primordial black hole formation ", JCAP **0806** (2008) 024.
- [7] Kohei Kamada, Jun'ichi Yokoyama: "Affleck Dine leptogenesis via multiple flat directions "; Physical Review D **78**, 043502 (2008).

- [8] M. Lemoine, J. Martin and J. Yokoyama: “Constraints on moduli cosmology from the production of dark matter and baryon isocurvature fluctuations,” arXiv:0904.0126 [astro-ph.CO].
- [9] Shunichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama, Shin Nakamura, Kin-ya Oda: “A Holographic Dual of BjorkenFlow”; Prog. Theor. Phys. **121**, 121 (2009)
- [10] Shunichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama, Shin Nakamura, Kin-ya Oda: “Consistent Anti-de Sitter-Space/Conformal-Field-Theory Dual for a Time-Dependent Finite Temperature System”; Phys. Rev. Lett. **102**, 031601 (2009)
- [11] Jennifer K. Adelman-McCarthy et al.: The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, The Astrophysical Journal Supplement **175**(2008) 297–313 (astro-ph/0707.3413)
- [12] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Norio Narita, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Debra A. Fischer, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Francis T. O’Donovan, and B. Scott Gaudi: The Prograde Orbit of Exoplanet TrES-2b, The Astrophysical Journal **682**(2008) 1283–1288 (arXiv:0804.2259)
- [13] John A. Johnson, Joshua N. Winn, Norio Narita, Keigo Enya, Peter K. G. Williams, Geoffrey W. Marcy, Bun’ei Sato, Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Gaspar Bakos, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Wako Aoki, Motohide Tamura, Toru Yamada, Yuzuru Yoshii and Marton Hidas: Measurement of the Spin-Orbit Angle of Exoplanet HAT-P-1b, The Astrophysical Journal **686**(2008) 649–657 (arXiv:0806.1734)
- [14] N. Ota, K. Murase, T. Kitayama, E. Komatsu, M. Hattori, H. Matsuo, T. Oshima, Y. Suto, and K. Yoshikawa: Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145: constraints on the extremely hot gas and non-thermal emission, Astronomy & Astrophysics **491**(2008) 363–377 (arXiv:0805.0500)
- [15] Piro, L. et al. : EDGE: Explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions, Experimental Astronomy **23**(2009) 67–89 (arXiv:0707.4103)
- [16] Naoki Seto, Atsushi Taruya: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds from the correlation signals of ground-based interferometers: Measuring a circular-polarization mode”; Phys. Rev. D **77** (2008) 103001
- [17] Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Takahiko Matsumura: “Signature of primordial non-Gaussianity on the matter power spectrum”; Phys. Rev. D **78** (2008) 123534
- [18] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya, Kazuhiro Hayama, Seiji Kawamura, Masa-aki Sakagami: “Probing non-tensorial polarizations of stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers”; Phys. Rev. D (2009) in press.
- [19] R. Saito, J. Yokoyama: “Gravitational-Wave Background as a Probe of the Primordial Black-Hole Abundance”, arXiv: 0812.4339[astro-ph], Phys. Rev. Lett. **102**, 161101 (2009).
- [20] S. Tsujikawa, K. Uddin, S. Mizuno, R. Tavakol and J. Yokoyama: “Constraints on scalar-tensor models of dark energy from observational and local gravity tests,” Phys. Rev. D **77** (2008) 103009
- [21] Masahiro Nakashima, Ryo Nagata and Jun’ichi Yokoyama: “Constraints on the time variation of the fine structure constant by the 5-year WMAP data,” Prog. Theor. Phys. **120** (2008) 1207.
- [22] R. Nagata and J. Yokoyama: “Reconstruction of the primordial fluctuation spectrum from the five-year WMAP data by the cosmic inversion method with band-power decorrelation analysis,” Phys. Rev. D **78**, 123002 (2008)
- [23] Hajime Kawahara, Erik D. Reese, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki and Yasushi Suto: ”Extracting Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity from X-Ray Surface Brightness: A Statistical Approach and Application to Abell 3667”; The Astrophysical Journal **687** (2008) 936
- [24] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Takahiko Matsumura, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, Akihito Shirata, Atsushi Taruya, Shun Saito, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: ”Simulations of Baryon Acoustic Oscillations I: Growth of Large-Scale Density Fluctuations”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **389**(2008)1675
- [25] Hidenori Nomura, Kazuhiro Yamamoto & Takahiro Nishimichi: ”Damping of the baryon acoustic oscillations in the matter power spectrum as a probe of the growth factor”; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **10**(2008)031
- [26] Hidenori Nomura, Kazuhiro Yamamoto, Gert Huetsi & Takahiro Nishimichi: ”Confronting the damping of the baryon acoustic oscillations with observation”; Physical Review D **79**(2009)063512
- [27] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Impact of massive neutrinos on nonlinear matter power spectrum”; Phys.Rev.Lett **100**, 191301 (2008)
- [28] Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, & Jun’ichi Yokoyama: ”Space-based gravitational-wave detectors can determine the thermal history of the early Universe”; Phys.Rev.D **77**, 124001 (2008)
- [29] Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, & Jun’ichi Yokoyama: ”Probing reheating temperature of the universe with gravitational wave background”; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **06** (2008) 020
- [30] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: ”Special Relativistic Simulations of Magneti-

- cally Dominated Jets in Collapsing Massive Stars”; *Astrophysical Journal* **691** (2009) 1360
- [31] Shunsaku Horiuchi, Yudai Suwa, Hajime Takami, Shin’ichiro Ando, and Katsuhiko Sato: ”Nonthermal neutrinos from supernovae leaving a magnetar”; *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **391**, 1893 (2008)
- [32] Shunsaku Horiuchi, John F. Beacom, and Eli Dwek: ”The Diffuse Supernova Neutrino Background is detectable in Super-Kamiokande”; *Physical Review D* accepted in 2009
- [33] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Toward Unraveling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources”; *Astrophysical Journal* **678** (2008) 606
- [34] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Distortion of Ultra-high-energy Sky by Galactic Magnetic Field”; *Astrophysical Journal* **681** (2008) 1279
- [35] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Implications to Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays from their Arrival Distribution”; *Astroparticle Physics* **30** (2009) 306
- [36] Kohta Murase & Hajime Takami: ”Implications to Ultra-high-energy Cosmic Rays for Transient Sources in the Auger Era”; *Astrophysical Journal Letters* **690** (2009) L14
- [37] Hajime Takami, Kohta Murase, Shigehiro Nagataki & Katsuhiko Sato: ”Cosmogenic Neutrinos as a Probe of the transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays”; *Astroparticle Physics* **31** (2009) 201
- [38] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: ”Impact of Rotation on Neutrino Emission and Relic Neutrino Background from Population III Stars”; *Astrophys. J.*, 690 913 (2009)
- (会議集録)
- [39] J. Yokoyama: ”Probing the early Universe with multichannel observations,” *AIP Conf. Proc.* **1040** (2008) 23.
- [40] K. Nakayama, S. Saito, Y. Suwa and J. Yokoyama: ”Gravitational wave background as a probe of reheating temperature of the universe,” *AIP Conf. Proc.* **1078** (2009) 515.
- [41] Kohei Kamada and Jun’ichi Yokoyama: ”Can dissipative effects help the MSSM inflation? ,” in *Proceedings of the 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*.
- [42] R.Saito, J.Yokoyama, ” Gravitational-Wave Constraints on Abundance of Primordial Black Holes ”, in *Proceedings of The 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- [43] Takeshi Kobayashi & Shinji Mukohyama: ”Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”; in *Proceedings of The 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*
- [44] S. Mizuno, F. Arroja and K. Koyama: ” Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation,” in *Proceedings of the 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*.
- [45] Masahiro Nakashima, Ryo Nagata and Jun’ichi Yokoyama: ”WMAP-5yr Constraint on the Varying Fine Structure Constant, ” in *Proceedings of the 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*.
- [46] Kohei Kamada and Jun’ichi Yokoyama: ”Dissipative effects on MSSM inflation,” in *Proceedings of the International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics 2008*.
- [47] Ryo Saito, Jun’ichi Yokoyama, ” Gravitational-Wave Constraints on Abundance of Primordial Black Holes ”, in *Proceedings of the International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics 2008*.
- [48] Ryo Nagata and Jun’ichi Yokoyama: ”Band-Power Reconstruction of Primordial Perturbation Spectrum from CMB Anisotropy,” in *Proceedings of the International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics 2008*. *Mod. Phys. Lett. A* **23**, 1478 (2008)
- [49] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Towards Unravelling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources”; *Journal of the Physical Society of Japan* **78** (2009) 120
- [50] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Towards Unravelling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources”; *AIP Conference Proceedings*, **1040** (2009) 211
- (国内雑誌)
- [51] 佐藤 勝彦 :「宇宙の誕生と進化」; 応用物理 77 巻 8 号 (2008)
- [52] 佐藤 勝彦 :「宇宙物理の面白さ: 多様な階層のからみ合い」; パリテイ 2009 年 3 月号 61 頁
- [53] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三: 都会のネズミと田舎のネズミ”、東京大学出版会 UP 427 (2008) 5 月号, pp.36–40.
- [54] 須藤 靖: “科学者からの手紙 第一回”、真夜中 1(2008) Early Summer, pp.106–107.
- [55] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四: ガリレオ・ガリレオ”、東京大学出版会 UP 431(2008)9 月号, pp.42–47
- [56] 須藤 靖: “理学の宝物 第 3 回 穴あきアルミ板から夜空のムコウを見る”、東京大学理学系研究科・理学部 ニュース 2008 年 9 月号 40 巻 3 号, p.7.
- [57] 須藤 靖: “アルミ板の穴が描いた立体宇宙地図”、星ナビ 2008 年 11 月号, pp.98–101
- [58] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その五: レレレのシュレーゼンガー”、東京大学出版会 UP 434(2008)12 月号, pp.24–31

- [59] 須藤 靖: “宇宙の暗黒 問題”、SONY CX-PAL Semiconductor & Component News, Vol. 79, 2009 年 1 月号
- [60] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その六: 一般二相対論”、東京大学出版会 UP 437(2009)3 月号, pp.36-43
- [61] 樽家篤史: “宇宙の彼方の非線形性”; 岩波「科学」11 月号 2008 年, pp.1229-1233.
- [62] 水野俊太郎、小山和哉: “ブレーン衝突宇宙シナリオはインフレーションに取って代わるか? ”、物理学会誌 2008 年 9 月号
- [63] 小林洗: “D ブレーン-超弦理論の高次元物体が描く世界像- (書評)”; 天文月報 2008 年 6 月号 pp.351
- [64] 鎌田耕平: “天文・宇宙が解るキーワード 100 『宇宙論』”、アストロアーツ 月刊星ナビ 2007 年 3 月号.
- (学位論文)
- [65] Shunji Matsuura: “Holographic Non-Local Operators” (博士論文)
- [66] Shunsaku Horiuchi: “Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors” (博士論文)
- [67] Hajime Kawahara: “Inhomogeneity in Intracluster Medium and Its Cosmological Implications” (博士論文)
- [68] Hidetaka Sonoda: “Nuclear “pasta” structure in supernovae” (超新星内部に現れる原子核パスタ構造) (博士論文)
- [69] Hajime Takami: “Investigation of the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays with Numerical Simulations” (博士論文)
- [70] 中島正裕: “宇宙背景放射を用いた宇宙論パラメータと物理定数の測定について” (修士論文)
- [71] 吉松 学: “確率的過程を用いたモノドロミーインフレーションモデルの解析”
- [72] 丹代拓也: “数値相対論を用いた原始ブラックホール生成の研究”
- [73] Yu Arafuka: “Formation of Pulsar Planet Systems -Comparison with the Standard Scenario of Planetary Formation-” (修士論文)
- (著書)
- [74] 横山順一、竹内 薫: 『宇宙の向こう側』; 青土社 2008 年 10 月
- [75] 佐藤 勝彦: 『眠れなくなる宇宙のはなし』; 宝島社、2008 年 7 月
- [76] 佐藤 勝彦: 『宇宙論入門』; 岩波新書 2008 年 11 月
- [77] 須藤靖、田中深一郎、荒深遊、杉村美佳、東悠平 訳: “宇宙生物学入門 惑星・生命・文明の起源”、シュプリンガー・ジャパン (2008 年 7 月), Peter Ulmschneider 著、Intelligent Life in the Universe, Springer 2006, 2nd edition)
- [78] 須藤 靖: “解析力学・量子論” 東京大学出版会 (2008 年 9 月)
- [79] 岩波書店編: “ブックガイド 宇宙 を読む” 岩波科学ライブラリー 152、岩波書店 (2008 年 11 月、第 9 章 須藤靖執筆)
- [80] 赴綺春秋編: “東大教師が新入生にすすめる本 2” 文春新書 688、赴綺春秋 (2009 年 3 月、pp.174 - 176 須藤靖執筆)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- France-Japan Joint Workshop on the Early Universe (Nikko-Kirifuri Convention Hall, Nikko, Japan, May 14-16, 2008)
- [81] Ryo Saito: “Non-Gaussianity in primordial black hole formation”
- [82] K. Kamada and J. Yokoyama: “Dissipative effect on the MSSM inflation,”
- [83] S. Mizuno, S. Tsujikawa, K. Uddin, R. Tavakol and J. Yokoyama: “Constraints on scalar-tensor models of dark energy from observational and local gravity tests,”
- [84] Shunichiro Kinoshita: “Stability of deformed Freund-Rubin compactification”;
- [85] Takeshi Kobayashi: “Conformal Modulated Reheating”;
- [86] R. Nagata: “Reconstruction of primordial fluctuation spectrum from WMAP 5yr data”
- [87] Jun’ichi Yokoyama: “Conclusion”
- International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics 2008 (APCTP, Korea, October 28 - November 1, 2008)
- [88] K. Kamada and J. Yokoyama: “Dissipative effects on MSSM inflation,”
- [89] R.Saito, J.Yokoyama, “ Gravitational-Wave Constraints on Abundance of Primordial Black Holes ”
- [90] S. Mizuno, F. Arroja and K. Koyama: “ Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation”
- [91] R. Nagata: “Constraints on scalar-tensor cosmology from WMAP data”
- The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology (Nov. 12-14, 2008, The University of Tokyo, Tokyo, Japan)
- [92] K. Kamada and J. Yokoyama: “Dissipative effects and the MSSM inflation,”
- [93] R.Saito, R.Nagata, J.Yokoyama, “ Non-Gaussianity in Primordial Black Hole Formation ”
- [94] S. Mizuno, F. Arroja and K. Koyama: “ Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation,”

- [95] R. Nagata and J. Yokoyama : “Primordial fluctuation spectrum after WMAP5yr”
- [96] Shunichiro Kinoshita: “Thermodynamic and dynamical stability of Freund-Rubin compactification”
- [97] Takeshi Kobayashi: ”Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”
- [98] Shun Saito: ”Prospects of neutrino masses through nonlinear power spectrum”
- [99] Takahiro Nishimichi: ”Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models”
- [100] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”General conditions of MHD explosions”
- [101] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata & Katsuhiko Sato: ”Cross-correlation between UHECR Arrival Distribution and Large-scale Structure”
- [102] Yudai Suwa: ”Gravitational wave emission from the central engine of gamma-ray bursts”
- The 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Hiroshima, November 17-21, 2008)
- [103] Kohei Kamada and Jun’ichi Yokoyama: “Can dissipative effects help the MSSM inflation?,”
- [104] Ryo Saito and Jun’ichi Yokoyama: “Gravitational-Wave Constraints on Abundance of Primordial Black Holes ”
- [105] S. Mizuno, F. Arroja and K. Koyama: “Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation,”
- [106] Shunichiro Kinoshita: “Thermodynamic and dynamical stability of Freund–Rubin compactification”
- [107] Takeshi Kobayashi: ”Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”
- [108] M. Nakashima, R. Nagata and J. Yokoyama: “WMAP-5yr Constraint on the Varying Fine Structure Constant”
- その他
- [109] K. Kamada and J. Yokoyama: “Dissipative effects on the MSSM inflation,” COSMO08 (University of Wisconsin, USA, August 25-29 2008)
- [110] S. Mizuno, F. Arroja and K. Koyama: “Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation,” COSMO08 (University of Wisconsin, USA, August 25-29 2008)
- [111] Atsushi Taruya: ”Accurate modeling for matter power spectrum and baryon acoustic oscillations”; Cosmology Near & Far: sciences with WFMOS (Hawaii, 5/19-21, 2009)
- [112] Erik. D. Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, & Yasushi Suto: ”A Statistical Approach to Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity: Chandra Observations of Nearby Galaxy Clusters”; American Astronomical Society (January, 2009, Long Beach, USA)
- [113] Takahiro Nishimichi: ”Systematic effects on BAO measurements”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Waikoloa Beach Marriott, Hawaii, May 19-21 2008)
- [114] Takahiro Nishimichi: ”Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations”; 3rd Biennial Leopoldina Conference on Dark Energy (Ludwig Maximilians University, Munich, Germany, Oct. 7-11 2008)
- [115] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Impact of Massive Neutrinos on Nonlinear Clustering and Degeneracy with Dark Energy Parameter”; A Decade of Dark Energy (STScI, Baltimore, US, May 5, 2008)
- [116] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Probing neutrino masses through nonlinear matter power spectrum with WFMOS survey”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Waikoloa Beach Marriott, Hawaii, May 19-21 2008)
- [117] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Determining w & neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum”; 3rd Biennial Leopoldina Conference on Dark Energy (Ludwig Maximilians University, Munich, Germany, Oct. 7-11 2008)
- [118] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magnetorotational collapses and jet formations”; Paris Asymmetric instabilities in stellar core collapse (Institut Henri Poincare, June 30-July 11, 2008)
- [119] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magneto-rotational collapse of stellar cores and formation of magnetars and engines of GRBs”; 10th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, (Kunming, Yunnan, P.R. China, August 3-6 2008)
- [120] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magneto-rotational collapse of stellar cores and formation of magnetars and engines of GRBs”; 24th Texas Symp24th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, (Vancouver, Canada, December 8 - 12, 2008)
- [121] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Theoretical Predictions of the positional correlation between the highest energy cosmic rays and nearby cosmic ray sources”; International Astroparticle Physics Symposium (5/6-8, 2008, Colorado school of Mines, USA)
- [122] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata & Katsuhiko Sato: ”Cross-correlation Between UHECR Arrival Distribution and nearby

large-scale structure”; International School of Cosmic Ray Astrophysics (7/8, 2008, Erice school, Erice, Italy)

- [123] Yudai Suwa: ”Gravitational Collapse of Very Massive Stars”; Asymmetric instabilities in stellar core collapse (Paris, France, July 2008)
- [124] Yudai Suwa: ”Gravitational wave emission from the central engine of gamma-ray bursts”; 1st International LISA-DECIGO Workshop (Kanagawa, Japan, November 2008)

招待講演

- [125] Jun’ichi Yokoyama “Primordial fluctuation spectrum: anomaly found from CMB temperature and polarization data” COSPA2008 (October 28-November 1, APCTP, Pohang, Korea)
- [126] Jun’ichi Yokoyama: “What can we learn about cosmophysics by observing only one Universe?” The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology (Nov. 12-14, 2008, The University of Tokyo, Tokyo, Japan)
- [127] Katsuhiko Sato: ”From Supernovae to Inflation”; The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology (Nov. 12-14, 2008, The University of Tokyo, Tokyo, Japan)
- [128] Yasushi Suto: ”Panel discussion: Cosmology near and far”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Hawaii, Kona, May 19–21, 2008)
- [129] Yasushi Suto: ”Log-normal fluctuations in the intracluster medium and their impact on X-ray and SZ cluster observations”; the 3rd KIAS workshop on Cosmology and structure formation (Seoul, Korea, October 27-28, 2008)
- [130] Yasushi Suto: ”From exoplanets to astrobiology”: The 2nd Yonsei-Tokyo joint workshop on physics (Yonsei University, Seoul, Korea, October 30, 2008)
- [131] Yasushi Suto: ”How to proceed next ? towards successful planning of HSC surveys” Japan-Princeton HSC collaboration meeting (NAOJ, Tokyo, January 17-20, 2009)

(国内会議)

一般講演

- ・ RESCEU 研究会 (浅虫、2008 年 8 月)
- [132] J. Yokoyama, N. Kaloper, and L. Sorbo, “Higgs-flation”
- [133] R. Saito, J. Yokoyama, “ Non-linear effects associated with primordial black hole formation ”
- [134] 水野俊太郎、小山和哉、 F. Arroja: “ Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation”
- [135] 木下俊一郎: “Stability of Freund–Rubin compactification”

- [136] 小林 洸: “Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”
- [137] 樽家 篤史: “Signature of primordial non-Gaussianity on matter power spectrum”
- [138] 河原 創: “Log-normal distribution Model of density and temperature fluctuation in cluster gas”
- [139] 西道啓博: “A study of nonlinear clustering and redshift-space distortion using N-body simulations”
- [140] 斎藤 俊: “Constraint on neutrino masses with nonlinear galaxy power spectrum”
- [141] 滝脇知也: 「超新星における磁場と不安定性の役割」
- [142] 諏訪雄大: 「ガンマ線バースト中心エンジンと重力波」
- ・ 日本物理学会 2008 年秋季大会 (山形大学、2008 年 9 月)
- [143] 鎌田 耕平、横山 順一: “MSSM インフレーションに散逸効果を与える影響”
- [144] 齊藤 遼、横山 順一、 “ 原始ブラックホールを生み出す初期揺らぎに対する高次摂動効果の解析 ”
- [145] 水野俊太郎、小山和哉、 F. Arroja: “ Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation,”
- [146] 木下俊一郎: 「 Freund–Rubin コンパクト化の熱力学的性質」
- [147] 中島 正裕、永田 竜、横山順一: 「 WMAP5yr のデータを用いた微細構造定数の時間変化の制限」
- [148] 高見一、西道啓博、矢幡和浩、佐藤勝彦: “Cross-correlation between UHECR arrival distribution and large-scale structure”
- [149] 諏訪 雄大、村瀬 孔大: 「重力波で探るガンマ線バースト中心エンジン」
- ・ 日本天文学会 2008 年秋季大会 (岡山理科大学、2008 年 9 月)
- [150] 樽家篤史: 「バリオン音響振動の非線形進化: 高次補正の影響」
- [151] 河原創: 「 X 線輝度分布を用いた銀河団ガス内不均一性の探索」
- [152] 西道 啓博、樽家 篤史、須藤 靖: 「 N 体シミュレーションに基づいた赤方偏移歪みのモデリング」
- [153] 斎藤俊、高田昌広、樽家篤史: 「物質ゆらぎの非線形パワースペクトルに対する有質量ニュートリノの効果 II」
- [154] 滝脇知也: 「磁場によるジェット放出のための一般的条件」
- [155] 高見一、井上進、山本常夏、佐藤勝彦: 「活動銀河核寿命からの最高エネルギー宇宙線ソースへの示唆」
- [156] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦、藤本 信一郎、橋本 正章: 「磁気駆動型超新星爆発における元素合成」
- ・ 日本物理学会 2009 年春季大会 (立教大学、2008 年 3 月)

- [157] 鎌田 耕平、横山 順一:「MSSM インフレーションの初期条件」
- [158] 小林 洸、向山 信治:“Inflation from Rapid-Rolling D-Branes”
- [159] 中島 正裕、市川 和秀、横山 順一、永田 竜:「宇宙背景放射を用いた微細構造定数の時間変化の新たな制限」
- [160] 樽家 篤史:「赤方偏移空間におけるバリオン音響振動の非線形進化」
- [161] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史:「銀河の非線形パワースペクトルによるニュートリノ質量の制限」
- [162] 日本天文学会 2009 年春季大会 (大阪府立大学、2008 年 3 月)
- [163] 樽家 篤史:「修正重力理論における質量パワースペクトルの非線形進化」
- [164] 西道 啓博、樽家 篤史、斎藤 俊、須藤 靖:「赤方偏移空間におけるバリオン音響振動の非線形進化」
- [165] 平野 照幸、須藤 靖、樽家 篤史、成田 憲保、佐藤 文衛:「ロシター効果による視線速度変動の摂動公式に対する精度検証」
- [166] 藤井 友香、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、E.L.Turner:「地球型惑星の反射光の時間変動とパイオマーカー」
- [167] 堀内 俊作:「The Diffuse Supernova Neutrino Background is detectable at Super-Kamiokande」
- [168] 諏訪 雄大:「降着円盤による非熱的ニュートリノ生成とガンマ線バースト中心エンジン」
- ・その他
- [169] 佐藤 勝彦:「宇宙論の現状と展望」; 東京工業大学物理教室談話会 (東京工業大学、2008 年 7 月 18 日)
- [170] 須藤 靖:「見えない 存在しない」; 第 6 回自然科学研究機構シンポジウム「宇宙究極の謎: 暗黒物質、暗黒エネルギー、暗黒時代」(東京国際フォーラム、2008 年 9 月 23 日)
- [171] 須藤 靖:「WF MOS」; 日本学術会議シンポジウム『第二回 天文学・宇宙物理学の展望 - 長期計画の策定に向けて -』(東京大学小柴ホール、2008 年 5 月 31 日)
- [172] 樽家 篤史:「非線形構造進化について」; 構造形成研究会その 2 (東大本郷、2008 年 6 月 12 日)
- [173] 樽家 篤史:「東京大学活動報告」; 「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第 3 回研究会 (国立天文台、2009 年 3 月 18 日)
- [174] 西道 啓博:「N 体シミュレーションに基づくバリオン音響振動の精密モデリング」; 第 21 回理論懇シンポジウム (国立天文台、2008 年 12 月 15 日)
- [175] 西道 啓博:「N 体シミュレーションを用いたバリオン音響振動の精密なモデリング」; 特定領域研究「公視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第 3 回研究会 (国立天文台、2009 年 3 月 19 日)
- [176] 斎藤 俊:「銀河の非線形パワースペクトルを用いたニュートリノ質量の制限」; 第 21 回理論懇シンポジウム (国立天文台、2008 年 12 月 15 日)
- [177] 斎藤 俊:「Cross correlation study: CMB lensing」; 特定領域研究「公視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第 3 回研究会 (国立天文台、2009 年 3 月 19 日)
- [178] 滝脇 知也:「General conditions of MHD explosions」; 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第二回領域シンポジウム、(国立天文台、2008 年 11 月 29 日)
- [179] 滝脇 知也:「MHD explosions at stellar core-collapses」; 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学、(東京大学、2009 年 2 月 2-4 日)
- [180] 堀内 俊作:「非熱的ニュートリノで探る星の強磁場」; 第 21 回理論懇シンポジウム (国立天文台、2008 年 12 月 15-17 日)
- [181] 堀内 俊作:「The Diffuse Supernova Neutrino Background is Detectable in SK」; 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学 (東京大学、2009 年 2 月 2-4 日)
- [182] 高見 一、佐藤 勝彦:「Implications to the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays」; 第 21 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム (国立天文台、2008 年 12 月 17 日)
- [183] 諏訪 雄大:「初代星からのニュートリノ、重力波とその観測から分かること」; 初代星・銀河形成研究会 (甲南大学、2008 年 9 月 9 日)
- [184] 諏訪 雄大:「重力波で探る GRB 中心エンジン」; 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第 2 回領域シンポジウム (国立天文台、2008 年 11 月 29 日)
- [185] 諏訪 雄大:「重力波で探るガンマ線バースト中心エンジン」; 第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(国立天文台、2008 年 12 月 15 日)
- [186] 諏訪 雄大:「Nonthermal neutrino production by bulk motion and implication to collapsar」; 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学 (東京大学、2009 年 2 月 3 日)
- 招待講演
- [187] 横山 順一:「CMB 観測による DECIGO 帯重力波バックグラウンドの推定」DECIGO 研究会 (国立天文台、2008 年 4 月 16 日)
- [188] 横山 順一:“Dark Energy” サマーインスティテュート 2008 (経団連研修所、富士吉田、2008 年 8 月)
- [189] 佐藤 勝彦:「超新星爆発と原子核の pasta 構造」; 茅コンファレンス (秋葉原、2008 年 6 月 9 日)
- [190] 佐藤 勝彦:「超新星爆発と r プロセス元素合成」; 日本物理学会秋季大会 超新星爆発と r プロセス 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム (山形大学、2008 年 9 月 20 日)
- [191] 佐藤 勝彦:「基調講演 素粒子・原子核・天文宇宙シミュレーションにかける期待」; シンポジウム「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」(つくば国際会議場、2009 年 2 月 23 日)
- [192] 佐藤 勝彦:「21 世紀 COE「極限量子系とその対称性」の成果」; G-COE キックオフミーティング (東京大学安田講堂、2009 年 1 月 24 日)

- [193] 須藤 靖: 「系外惑星: 観測 - トランジット惑星とロシター効果 -」; 京都太陽系研究会 (京都大学基礎物理学研究所, 2008 年 4 月 7 日)
- [194] 須藤 靖: 「WF MOS で期待されるサイエンス (ダークエネルギー編)」; 2008 年度 光学赤外線天文連絡会 シンポジウム地上大型望遠鏡計画: 2020 年のための決心 (国立天文台, 2008 年 8 月 22 日)
- [195] 須藤 靖: 「系外惑星から宇宙生物学へ」; アストロバイオロジーワークショップ (湘南国際村, 2008 年 12 月 20 日)
- [196] 須藤 靖: 「WF MOS に至る経緯と期待されるサイエンスの概観」; 2008 年度 すばるユーザーズミーティング (国立天文台, 2009 年 1 月 14 日)
- [197] 樽家篤史: 「宇宙構造形成の理論研究の新たな展開」日本物理学会 招待講演 (山形大学, 2008 年 10 月 20 日)
- [198] 樽家篤史: 「Baryon acoustic oscillations」; すばるユーザーズミーティング (国立天文台, 2009 年 1 月 14 日)
- [199] 西道 啓博: 「構造形成の N 体計算について」; 研究会「宇宙構造形成の理論研究とその進展 その 2」(東京大学, 2008 年 6 月 12 日)
- [200] 高見一: 「最高エネルギー宇宙線の伝搬」; 超高エネルギー宇宙線とハドロン構造 2008 (高エネルギー加速器研究機構, 2008 年 4 月 26 日)
- (セミナー)
- [201] 横山順一: "Reconstruction of primordial power spectrum from CMB anisotropy" 大阪市立大学 (2008 年 7 月 12 日)
- [202] 須藤 靖: 「夜空のムコウを探る」; 広島大学物理学科セミナー (広島大学, 2008 年 9 月 30 日)
- [203] 水野俊太郎: "Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation," 早稲田大学宇宙物理学研究室 (2008 年 12 月 26 日)
- [204] 水野俊太郎: "Primordial density perturbations from new ekpyrotic cosmology," KEK 理論グループ (2009 年 1 月 13 日)
- [205] 木下俊一郎: "Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics"; 国立天文台 (2008 年 5 月 21 日)
- [206] 樽家篤史: 「宇宙大規模構造に関する話題: 精密宇宙論の裏事情」; 東京大学駒場, コロキウム (2008 年 5 月 1 日)
- [207] 樽家篤史: 「大規模構造の非線形重力進化と精密宇宙論」; 立教大学, Joint seminar on cosmology & gravitation (2008 年 9 月 30 日)
- [208] 樽家篤史: "Baryon Acoustic Oscillations and Future Galaxy Surveys"; 高エネルギー加速器研究機構, 理論セミナー (2008 年 10 月 7 日)
- [209] Atsushi Taruya: "Perturbation Theory of Large-scale Structure and Future Galaxy Surveys"; seminar at Institute for Cosmology and Gravitation, University of Portsmouth (2008 年 10 月 16 日)
- [210] Atsushi Taruya: "Accurate Modeling for Power Spectrum and Baryon Acoustic Oscillations"; coffee talk at Royal Observatory of Edinburgh, University of Edinburgh (2008 年 10 月 23 日)
- [211] Takahiro Nishimichi: "Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations"; ICG, University of Portsmouth (Oct. 15 2008)
- [212] Shun Saito: "Forecast of constraint on neutrino masses through nonlinear galaxy power spectrum"; Coffee seminar (Royal Observatory Edinburgh, UK, Oct 24, 2008)
- [213] Shun Saito: "Recent progress of nonlinear matter P(k) & impact of massive neutrinos on nonlinear galaxy P(k)" Cosmology seminar (University College London, UK, Oct 30, 2008)
- [214] 永田竜: 「マイクロ波背景放射の観測による構造の起源の探索」, 青山学院大学物理数理学科コロキウム (2008 年 4 月 18 日)
- [215] 滝脇知也: 「大質量星の重力崩壊時における磁場によるジェット生成」; 早稲田大学 (2008 年 5 月 16 日)
- [216] Shunsaku Horiuchi: "Star Formation History and the Neutrino Background"; The Ohio State University (2009 Sept 25th)
- [217] 堀内俊作: 「ニュートリノで探る大質量星の最期」; 立教大学 (2008 年 10 月 28 日)
- [218] 高見一, 村瀬孔大, 長滝重博, 佐藤勝彦: 「最高エネルギー宇宙線到来方向分布からその起源に迫る」; 京都大学基礎物理学研究所 (2008 年 4 月 17 日)
- [219] 高見一, 村瀬孔大, 長滝重博, 佐藤勝彦: 「最高エネルギー宇宙線の起源の解明に向けて」; 国立天文台 (2008 年 6 月 18 日)
- [220] 高見一, 村瀬孔大, 長滝重博, 佐藤勝彦: 「荷電粒子天文学の開拓」; 広島大学セミナー (2008 年 7 月 1 日)
- [221] 高見一, 村瀬孔大, 西道啓博, 矢幡和浩, 長滝重博, 佐藤勝彦: "Bottom-up Approaches to the Origin of the Ultra-high-energy Cosmic Rays"; 早稲田大学 (2008 年 10 月 24 日)
- [222] 高見一, 村瀬孔大, 西道啓博, 矢幡和浩, 長滝重博, 佐藤勝彦: "Implications to the origin of ultra-high-energy cosmic rays"; 東京大学宇宙線研究所 (2008 年 11 月 28 日)
- [223] Yudai Suwa: "Gravitational Collapse of Very Massive Stellar Core: Neutrino and Gravitational Wave Emissions"; University of Basel (2008 年 7 月 22 日)
- [224] 諏訪 雄大: 「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ, 重力波放射」; 京都大学 (2008 年 10 月 8 日)
- [225] 諏訪 雄大: 「第一世代星からのニュートリノ, 重力波とその観測から分かること」; 早稲田大学 (2008 年 12 月 5 日)
- (集中講義)

- [226] 須藤 靖: 「宇宙の始まりと終わり」; 東京大学理学
クラスター講義「進化」(東京大学小柴ホール、2008
年7月24日)
- [227] 須藤 靖: 「太陽系外惑星から宇宙生物学へ」; 広島
大学理学部物理学科集中講義(広島大学、2008年9
月30日、10月1日)
- [228] 須藤 靖: 「物理学的世界観: 第1回 物理屋の偏
見、夜空のムコウ、第2回 物質の起源と宇宙の歴史、
宇宙の組成、第3回 自然法則と人間原理、世界を
科学で俵 する」; 2008年度 東京大学学術俵 講義
『137億年の物質の旅 -ビッグバンからみどりの地球
へ-』(東京大学駒場18号館ホール、2008年10月8
日、15日、22日)
- [242] 須藤 靖: 「夜空の向こうの物理学」; 土佐塾高校ワ
ンデイセミナー(土佐塾高校、2008年6月14日)
- [243] 須藤 靖: 「宇宙は何からできている?」; ビッグバ
ン宇宙国際研究センター 第3回公開講演会「暗黒
エネルギーと宇宙の未来」(東京大学、2008年7月
31日)
- [244] 須藤 靖: 「見えなくともそこにあるもの」; 相馬高
校 SSH 講演会(代々木オリンピックセンター、2008
年10月1日)

・アウトリーチ活動

- [229] 横山順一: 「宇宙のはじまる前」; 河合塾エンリッチ
講座(河合塾本郷校、2008年6月2日)
- [230] 横山順一: 「宇宙をあやつるダークエネルギー」;
ビッグバン宇宙国際研究センター 第3回公開講演
会「暗黒エネルギーと宇宙の未来」(東京大学、2008
年7月31日)
- [231] 横山順一: 「宇宙への旅立ち」; 大阪大学 Saturday
Afternoon Physics(大阪大学、2008年11月22日)
- [232] 横山順一: 「相対論を学ぶための数学 II」; 日比谷高
校SSH講演会(日比谷高校、2009年1月20日)
- [233] 横山順一: 「研究者のしごと」; 新島学園高等学校進
路講座(新島学園、2009年1月24日)
- [234] 横山順一: 「宇宙のはじまる前」; 新島学園講演会(新
島学園、2009年1月24日)
- [235] 佐藤勝彦: 「アインシュタインの相対論と宇宙論」; ア
インシュタイン LOVE 鹿児島展(鹿児島大学、2008
年8月23日)
- [236] 佐藤勝彦: 「宇宙の誕生と未来」; 日本物理学会秋季
大会 市民講演会(山形県生涯学習文化財団遊学館
ホール、2008年9月20日)
- [237] 佐藤勝彦: 「宇宙はこうして始まった」; 愛媛大学宇
宙進化研究センター講演会(愛媛大学グリーンホー
ル、2009年1月10日)
- [238] 佐藤勝彦: 「宇宙は無数にあるか? マルチバースと人
間原理」; 日本学術会議サイエンスカフェ(文部科
学省情報広場、2009年1月23日)
- [239] 佐藤勝彦: 「宇宙の始まりとは? 宇宙の果てとは?」;
(小牧市まなび創造館あさひホール、2009年2月7
日)
- [240] 佐藤勝彦: 「宇宙の誕生とインフレーション理論」;
多摩六都科学館サイエンスカフェ「宇宙」(多摩六都
科学館、2009年2月21日)
- [241] 須藤 靖: 「見えない宇宙をみる: 宇宙の組成とダーク
エネルギー」; 第13回東京大学理学部公開講演会
『理学研究のフロンティア』(東京大学駒場キャンパ
ス、2008年5月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）

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

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

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

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

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

2.1 銀河系

球状星団における多重主系列の起源

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

銀河初期における軽元素の起源

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

えられる。そのような過程を計算した結果、観測された ${}^6\text{L}/\text{O}$, Be/O を再現できることがわかった。[5]

2.2 超新星

無衝突衝撃波の研究

2つのプラズマが交差する状況でのプラズマの変化を空間二次元、運動量空間3次元の Vlasov-Maxwell 方程式系を mesh 法で数値計算することで調べている。その際、磁場が増幅され、電子がフィラメント状に集まって準定常的な状態になることを見いだした。この部分は The Astrophysical Journal に発表した。また、この定常状態を解析的に記述する解を発見し、Physics of Plasmas に発表した。また、その相対論的な拡張も行えることがわかったので同雑誌に発表した。[1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14]

Ia 型超新星の多様性の起源の研究

Ia 型超新星は明るい標準光源として宇宙論的な研究にも利用されている。しかし、その明るさの変化には多様性も見られる。他方、Ia 型超新星を起こす白色矮星では近年、強い磁場 (表面で $\sim 10^9$ G) が見つかってきた。この様々な強さの磁場を持つ白色矮星を多様性の起源のひとつと考えられないか調べることにした。Ia 型超新星爆発を起こすより重くコンパクトな白色矮星の中心付近ではより強い磁場をもったものもあることが期待される。そこで、白色矮星の中心付近で燃え始める核燃焼波の伝播に強い磁場がどのような影響を与えるかを研究し始めた。磁場の影響を考慮した電子の熱伝導率を用い、単純化した燃焼反応のもと定常燃焼波の構造を数値計算し伝播速度をその固有値として求めた結果、爆発直前の白色矮星の中心の密度では 10^{11} G 以上の磁場があると磁場に垂直な方向には燃焼波が伝播しにくくなることがわかった。[16]

非球対称超新星での爆発的元素合成 s 殻銀河の化学進化

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

構築を目指す。非球対称爆発での中性子捕獲元素の合成も合わせて調べる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Detailed Analysis of Filamentary Structure in the Weibel Instability", 2009, ApJ, 695, 1550-1558
- [2] Suzuki, A. "A novel method to construct stationary solutions of the Vlasov-Maxwell system : the relativistic case", 2008, Physics of Plasmas, 15, 072107-072107-7
- [3] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "A novel method to construct stationary solutions of the Vlasov-Maxwell system", 2008, Physics of Plasmas, 15, 042107-042107-5
- [4] Kawanaka, N., Kato, Y., & Mineshige, S. "X-Ray Emissions from Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Coronal Accretion Flows", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.2, pp.399-405

(会議抄録)

- [5] Nakamura, K., "Light Element Production in Type Ib/c Supernovae," Proceedings of Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2007 (American Institute of Physics) 1016, 430-432
- [6] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Detailed analysis of filamentary structures in a collisionless shock transition region" International Workshop on Plasma Shocks and Particle Acceleration, Jan. 24-26, 2008, Osaka, Japan
- [7] Suzuki, A., "A novel method to construct stationary solutions of the Vlasov-Maxwell system", in press

(国内雑誌)

- [8] 茂山俊和, "光エコーによる超新星研究の進展" 丸善, パリティ, 2009年1月号 (Vol. 24, No. 1), 54-55

(学位論文)

修士

- [9] 鈴木昭宏; Theoretical Investigations into Plasma Processes in Collisionless Shocks by Direct Integration of the Vlasov-Maxwell System, 研究奨励賞受賞

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [10] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "Detailed analysis of filamentary structures in a collisionless shock transition region" International Workshop on Plasma Shocks and Particle Acceleration, Jan. 24-26, 2008, Osaka, Japan

- [11] Suzuki, A., & Shigeyama, T. "A novel method to construct stationary solutions of the Vlasov-Maxwell system", Journal of Plasma and Fusion Research Series, International Congress on Plasma Physics 2008, Sep. 8-12, 2008, Fukuoka, Japan
- [12] Norita Kawanaka, Yoshiaki Kato, & Shin Mineshige, "X-ray Emissions from Three-dimensional Magnetohydrodynamic Coronal Accretion Flows", Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, 2008/06/09

(国内会議)

一般講演

- [13] 鈴木昭宏: 相対論的 two-stream 不安定性の Vlasov simulation, 第 9 回高宇速研究会「宇宙ジェットの多様性と普遍性」, 愛媛大学, 2009 年 3 月 16 日 ~ 18 日
- [14] 鈴木昭宏: 相対論的グラソフシミュレーションコードの開発, 日本物理学会 2009 年春季大会, 立教大学, 2009 年 3 月 27 日 ~ 30 日

日本天文学会 2009 年春季年会, 大阪府立大学
2009/3/24-27

- [15] 守屋亮, 茂山俊和: Multiple Main Sequence of Globular Clusters as a Result of Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis, U19a

日本天文学会 2008 年秋季年会, 岡山理科大学
2008/9/11-13

- [16] 朽名正道, 茂山俊和: Ia 型超新星の核燃焼波の伝搬に与える磁場の影響, K26a
- [17] 中村航, 茂山俊和: 超新星爆発による低質量 X 線連星の形成プロセス, J50a
- [18] 川中宣太, 加藤成晃, 嶺重慎: ブラックホール磁気流体円盤コロナからの X 線放射と X 線連星への応用, J65a

(セミナー)

- [19] 茂山俊和: 「球状星団に見られる多重主系列の起源」, 北海道大学理学院宇宙物理談話会, 2008/12/4
- [20] 川中宣太: 「ブラックホール降着円盤コロナモデルとその応用」国立天文台理論部・高密度天体グループセミナー, 国立天文台, 2008/04/24
- [21] 川中宣太: 「ブラックホール降着流からの X 線放射モデルについて」東京大学大学院理学系研究科物理学教室牧島研究室セミナー, 東京大学, 2008/05/20
- [22] 川中宣太: 「ブラックホール降着流からの X 線放射モデルについて」早稲田大学理論宇宙物理学研究室セミナー, 早稲田大学, 2008/05/23
- [23] 川中宣太: 「X 線で『見る』ブラックホールの姿」国立天文台一般向け天文学講座《天塾》, 国立天文台, 2008/05/24

- [24] 川中宣太: 「ブラックホール降着流からの X 線放射モデルについて」東京大学大学院理学系研究科天文学教室談話会, 東京大学, 2008/06/17

集中講義

- [25] 茂山俊和: 慶応義塾大学通信教育部夏期スクーリング, 「天文学」(2008 年 8 月 18-25 日)
- [26] 茂山俊和: 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻, 「超新星による宇宙の化学進化」(2008 年 12 月 3-5 日)

その他

- [27] 茂山俊和: 第 14 回東京大学理学部公開講演会, 「長老の星が語る宇宙錬金術」, 2008 年 11 月 1 日

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・青木)

2000 年末から 8 年間の長期間にわたり、1 型活動銀河核の可視近赤外線多波長精密モニター観測を行ってきた MAGNUM 望遠鏡は、今年度 12 月に観測を終了した。長期間の精密なモニター観測データから dust reverberation (ダスト反響) 現象による可視近赤外線変光遅延時間を 34 天体について 49 個の測定値を、また 3 天体についてその下限値を得ることができ、反響探査法によるダストトーラスの研究を質・量ともに飛躍的に進歩させることができた。10 等級以上の活動銀河核光度範囲において、可視光度 L と遅延時間 Δt との強い相関を確認し、それはダスト昇華温度を一定とするモデルの予想である $\Delta t \propto \sqrt{L}$ の依存性にほぼ一致した。また遅延時間 Δt が測定されたもっとも遠方の活動銀河核は赤方偏移 $z = 0.6$ に達した。これらは MAGNUM 計画の目標であるダスト反響現象による遠方活動銀河核の光度距離測定と宇宙論的応用への可能性を示すものであり、これまで MAGNUM 望遠鏡によって取得したデータを解析することにより当初の目標を達成できると考えられる。ダスト反響現象およびその他の活動銀河核、超新星に関する観測成果の詳細については項目をあらためて報告する。

ハワイ大学ハレアカラ観測所にて長年観測を行ってきた MAGNUM 望遠鏡は 12 月 8 日の観測を最後にオペレーションを終了した。その後、望遠鏡および観測装置の解体作業を開始し、12 月中にハレアカラ観測所からすべての機材を撤収した。直前まで観測を遂行していた望遠鏡および観測装置はまだまだ十分利用可能な状態にある。来年度以降国内に輸送し、新天地での運用に向けて備える予定である。また MAGNUM 望遠鏡における長期間の遠隔無人自動観測の経験と技術的蓄積は、東京大学アタカマ 1.0 m 望遠鏡の立ち上げと運用に応用されている。

3.1 活動銀河核

近傍セイファート銀河 17 天体の可視赤変光遅延時間の検出

本研究では、MAGNUM プロジェクトで 2001 年から 2008 年にかけて測光モニター観測を行ったターゲットのうち近傍の 17 天体について可視近赤変光遅延を検出した。活動銀河核の可視近赤変光遅延は降着円盤からダストトーラスの内縁までの距離を光が伝わる時間と解釈することができる。可視近

赤変光遅延時間の検出は分解することのできない活動銀河核の中心構造を探る強力な手法である。

これまでに変光遅延時間が検出されている NGC 3227、4051、4151、5548、7469 および Mrk 79、110、335、509、590、744、817 に関して 2007 年 7 月までのデータを加えて再度解析を行なった。またこれまでに変光遅延時間が精度よく求められなかった MGC +08-11-011、Akn 120、IRAS 03450+0055 や、新たにモニターを開始した NGC 3516、4593 についても、最新のデータを加えることで変光遅延時間を検出することができた。

これらの天体について MAGNUM 望遠鏡による撮像データから V、K バンドの変光曲線を求め、Cross Correlation Function (CCF、相互相関関数) 解析によって変光遅延時間を測定した。17 天体のうち 11 天体については変光曲線に複数の変光特徴が観測されており、そのそれぞれについて変光遅延を求めることでのべ 49 の変光遅延時間を計測することができた。

検出した可視近赤変光遅延時間を活動銀河核の可視光度に対してプロットすると、 $-15.5 > M_V > -22.5$ の広い光度範囲にわたって $\Delta t \propto L^{0.5}$ に従う強い相関があることがわかった。また広輝線領域における同様の研究と比較すると、可視近赤変光遅延時間が広輝線領域の変光遅延時間よりも系統的に大きいことが確認された。これらの結果は、ダストトーラスの内径が降着円盤放射によるダストの昇華によって決定され、またダストトーラスが広輝線領域を覆うように存在しているという活動銀河核統一モデルの描像を支持する観測的な証拠である。また、のべ 49 個という多くのサンプルによってこの描像が近傍セイファート銀河の間で広くなりたっていることを示すことができた [11, 22]。

クエーサーの可視近赤外線変光遅延とダストトーラス

本研究では、MAGNUM プロジェクトで 2001 年から 2008 年にかけて測光モニター観測を行ったターゲットのうち、赤方偏移 $z = 0.06 \sim 0.6$ の活動銀河核 31 天体について、ダスト反響現象の検出と解析を試みた。MAGNUM でこれまで行われてきた標準的な手法にしたがい CCF を利用して可視近赤外線変光遅延時間を求め、光度曲線のシミュレーションから遅延時間の誤差を評価した。このとき、降着円盤からの近赤外線放射をとりぞいでダストトーラスからの近赤外線放射の光度曲線を抽出し、またダストトーラスの温度勾配に起因するダストトーラス放射の変光の波長間遅延を Tomita (2005) の結果にしたがって補正した。また活動銀河核可視光度の評価に必要な母銀河成分放射の差引には Sakata (2008) に基づく可視多波長変光の相関を利用した方法を用いた。本研究のターゲットには赤方偏移の大きい天体が多数含まれるため、こういった注意深い解析が必要となる。

この結果、数十日～数百日の有意な可視近赤外線変光遅延時間を 17 天体で検出し、また 3 天体については遅延時間の下限値を光度曲線から評価でき

た。ダスト反響現象の観測例は倍増し、とくに大光度 ($M_V = -21 \sim -26$ mag) でのサンプルが格段に増加した。またダスト反響現象の観測に成功した活動銀河核の赤方偏移も大きく更新した ($z \sim 0.6$)。これまで近傍セイファート銀河を中心に確認されていた可視近赤外線変光遅延時間と可視絶対光度の相関をクエーサーに相当する光度範囲にまで広げることができ、全体の光度範囲は 10mag (10^4 倍) にも及ぶ。このように広い光度範囲においても可視近赤外線変光遅延時間の可視光度依存性は $\Delta t \approx L^{0.5}$ にしたがって、ダスト昇華半径によってダストトラス内径が決まるとするモデルの予想と一致する。また今回の結果を $H\beta$ 広幅輝線の反響探査結果と比較し、広い光度範囲において BLR がダストトラスの内側に存在することを示し、活動銀河核の統一モデルの描像を直接的な手法で明らかにした [12, 24]。

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

本研究の目標は、 $z = 0.4 \sim 1.6$ という広範にわたる活動銀河核について可視赤外線変光遅延を検出し、ダスト反響というユニークな手法により、活動銀河核の構造・放射機構を調べ、またその結果を利用して距離・宇宙論パラメータの決定に挑むことである。本研究の今年度の主な成果は、1) MAGNUM 望遠鏡による可視域先行モニターによる光度曲線の獲得、2) それにもとづく赤外線天文衛星「あかり」へのモニター観測の 2 点である。

本研究の対象となる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ため、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」を併用する観測を提案・推進してきた。

今年度の成果としては、まず、可視域での先行モニター観測をさらにすすめて、光度曲線のスパンを更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隨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はなく、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ものである。可視域でのデータを解析した結果、観測天体の大半 (~ 10 天体) において有望な変光を検出することができた。

「あかり」は既に液体ヘリウムが尽き、遠赤外線の観測が出来ない phase-3 に突入した。MAGNUM による可視域での先行モニターの結果を踏まえた phase-3 期の mission proposal 募集にたいして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を提案し、採択された (100 ポインティングの獲得)。phase-3 は機械式冷凍機の寿命の続くかぎり長期的

に継続可能であるため、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。「あかり」によるデータのうち、観測開始当初 (6 か月分) のデータの解析を行い、早くも変光の兆候が検出され始めていることを確認した。今後、観測スパンが長くなるにつれ、変光検出の有意性は高まり、MAGNUM および「あかり」による光度曲線の直接比較、変光遅延の検出等に発展していくことが期待される。これらの結果・状況を受け、今後も「あかり」の phase-3 において活動銀河核のモニターを継続していく。

NGC4151 における可視近赤外線変光遅延時間の変化

NGC 4151 は $z = 0.0033$ という近傍に存在する見かけ上明るい 1 型セイファート銀河である。MAGNUM プロジェクトではこの活動銀河核に対し 8 年に渡って測光モニター観測を行ってきた。本研究では、得られた可視近赤外線変光曲線を用いて活動銀河核の可視近赤外線変光遅延時間の変化について調べた。

変光遅延時間の検出に用いる CCF 解析では、変光の山や谷などひとつの変光特徴ごとに遅延時間を計測することができる。MAGNUM で得られた NGC 4151 の変光曲線には多数の変光特徴が観測されているので、変光遅延時間を複数回にわたって計測することができる。その時間的推移を知ることができる。

NGC 4151 の V、K バンドの変光曲線を変光特徴ごとに分割して CCF 解析を行った結果、のべ 8 回にわたって高精度に変光遅延時間を計測することができた。その時間的推移を見ると、2004 年から 2006 年にかけて変光遅延時間が 24 日も減少していることがわかった。可視近赤外線変光遅延時間はダストトラスの内径を光が伝わる時間なので、この変化はダストトラス内径の変化を示していると解釈することができる。内径の縮小する速度は 2.4×10^4 km s $^{-1}$ にも達することから、ダストが周囲から落下したのではなく、この領域で再生成されたものと考えられる。また、変光遅延時間の減少は可視光度の減少から 1 年ほど遅れて起こった。このことは、活動銀河核内部のダストの再生成は約 1 年ほどのタイムスケールで起こることを示唆している [4, 11, 15]。

近傍 1 型活動銀河核の可視光度変動に伴う可視カラー変化の有無の検証

1 型活動銀河核 (1 型 AGN) の紫外可視連続放射の変光に伴うスペクトル形状の変化については、2 つの対立する主張が存在することが知られている。Winkler et al. (1992) や Suganuma et al. (2006) では、セイファート銀河の可視多色変光データが異なる 2 バンドの flux-flux 図上でほぼ直線上に分布することから、可視連続放射成分は変光に伴いカラーは一定であることを主張しているが、一方で多くの 1 型 AGN モニター観測の結果 (Giveon et al. 1999、Webb & Malkan 2000、Vanden Berk et al. 2004 な

ど)からは増光に伴い紫外可視カラーは青くなるという前述の主張とは対立する結果がでている。

我々はこの対立の原因は観測フラックス中に含まれる母銀河成分などの非変動放射成分の影響であると考え、非変動成分を精確に評価することで1型AGNの可視連続放射の変光に伴うカラー変化の有無を検証した。AGNの可視光度変動データは、MAGNUMプロジェクトでこれまでに最大約7年に渡り観測されてきた天体の中からHSTアーカイブデータの存在する近傍1型AGN 11天体(セイファート銀河9天体、radio-quiet QSO 1天体、radio-loud QSO 1天体)の高精度可視多色モニター観測データ(B、V、Iバンド)を解析した。そして同日に撮られた(B、V)、(V、I)変光データをflux-flux図上にプロットすると、全ての天体において直線上に分布した。非変動成分は母銀河からの放射成分と狭輝線成分を考えた。母銀河からの放射はHST高空間分解画像の表面輝度分布フィットから決めた母銀河形状パラメータを利用してMAGNUMデータの表面輝度分布フィットを行うことで多波長での母銀河成分を決定した。狭輝線成分は過去の分光観測論文の結果を利用して精確に見積もった。そして見積もられた非変動成分を(B、V)、(V、I)変光データのflux-flux図上にプロットすると、ほぼ全ての天体・バンドペアで変光データのフィット直線の延長上に存在することが示された。このことから近傍1型AGNの可視連続放射成分は光度変動に伴いそのスペクトル形状が系統的には変化しないことがわかった。また非変動成分の精確な差し引きにより、一部の天体では数年のタイムスケールの中に最大10倍以上の変光をカラーを系統的に変化させずに示していることもわかった[5, 16]。

活動銀河核の可視光度変動の性質を利用した母銀河放射成分推定法の確立

AGNの観測的研究において、観測フラックスに混入する母銀河成分を分離することはAGN光度や変動増幅率などを議論するために必要不可欠と考えられる。しかし、ごく近傍AGNに関しては母銀河が十分に空間分解されるため表面輝度分布のフィッティングにより母銀河成分の分離が比較的容易に可能となるものの、クエーサーなどの遠方AGNに関して分離は容易ではない。

我々はこれまでのAGN可視変光に伴うカラー変化の有無の検証の研究において、近傍AGN 11天体の高精度可視多色(B、V、I)の長期モニター観測と母銀河などの非変動成分の寄与推定を行い、1.「同日観測された(B、V)、(V、I)フラックスデータはflux-flux図上において“ほぼ直線状”に分布する」、2.「非変動成分(ほぼ母銀河成分)はflux-flux図上で変光データのフィット直線の延長上に誤差の範囲で存在する」ことを見出した。

これらの近傍AGNでの結果を逆に利用することで、母銀河成分の推定が困難な遠方AGNにも応用可能な母銀河成分推定が可能となる。この手法の概略は以下のとおりである。まず、可視2バンドで

AGN長期モニター観測を行い、変光データをflux-flux図上にプロットする。過去の我々の結果から母銀河成分はそのデータプロットのフィット直線の延長上のどこかに存在すると考えられる。そこで母銀河カラーを典型的銀河カラー(Fukugita et al. 1995)の結果を用い評価することでflux-flux図上における母銀河成分の推定領域がさらに制限され、各2バンドでの母銀河成分のより精度の高い評価が可能となる。

我々はこの手法を用い、MAGNUM望遠鏡で最大8年間に渡り可視多波長モニター観測が行われたQSO 31天体について可視母銀河成分の推定を行った。その結果、全解析天体のうち23天体について母銀河成分を評価することに成功した。典型的な評価精度は約0.3 mag程度であり、全観測フラックスにおける母銀河の混入度合は典型的に約4割程度であった。母銀河成分評価に失敗したものは、観測データが少ない、あるいは観測期間中における変光幅が小さいことが原因であった[23]。

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

活動銀河核の広幅輝線のreverberation mapping観測は広幅輝線領域の大きさを測定する直接的な方法であるだけでなく、広幅輝線の線幅と広幅輝線領域の大きさから活動銀河核中心のブラックホール質量を観測的に測定することができ、活動銀河核の内部構造を調べるうえで極めて重要な観測手法となっている。さらに輝線の速度ごとの遅延を測定することで広幅輝線領域のガス雲の運動を調査することが可能である。

2006年度末から2007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。この観測では広幅輝線領域の大きさとブラックホール質量の測定精度を大きく向上させる目的で、3ヶ月以上の連続した期間について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。これらの観測に基づき、比較的輝線幅の狭いセイファート1型活動銀河核として有名なNGC 4051について可視変光と広幅輝線変光との遅延時間を精度よく測定することに成功し、そのブラックホール質量を精度の良い新しい値で書き換えた[3]。

また2007年度末から2008年度始めにかけてはカリフォルニア大学アーバイン校のBarth教授、Bentz博士を中心に、近傍の中小質量ブラックホールを持つと予想される活動銀河核について約2ヶ月間の毎日の集中的なreverberation mapping観測を行ない、MAGNUM望遠鏡でも共同観測として同時に集中的な可視赤外線モニター観測を遂行した。活動銀河核Arp 151について可視変光と広幅輝線変光との遅延時間を精度よく測定することに成功し、そのブラッ

クホール質量を求めた。さらに輝線の速度ごとに遅延時間を測定した結果、輝線の赤方偏移側で遅延時間が小さいことを発見した。これは Arp 151 の広幅輝線領域のガス雲が系統的に落下する傾向にあることを示している [1]。その他のターゲットについても現在解析中である。

近傍セイファート銀河の X 線変光観測との共同観測

活動銀河核は強い X 線放射を示しその光度が短いタイムスケールで変動することから、一次的な X 線放射領域はブラックホールのごく近傍であるとされている。いっぽうでブラックホール周囲の活動銀河核の構造に影響され、複数の二次的な X 線放射成分が複雑に重なりあっていると考えられている。また、X 線と可視変光にはある種の相関があることが知られており、これは両者の放射変動機構に密接な関連があることを示唆している。したがって X 線放射強度やスペクトルの変動およびそれと可視・近赤外線変動との相関を調べることは、X 線の放射機構や X 線・可視放射の変動機構を解明するうえで重要である。

ハーバードスミソニアン天文学研究所の Elvis 教授らとの共同研究として 2007 年度に近傍セイファート銀河 NGC 5548、2008 年度に近傍セイファート銀河 NGC 3227 について、すざくによる X 線モニター観測と同時期に可視近赤外線モニター観測を行った。すざくによる観測は 1 週間おきに約 2ヶ月間にわたって行われ、二次的な X 線放射成分と活動銀河核の内部構造との関係の解明に重点をおいた観測となっている。データは現在解析中である。

またサウスハンプトン大の McHardy 教授らとの共同研究として RXTE 衛星による近傍セイファート銀河の長期 X 線モニターデータと可視・近赤外線変光曲線との比較を行っている。例えば NGC5548 については X 線光度変動に数日遅れて可視変光が追従する様子が観測されており可視変光 (の一部) は X 線放射変動によって引き起こされるとするメカニズム (X-ray reprocessing model) が支持されている (Suganuma et al. 2006) が、いっぽうで X 線光度変動と可視光度変動との相関は活動銀河核によってまちまちであることが知られており、多数の活動銀河核について系統的に調査することが重要である。活動銀河核 Mrk79 について数年にわたる長期間の X 線変光データと可視変光データの相関を調べたところ、短いタイムスケールでは良い相関を示し X-ray reprocessing model と矛盾しない結果を示したのに対し、長期間の変光の様子は X-ray reprocessing model では説明できないことがわかった [2]。

3.2 超新星など

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。

Ib 型超新星 SN 2008D は 2008 年 1 月 9 日に Swift XRT によって偶然にも X-ray transient として発見された大変貴重な超新星であり、その X 線放射は超新星のショックブレイクアウトに伴うものともガンマ線バーストや X 線フラッシュの低エネルギー版とも言われている。近年の研究によりガンマ線バーストは大質量星の重力崩壊による極超新星に伴う現象であることが明らかになってきており、ガンマ線バーストに付随する極超新星現象の諸性質、発生条件などを理解することが重要である。しかしながら極超新星に関する研究は始まったばかりで、極超新星およびガンマ線バースト現象の理解のためには詳細な観測が可能な近傍の極超新星やガンマ線バースト残光の研究が欠かせず、SN 2008D は絶好のターゲットであった。そこで 1 月 12 日から 100 日以上にわたって MAGNUM によって SN2008D の可視近赤外線モニター観測を行い、長期間の精密な多波長光度曲線を得ることができた。このデータから求めた輻射光度曲線とスペクトルの情報を理論モデルで解釈することにより、SN 2008D が爆発エネルギーや親星質量の観点から極超新星と通常の重力崩壊型超新星の中間的な性質を持つことが示された [7, 8]。

その他に SN2008ax、SN2008bo、SN2008S の観測を行った。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Bentz, M. C. et al. : “First Results from the Lick AGN Monitoring Project: The Mass of the Black Hole in Arp 151”, *The Astrophysical Journal*, **689**, 21-24 (2008)
- [2] Breedt, E., Arevalo, P., McHardy, I. M., Uttley, P., Sergeev, S. G., Minezaki, T., Yoshii, Y., Gaskell, C. M., Cackett, E. M., Horne, K., Koshida, S. : “Long-term optical and X-ray variability of the Seyfert galaxy Markarian 79”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **394**, 427-437 (2009)
- [3] Denney, K. D. et al. : “A Revised Broad-Line Region Radius and Black Hole Mass for the Narrow-Line Seyfert 1 NGC 4051”, submitted to the *Astrophysical Journal* (2009) (arXiv/0904.0251)
- [4] Koshida, S., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Sakata, Y., Sugawara, S., Enya, K., Suganuma, M., Tomita, H., Aoki, T., and Peterson, B. A. : “Long-Term Optical Continuum Color Variability of Nearby Active Galactic Nuclei”, submitted to the *Astrophysical Journal* (2009)
- [5] Sakata, Y., Minezaki, T., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Koshida, S., Aoki, T., Enya, K., Suganuma, M., Tomita, H., Uchimoto, Y. K., and Sugawara, S. : “Variation of Inner Radius of Dust Torus in

NGC 4151”, submitted to the *Astrophysical Journal* (2009)

- [6] Sakon, I. et al. : “Properties of Newly Formed Dust by SN 2006JC Based on Near- to Mid-Infrared Observation With AKARI”, *The Astrophysical Journal*, **692**, 546-555 (2009)
- [7] Tanaka, M. et al. : “Type Ib Supernova 2008D Associated With the Luminous X-Ray Transient 080109: An Energetic Explosion of a Massive Helium Star”, *The Astrophysical Journal*, **692**, 1131-1142 (2009)
- [8] Tanaka, M. et al. : “Nebular Phase Observations of the Type Ib Supernova 2008D/X-ray Transient 080109: Side-Viewed Bipolar Explosion”, accepted for publication in the *Astrophysical Journal* (2009) (arXiv/0906.1061)
- [9] Tominaga, N. et al. : “The Peculiar Type Ib Supernova 2006jc: A WCO Wolf-Rayet Star Explosion”, *The Astrophysical Journal*, **687**, 1208-1219 (2008)

(会議集録)

- [10] Minezaki, T.: “Near-Infrared Intraday Variations in AGN”, in *Proceedings of Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations – 3rd International MAXI Workshop –*.

(学位論文)

- [11] 越田 進太郎 : “Multi-Epoch Measurements of Inner Radii of Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies”, (博士論文)
- [12] 菅原 章太 : “クエーサーの可視近赤外線変光遅延とダストトーラス”, (修士論文)

(国際会議)

一般講演

- Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations – 3rd International MAXI Workshop – (RIKEN, Japan, June 10-12, 2008)
- [13] Minezaki, T. : “Near-Infrared Intraday Variations in AGN”

(国内会議)

一般講演

- RESCEU 研究会 (箱根、2008 年 8 月)
- [14] 峰崎 岳夫: 「MAGNUM プロジェクト成果報告」
- 日本天文学会 2008 年秋季大会 (岡山理科大学、2008 年 9 月)
- [15] 越田進太郎:「MAGNUM プロジェクト (1) セイファート銀河 NGC4151 の可視近赤外変光遅延時間の変化」
- [16] 坂田悠:「MAGNUM プロジェクト (2) 近傍 AGN の可視光度変動成分へのダストトーラス放射成分の寄与の考察」

- [17] 峰崎 岳夫: 「MAGNUM 望遠鏡による超新星 SN2008D の可視近赤外多波長モニター観測」

- [18] 田中雅臣: 「明るい X-ray transient 080109 に付随した超新星 SN 2008D の理論モデル」

・日本天文学会 2009 年春季大会 (大阪府立大学、2008 年 3 月)

- [19] 吉井謙: 「MAGNUM プロジェクト (1) 距離指標としての MAGNUM 関係の評価」
- [20] 小林行泰: 「MAGNUM プロジェクト (2) 全自動天文台、その運用と観測」
- [21] 青木勉: 「MAGNUM プロジェクト (3) 自動観測システム」
- [22] 越田進太郎: 「MAGNUM プロジェクト (4) 近傍セイファート銀河におけるダストトーラス内縁半径の測定」
- [23] 坂田悠: 「MAGNUM プロジェクト (5) AGN 可視光度変動を利用した母銀河成分の推定と MAGNUM QSO 天体への応用」
- [24] 菅原章太: 「MAGNUM プロジェクト (6) クエーサー 31 天体の可視近赤外線モニター観測と変光遅延」
- [25] 峰崎 岳夫: 「MAGNUM プロジェクト (7) 変光から探る活動銀河核中心部の構造と放射」

(セミナー)

- [26] 峰崎 岳夫: 「変光から探る活動銀河核中心部の構造と放射機構」青山学院大学物理・数理コロキウム (2008 年 11 月 17 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）・坂井）

【はじめに】星および惑星系の形成は宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観測的にも理論的にも活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源との関連でも注目されるテーマである。本研究室では、星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測（主にミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波）によって研究している。

新しい星は、星と星の間に漂うガスと塵からなる希薄な雲（星間雲）が重力収縮して形成される。星間雲の中でも密度が比較的高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系が形成される直接の現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、その中には様々な原子・分子が僅かに存在している。これらの微量分子の組成は、星間分子雲やその中の星形成過程を克明に記憶している。即ち、微量分子の組成を調べることで、現在の物理状態だけでなく、星間分子雲や星形成領域の「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような独創的視点を含む多面的アプローチにより、星・惑星系形成とそこでの物質進化の理解を目指している。

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

【ALMA（アルマ）に向けて】近年、センチ波、ミリ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低雑音ヘテロダイン受信機の実現がその技術的背景にある。我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開している。しかし、星形成から惑星系形成に至る進化を追う場合、感度、分解能の点でまだまだ不十分なことが多い。それらを解決するのがALMA（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）である。南米チリの標高5000 mのアタカマ高原に12 mアンテナ54台と7 mアンテナ12台からなる巨大電波望遠鏡（電波干渉計）を建設するもので、日本、北米、欧州の共同プロジェクトとして建設が進んでいる。建設は順調で、2012年から本格運用を予定している。ALMAは桁外れの感度と解像度により、星・惑星系形成の

理解を一挙に進展させるであろう。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】一方、テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、まだ、観測的研究が十分に行われていない波長域である。この領域には C^+ 、 N^+ などのよく知られた原子スペクトル線の他、 CH 、 H_2D^+ 、 HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線が存在する。それらの観測により、上で述べた星・惑星系形成における物質進化の根源を掴むことができると期待されている。世界的にはHerschel宇宙赤外線望遠鏡が近い未来に打ち上げられる予定で、これによりテラヘルツ帯観測のフロンティアが開かれるであろう。本研究室では、それとは相補的な地上大口径望遠鏡による高分解能観測を目指して、独自の技術開発を進めている。本研究室は、1998年から2005年までの間、富士山頂に口径1.2 mのサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ天文学の創生に寄与したいと考えている。

4.1 星形成領域の観測研究

低質量星形成領域における化学的多様性の発見

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化は、惑星環境の多様性や生命の起源などとも関連する重要な分野であり、活発な研究が進められている。近年、太陽質量程度の原始星において、 $HCOOCH_3$ や $(CH_3)_2O$ などの大型有機分子が電波観測によって検出され話題となった。このような分子が検出される天体をホットコリノ（hot corino）天体と呼ぶ。かなり複雑な有機分子が原始星円盤で検出されたことは、荀石などで見つかる先太陽系有機分子との関係でも注目された。この発見により、原始星円盤の化学組成の一般的特徴が把握されたかに思われていた。

ところが、昨年度、我々はまったく異なる化学組成をもつ低質量原始星L1527を発見した。この天体では、上記のような大型有機分子は検出されず、一方で C_4H_2 などの様々な炭素鎖分子が原始星近傍の暖かくて高密度な領域に豊富に存在している。そこでは、 CH_4 の星間塵マントルからの蒸発をきっかけとして炭素鎖分子が爆発的に形成されているものとみられる。我々はこれをWarm Carbon-Chain Chemistry (WCCC)と名付けた。通常、炭素鎖分子は星形成以前の若いコアで豊富に存在し、星形成領域では少なくなる。従って、上記の発見は大変な驚きであった。

WCCC現象がL1527に特有かどうか調べるために、我々は、16個の星形成領域について、国立天文台45 m電波望遠鏡とMopla 22 m電波望遠鏡を用いて炭素鎖分子のサーベイ観測を行った。その結果、おおかみ座において、L1527と酷似した天体IRAS15398-3359を発見した。さらに、CCH分子の高励起輝線観測などにより、それが間違いなく第二のWCCC天体であることを確認した。この他にも、部分的に上記の特徴を満たす天体がいくつか見つかった。これらのことから、WCCC現象はL1527に特有ではなく、程度の差はあれ星形成領域における一般現象である

ことがわかった。また、複雑な有機分子が検出される星形成領域 (hot corino 天体) では一般に WCCC 現象は弱い傾向が見られた。

このような化学組成の多様性は、分子雲の形成から原始星の形成に至るまでのタイムスケールの違いで説明できる。もし、原始星に至る時間が短く、自由落下に近い場合には、星間塵マントル上でより効率よく CH_4 が形成され、WCCC 天体となる。この場合、形成された原始星の周囲にも炭素鎖分子がある程度残される。一方、星形成に至るタイムスケールが長いと、星間塵上にはむしろ CH_3OH や複雑な有機分子が作られる。この場合、hot corino 天体となる。一般に星形成に至る時間の違いを調べることは非常に難しいが、それには化学組成による診断が非常に有効であることがわかった。[3][10][11]

WCCC 天体 L1527 における重水素化物の観測

星間分子雲コアにおいて、分子の重水素濃縮度は、コアの進化に伴って高くなることが知られている。そこで、スペインの IRAM 30 m 望遠鏡、および米国の GBT 100 m 望遠鏡を用いて、WCCC 天体である L1527 に対して重水素化物の探査を行った。その結果、 $1\text{-C}_3\text{D}$ 、 C_4D 、 C_4HD 、 DC_3N 、 DC_5N 、and $c\text{-C}_3\text{HD}$ を検出した。なかでも $1\text{-C}_3\text{D}$ と C_4HD は宇宙空間での初めての検出である。一方で、 CH_3OH の重水素化物である CH_2DOH は高感度観測にもかかわらず検出されなかった。これらの分子における重水素濃縮度は、2% から 7%、もしくはそれ以下であり、星なしコア TMC-1 の値と比べるとやや高くなっている。一方、hot corino 天体では、 CH_3OH や H_2CO などの分子で数 10% に達する著しい濃縮が知られており、それと比べると L1527 での重水素濃縮度は星形成領域としては低いことがわかった。この事実は、WCCC 天体である L1527 が hot corino 天体よりも短いタイムスケールで形成された可能性を強く支持する。[4][14]

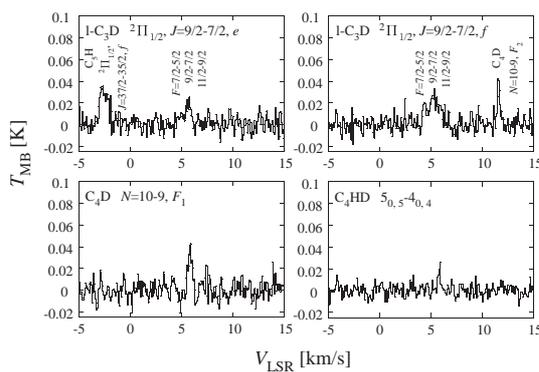


図 4.1: Spectral Line Profiles of $1\text{-C}_3\text{D}$, C_4D , and C_4HD in L1527

L1527 における HC_5N 高励起輝線の干渉計観測

昨年度、我々は、国立天文台 45 m 望遠鏡を用いた観測で、炭素鎖分子 HC_5N の高励起輝線 ($J = 32 - 31$) を L1527 において検出した。この輝線は上位準位のエネルギーが 67 K と高いことから、高温高密度な領域だけから放射される。一般に炭素鎖分子は星なしコアに豊富に存在しているが、そのような場合は上記のような高励起の輝線は非常に弱い。したがって、その検出は、L1527 において、 HC_5N が原始星のごく近傍に存在していることを意味する。そこで、原始星周辺における HC_5N の分布を明らかにするため、欧州のミリ波干渉計 PdBI を用いて HC_5N 高励起輝線の高感度観測を行った。その結果、図 2 に示すように、原始星周りに数百 AU のスケールで集中していることがわかった。hot corino 天体では、大型有機分子が原始星周りの 200 AU 程度の領域に分布しているが、一方で WCCC 天体 L1527 では炭素鎖分子 HC_5N が原始星周辺の同程度の大きさの領域に存在しており、原始星円盤の化学組成には明らかに多様性があることが確認された。

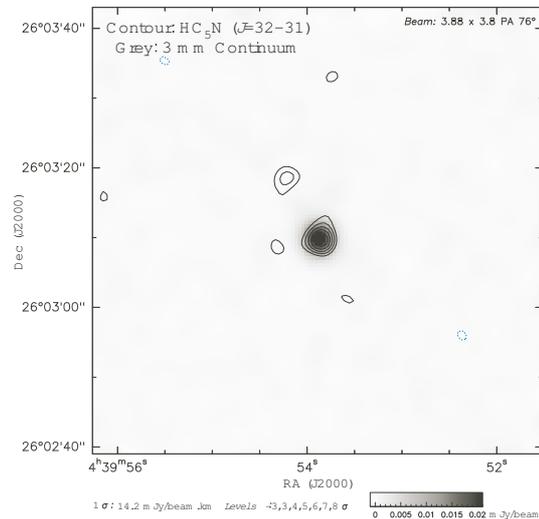


図 4.2: Distribution of $\text{HC}_5\text{N}(J = 32 - 31)$ in L1527

WCCC 天体近傍での炭素鎖分子の分布

上述のように、WCCC 天体と hot corino 天体の違いはコア収縮のタイムスケールにより生じると考えられる。もしそうであれば、原始星の近傍にはまだ炭素鎖分子が取り残されており、化学的に若いコアが存在してもよい。実際、WCCC 天体 L1527 の近くには若い星なしコア TMC-1 がある。同じように もう一つの WCCC 天体 IRAS15398-3359 の近くにも同様な星なしコアが存在するかどうかを調べるために、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて、IRAS15398-3359 の周囲を CCS や C_4H 、 HC_3N でマッピングした。

その結果、原始星から約 2' 程度西側に離れた位置に炭素鎖分子が豊富に存在する星なしコアを発見した。HN₂⁺で見ると、原始星周囲では 8 K もの強度があるのに対して、星なしコアでは 2 K 程度であり、化学進化があまり進んでいないことがわかる。一方、C₄H、HC₃N、HC₅N などの炭素鎖分子は原始星周囲でも星なしコアでも同程度の強度を示す。これは原始星周辺で炭素鎖分子の再生成、つまり WCCC に起因すると考えられる。

CCH 分子の統計平衡励起計算

CCH は最も基本的な炭素鎖分子で、多くの天体で観測される。この分子は不対電子を持っているため、スペクトル線は超微細構造分裂を示す。CCH のスペクトル線は光学的に厚い場合が多く、フォントラッピングの影響で LTE 近似が成り立たない可能性がある。そこで、超微細構造準位を考慮した統計平衡励起計算を行った。CCH の衝突レートは報告されていないので、近い大きさの分子である HCN の衝突レートを適用した。超微細構造準位間の衝突レートについては、IOS 近似で計算した。回転準位としては、 $N = 10$ まで考慮した。

計算結果を、我々が国立天文台 45 m 電波望遠鏡などで観測した結果と比較したところ、これまで LTE 近似では説明できなかった超微細構造のスペクトル強度パターンを説明できた。また、光学的厚みにより励起温度が大きく変わったことが確認された。これは、例えば、¹³CCH、C¹³CH の励起温度と CCH の励起温度が同じであると単純に仮定できないことを意味する。CCH 分子の存在量を求める上で、統計平衡計算が不可欠であることがわかった。[18]

NGC2264MMS3 の高分解能ミリ波観測

NGC2264 は太陽系近傍の星形成領域であり、その中に、強いミリ波源 MMS3 がある。MMS3 は非常に若い大質量原始星と考えられており、ホットコアを特徴づける分子 HCOOCH₃ も検出されている。この領域では、CS 輝線の観測で双極分子流が報告されているが、空間分解能が悪いため駆動源を特定するに至っていない。そこで、ハワイ・マウナケアにある SMA (サブミリ波干渉計) を用いて、MMS3 領域の双極分子流の高分解能観測を行った。

CO($J=2-1$; 231 GHz) および CH₃OH($J_k=5_k-4_k$; 242 GHz) の輝線で、MMS3 を駆動源とするコンパクトな双極分子流の検出に成功した。力学的年齢は $10^2 \sim 10^3$ 年程度と非常に若い。Sptizer 衛星で赤外線源が見えないことを考え併せると、MMS3 は Class 0 相当の大質量原始星という、非常に珍しい天体である可能性が高まった。さらに、CH₃OH と CO の分布の違いから、CH₃OH は CO より外側のポスト・ショック領域で多いことがわかった。一方で、HCOOCH₃ の分布と双極分子流の分布には直接的関係が見られず、むしろ、HCOOCH₃ は双極分子流と垂直な方向に存在していた。この状況は、典型的な大質量星形成領域である Orion-KL の構造と類似している。[22]

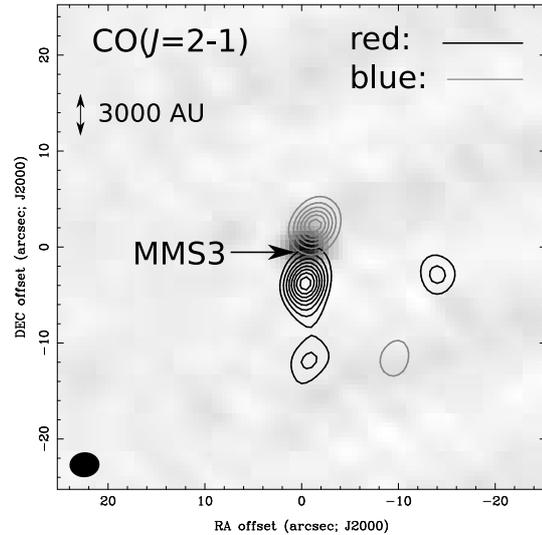


図 4.3: Molecular Outflow Associated with High Mass Class 0 Candidate, NGC2264MMS3

HCL2 領域における CH の分布

希薄な星間雲から星間分子雲が作られるとき、炭素の主要形態は C⁺ から C、そして CO へと変化する。以前、我々は、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた炭素原子輝線 (CI) の観測で、おうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域でそのような系統的变化が起きていることを示した。CI は HCL2 の南側で強く (CI ピーク)、C¹⁸O は北側 (TMC-1 リッジ) で強い。このことは北から南に向けて分子雲形成が起きていることを意味する。このことを裏付けるために、我々は、同領域において C から CO を生成する際の反応中間体である CH 分子のスペクトル線 (3.3 GHz) をドイツ Effelsberg の 100 m 電波望遠鏡で観測した。

その結果、CH の分布は HCL2 領域の全体に広がっており、C¹⁸O と CI ピークをつなぐ構造をしていることがわかった。まさに C と CO の架け橋となっており、上記の分子雲形成過程を支持する。CI ピーク周辺では CH のスペクトル線幅は 3 km/s 程度であるのに対し、TMC-1 リッジでは、その成分は弱くなり、細い (0.5 km s^{-1}) 成分が重なって現れた。細い成分は、CCS などのスペクトル線幅とほぼ同じである。一方、星がすでに形成されている北側の領域では、細い成分のみが検出された。即ち、星間分子雲の中でのコア形成に伴って、線幅の広い成分がなくなり、細い成分が卓越してくる。これは、コア形成に伴う星間乱流の散逸を見ているものと考えられる。

4.2 低質量星形成領域のラインサーベイ

一つの天体で広い周波数帯域をくまなく観測し、どのようなスペクトル線が検出されるかを先入観な

く調べられることをラインサーベイという。我々は、昨年度から、国立天文台 45 m 電波望遠鏡の Legacy プロジェクトのひとつであるラインサーベイプロジェクト(代表:高野秀路(国立天文台))の一翼を担い、WCCC 天体である L1527、および L1157 の衝撃波領域についてサーベイを行っている。

低質量原始星 L1527

L1527 において、 $\text{rms}(T_{mb})$ 雑音で 5 mK から 9 mK という高感度観測を行ったところ、50 mK 以下の強度で非常に多くのスペクトル線が検出された。CCS の高励起輝線、 HC_3N の ^{13}C 同位体、CCCO など様々な炭素鎖分子のスペクトル線を検出した。特に CCCO はこれまで星なしコア TMC-1 でしか検出されたことがなく、非常に興味を持たれる結果である。また、 HC_5N の高励起輝線が 4 本検出された。これらの強度を 1 温度の LTE モデルにあてはめたところ、最も高励起なスペクトル線 ($J = 41 - 40$, $E_u = 110$ K) の強度が他の 3 本から予想される強度よりも有意に強いことがわかった。そこで、 $J = 41 - 40$ のデータを外して温度を求めたところ、 16.2 ± 0.4 K となった。一方、励起の高い順に 2 本のスペクトル線を取り出して温度を求めると、 55.6^{+40}_{-16} K と非常に高い値となる。このことは、 HC_5N が L1527 原始星のエンベロープからディスク部分へと連続して分布していることを示している。

L1157 衝撃波領域

L1157 の衝撃波領域は、Class 0 原始星 IRAS 20386 +6751 からの双極分子流が周囲の分子雲と衝突して形成されたものである。ここでは、 CH_3OH 輝線が強く検出されており、衝撃波による温度上昇で星間塵マントルの蒸発が起きていると考えられる。

観測した周波数帯域はわずか 3.6 GHz であるが、長時間積分の結果 3 mK 程度 (T_A^*) の rms 雑音を達成した。 CH_3CHO 、 HCOOCH_3 、 HCOOH のような有機分子が検出され、衝撃波領域においても有機分子が豊富に存在することがわかった。衝撃波領域の年齢を考えると、それらは気相で生成したものではなく、星間塵マントル中にすでに生成していたものと考えられる。また、重水素化メタノール CH_2DOH も検出された。これらの分子と CH_3OH の存在比は、低質量星形成領域における値とは大きく異なり、むしろ大質量星形成領域の値に近い。このことから、大質量星形成領域において衝撃波がより強く化学組成に影響を与えている可能性が示唆される。[8][19]

4.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、テラヘルツ帯で動作する低雑音の周波数混合器(ヘテロダインミキサ)の開発が不可欠である。サブミリ波帯

においては、SIS (Superconductor Insulator Superconductor) ミクサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb (ニオブ) を超伝導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音限界に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による損失が増大するため、急激に性能が低下する。

そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子に注目している。HEB ミクサ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、超伝導体をサブミクロンサイズの大きさにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法(拡散冷却)と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法(格子冷却)の 2 つがある。我々は、Nb を用いた拡散冷却型 HEB ミクサ素子と、NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。[9][20][24]

NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の開発

本研究室では、研究室内のクリーンブースに HEB ミクサ素子製作に必要な装置群を導入し、独自の技術で HEB ミクサの製作方法の確立を目指してきた。昨年度までに、NbTiN HEB ミクサで 800 GHz における雑音温度として 500 K という性能を達成した。これは導波管型としては世界水準の雑音性能である。

本年度は、その成果を踏まえ、目標としている 1.5 THz 帯の NbTiN HEB ミクサの開発を行った。導波管とのマッチングを調べるために、国立天文台の松尾宏氏の協力を得て、フーリエ変換分光器を用いて HEB ミクサの高周波応答を調べた。応答のピークは設計した最適周波数 (1.5 THz) よりも 0.2 THz ほど低周波数にずれていたが、1.5 THz 帯においてもある程度応答が見られた。そこで、1.5 THz 帯において受信機雑音温度を測定したところ、1700 K が得られた。これは導波管型としては世界の他の研究グループと並ぶ結果である。これにより、テラヘルツ帯観測の実現に一步踏み出すことができた。

上記の実験で用いた HEB ミクサ素子は、いずれも 12 nm の膜厚の NbTiN 薄膜を使っている。これは格子冷却を考えると最適値よりもかなり厚い。それにもかかわらず上記の性能が達成されたことは、格子冷却とともに拡散冷却が協奏的に働いていることを示唆する。我々の素子製作プロセスでは、超伝導薄膜 (NbTiN) と電極 (Au/Ti) を同時製膜している。そのため、両者の間に酸化膜が生じにくく、効率よい拡散冷却を実現できている可能性がある。格子冷却と拡散冷却をともに用いる複合冷却は、HEB ミクサの可能性をさらに高める方法として注目されており、本研究の結果はその意味でも重要な成果と言える。[2][5][13]

AlN 緩衝層による NbTiN, NbN 薄膜の改善

HEB ミクサの心臓部は超伝導薄膜のマイクロブリッジである。先に述べたように本研究室では超伝導物質に Nb, NbTiN を用いたミクサの開発を行っている。バルクの NbTiN は 16 K の転移温度をもつが、スパッタ法によって成膜した薄膜の場合、この値より大幅に低い値を示す。今回我々は、NbTiN の膜質を改善する目的で、基板と NbTiN 薄膜の間に緩衝層として AlN を用いる実験を行った。

AlN は窒素ガス中で Al をスパッタして成膜する。スパッタ時のパラメータを変化させて様々な条件下で AlN を成膜し、その結晶性を X 線で調べた結果、ある条件下では 002 面に配向して成膜されていることがわかった。この AlN を緩衝層にして NbTiN を成膜し、常温抵抗率、転移温度を調べた。すると、8 nm 厚の NbTiN で 8.4 K から 11.0 K へ転移温度が上昇した。また、抵抗率も約 20 % 程度低下した。同様の改善が NbN でもみられるかどうか調べた。すると 10 nm 厚で転移温度が 6.9 K から 11.4 K へ、6 nm 厚では 6.1 K から 9.8 K へ大幅に上昇することがわかった (図 4)。また抵抗率も共に約 20 % 低下した。NbN は石英基板上に成膜した場合、超伝導特性が非常に悪いことが知られている。しかし、AlN 緩衝層を導入することで HEB ミクサとして十分な超伝導特性を示すことがわかった。[25]

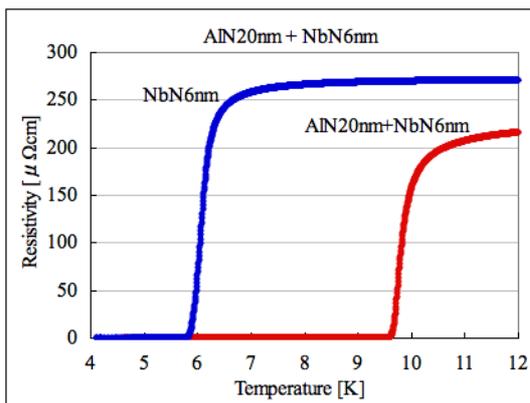


図 4.4: R-T Curve for Ultrathin NbN Films with and without AlN Buffer Layer

NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

導波管を用いたミクサではビームパターンを正確に決めることができるという利点があるが、周波数が高くなるにつれ導波管の微細な加工技術が必要となる。また、それにとれないミクサ素子の大きさも小さくなり、薄く研磨する必要も出てくる。そのような困難を回避するため、準光学型のミクサ素子の開発を進めている。我々の準光学型 HEB ミクサはツインスロットアンテナを搭載しており、その設計値により感度を持つ周波数帯を変えることができる。そこで、フーリエ変換型分光器 (FTS) を用いてツ

インスロットアンテナの設計値の違いによる HEB ミクサの周波数感度特性を調べた。これにより、目的とする周波数帯に感度を持つ HEB ミクサの製作が可能となった。[21]

HEB ミクサ性能の動作温度依存性

機械式冷凍機では比較的容易に動作温度を変化させられることを活かして、温度変化に対する性能の振る舞いを評価している。昨年度、NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子で、800 GHz 帯での測定を行い、動作温度に対する受信機雑音温度の変化は、概ね古典的な HEB ミクサの理論で説明できることを示した。異なる超伝導物質での性能の振る舞いは、動作メカニズムの違いを反映することが期待されるので、NbTiN と比較するために、本年度は、拡散冷却型とされる Nb を用いた HEB 素子でも同様の実験を行った。Nb では受信機雑音温度が 3000 K 程度と性能が悪いこと、出力が不安定で性能評価が困難となる動作点の範囲が広いため、十分なデータが得られなかった。

そこで、800 GHz 帯の局部発振器 2 つを用いて差周波の強度を測定する実験を行った。この方法では、中間周波数に大きな出力が得られるため、不安定な動作点でも測定が可能となる。雑音温度の絶対値を評価することは難しいが、相対的な性能変化を追うことができた。Nb の場合、動作温度の上昇に伴う出力の変化が単調ではなく、2 つの成分が現れている可能性があることがわかった。[6][12][17]

量子カスケードレーザーの開発

1.5 THz よりも高い周波数では、局部発振器 (LO) も課題となってくる。将来、受信機の高周波化を行うための足がかりとして、テラヘルツ帯での局部発振器として有望視されている量子カスケードレーザー (QCL) の開発研究に本年度から着手した。この研究は、情報通信研究機構の入交芳久氏、関根徳彦氏、竇迫巖氏との共同研究である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Sakai, T., Sakai, N., Kamegai, K., Hirota, T., Yamaguchi, N., Shiba, S., and Yamamoto, S., "A Molecular Line Observation Toward Massive Clumps Associated with Infrared Dark Clouds", *ApJ*, 678, 1049-1069 (2008).
- [2] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sakai, N., Yamakura, T., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., and Yamamoto, S., "Development of THz Waveguide NbTiN HEB Mixers", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* in press.
- [3] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M. & Yamamoto, S. "Discovery of the Second Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS15398-3359 in Lupus", *ApJ*, in press (2009)

- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S. “Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case”, submitted to ApJ (2009)

(会議抄録)

- [5] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., Shi, S.C., and Yamamoto, S., “Development of 0.8 THz and 1.5 THz Waveguide HEB Mixers”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, 409 (2008).
- [6] Shiba, S., Shimbo, K., Jiang, L., Sakai, N., Sugimura, M., Maezawa, H., and Yamamoto, S. “Temperature Dependence of HEB Mixer Performance”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, 59 (2008).

(学位論文)

- [7] 坂井南美, “Discovery of Warm Carbon Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Region and Its Astrophysical Implication” 博士論文, 2008年9月
- [8] 杉村美佳, 「低質量原始星 L1157 の衝撃波領域におけるスペクトル線サーベイ」, 修士論文, 2009年3月

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [9] Yamamoto, S., “Developmental Study of Superconducting Hot-Electron Bolometer Mixers for Terahertz Astronomy”, International Symposium on Terahertz between Japan and Sweden, Tokyo, May 28-29, 2008.

一般講演

- [10] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. “Warm Carbon-Chain Chemistry Discovered in L1527”, Molecular Universe, Arcachon, France, May 5-8, 2008
- [11] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. “Deuterated Molecules in Warm Carbon-Chain Chemistry: The L1527 Case”, Chemical Diagnostics in Star-Forming Region, Tokyo, March 5-6, 2009
- [12] Shiba, S., Shimbo, K., Jiang, L., Sakai, N., Sugimura, M., Maezawa, H., and Yamamoto, S. “Temperature Dependence of HEB Mixer Performance”, 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, The Netherlands, April 18-30, 2008
- [13] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., Shi, S.C., and Yamamoto, S., “Development of 0.8 THz and 1.5 THz Waveguide HEB Mixers”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, The Netherlands, April 18-30, 2008

(セミナー)

- [14] Sakai, N. “Warm Carbon-Chain Chemistry Discovered in L1527” (Sep. 16, 2008, Bonn Univ., Germany)
- [15] Yamamoto, S. “Carbon Chains in Molecular Clouds” (Sep. 26, 2008, MPI, Heidelberg, Germany)
- [16] 坂井南美: 「低質量星形成領域における「暖かい炭素鎖化学」の発見とその宇宙物理学的意義」, 天文学教室談話会、東京大学、2008年11月18日)

(国内会議)

一般講演

- [17] 芝祥一、新保謙、蒋玲、前澤裕之、山本智、「Nb HEB ミクサ性能の動作温度依存性」, 第69回応用物理学会 3a-ZM-11、中部大、2008年9月2-5日
- [18] 猿渡修、坂井南美、山本智、廣田朋也、「超微細構造を考慮した CCH 分子の統計平衡励起計算」, 日本天文学会秋季年会 Q29a、岡山理科大、2008年9月11日
- [19] 杉村美佳、酒井剛、梅本智文、高野秀路、坂井南美、山本智、他 NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー、「L1157 の衝撃波領域におけるラインサーベイ」, 日本天文学会秋季年会 Q30a、(同上)
- [20] 山本智、新保謙、芝祥一、L. Jiang、坂井南美、杉村美佳、森田将、椎野竜哉、山倉鉄矢、前澤裕之、入交芳久、P. Ananthasubramanian、「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ポロメータミクサ受信機の開発」, 日本天文学会秋季年会 V63a、(同上)
- [21] 山倉鉄矢、中井直正、瀬田益道、前澤裕之、水野亮、長浜智生、芝祥一、新保謙、山本智、「準光学型ホットエレクトロンポロメータミクサの開発」, 日本天文学会秋季年会 V64a、(同上)
- [22] 猿渡修、坂井南美、酒井剛、S.-Y. Liu、Y.-N. Su、山本智、「大質量「class 0」候補天体 NGC2264MMS3 の高分解能ミリ波観測」, 日本天文学会春季年会 P31a、大阪府立大、2009年3月26日
- [23] 坂井南美、酒井剛、廣田朋也、Michael Burton、山本智: 「Discovery of the Second Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS15398-3359 in Lupus」, 日本天文学会春季年会 P32a、(同上)
- [24] 山本智、L. Jiang、椎野竜哉、芝祥一、新保謙、杉村美佳、坂井南美、山倉鉄矢、前澤裕之、入交芳久、P. Ananthasubramanian、「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ポロメータミクサ受信機の開発(2)」, 日本天文学会春季年会、(同上)
- [25] 椎野竜哉、轟孔一、N.D. Minh、J. Ling、芝祥一、鶴澤佳徳、前澤裕之、坂井南美、山本智: 「AlN 緩衝層を用いた NbN、NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の改善」, 2009年春期応用物理関係者連合講演会、筑波大、2009年3月30日-4月2日、30aP19-10

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—— (衰輪・井上)

衰輪研究室では、「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 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験

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

我々は太陽由来のアクシオンを捉えるために、高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。Sumico と名づけられたこの装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆ブリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクシオンの質量として $m_a < 0.27$ eV、 0.84 eV $< m_a < 1.00$ eV という範囲でアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6\text{--}13.4 \times 10^{-10}$ GeV $^{-1}$ という上限値を得ることに成功している (図 5.1)。

昨年はまず、2007 年末から始めた質量 1 eV 付近の太陽アクシオン探索を 2008 年 4 月まで行った。この実験で得られた結合定数に対する上限値は、現在この質量領域において直接検出実験で得られる値としては最も小さく、また様々に予想されているアクシオン模型の一部に対して世界で初めて制限をつけたものとなっている。その後は実験装置の向く角度を読み取るロータリーエンコーダーや、超伝導磁石を冷却する GM 冷凍機など、様々な装置の故障が相次いだ為、実験の中断を余儀なくされた。これら装置の修理は完了し、現在は不具合を起こした PIN フォトダイオードの交換と動作試験を行っている。その他、質量 1 eV 以上の太陽アクシオン探索を行うべ

く、超伝導磁石クエンチ時の安全対策を目的とした安全弁の配管改修を行っており、まもなく探索実験を再開する予定である。

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

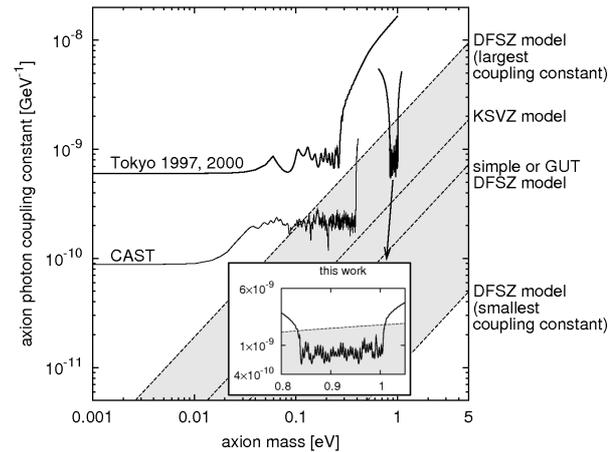


図 5.1: 太陽アクシオンに対する制限

5.2 Hidden photon 探索実験の検討

Hidden photon は素粒子物理学の諸問題を解決するための標準模型の拡張において存在が予言されている粒子である。Hidden photon は通常物質とは直接相互作用しないが、真空領域の長さ (l)、hidden photon の質量 ($m_{\gamma'}$)、hidden photon と光子の混合角 (χ)、エネルギー (ω) に依存したある確率で光子に転換される性質を持つ。Hidden photon は存在すればクーロン力の逆二乗則、星の進化、初期宇宙の進化等に対して修正が加えられることになるが、観測結果と矛盾しないことを要請することにより $\chi - m_{\gamma'}$ plot に対して制限がつけられてきた。また、光子が hidden photon に転換し、壁を通過した後光子に再転換されるイベントを探索する実験、CERN の CAST グループによる太陽由来の keV 領域の hidden photon の hidden photon 探索実験等により、 $\chi - m_{\gamma'}$ plot に対して制限がつけられてきた (図 5.2 参照)。

我々は、太陽由来のエネルギー数 eV の hidden photon の探索実験を検討している。測定を行うには太陽を追尾する必要があるが、既存の太陽アクシオン探索用の装置に新たに開発する hidden photon 探索

用装置を取り付けて測定する予定である (図 5.3 参照)。Hidden photon 探索用装置は hidden photon が光子に転換する真空領域を形成するチェンバー、転換光子を集光する鏡、そして光検出器等の部品から成る。これらの部品の仕様は測定結果として描かれる $\chi - m_{\gamma'}$ exclusion plot に大きく影響するので、装置の設計を行うにあたり実験によって得られる結果を見積もっておく必要がある。そこで、装置の仕様を様々に変えて、現在製作可能な装置の最適な見積りを行った (図 5.2 参照)。今後、この見積りを元に実験装置を開発し、測定を行う予定である。

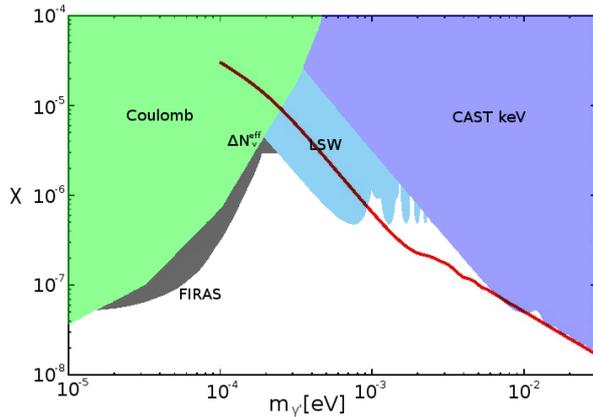


図 5.2: Exclusion plot の見積り結果 (太実線)。長さ $L = 1\text{m}$ 、直径 $D = 50\text{cm}$ の円筒状の真空領域、光検出器に R329-02(Hamamatsu) 使用、測定時間 $t = 10^6\text{s}$ を仮定している。

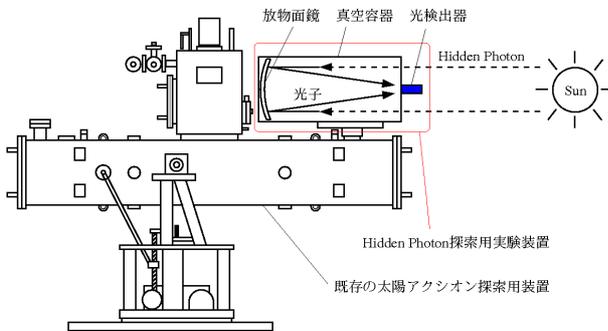


図 5.3: Hidden photon 探索の実験装置の概略図。

5.3 レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発

ここ近年の産業技術の発展と並行して、生体・材料分析や環境科学など幅広い分野で微量物質の評価技

術の重要性が目目されてきている。この中で、半導体デバイスの高密度化・微細化とともに必要性が増してきている半導体ウエハ表面の極微量な不純物に対する汚染評価に着目し、レーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS: Resonance Ionization Mass Spectrometry) を用いた新しい汚染評価手法を提案し、技術開発を行っている。RIMS はレーザー共鳴イオン化による元素の選択と質量分析による同位体識別をセットにした微量元素分析手法であり、原子番号 Z と質量数 A を決定することで特定の原子のみを検出するものである。

既存のウエハ表面汚染評価手法として、主に全反射蛍光 X 線分析 (TXRF) と誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) が挙げられ、微量物質の検出限界という点では後者の ICP-MS が優れている。しかし、典型的な ICP-MS 分析計では質量分析しか行わないため、同量体や等質量の分子による干渉が検出限界に大きな影響を与えていると考えられる。

RIMS による汚染評価はウエハ表面から汚染物質を回収する前処理、得られた試料の真空中への導入、RIMS による検出の 3 段階に分けられる。前処理及び質量分析を行う点で ICP-MS と共通点も多いが、試料のイオン化にレーザーを用いて元素の選択を行うとともに測定系の真空度を低く抑えることでバックグラウンドを大幅に減らし、検出限界改善につながると考えている。

本年度は RIMS の有用性を実証するため、代表的な金属不純物としてカリウムを取り上げて RIMS による微量分析を行った。レーザー共鳴励起用の波長 405nm 外部共振器型半導体レーザーと励起準位からのイオン化効率改善のための波長 808nm 高出力レーザー (ファイバー出力で約 50W) を用いて共鳴イオン化を行い、質量分析には四重極質量分析計 (QMS) を用いた。試料に炭酸カリウム (K_2CO_3) を使い、 $700\text{--}900$ 度程度まで加熱して得られるカリウム原子ビームに対して、(図 5.4) に示す測定セットアップのもと RIMS 検出を行い、検出効率 $\sim 10^{-6}$ を得た。RIMS の特徴としてバックグラウンドを大幅に低減できているため、既存の手法と比較して半導体ウエハの表面汚染評価への有用性が大きいと判断した。分析対象によって外部共振器型半導体レーザーの波長、もしくは波長可変幅の広い OPO レーザー等を使い分けることで、あらゆる元素の汚染評価に対応できると考えられる。RIMS を用いた表面汚染評価は、国際リニアコライダー (ILC) 用ニオブ超伝導空洞の加速電場向上のための表面不純物分析にも有効と考えられる。

また、半導体レーザーの持つ線幅の狭い特徴を利用して、共鳴励起用の 405nm レーザー周波数をスキャンさせることで、カリウム各同位体 $4s_{1/2}$ 基底状態の超微細構造を観測した (図 5.5)。図 5.5 で各同位体の共鳴イオン化シグナルの相対的な周波数のずれが 405nm 線における同位体シフトを示している。超微細構造の分裂幅に文献値を用いて、 405nm 線における ^{40}K , ^{41}K , 同位体シフト $207 \pm 13\text{MHz}$, $451 \pm 10\text{MHz}$ が得られた。

今後は、今回製作したレーザー共鳴イオン化質量分析器をもとにして、前処理からの一連の流れによ

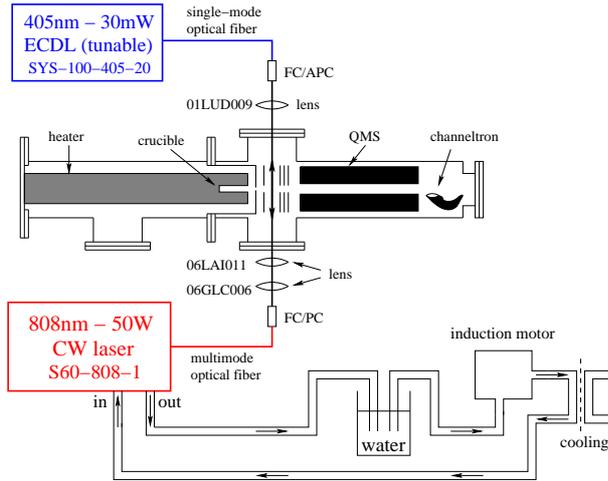


図 5.4: RIMS による微量カリウム原子検出の測定セットアップ

り RIMS による汚染評価の有効性をさらに検証していく予定である。この開発研究は、将来的には微量元素分析によるニュートリノ検出器としての使用を目指したものである。

5.4 原子炉ニュートリノモニター

比較的小型で移動が可能な反電子ニュートリノ検出器を開発している。このニュートリノ検出器は原子炉中での核反応に伴って生じる反電子ニュートリノを検出対象としており、原子炉近傍に設置し、原子炉の熱出力あるいは核燃料の燃焼状況などをモニターすることを目的としている（図 5.6）。

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

この結果期待される応用の一つとして、IAEA (国際原子力機関) による原子力活動の監視が挙げられる。一例として、原子炉の運転によりプルトニウムが生成されるが、プルトニウムは核兵器の原料となりうるため、原子炉中でどの程度の量のプルトニウムが生成されたかというのは核査察活動における大きな関心事の一つである。現在、IAEA は原子炉内部に測定装置を設置し、原子炉に大きく干渉する形

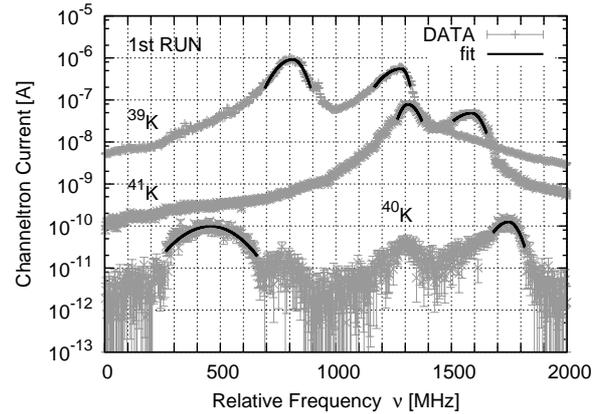


図 5.5: 405 nm レーザー周波数スキャンによるカリウム各同位体 $4s_{1/2}$ 基底状態の超微細構造の観測 (一例)

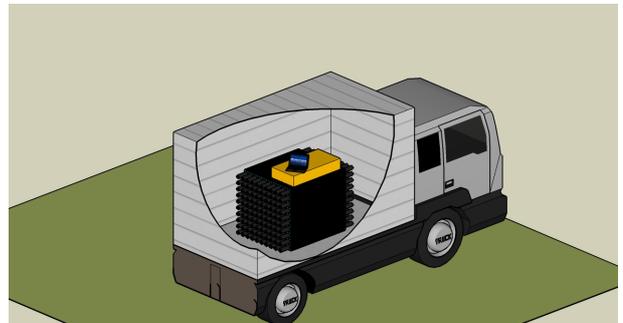


図 5.6: 可搬型ニュートリノ検出器。トラックで移動し、原子炉建屋の外に駐車してそのまま計測する。

でその量を測定しているが、ニュートリノ検出器を用いると、原子炉の外部から熱出力や燃料構成比を見積り、そこからプルトニウム生成量を見積りことができると考えられる。ニュートリノは遮蔽がほぼ不可能であり、原子炉以外の代用ニュートリノ源を用意する事が困難であるため、破壊等のあからさまな方法以外で監視活動を妨害できないという点も小型反電子ニュートリノ検出器が、原子力活動の監視手法として有力視されている理由の一つでもある。

我々が開発している小型反電子ニュートリノ検出器は、おおまかにはプラスチックシンチレータと、ガドリニウム含有膜により構成されている。検出器に入射してきた反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) は、プラスチックシンチレータ中に含まれる陽子 (p) と逆 β 崩壊反応を起こし、陽電子 (e^+) と中性子 (n) が生成される。陽子はシンチレータにエネルギーを落とすしながら短距離を移動し、その後シンチレータ中の電子と対消滅して 2 本の γ 線を放出する。一方中性子は、シンチレータ中を最大 $200\mu\text{s}$ 程度の時間をかけながら動き回り、徐々にそのエネルギーを失っていく。この中性子は十分にエネルギーを失った段階で、検出

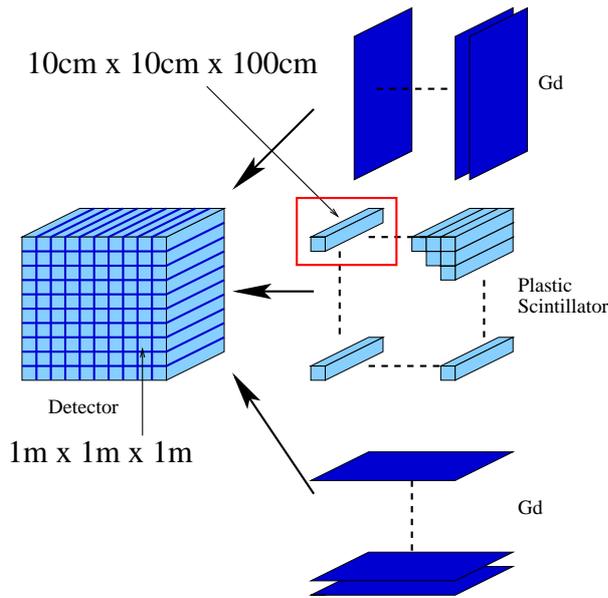


図 5.7: 検出器のおおまかな構造

器を構成するガドリニウム (Gd) に吸収されて合計約 8MeV の γ 線を放出する。以上 2 つの (陽電子と中性子の) 信号をシンチレータで捉え、遅延同時計測法を用いてニュートリノ信号として検出できる。

検出器は、おおまかには図 5.7 に示すように、100 本の $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 100\text{cm}$ の大きさの棒状プラスチックシンチレータの間にガドリニウムを含有する膜を挟むという構造を計画している。その重さは約 1 トンと比較的小型であり、また有機液体シンチレータよりも燃えにくいプラスチックシンチレータを用いるという特徴により、原子力発電所敷地内に持ち込むための障害が少ないと考えられる。通常、ニュートリノ検出器はニュートリノの反応断面積の小ささから、かなり大型のものが作られるが、上述のように原子力発電所敷地内に持ち込み、原子炉炉心近傍 (数十 m) に設置することにより、小型のニュートリノ検出器でも十分な量のニュートリノが検出できると見積もっている。我々の計画している検出器では熱出力 3GWth の原子炉炉心から 25m の地点で、1 日当たり約 300 イベントが検出できると考えている。

しかし、この検出器を遮蔽なしで地上に設置した場合、宇宙線 μ 粒子、環境中性子線、環境 γ 線等のバックグラウンド信号も検出されてしまうため、約 6 桁の精度でのイベントセレクションが必要となる。本年度は、これらバックグラウンドの見積り、および、原子核反応シミュレータ Geant4 を用いた検出器シミュレーションとイベントセレクション方式の検討を行った。

また、検出器に使用するガドリニウムの形態に関しても考察し、酸化ガドリニウム含有塗料塗布済みシートという製品が市販されていたので、このシートが実験に利用できるかどうかを確認するために、ガドリニウムシートを用いた中性子検出実験を行い、市販のガドリニウム含有シートを我々の検出器に使

用できるという結論を得た。

5.5 暗黒物質検出器開発

以前我々は、 CaF_2 シンチレータを用いたニュートラリーノ探索実験を行っていた。このシンチレータは、ニュートラリーノと相互作用する核子として、原子核中最大のスピンを持つフッ素-19 を含んでおり、スピンに依存した (SD, spin dependent) 相互作用に大きな感度を持つ。我々が 2005 年に出した散乱断面積に対する制限は、当時の世界最高水準であり、今後の性能向上の結果次第で、さらに高感度の探索を狙える可能性を持っている。

現在研究しているのは、検出器の識別によるバックグラウンド除去である。ニュートラリーノ由来のシグナルの見えない現状では、バックグラウンドを一桁下げることが、制限を一桁きつくすることを意味している。我々は、2005 年の実験のバックグラウンドは、検出器内外からの γ 線であると推測し、 γ 線による電子反跳現象と、ニュートラリーノなどによる原子核反跳現象を識別する方法を、模索している。

識別手法として考えているのは、波形識別と波長識別の二つである。波形識別はシンチレーション光の減衰時間を用いて識別する方法であり、他のグループでも、さかに行われている手法である。一方、波長識別はシンチレーションの波長によって識別する方法であり、他のグループでは、まだほとんど研究されていない。

これらの識別手法を検証するためには、シンチレータに γ 線と中性子線を別々に入射させて比較しなければならない。しかし、通常中性子線源は同時に γ 線も発生させているため、検証する識別法以外の方法でイベントセレクションを行う必要がある。我々の研究室では、TOF を用いたイベントセレクションの方法を確立した。これにより、実験室レベルでの実験で中性子によるシンチレーションの研究が可能となった。現在この手法を用いて、低エネルギー領域 (数十 keVee) での波形識別と波長識別の検証作業を進めている。

5.6 量子ドットを用いた液体シンチレータの開発

三次元井戸型ポテンシャルに電子を閉じ込めたものを量子ドットと呼び、近年、物性分野や生物・化学分野で盛んに研究・利用されている。これを応用した CdSe/ZnS 半導体ナノ結晶は、蛍光物質の役割を持っており、液体シンチレータへの応用が期待される。

蛍光物質としての半導体ナノ結晶はすでに一般的に市販されている。本研究で用いているものは、Evident Technologies 社から販売されている Core-Shell Evidots という商品である。Cd と Se から構成された核に、Zn と S の殻をつけたようなもので、一つ一

つは直径数 nm の擬似原子核のような恰好をしている。この内部の電子は、井戸型ポテンシャルにより離散的なエネルギー準位を持っているため、励起後、脱励起時に単色の光を出す。放出する光子の波長は、半導体ナノ結晶の直径に依存しており、Core-Shell Evidots では 490 ~ 620nm で 20nm おきに販売されている。

我々は、この半導体ナノ結晶をトルエンに溶解させ、放射線検出器 (液体シンチレータ) としての利用を考えた。発光の原理は通常の液体シンチレータと同様で、まず入射した荷電粒子によりベンゼン環を持つトルエンが励起され、その励起エネルギーが半導体ナノ結晶に伝播し、半導体ナノ結晶が脱励起するときにシンチレーション光が発生する。実験では、 ^{60}Co の γ 線による発光が観測でき、半導体ナノ結晶の濃度を濃くすることによって発光量が増大する現象も確認できた。

今後は、現在問題となっている自己吸収を低減させるために、二次蛍光物質の使用を考えている。最終的には既存の液体シンチレータと発光量を比較し、さらに発光量の多いシンチレータの開発を目標としている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo Axion Helioscope, RESCEU-53/08, arXiv:0809.0596v1 [astro-ph]
 - [2] Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto, M. Minowa: Search for solar axions with mass around 1 eV using coherent conversion of axions into photons, RESCEU-55/08, arXiv:0806.2230v2 [astro-ph], Physics Letters B 668 (2008) 93-97.
 - [3] Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa: Trace Element Analysis of Potassium by Resonance Ionization Mass Spectrometry, RESCEU-56/08, arXiv:0808.4020v2 [physics.atom-ph]
- ##### (会議抄録)
- [4] Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ota, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Status report of the Tokyo axion helioscope experiment, Tenth International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2007), RECEU-54/08, arXiv:0806.1471 [astro-ph], J. Phys.: Conf. Ser. 120 (2008) 042014.
- ##### (学位論文)
- [5] 岩田圭弘: Resonance Ionization Mass Spectrometry and Its Application to Related Fields, 平成 21 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- ##### < 学術講演 >
- ##### (国際会議)
- 一般講演
- [7] M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo axion helioscope, 4th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, DESY, Hamburg Site /Germany on 18-21 June 2008.
 - [8] Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo axion helioscope, idm2008 — Identification of Dark Matter 2008, Stockholm, Sweden, 18-22 August 2008.
- ##### (国内会議)
- 一般講演
- [9] 蓑輪 晝: 暗黒物質・太陽アクシオン実験、「第 8 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会 'Dark Energy in the Universe' サマースクール、浅虫温泉 2008 年 8 月 31 日.
 - [10] 小栗秀悟: CaF_2 シンチレータでの波長識別の暗黒物質探索への応用、日本物理学会秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.
 - [11] 太田良介: 第三期太陽アクシオン探索、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.
 - [12] 水本哲矢: アクシオン探索実験について 2、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.
 - [13] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器のためのガドリニウムを用いた中性子検出の評価、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 21 日.
 - [14] 中田量子: 小型反電子ニュートリノ検出器のための回路系の設計、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 21 日.
 - [15] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法による半導体ウエハ表面の新しい汚染評価手法の開発、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学 2008 年 9 月 22 日.
 - [16] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器のためのシミュレーション研究とセレクションクライテリアの検討、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 27 日.
 - [17] 小栗秀悟: 量子ドットによる発光を用いた素粒子放射線検出器の開発、日本物理学会年次大会、立教大学 2009 年 3 月 27 日.
 - [18] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いたカリウム微量分析とその応用、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 日.
 - [19] 水本哲矢: Hidden photon 探索実験検出器の開発、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 日.
 - [20] 太田良介: 2eV 太陽アクシオン探索に向けてのアクシオン望遠鏡改修、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 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）

6.1 高赤方偏移銀河

$z = 6.6$ に非常に大きな Ly α 輝線天体を発見

大内正己 (Carnegie), 江上英一 (Arizona) らとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Fieldにおいて, Ly α 輝線で大きく広がった天体を発見した. Keck 望遠鏡と Magellan 望遠鏡による分光観測で赤方偏移も測定済みである. この天体は Ly α 光度が $3.9 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ と極めて明るい上に, 当時の銀河としては異例に大きい 17 kpc 以上もの広がりを持つ. すばる, UKIRT, Spitzer による深い測光データに基づき, 星質量は $0.9 - 5.0 \times 10^{10} M_{\odot}$, 星形成率は $34 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 以上と見積もられた. この天体の正体はまだ謎だが, 銀河形成, 宇宙の再電離, 銀河間空間の重元素汚染などの研究に大変重要な天体となるだろう. この天体は研究グループによって Himiko と名付けられた. [16]

$z = 3.1$ と 3.7 のライマン・アルファ輝線銀河 (LAEs) の星の種族の研究

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

の爆発的星形成銀河 Arp220 のものによく似ていることがわかった. [6, 27, 45, 46, 55]

Subaru/MOIRCS を用いた星形成 BzK 銀河の近赤外線分光観測

本原顕太郎, 内一・勝野由夏 (天文学教育研究センター), 小野寺仁人 (CEA Saclay), 柏川伸成 (国立天文台), C. Ly, M. A. Malkan (UCLA) らとの共同研究. BzK 銀河は $B - z$ vs $z - K$ のカラーを利用して選出される $z \sim 2$ の銀河である. この選出法では, K バンド等級がある限界値より明るいほぼ全ての $z \sim 2$ の銀河を選出することができる. 我々はすばるディープフィールドにある 40 個の星形成 BzK 銀河について, すばる望遠鏡の多天体近赤外撮像分光装置 (MOIRCS) を用いて近赤外分光観測を行ない, 0.9 から 2.3 ミクロンまでのスペクトルを取得した. そのうち, 15 個の銀河で $H\alpha$ とその他に [NII] などの輝線を検出した. また, $BVRiz'z'K$ バンドの多色データを用いて SED フィットングを行い, 恒星質量を得た. そして, その輝線スペクトルから, 銀河の星形成率や銀河の星間ガスの金属量を調べた. その結果, 星形成率は恒星質量の大きな銀河ほど高いが, この星形成率の増加率は星質量の変化と比べて緩やかであることがわかった. そのため, 単位恒星質量あたりの星形成率は恒星質量の大きな銀河ほど逆に小さくなる. この関係は, 恒星質量の小さな銀河ほど質量成長率が大きいことを示唆する. さらに, 恒星質量が大きくなるほど, 銀河の星間ガスの金属量が大きくなるという関係が得られた. この相関関係の傾向は静止系 UV 光に基いて選出された $z \sim 2$ の銀河に対する先行研究の結果と一致する. しかし, 同じ恒星質量の銀河を比較したとき, 先行研究と比べて我々の調べた銀河のほうが, 平均して 0.2dex ほど金属量が大きい. 我々の銀河の方が赤いカラーを持つことから, 赤方偏移 2 の銀河の恒星質量と金属量の間にはカラー依存性があることが示唆される. [11, 13, 20, 40]

UKIRT/WFCAM によるすばるディープフィールドの近赤外線観測

本原顕太郎 (天文学教育研究センター), 柏川伸成, 児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. 我々は, すばるディープフィールドの広視野近赤外線撮像観測を進めている. $z \sim 2$ の銀河では, スペクトルの大きな特徴である 4000\AA ブレイクが近赤外線領域に赤方偏移するため, 測光的赤方偏移の手法や, モデルの SED をフィットすることによる銀河の性質の推定には, 近赤外線のデータが不可欠である. そこで, 2009 年 3 月に UKIRT/WFCAM を用いて H バンドの撮像観測を行った. 積分時間が 300 分の広視野データが得られ, すばるディープフィールドの可視光データとのオーバーラップは約 450 平方分となっている. 簡易解析の結果, 限界等級は約 24.3 等 (AB 等級, $S/N = 3, 2''$ アパーチャー) と推定され, 期待どおりの深いデータとなっているようである. 今後, 本解析を行い, こ

れまでに得られている可視光から赤外線とのデータと合わせることができるようになると、 $z \sim 2$ の銀河の性質をより精度よく調べることが可能になるだろう。[25]

サブミリ銀河と BzK 銀河の関係

高木俊暢 (ISAS), 花見仁史 (岩手大) との共同研究. サブミリ波で明るい銀河 (SMG) と近赤外線を選択される銀河 (BzK 銀河) は、ともに $z \sim 2$ 付近の銀河種族であるが、両者の関係はよく分かっていない。我々は深い多波長データの揃っている Subaru/XMM-Newton Deep Field で両者の関係を調べ、次の結果を得た。(i) K バンドで比較的暗い ($K > 21.3$) SMG の多くは BzK 銀河である。SMG の光学対応天体を同定するのは一般に難しいが、この結果は、SMGs の周囲の BzK に当たるのが効率的であることを示している。(ii) BzK 銀河のうち、SMG と呼べるほどサブミリ波で明るいものは 1% 程度である。SMG は、マージングによって星形成が活発になっている BzK 銀河だと考えられるが、当時はマージングの頻度がかかり高かったことを考慮すると、1% という低い比率は不可解である。[8]

GALEX データに基づく $z \sim 1.8 - 2.8$ の Lyman Break 銀河の研究

Ly, Malkan (UCLA), 柏川伸成 (国立天文台), 本原顕太郎 (天文センター) らとの共同研究. 我々は Subaru Deep Field において、すばるによる可視のデータと GALEX による近紫外のデータを組み合わせ約 7100 個の $z \sim 1.8 - 2.8$ の Lyman Break 銀河 (LBGs) の候補を検出した。一部については分光同定も行っている。このサンプルを用いて紫外線光度関数を導出した結果、同じ赤方偏移における別の選択法で選ばれた銀河の光度関数よりも 1.7 倍程度高い値が得られた。この違いの原因はまだ完全には突き止めてはいないが、もしサンプルの選択方法によって光度関数のような基本統計量が大きく変わり得ることを示しているのだとすれば、過去の研究結果の解釈には注意を要する。我々はさらに、 $z \sim 2$ における宇宙の星形成活動についても考察した。[14]

静止系近赤外測光データを用いた銀河の選択に関する考察

中島王彦の課題研究. 銀河の形成や進化を調べるには、ある天域に写っている多数の銀河から、目標とする赤方偏移の銀河だけを効率的に選択することがまず必要である。本研究では、銀河のスペクトルの静止系 $1.6\mu\text{m}$ 付近に現れる「出っ張り」、いわゆる $1.6\mu\text{m}$ bump に注目して銀河の選択を試みた。 $1.6\mu\text{m}$ bump は、相当若い銀河から年老いた銀河まで共通に持つ特徴であり、星形成史やダスト吸収の有無にほとんど影

響されないため、バイアスの無い銀河サンプルを作れると期待されている。今回は、Subaru Deep Field の K バンドカタログを用いて、可視 (Suprime-Cam) から中間赤外 (IRAC/Spitzer) までの多色のデータを使い、 $z \sim 1$ の銀河を選択する方法を考案した。具体的には、 $z - K$ 対 $K - \text{ch2}$ の 2 色図上に、赤方偏移の既知の天体と、様々な銀河進化モデルのトラックを描き、その分布から 2 色図上で $z \sim 1$ の銀河が位置する領域を定義した。そして、その選択基準を、赤方偏移が分からないものも含むカタログ全体に適用して、 $z \sim 1$ のサンプルを作った。さらに、得られた銀河の統計的性質を調べた。

6.2 銀河進化と環境効果

狭帯域フィルター NB912 による XCS2215 銀河団 ($z = 1.46$) の [OII] 輝線銀河探査

児玉忠恭, 田中孝 (国立天文台) らとの共同研究. 近傍の宇宙では高密度領域にある銀河ほど星形成活動が弱いことが知られている。しかし、最近の研究から、 $z = 0.8 - 1.0$ の遠方宇宙では高・中密度領域で銀河の星形成活動が高まっているという結果が報告されて始めている。 $z > 1$ に存在する銀河団の広視野観測することでより遠方での詳細な星形成活動の環境依存性を明らかにすることは重要である。我々は、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) と MOIRCS を用いて $z = 1.46$ にある XCS2215 銀河団の広視野撮像観測し、 $B, z', \text{NB912}$ の可視光の 3 バンド、 J, K_s の近赤外線 2 バンドの撮像データを取得した。この銀河団は X 線で検出されている現在最も遠方の銀河団である。そして、NB912 狭帯域フィルターにより、この銀河団メンバーからの [OII] 輝線をほぼ完璧に捕らえられる。銀河団中心領域 (約 7.5×7.5 平方 Mpc (comoving)) において、 $2.6 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ より大きな星形成率を持つ 44 個の [OII] 輝線銀河を選び出した。その結果、銀河団中心にも [OII] 輝線銀河は多く存在していることがわかった。[OII] 輝線の多くが活動銀河核から放射されたものではなく星形成活動によるものとみなすと、 $z = 1.46$ の銀河団中心部では、低赤方偏移の銀河団中心部とは異なり、星形成活動が活発であることを示唆する。[58]

すばる望遠鏡 MOIRCS を用いた RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の $\text{H}\alpha$ 輝線サーベイ

児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. 我々は RXJ1716 銀河団フィールドの重点的な観測を続けている。一般に、 $\text{H}\alpha$ 輝線は星形成活動の有用な指標であるが、赤方偏移 0.5 より遠方の宇宙では、 $\text{H}\alpha$ 輝線が近赤外線の領域にシフトしてしまい、大規模な $\text{H}\alpha$ 輝線探査を行うことは困難であった。しかしこの銀河団の場合は、 $\text{H}\alpha$ 輝線がちょうど夜光の谷間である $1.19\mu\text{m}$ に入り、すばる望遠鏡の MOIRCS はこの波長帯に狭帯域フィルター NB119 をもつため、

RXJ1716 銀河団は $z = 0.81$ という非常に遠方でありながら大規模な $H\alpha$ 輝線探査を行うことができた。我々は J バンドと NB119 バンドでこの銀河団を観測し、 $H\alpha$ エミッターを多数検出した。 $H\alpha$ エミッターはきれいに銀河団の中心領域を避けるように分布しており、主に青い色をしていた。しかし、銀河団周辺部では赤い色をもつものも見つかった。これらはダスト赤化を強く受けた星形成銀河である可能性が高い。また、「あかり」による中間赤外線観測で検出された銀河のなかには $H\alpha$ 輝線で検出されていないものも多く存在していた。これらの銀河が銀河団メンバーであるとする、あまりに強いダスト吸収のため、遠方の銀河団には $H\alpha$ 輝線でさえ検出できない多くの星形成活動が存在していることを意味しているのかもしれない。現在、この可能性を検証するため分光データを解析すると同時に、さらに広い領域の $H\alpha$ 輝線探査を続けている。[57]

RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) 領域に存在する中間赤外線ソースの分光観測

児玉忠恭 (国立天文台)、仲田史明 (国立天文台)、田中賢幸 (ESO) らとの共同研究。我々はあかり衛星による RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の中間赤外線観測により、銀河団周囲に広がる大規模構造に沿って多数の中間赤外線ソースを発見した。これらは銀河団環境における銀河進化のカギを握る種族かもしれないと考えられており、銀河団メンバーであることの確認および可視光域での輝線の情報がどの程度ダスト吸収によって隠されているのか、などの正確な情報が求められている。我々は好条件のもと、すばる望遠鏡の FOCAS を用いて分光観測を行い、分光データの取得に成功した。現在そのデータを解析中である。[4, 23]

「あかり」による CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) および RXJ0152 銀河団 ($z = 0.83$) の赤外線観測

児玉忠恭 (国立天文台)、あかり CLEVL チームとの共同研究。我々は、北黄極付近に位置する RXJ1716 銀河団のあかり衛星による中間赤外線観測から、遠方銀河団の周囲に多くのダストを伴う星形成銀河が存在することを示し、銀河進化を考えるうえで遠方銀河団の広視野赤外線観測の重要性を示してきた。我々はさらに、可視光で詳細に研究が行われている CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) および RXJ0152 銀河団 ($z = 0.83$) もあかり衛星によって広く観測している。データの深さは RXJ1716 銀河団にはおよばないものの、広視野赤外線観測ができるあかり衛星のユニークなデータである。特に静止系で $7 - 8\mu\text{m}$ を捉えるために、CL0016 銀河団では $11\mu\text{m}$ 帯のデータ、RXJ0152 銀河団では $15\mu\text{m}$ 帯のデータに主に注目しながら、現在これらのデータを解析中である。[24, 42, 43, 44]

CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) 周辺に広がる超巨大構造の分光確認

田中賢幸 (ESO) らとの共同研究。CL0016 銀河団 ($z = 0.55$) は古くから知られる非常にリッチな銀河団である。我々は、この領域をすばる望遠鏡の Suprime-Cam で観測し、30 分角四方の視野では覆いつくせないほどの大規模構造が存在する可能性を示していた。我々はさらに、その外側を、Suprime-Cam の 6 視野で追加観測し、大規模構造がさらに広い領域まで広がっている可能性を示した。これらの新たに見つかった超巨大構造に付随すると思われる銀河を、すばる望遠鏡の FOCAS および VLT の VMOS によって分光観測を行い、その多くはたしかに大規模構造に付随する銀河であることを確認した。

かみのけ座銀河団の intracluster diffuse light の観測

征矢野隆夫、中田好一、猿楽祐樹 (木曾観測所) らとの共同研究。銀河団中の銀河間空間にかなりの量の星があるという観測的な証拠は今や確かに存在する。それらは淡い広がった銀河間光 (Intracluster Light=ICL) や個々の星、つまり惑星状星雲 (ICPNe) や赤色巨星として観測されている。我々は、かみのけ座銀河団ほどの遠距離においても惑星状星雲を検出できる Multi-Slit Imaging Spectroscopy という手法を開発し、約 40 個の ICPNe の観測に成功した。その結果、銀河団中心にある 2 つの巨大楕円銀河が銀河団に落ち込んできた軌道の推測をすることで来た。そこで、かみのけ座銀河団の ICL の分布を精度良く観測して推測軌道との関連などを調べてみたいと思い始めた。これには、木曾観測所の 2K CCD カメラが最適の装置である。3 月と 4 月の観測で取得したデータの整約中だが、何せ微かな diffuse light の観測であるため、来期も観測を行う予定である。[26]

6.3 機器・ソフトウェア開発

すばる望遠鏡 Suprime-Cam 用グリズムデータ解析ソフトの開発

我々はすばる望遠鏡 Suprime-Cam のほぼ全視野をカバーする低分散グリズムを開発した。このグリズムで得られるデータは汎用の画像解析ソフトでは整約できないため、我々はソフトウェアの開発も行なっている。2008 年度は、多数のスペクトルの生画像を位置合わせ・加算処理して S/N を上げ、画像から 1 次元スペクトルを抽出するという、整約の骨格といえる部分をほぼ作り終えた。また、周囲の天体によるスペクトルの contamination の程度を評価するソフトの開発も並行して進めた。[47, 54]

すばる望遠鏡 MOIRCS 用の VPH グリズムの開発

海老塚昇 (理研), 家正則, 柏川伸成, 丸山美代子 (国立天文台), 内一・勝野由夏 (天文センター), 市川隆 (東北大) との共同研究. MOIRCS はすばる望遠鏡の広視野近赤外撮像分光装置である. 我々は MOIRCS 用に Y バンドグリズムを新たに製作した. このグリズムは $1.0\mu\text{m}$ 付近に感度を持ち, スリット幅 $0.''5$ における波長分解能は $\lambda/\Delta\lambda = 3000$ である. このグリズムは汎用であるが, 我々は特に, $z = 7.3$ 付近の Ly α 輝線銀河の分光同定を計画している. [21]

< 受賞 >

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Adelman-McCarthy, Jennifer K., Agueros, Marcel A., Allam, Sahar S., Allende Prieto, C., Anderson, Kurt S. J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., Bailer-Jones, C. A. L., Baldry, Ivan K., and 153 coauthors including Okamura, S., Shimasaku, K. 2008, “The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey”, *Astrophys. J. Suppl.*, **175**, 297-313.
- [2] Carter, D., Goudfrooij, P., Mobasher, B., Ferguson, Henry C., Puzia, Thomas H., Aguerri, Alfonso L., Balcells, M., Batcheldor, D., Bridges, Terry J., Davies, Jonathan I., and 27 coauthors including Okamura, S. 2008, “The Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Coma Cluster Survey. I. Survey Objectives and Design”, *Astrophys. J. Suppl.*, **176**, 424-437.
- [3] Furusawa, H., Kosugi, G., Akiyama, M., Takata, T., Sekiguchi, K., Tanaka, I., Iwata, I., Kajisawa, M., Yasuda, N., Doi, M., and 26 coauthors including Okamura, S. 2008, “The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). II. Optical Imaging and Photometric Catalogs”, *Astrophys. J. Suppl.*, **176**, 1-18.
- [4] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Tanaka, M., Lee, Hyung M., Im, M., Matsuhara, H., Takagi, T., Wada, T., Oyabu, S. 2008, “Mapping dusty star formation in and around a cluster at $z = 0.81$ by wide-field imaging with AKARI”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **391**, 1758-1770.
- [5] Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Kobayashi, M., Totani, T., Nagashima, M., Morokuma, T., Furusawa, H., Hattori, T., and 3 coauthors 2008, “Reionization and Galaxy Evolution Probed by $z = 7$ Ly α Emitters”, *Astrophys. J.*, **677**, 12-26.
- [6] Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Simpson, C., Saito, T., Ueda, Y., Furusawa, H., Sekiguchi, K., Yamada, T., Kodama, T., and 6 coauthors including Okamura, S. 2008, “The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Ly α Emitters from $z=3.1$ to 5.7 in the 1 deg² Field: Luminosity Functions and AGN”, *Astrophys. J. Suppl.*, **176**, 301-330.
- [7] Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., Yoshida, M., Ueda, Y. 2008, “Deep Spectroscopy of Systematically Surveyed Extended Ly α Sources at $z \sim 3 - 5$ ”, *Astrophys. J.*, **675**, 1076-1094.
- [8] Takagi, T., Ono, Y., Shimasaku, K., Hanami, H. 2008, “A close relationship at $z \sim 2$: submillimetre galaxies and BzK-selected galaxies”, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **389**, 775-786.
- [9] Yoshida, M., Shimasaku, K., Ouchi, M., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Okamura, S. 2008, “The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). VII. Clustering Segregation with Ultraviolet and Optical Luminosities of Lyman Break Galaxies at $z \sim 3$ ”, *Astrophys. J.*, **679**, 269-278.
- [10] Yoshida, M., Yagi, M., Komiyama, Y., Furusawa, H., Kashikawa, N., Koyama, Y., Yamanoi, H., Hattori, T., Okamura, S. 2008, “Strange Filamentary Structures (“Fireballs”) around a Merger Galaxy in the Coma Cluster of Galaxies”, *Astrophys. J.*, **688**, 918-930.
- [11] Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, Y., Katsuno, Kashikawa, N., Yoshida, M., Okamura, S., Ly, C., Malkan, Matthew A. 2009, “Star Formation Rates and Metallicities of K-Selected Star-Forming Galaxies at $z \sim 2$ ”, *Astrophys. J.*, **691**, 140-151.
- [12] Richmond, M. W., Morokuma, T., Doi, M., Komiyama, Y., Yasuda, N., Okamura, S., Gal-Yam, A. 2009, “Proper Motions with Subaru I. Methods and a First Sample in the Subaru Deep Field”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **61**, 97-107.
- [13] Hatsukade, B., Iono, D., Motohara, K., Nakanishi, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Nagao, T., Tamura, Y., Malkan, Matthew A, Ly, C., Kohno, K. 2009, “A Search for Molecular Gas toward a BzK-selected Star-forming Galaxy at $z = 2.044$ ”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press
- [14] Ly, C., Malkan, Matthew A., Treu, T., Woo, Jong-Hak, Currie, T., Hayashi, M., Kashikawa, N., Motohara, K., Shimasaku, K., Yoshida, M. 2009, “Lyman Break Galaxies at $z \sim 1.8 - 2.8$: GALEX/NUV Imaging of the Subaru Deep Field”, *Astrophys. J.*, in press
- [15] Ota, K., Kashikawa, N., Malkan, Matthew A., Iye, M., Nakajima, T., Nagao, T., Shimasaku, K., Gandhi, P. 2009, “Overdensity of i'-Dropout Galaxies in the Subaru Deep Field: A Candidate Protocluster at $z \sim 6$ ”, *Astrophys. J.*, submitted
- [16] Ouchi, M., Ono, Y., Egami, E., Saito, T., Oguri, M., McCarthy, Patrick J., Farrah, D., Kashikawa,

- N., Momcheva, I., Shimasaku, K., and 17 coauthors including Okamura, S. 2009, “Discovery of a Giant Ly α Emitter Near the Reionization Epoch”, *Astrophys. J.*, in press
- [17] Sumiyoshi, M., Totani, T., Oshige, S., Glazebrook, K., Akiyama, M., Morokuma, T., Motohara, K., Shimasaku, K., Hayashi, M., Yoshida, M., and 2 coauthors 2009, “Photometric H α and [O II] Luminosity Function of SDF and SXDF Galaxies: Implications for Future Baryon Oscillation Surveys”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, submitted
- (会議集録)
- [18] Doi, M., Hayano, J., Utsunomiya, H., Ihara, Y., Tokita, K., Takanashi, N., Sako, S., Okamura, S., Morokuma, T., Furusawa, H., and 10 coauthors 2008, “Instruments with Many Dichroic Mirrors and CCDs”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 491.
- [19] Doi, M., Hayano, J., Utsunomiya, H., Ihara, Y., Tokita, K., Sako, S., Okamura, S., Takanashi, N., Morokuma, T., Furusawa, H., and 16 coauthors 2008, “First light of UT 15-band dichroic-mirror camera”, *Proc. of SPIE*, **7014**, 70140F-70140F-12.
- [20] Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, Y. K., Kashikawa, N., Yoshida, M. 2008, “Near-Infrared Spectroscopy of BzK Galaxies with Subaru/MOIRCS”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 282.
- [21] Ichikawa, T., Ichiyama, K., Ebizuka, N., Murata, C., Taniguchi, Y., Okura, T., Harashima, M., Uchimoto, Y., Katsuno, Maruyama, M., Iye, M., Shimasaku, K. 2008, “Cryogenic VPH grisms for MOIRCS”, *Proc. of SPIE*, **7014**, 70141S-70141S-8.
- [22] Iye, M., Kashikawa, N., Furusawa, H., Ota, K., Ouchi, M., Shimasaku, K. 2008, “Suprime-Cam LAE Survey at Redshift 7.3 – Ultimate Limit with New Red-Sensitive CCDs”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 61.
- [23] Koyama, Y., Kodama, T., Tanaka, M., Shimasaku, K., Okamura, S. 2008, “Panoramic and Multi-Wavelength Study of the Distant Cluster RXJ1716 at $z=0.81$ ”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 361.
- [24] Im, M., Lee, H. M., Lee, M. G., Ko, J., Shim, H., Kodama, T., Koyama, Y., Takagi, T., Watarai, H., Matsuhara, H., Wada, T., Oyabu, S., Hanami, H. 2008, “Evolution of Galaxy Clusters from an AKARI Mission Program, CLEVL”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 382.
- [25] Motohara, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Yoshida, M., Kashikawa, N., Kodama, T. 2008, “Deep- and Wide-field K-band Imaging of the Subaru Deep Field: Implications for Galaxy Formation at $z \sim 2^1$ ”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 274.
- [26] Okamura, S. 2008, “Probing the History of Cluster Assembly by Intracluster Planetary Nebulae”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 352.
- [27] Ono, Y., Shimasaku, K., Ouchi, M., Yoshida, M., Akiyama, M., Okamura, S. 2008, “Near Infrared Photometry of Lyman- α Emitters at $z=3.1$ and 3.7 in the Subaru/XMM-Newton Deep Field”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 294.
- [28] Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., Yoshida, M., Ueda, Y. 2008, “Galaxy Formation and Evolution Probed with Lyman- α blobs”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 280.
- [29] Shimasaku, K., Hayashi, M., Motohara, K., Kashikawa, N., Kodama, T., Ouchi, M. 2008, “Dark-Halo Masses, Star Formation Rates, and Stellar Masses of High-Redshift Galaxies”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 75.
- [30] Sumiyoshi, M., Oshige, S., Totani, T., Glazebrook, K., Akiyama, M., Morokuma, T., Motohara, K., Shimasaku, K., Yoshida, M., Hayashi, M., Kashikawa, N., Kodama, T. 2008, “Testing the Target Selection for Future Spectroscopic BAO Surveys by SDF and SXDS Data”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 487.
- [31] Yoshida, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Ouchi, M. 2008, “Dependence of Clustering Strength on Stellar Mass and SFR for LBGs at $z \sim 3$ ”, *ASP Conf. Ser.*, **399**, 276.
- (国内雑誌)
- [32] 岡村定矩 “冥王星型天体の英語名称決まる”, 「科学」, 2008年9月号, 岩波書店.
- [33] 岡村定矩 “新しい太陽系の姿—冥王星を巡る問題—”, 「理科の教育」, 2008年11月号, 東洋館出版.
- [34] 小山佑世 2009: “ひしめきあう銀河の世界”, 「星ナビ」, 100(2009年3月号), 28-29
- [35] 小山佑世 2009: “「すばる」と「あかり」による遠方銀河団の徹底調査”, 「天文月報」, 102(2009年4月号), 260-266.
- [36] 嶋作一大, “宇宙の再電離”, 理学のキーワード, 理学部ニュース 2009年1月号
- (学位論文)
- [37] 小野 宜昭 “Stellar Population Analysis of Lyman Alpha Emitters (修士論文)
- (著書)
- [38] 岡村定矩, 柴橋博資 2008, 「理科年表 2009」(天文部, 分担執筆), 丸善.
- [39] 嶋作一大 訳, 丸善, パリティ, 2008年12月号 (vol. 23, No. 12) 「行方不明のバリオンがついに見つかり始めた」 C. Day

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [40] Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, K. Y., Kashikawa, N., Yoshida, M., Okamura, S., Ly, C., & Malkan, M. A.: “Star Formation Rates and Metallicities of K-selected Star Forming Galaxies at $z \sim 2$ ”, *When the Universe Formed Stars*, Martinique, France, 2008/11/17-24.
- [41] Koyama, Y., Kodama, T., Tanaka, M., Shimasaku, K., Okamura, S., & AKARI CLEVL Team: “Wide-field observation of distant clusters of galaxies”, *Cosmology Near and Far: Science with WFMOS*, Kailua-Kona, USA, 2008/5/19-21.
- [42] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Tanaka, M., & AKARI CLEVL Team: “Star formation in the cluster outskirts at $z \sim 0.8$ ”, *When the Universe formed stars*, Martinique, France, 2008/11/17-21.
- [43] Koyama, Y., Kodama, T., & AKARI CLEVL Team: “Unveiling the hidden star formation activity in and around distant clusters of galaxies with AKARI”, *AKARI, a light to illuminate the misty Universe*, Tokyo, Japan, 2009/2/16-19.
- [44] Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Okamura, S., & Tanaka, M.: “Galaxy Evolution in the Cluster Outskirts at $z \sim 0.8$ ”, *Galaxy Evolution and Environment*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009/3/30-4/3.
- [45] Ono, Y., Shimasaku, K., Yoshida, M. & Okamura, S.: “Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z = 3.1$ and 3.7 in the Subaru/XMM-Newton Deep Field”, *Cosmology Near and Far: Science with WFMOS*, Waikoloa, Hawaii, 2008/5/19-21.
- [46] Ono, Y., Shimasaku, K., Yoshida, M. & Okamura, S.: “Stellar populations of $z = 3.1$ and 3.7 Lyman-Alpha Emitters with $K \sim 23 - 27$ from deep $0.5 - 8 \mu\text{m}$ photometry”, *Understanding Lyman-Alpha Emitters*, Heidelberg, Germany, 2008/10/6-10.
- 招待講演
- (国内会議)
- 一般講演
- [47] 大野貴博: “Suprime-Cam Slitless Spectroscopy of High-Redshift Galaxies”, 2008 年度天文天体物理若手の会夏の学校, つくばグランドホテル, 茨城県つくば市, 2008/7/20.
- [48] 小山佑世: “「あかり」による遠方銀河団の赤外線観測”, 2008 年度天文・天体物理若手夏の学校, つくばグランドホテル, 茨城県つくば市, 2008/7/27-30.
- [49] 小山佑世: “H-alpha 輝線で探る $0.5 < z < 2.0$ 宇宙の正確な星形成活動”, FMOS 戦略枠ワークショップ, 京大宇物, 2008/9/24-25.
- [50] 小山佑世: “銀河団環境におけるダストに隠された星形成活動”, 平成 20 年度「銀河のダスト」研究会, 名大高等研究院, 2009/1/23-24.
- [51] 嶋作一大: “銀河の形成と進化”, 光天連シンポジウム「地上大型望遠鏡計画: 2020 年のための決心」, 国立天文台三鷹, 2008/8/21.
- [52] 嶋作一大: “WFMOS で探る銀河進化”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台三鷹, 2009/1/14.
- [53] 林将央: “FMOS を用いた $z \geq 2$ 星形成銀河の近赤外分光観測”, FMOS 戦略枠ワークショップ, 京都大学, 2008/9/24-25.
- (学会発表)
- 日本天文学会 2008 年秋季年会, 岡山理科大学 (2007/09/11-13)
- [54] 大野貴博, 岡村定矩, 嶋作一大, 小山佑世, 小野宜昭: すばる主焦点カメラ Suprime-Cam 用長波長用グリズムの性能評価, V30a.
- [55] 小野宜昭, 嶋作一大, 吉田真希子, 岡村定矩: $z = 3.1, 3.7$ の Lyman α 輝線銀河の星の種族, X7a.
- [56] 林将央, 本原顕太郎, 嶋作一大, 小野寺仁人 (Yonsei Univ.), 内一・勝野由夏, 柏川伸成 (国立天文台), 岡村定矩, Chun Ly (UCLA), M. A. Malkan (UCLA): $z \sim 2$ における K -selected 星形成銀河の星形成率と金属量, X16a.
- 日本天文学会 2009 年春季年会, 大阪府立大学 (2009/03/24-27)
- [57] 小山佑世, 児玉忠恭 (国立天文台), 嶋作一大, 岡村定矩, 田中脛 (国立天文台), 東谷千比呂 (東北大学), 林将央: 近赤外線狭帯域撮像による RXJ1716 銀河団 ($z = 0.81$) の H α 輝線サーベイ, X28a.
- [58] 林将央, 児玉忠恭 (国立天文台), 小山佑世, 田中脛 (国立天文台), 岡村定矩: [OII] 狭帯域撮像で探る最遠 X 線銀河団 ($z=1.45$) の高い星形成活動性, X29a.
- ・その他
- 招待講演
- [59] 岡村定矩: 「宇宙ってなんだか知っていますか」, 福山市盈進中学校, 2008/11/8.
- [60] 岡村定矩: 「国立天文台と日本の天文学」, 国立天文台創立 20 周年記念講演, 国立天文台, 2008/11/26.
- [61] 岡村定矩: 「太陽系外惑星系 - 第 2 の地球を探して - 」, 東大環境安全研究センターシンポジウム, 東大弥生講堂 2008/12/25.
- [62] 岡村定矩: 「宇宙って何だ?」, サイエンスカフェ日本橋, ギャラリー「宙」 2009/2/28.
- [63] 小山佑世: “銀河のエコロジー”, 「第 46 回 天塾」, 国立天文台三鷹, 2008/4/26.
- [64] 嶋作一大: “銀河はこう進化した”, ぐんま天文台談話会, ぐんま天文台, 2009/3/3.

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))

7.1 衛星によるX線・ γ 線観測

7.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況

○宇宙X線衛星「すざく」と硬X線検出器 (HXD)

2005年7月10日に打ち上げられた宇宙X線衛星「すざく」は、3年目の観測に入り、搭載されたX線CCDカメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) および硬X線検出器 (HXD, Hard X-ray Detector) は、順調に稼働を続けている。HXDは我々がビッグバンセンターおよび物理学教室において、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非撮像装置で、10–600 keVの帯域で世界最高レベルの感度を実現している。本年度も中澤らを中心として衛星の運用を支援し、HXDの運用とその軌道上較正に貢献するとともに [13]、「すざく」データの解析を続けた。

HXDは2 mm厚シリコンPINダイオード (HXD-PIN) で10–70 keVの光子を検出し、それを透過した50–600 keVの光子は、背後に置いたGSO結晶シンチレータ (HXD-GSO) で検出する。北口らは昨年引き続き、HXD-PINバックグラウンドを解析し、宇宙線が大気に突入して作る中性子とその主因であることを示した [38, 13]。中性子はシールドを抜けてHXD-PINに飛び込み、シリコン原子核と衝突して、反跳信号を作り出す。山田らは、HXD-GSOのエネルギー較正を改良し、全世界の「すざく」ユーザー向けに情報を更新する準備を進めた。

○太陽フレアからの中性子

HXD-PINが大気中性子に感度をもつことから、太陽フレアで生じた高エネルギーの中性子が、崩壊せず地球まで到来すると、HXD-PINで検出できる可能性がある。じっさい2006年12月5日に起きたX9.0太陽フレアのさい、太陽ガンマ線をシールドできるはずのHXD-PIN検出器が反応した。北口らはそのデータを詳しく調べた結果、この信号は太陽フレアガンマ線が衛星構体で散乱されたものと思われるものの、いっばんにHXD-PINは、強い太陽フレアに伴う中性子を十分に検出する能力をもつことを、数値シミュレーションなどにより明らかにした [38]。

「すざく」が遭遇した最大のフレアは、2005年9月7日のX17イベントである。あいにく台風で受信

不能となったため、「すざく」では観測できなかったものの、地上中性子モニタがこのフレアから強い中性子信号を受けた。それをもとにHXD-PINのデータをシミュレートした結果が図7.1で、高い有意度で中性子を検出できた可能性が示された。太陽活動の上昇に伴い今後、検出例が期待される。

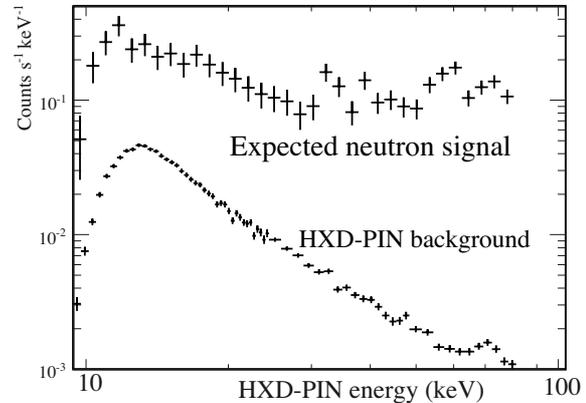


図 7.1: A simulated HXD-PIN spectrum to be produced by energetic neutrons from a large solar flare, compared with the typical HXD-PIN background. The simulation is based on an actual neutron detection by ground-based detectors, achieved during the 2005 September 7 solar flare (Watanabe *et al.* 2007) [38].

○HXD-WAMによる観測

HXDの外周シールド部 (HXD-WAM) を用いた、ガンマ線バーストや太陽フレアの研究も、多くの機関と協力して進めた [14, 27, 28, 85, 114, 117]。

7.1.2 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡

米日伊などの共同で開発された宇宙ガンマ線衛星 *GLAST* (Gamm-ray Large Area Space Telescope) は2008年6月11日、デルタ2ロケットにより、ケープカナベラルから打上げられ、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡と名付けられた [66, 96]。これは20 MeV–300 GeV帯で高感度の全天サーベイを行なう衛星で、日本では広島大(トラッカー用シリコン検出器を製作)、東工大、JAXA/ISASなどが参加している。初期宇宙研究センター(ビッグバン宇宙国際研究センターの前身)設立の立役者の1人である釜江常好名誉教授は、スタンフォード大学にてフェルミプロジェクトに大きな貢献をしており、牧島も準メンバーの立場にある。今年度から、奥村が全面的にフェルミプロジェクトに参加し、スタンフォード大学に滞在しつつ、大気バックグラウンドの推定 [67]、分子雲からの π^0 崩壊ガンマ線 [99, 107, 116]などを研究している。

打ち上げ以来、フェルミは順調に全天サーベイを続け、新しいガンマ線パルサーを続々と発見するなど、画期的な成果を出しつつある [6, 7]。図7.2は、2009年2月に公開された全天のガンマ線マップで、

わずか3ヶ月の観測で、過去の *CGRO/EGRET* の数年分の結果を上回る感度を達成した。

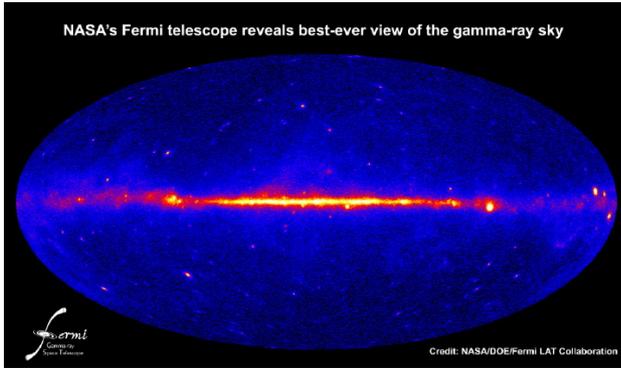


図 7.2: An all-sky gamma-ray (20 MeV - 300 GeV) intensity map in Galactic coordinates, produced by initial 3 months of observations with the *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* launched in June 2008. A bright emission along the Galactic plane is due to decay of π^0 particles, which are generated when cosmic rays collide with interstellar gas. The detected point sources are dominated by pulsars and active galactic nuclei. Credit: NASA/DOE/Fermi LAT collaboration.

7.1.3 質量降着するブラックホール

○ ブラックホール連星

図 7.3 は、これまで「すざく」で観測された、銀河系内のブラックホール連星のスペクトルを、標準天体である「かに星雲」のスペクトルで割って表示したもので、質量降着するブラックホールの研究に、「すざく」の広帯域 (0.2–600 keV) が大きな威力となることを示す [2, 16, 44, 77, 129]。これは降着率により降着物質が、自由落下温度に近い高温 (数十 MeV) から放射冷却の効いた低温 (~ 1 keV) まで、多様な温度を取りうるためである。5 天体のうち、GX 339–4 と GRS 1915+105 は Very High 状態、他の 3 天体は Low/Hard 状態にある。

GX 339–4 の「すざく」データを解析した Miller *et al.* (2008) は、6–7 keV に見られる鉄 K_{α} 線が、相対論的効果で数 keV にわたり広がっていると論じ、よって降着円盤は非回転ブラックホールまわりの最終安定軌道 $3R_S$ (R_S は Schwarzschild 半径) より内側まで存在するので、この天体は極端 Kerr ブラックホールであると結論した。しかし山田らによる注意深い再解析の結果、彼らの結論はスペクトルの連続成分の選び方に強く依存し、また XIS データのパイルアップの補正が不十分なことが判明した [97, 101, 130]。過去の「てんま」や「ぎんが」による High/Soft 状態での観測では、GX 339–4 の円盤の内縁半径は $\sim 3R_S$ と計測されているので、Schwarzschild ブラックホールと考える方が妥当である。

理研の Gandhi らとの共同研究では、GX 339–4 から、きわめて興味ある速い (< 0.1 秒) 可視光の変動を検出した [12]。

山田、牧島らは、昨年度に得た、ブラックホール連星 Cyg X-1 の「すざく」による観測の結果 [2] を深化させた [57, 63, 80, 129, 135]。要点は

1. 降着物質は、平たい低温 (~ 0.2 keV) の円盤と、厚い高温 (~ 100 keV) のコロナから成り、円盤の軟 X 線をコロナが逆コンプトン散乱することで、硬 X 線光子が作られる。
2. 円盤はコロナに半ば侵入するものの、 $3R_S$ まで達せず、その数倍の距離で途切れる。
3. コロナは不均一で、結果として X 線連続成分は、単一のべき関数では表現できない。
4. コロナの密度の時間変化が、硬 X 線の変動を生み出している可能性がある。

の 4 点にまとめられる。

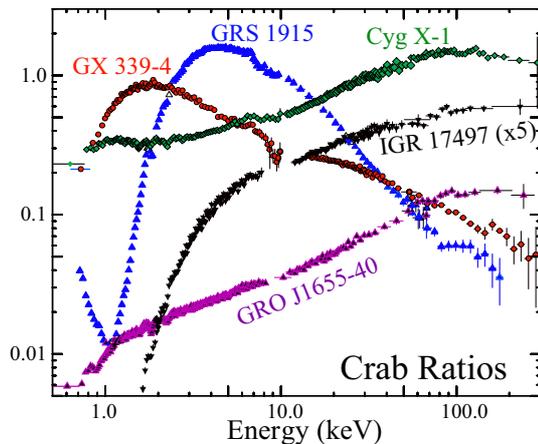


図 7.3: A compilation of *Suzaku* spectra of black-hole binaries, shown normalized to that of the Crab Nebula.

○ ULX 天体

ULX (Ultra-Luminous X-ray source) は、近傍銀河に見られる大光度の X 線点源で、恒星質量ブラックホールと活動銀河核 (AGN) の中間に位置する、「中質量ブラックホール」の有力な候補である。宮脇らはスターバースト銀河 M82 にある明るい ULX (M82 X-1) を、HXD-PIN で ~ 25 keV まで検出し、この天体は少なくとも $100\text{--}200 M_{\odot}$ を持つブラックホールで、スリム円盤状態にあると論じた [18]。

理研の磯部らと協力し、NGC 2403 X-1 を「すざく」で観測した。その結果を *Chandra* 衛星などの結果と比べることで、この天体は $10\text{--}15 M_{\odot}$ のブラックホールが、スリム円盤をもち、Eddington 限界に近い光度で輝いているものと解釈できた [19]。

カリフォルニア大学バークレイ校から、学振 Pre-Doc として Diane Wong が 1 月より研究室に加わり、ULX を可視光で研究している。NGC 6946 にある ULX を Keck 1 望遠鏡で観測した結果、多数の輝線が卓越した 310–936 nm の広帯域スペクトルを得た。ULX を生成した超新星の残骸が、X 線で励起されている可能性があり、励起光度は $\sim 2 \times 10^{39}$ erg s^{-1} に達する。これは ULX が我々に向けてピーミングした天体であるという可能性を棄却し、真に質量が大きいブラックホールであることを支持する。

○ 活動銀河核 (AGN)

銀河の中心にある巨大 ($10^6\text{--}9 M_{\odot}$) ブラックホールにガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。NGC 4258 銀河の中心核は、水メーザーで測定された質量 ($3.6 \times 10^7 M_{\odot}$) から判断すると、Eddington 限界光度より5桁も暗い「低光度 AGN」である。山田、伊藤らはその「すざく」データを解析し、吸収が強いわりには、冷たいガスによるX線の反射成分が弱いので、吸収体は視線上に局在し、AGN に普遍的に存在するとされる分子雲トーラスは、存在しない可能性が高いことを示した [4]。また時間変動を、Cyg X-1 で得た不均一コロナの描像で説明した。

「あすか」衛星の時代から、一部のセイファート銀河では、鉄の K_{α} 線が異常に幅広く、よってそれら AGN は極端 Kerr ブラックホールであると論じられてきた。しかし、ブラックホール直近で発生しているはずの鉄輝線が強度変動を示さない、反射成分が強すぎる、などの観測的な問題が伴っており、その解決には、相対論的な光線の曲がりなど、技巧的な説明が必要となる。上原らは、その代表格といえる MGC-6-30-15 銀河の「すざく」データを、スペクトルと時間変化の両面から詳しく解析した。その結果、従来は反射成分と考えられていた 20–40 keV のスペクトルの盛り上がり、数時間のタイムスケールで連続成分と独立に強度変動することを発見した。その変動成分を抽出したところ、鉄輝線は付随せず、反射と考えより、光学的厚みの大 (~ 10) な熱的コンプトン放射であると考えの方が妥当であることを発見した。時間平均したスペクトルを、この熱的コンプトン成分を含めてフィットすると、図 7.4 のように鉄輝線の広がりも弱まり、Kerr ブラックホールと断じる証拠は薄いと判明した [41, 81, 102]。

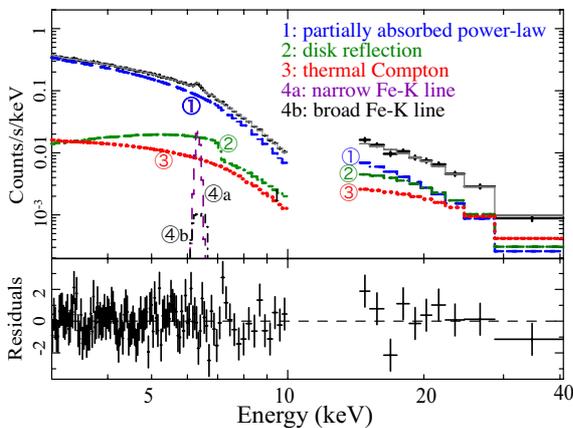


図 7.4: Background-subtracted count spectra of the Seyfert galaxy MGC-6-30-15 obtained with the *Suzaku* XIS (< 10 keV) and HXD-PIN (> 10 keV), fitted simultaneously with a model consisting of 5 components.

7.1.4 強磁場コンパクト天体

○ X線パルサー

降着型パルサーは、中性子星に相手の星からガスが降着することでX線を放射し、それらのX線スペクトル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、中性子星の磁場計測の切り札となる。理研、埼玉大などと協力し、その研究を続行した [56, 103, 104]。

上田、中澤らは昨年度に続き、Her X-1 からのX線が数十分～数時間にわたり、繰り返し不規則に弱まる dip 現象を研究した。その結果、これはパルサーからのX線が光電離した物質により遮られたためと判明した。硬X線がコンプトン散乱で減る様子から、この物質の柱密度は $0.3 \sim 3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ と求められ、XIS スペクトルの変化 (0.7 keV の電離酸素の吸収端など) から、その電離パラメータは $\sim 10 \text{ erg cm s}^{-1}$ 程度と評価された。さらに時間変動などから、この吸収体はパルサーから $1 \times 10^{12} \text{ cm}$ 程度の距離にあると推定された。降着円盤の外縁部が、その候補となる。

○ マグネター天体

銀河系内にあるX線パルサーのうち15個ほどは、連星の証拠をもたず、その放射光度はスピンドウン光度を大幅に越え、時おり激しいバースト活動を示す [21, 88, 127]。よってこれらは、 $10^{14\text{--}15} \text{ G}$ の超強磁場をもつ特殊な中性子星「マグネター」で、磁気エネルギーを消費し輝いていると考えられる。榎戸らは昨年度、その1つ 4U 0142+63 を「すざく」で観測し、図 7.5(下) のように、黒体放射的な軟X成分に加え、HXD-GSO のエネルギー域 ($\sim 300 \text{ keV}$) まで光子指数 ~ 1 で延びる、硬いパルス硬X線を検出することに成功し [64, 79, 61, 62]、先行する *INTEGRAL* の発見をさらに進めた。この成分の起源は不明だが、これほど硬い放射は他の天体には無いので、超強磁場に関連した現象と想像される [77]。

2008 年 8 月 22 日、新しいマグネター SGR 0501+4516 がバースト活動を開始したことが、*Swift* 衛星によって発見され、「すざく」もオランダの N. Rea、榎戸、理研の中川、牧島らの提案で、同 22 日に緊急観測を行った。その成果、32 発の短い (< 1 秒) バーストと明るい定常放射、および 5.76207 秒のパルスを検出することができた [11]。最も強いバーストは 89 Crab もの強度をもつため、HXD は飽和したが、その短い (0.2 秒) プリカーサーは HXD-GSO により 200 keV まで検出され、XIS まで含めた 1–200 keV スペクトルは、温度 3.3 keV と 15 keV の 2 温度黒体放射で良く説明できた [11, 100, 127]。距離 10 kpc にある球対称な放射体を仮定すると、半径は 8 km (低温) と 0.5 km (高温) になり、中性子星の大きさと矛盾しない。通常の中性子星の Eddington 温度 ($\sim 2 \text{ keV}$) を大きく越えるのは、超強磁場の効果と考えられる。図 7.5(中) に示すように、定常放射は 4U 0142+61 と酷似したスペクトルを示す [61, 62]。

幸運にも 2009 年 1 月 21 日、最も速い自転 (2.07 秒) で知られるマグネター 1E1547.0–5408 が急にバースト活動を開始し、最盛時期には「すざく」WAM でも、1 日で 260 発もバーストが検出された。SGR 0501+4516 のときと同様、1 月 28 日から翌日にかけて緊急にポインティング観測を実行し、図 7.5(上) のように、硬軟の 2 成分から成る特徴的なスペクトルを得た。ただし軟X線成分に比べ硬X線成分が強

いなど、3 天体の間に微妙な差もあり、現象を理解する手掛かりになりうる。

こうした進展を踏まえ、牧島、榎戸、理研の中川らは、全国 10 機関の研究者を糾合し、「すざく」第 4 期公募観測 (2009 年度) に「マグネター大研究」を提案した。これは「すざく」キーププロジェクトの 1 つとして採択され、2009 年度に約 470 ksec、2010 年度に 200 ksec の観測が予定されている。

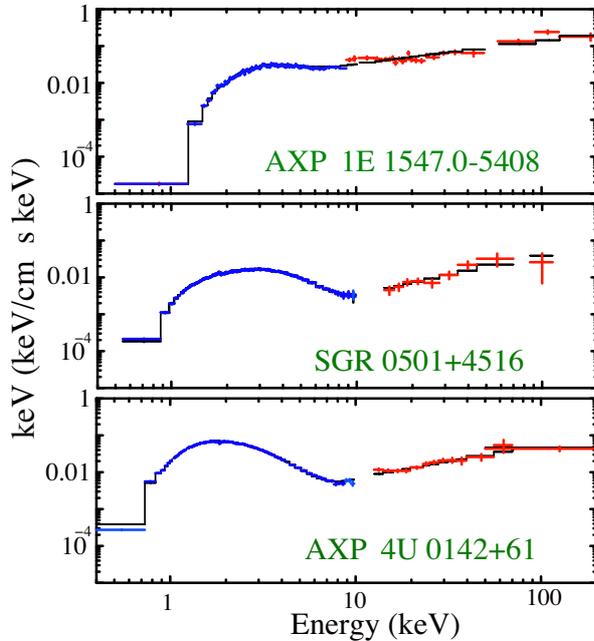


図 7.5: *Suzaku* νF_ν spectra of persistent emission from three magnetars. Red and blue data points represent the results with the XIS and HXD, respectively, while black histograms show the best-fit empirical model. The top two objects were caught during high bursting activities, while the bottom one was observed in quiescence [61, 62].

○ 強磁場の白色わい星

白色わい星の一部は、 10^{6-7} G の強磁場をもつ。昨年度、埼玉大などと協力し、高速自転する強磁場白色わい星 AE Aqr で、粒子加速の徴候を発見し、今年度は論文として出版した [1, 86]。今年度はまた観測例を増やすべく、候補天体を探査した。

7.1.5 星間空間における高エネルギー現象

○ 星間分子雲からの GeV ガンマ線

宇宙では、加速された陽子が標的陽子に衝突するさい π^0 粒子が作られ、その崩壊でエネルギー 70 MeV 以上のガンマ線が生成する。それを検出することは、宇宙線ハドロン成分の分布や生成を光子により知る、ほとんど唯一の方法で、フェルミ衛星の大きな目的の 1 つでもある (図 7.2)。奥村、釜江名誉教授、広島大の水野らは、フェルミの初期データにより、オリ

オン星雲に付随する広がった放射を 0.1–20 GeV の帯域で検出し、宇宙線が分子雲に衝突して生じる π^0 起源のガンマ線と、そのスペクトルが良く一致することを示した。今後はガンマ線の強度から、太陽圏近傍から離れた地点での、宇宙線強度を推定したい。

○ 銀河系に付随するディフューズ X 線放射

湯浅らは昨年度、銀河中心まわりの銀河面から、高温の熱的放射に加え、HXD-PIN 検出器により、光子指数 2~3 の非熱的な広がった放射を検出した。これが星間空間での高エネルギー現象によるディフューズ放射か、多数の点源の集まりなのか、熱い議論が続いている。そこで湯浅を中心に、点源の最有力候補である激変星 (質量降着のある強磁場白色わい星) の広帯域 X 線スペクトルを、「すざく」により系統的に研究している [77]。これらの天体では、降着物質が白色わい星の磁極で衝撃波加熱され、図 7.6 の例に見るように高温 (20–30 keV) の熱的制動放射を出す。さらに鉄イオンからは、高温部分での H-like 輝線 (6.9 keV)、低温部分での He-like 輝線 (6.7 keV)、および白色わい星の表面や降着ガスによる中性蛍光輝線 (6.4 keV)、という 3 本のラインが放射される。今後、こうした白色わい星のスペクトルを集積し、それらの総和で銀河面 X 線放射の硬 X 線成分が説明できるか、検討を進めたい。

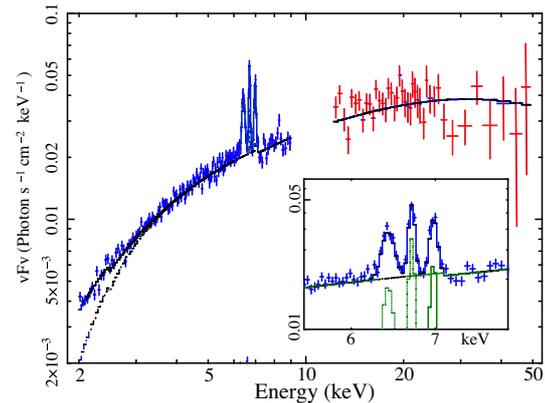


図 7.6: A deconvolved νF_ν spectrum of the cataclysmic variable TV Col obtained with *Suzaku* (crosses), compared with the best-fit Bremsstrahlung plus 3-Gaussian model. The inset shows details of the three Fe-K lines. The color specifications are the same as in Fig. 7.5.

過去に岡田らは、数個の球状星団に付随する広がった X 線放射を *Chandra* 衛星で検出し、球状星団が運動するさいの衝撃波加速の現れと論じた。湯浅らは、その代表である 47 Tuc を「すざく」で観測したところ、XIS スペクトル中に、赤方偏移した電離元素輝線を発見した。よって広がった X 線は、47 Tuc に付随するものではなく、近くに偶然いた赤方偏移 $z = 0.34$ の銀河団からの放射であると結論した。

○ 超新星残骸の観測

理研の玉川、早藤、山口、平賀らが展開している超新星残骸の研究に協力し、チコ・ブラーエの残骸から初めて、弱電離した Cr と Mn の特性 X 線を検出

することに成功した [17, 84]。両者の存在比は、親星の重元素組成の良い指標になると考えられる。ケプラーの超新星残骸からも、これら希少元素が検出されつつある [106]。チコの残骸ではまた、膨張のドップラー効果に起因すると思われる鉄輝線の広がりを検出し [10, 84, 91]、また Fe に比べ Si や S が外側に分布する「玉ねぎ構造」の徴候を得た [89]。

○ 渦巻き銀河の星間ガスの化学組成比

理研の小波らと協力し、「すざく」で観測した渦巻き銀河 NGC 4258 のデータを解析した。HXD 帯域では低光度 AGN の放射が卓越するのに対し、XIS 帯域では、高温 (0.2–0.6 keV) の星間ガスからの熱的放射が強く、O、Mg、Ne、Si、S、Fe などの電離輝線が見られる。それらを解析した結果、この銀河の高温星間ガスの化学組成比は、我々の銀河系での組成比と ~30% 以内で一致することがわかった [5, 92, 108]。

7.1.6 銀河団および銀河群の研究

○ 非熱的硬 X 線の上限と非常に高温な熱的成分の発見

銀河団は、大規模構造の節をなし、周囲の銀河群や銀河団と衝突合体しつつ成長する宇宙最大の天体である。この衝突の過程で、銀河団ガスの加熱と、粒子加速が起きると考えられる。銀河団には Mpc スケールに広がる電波源が付随することがあり、GeV 電子からのシンクロトロン放射と考えられている。同じ GeV 電子は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を、硬 X 線帯域に逆コンプトン散乱 (IC 放射) する。

我々は、広がった硬 X 線放射に高い感度を持つ「すざく」を用いて、この放射を探索している。衝突銀河団 Abell 3667 の観測では、得られた IC 放射の上限から、その電波源中での銀河間磁場の値が $2 \mu\text{G}$ 以上であることを初めて示した [3]。また同様の解析を Abell 2319 に適用し、同じく付随する電波源に対し $> 0.2 \mu\text{G}$ という結果を得た [94]。いずれも過去最高精度の結果であり、とくに前者は、磁気圧がガス圧の 20% 近い値をもつことを意味し、非熱的な圧力が銀河団に与える影響を明確に実測した結果と言える。

Abell 3667 ではまた、温度 13 keV 以上、おそらくは 20 keV に近い、極めて高温の熱的な放射の兆候をとらえた。よってこの衝突銀河団の中では強いプラズマ加熱が起きており、予想以上に速い速度で合体が起きたのか、未知の加熱機構があるのか、興味深い。

○ Weak Lensing 信号の X 線追観測

中澤らは「すばる」により複数の中小規模の weak lens (WL) 信号が検出された、ZwCl0823.2+4250 領域を、「すざく」を用いて観測した。その結果、2 つの強い WL ソースが $z = 0.2$ と $z = 0.4$ の中型の銀河団であること、また、4 つの弱い WL 源のうち 1 つからは弱い信号があり、 $z = 0.4$ の小型銀河団で説明できるが、残る 3 つは X 線で暗い事を確認した。

現在、詳細な上限値の解析中であるが、WL 信号と X 線信号の強度間に有意なばらつきがあれば、宇宙のバリオン比の揺らぎなど、将来の研究につながる可能性がある [113]。

7.1.7 雷雲における静電加速現象の研究

我々は一昨年度より、宇宙での電場加速の手掛かりを得るため、榎戸らを中心に理研と協力し、新潟県柏崎刈羽原子力発電所にて、冬期雷雲からのガンマ線を探索する GROWTH 実験を開始した。その結果、2007 年 1 月と同 12 月に、1 分程度つづく強いガンマ線 (~10 MeV まで) の増大を雷雲から 1 例ずつ検出することに成功し、新しい研究分野を開拓しつつある [43, 69, 124, 58, 133]。

○ 高山での夏季雷雲からのガンマ線と電子

今年度は東大宇宙線研・乗鞍観測所 (標高 2770 m) をベースに、夏季雷雲も研究すべく、同研究所に共同研究を申請し (受入れ所員は瀧田准教授)、榎戸、湯浅、中澤らに 4 年生特別実験の鳥井、福山、山口を加え、小型 BGO シンチレータを製作した。これを観測所の屋内に、また理研の同様な装置を屋外に設置して、2008 年 9 月 4 日に観測を開始したところ、9 月 21 日の深夜、観測所が濃い雷雲 (前線雷) に包まれたさい、理研の装置が 90 秒ほど続く強い放射線の増加をとらえた。NaI とプラスチックシンチゲとも増加を示したので、ガンマ線と電子の両者が到来したことが確実で、ガンマ線は ~10 MeV まで延び、電子の飛程やガンマ線スペクトルから、発生源の距離は ~90 m と推測された [119]。東大の装置は屋内に置いたため、増加は弱かったものの、同期した信号を得た。雷光は検出されず、落雷には同期していないと判断できる。この日はさらに 3 例、短い増加が検出された可能性がある (表 7.1 a)。

○ 日本海側の冬季雷雲からのガンマ線と電子

今年度も榎戸らを中心に新潟県柏崎の刈羽原発で、東大と理研の装置を並べて自動観測を行なった結果、5 例もの放射線バーストをとらえることに成功した。いずれのイベントも雷雲と関連し、東大と理研の装置の両方で検出され、両者のデータはよく一致した。うち 2 例を図 7.7 に示し、乗鞍岳の例および柏崎での過去の 2 例を含めた現時点での全イベントを、表 7.1 a にまとめる。大別すると、短い (<1 秒) イベントと長い (1–2 分) ものと 2 種類あり、前者のみが落雷に同期するようである。ガンマ線のスペクトルはどの例でも、~10 MeV まで延びるので、電子が 20 MeV 程度まで加速されていることは疑いない。ガンマ線に加え電子も検出される場合があり、その場合は発生源の距離が、20 MeV 電子の飛程 (大気中では ~100 m) より近いと考えられる。

○ 雷雲での電子加速のシナリオ

これまでの観測から、雷雲に起因するガンマ線は、以下のような機構で発生すると考えられる。まず雷

表 7.1 a: List of radiation bursts from thunder clouds.

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

*: もしくは高エネルギーのガンマ線。

雲内部で、鉛直方向に強い静電場が発達する。宇宙線などで高エネルギーの種電子が作られると、それらはイオン化でエネルギーを損失するより早く、電場により加速されうる (逃走電子加速)。電子は制動放射を出し、それは相対論的效果により、前方に鋭くビームする。このビームが検出器を掃いた場合に限り、ガンマ線が検出されると考えられる。今後は検出器の台数を増やし、ビームの移動を検出したい。

7.1.8 ASTRO-H 衛星計画およびその先

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は 2013 年度中の打ち上げを目指して開発中の次世代の宇宙 X 線衛星で、長さ 14 m、重さ 2.5 t と日本最大の科学衛星である。この衛星は、「すざく」で稼働しなかった X 線マイクロカロリメータ (SXS) を再び搭載し、0.3–10 keV のエネルギー域で 4–7 eV という世界最高のエネルギー分解能を実現することで、多数の天体のドップラー計測や、高温プラズマの高精度分光を目指す。加えて ASTRO-H は、軟 X 線領域で撮像分光を行なう X 線 CCD カメラ (SXI) 1 台、5–80 keV まで数分角の分解能で撮像分光を行う硬 X 線イメージャ (HXI) 2 台、および 60–600 keV で最高感度の観測を行う軟ガンマ線検出器 (SGD) 2 台を搭載する。我々は JAXA などと共同で、HXI と SGD の開発を進めている。

○ HXI 装置と SGD 装置

HXI と SGD はともに、東大、JAXA、スタンフォード大、広島大、埼玉大などの共同プロジェクトである。両装置は多くの要素技術を共有しており、それらの開発は連携して行なわれている。

HXI は硬 X 線望遠鏡 (名古屋大学が中心となって開発) と組み合わせ、9 分角の視野を 1–2 分角の角分解能で撮像し、1.5 keV よりよい分解能で分光する

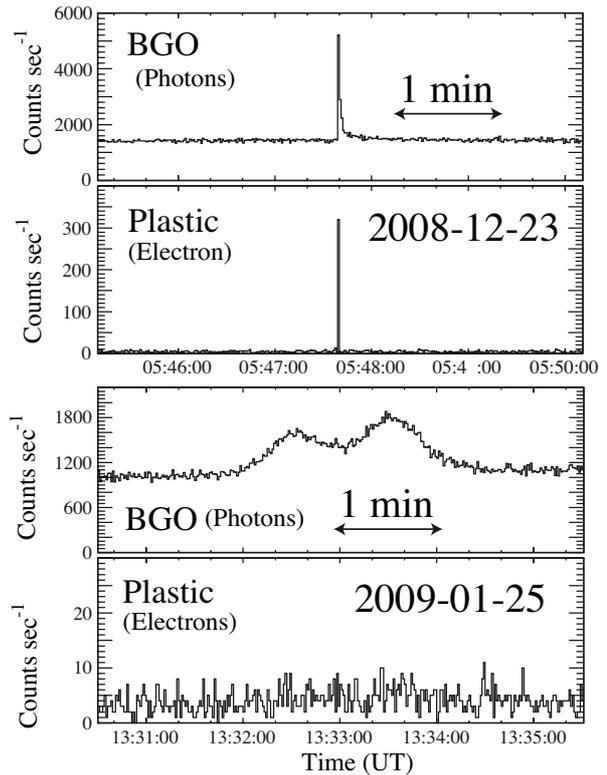


図 7.7: Two examples of radiation bursts detected from winter thunder clouds in Niigata prefecture. The plastic scintillator is mainly sensitive to charged particles and high-energy gamma-rays, while the BGO scintillator can detect low-energy gamma-rays as well.

装置である。「すざく」HXD と比較して、新たに撮像機能が加わり、また硬 X 線望遠鏡で集光が行なわれるため、10–80 keV 帯域で 2 桁もの感度向上が見込まれ、画期的に高い精度の硬 X 線観測を実現する。SXS で天体の運動や衝突を知ると同時に、HXI でその結果としてのプラズマ加熱や粒子加速を探ることができる。図 7.8 のように HXI は、井戸型に組み上げた BGO シンチレータで極低バックグラウンド環境を実現し、そこに両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と両面 CdTe ストリップ検出器 (DS-CdTe) を重ねた主イメージャを置く構造をもつ。

SGD は、ポインティング型の半導体コンプトンカメラという世界初のアイデアにより、60–600 keV までの感度をこれまでより一桁上げる装置で、その原理は 1980 年代、釜江名誉教授らが発案したものである。SGD は多数の巨大ブラックホールや、衝突銀河団からの硬 X 線信号を、数百 keV までとらえることができ、さらに電子・陽電子の対消滅線 (511 keV) の探査も行なう能力をもつ。図 7.8 のように、SGD もまた、井戸型に組み上げた BGO の中に、多層シリコンパッド検出器と CdTe パッド検出器から成る、半導体コンプトンカメラを配置した構造をもつ。

○ 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の開発

奥山らは、多層両面シリコンストリップ検出器

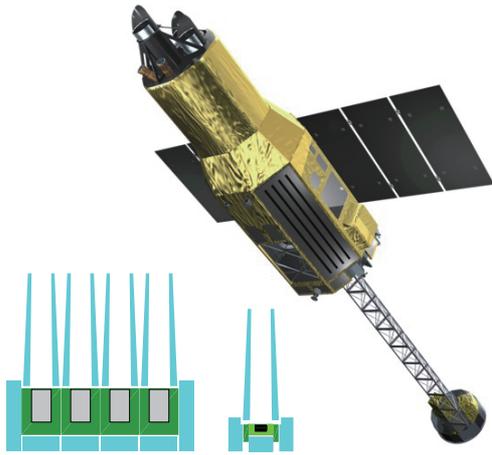


図 7.8: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched into orbit in the FY 2013. The overall length is 14 m, and the weight is 2.5 t. Also plotted are the cross sectional view of the HXI (right: 40 cm tall) and the SGD (left: 50 cm tall).

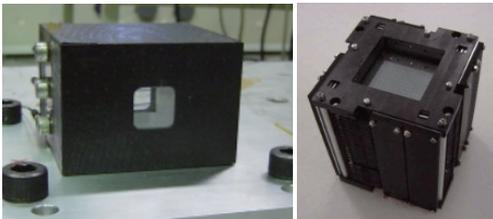


図 7.9: (left) A BGO crystal test model of the HXI and (right) a Compton Camera mechanical model of the SGD, tested for vibration input standard of the H-II rocket.

(DSSD) の読み出しシステムの開発に参加し、特に各層を接続するインターフェースの評価を進めた。HXI でも 4 層を 2 ユニット、SGD では、合計 600 層をも超える段間接続を、簡素なデザインで信頼性高く実現することが課題である。4 段多層 DSSD システムの試験の結果、当初試みた微細なピン等を使った手法で、常温では良好な性能が得られたものの、温度変化に対する雑音特性の変化が抑えられなかった。温度とロケット打ち上げ振動等の環境試験を考慮すると、十分な信頼性を得る事は難しい事が確認され、小型ソケットを用いた開発に全面的に移行することとなった。

○ BGO 結晶シンチレータの耐震構造の開発

上田、中澤らは、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの構造開発を進めた。HXI や SGD では、「すざく」HXD に比べ、内部に収納される主検出器が大きく、「すざく」で用いられた技法で BGO 結晶を支持することは困難である。そこで、CFRP とネジを使った全く新しい概念の固定方法を考案し、CFRP 製造業者と共同で設計と試作を行なった。H2A ロケットでの打ち上げを考慮した振動試験(図 7.9)を実施し、破壊が生じないことを確認した。これにより、HXI/SGD の構造開発の見通しが大き

く開かれた [39]。この結果に基づき、業者と共同で特許を申請中である。

○ 半導体コンプトンカメラの構造開発

JAXA、スタンフォード大、三菱重工などと協力し、HXI と SGD の基本構造の開発を進めている。2008 年度は、全体の機械設計と熱設計の検討を進めた。2009 年の 3 月には、半導体コンプトンカメラのメカニカルモデルに対して、前項と同様の振動試験を実施しており(図 7.9)、機械構造上の目処が確認できた。今後は、熱設計が大きな課題である。

○ 結晶シンチレータの集光効率の研究

奥山らは、光子追跡法に基づく光学シミュレーションを導入することで、無機結晶シンチレータの発光を光検出素子へ効率よく集光する方法を、数値的に設計できる仕組みを立ち上げた。特に BGO 結晶は屈折率が 2.15 と極めて高く、結晶表面で強い全反射が起き、蛍光光子が結晶内部に閉じ込められやすいため、それらをいかに効率よく外へ導くかが大きな課題である。結晶の形状、その表面仕上げ(鏡面か粗面か)、反射材の材質(ゴアテックス、ESR、BaSO₄ 粉など)や巻き方などを変え、実験と比較しつつシミュレーションを進めた結果、高い精度で実験結果を再現できるようになった。たとえば結晶とフォトチューブの接触面は、鏡面より粗面が優れているなど、多くの示唆が得られている。これにより、従来は半経験的に行なわれてきた結晶シンチレータ検出器の設計を、基本原理に基づき進めることが可能となった。

○ 新しい撮像型ガンマ線検出器

奥山らは前項の結果を用いて、500 μm 幅のファイバー状の細い BGO 結晶と、1.5 mm 幅の柱状の BGO 結晶を用いた、新しいガンマ線撮像装置の開発を行った。その結果、優れた位置分解能と、BGO 本来のエネルギー分解能を両立する、新しい蛍光読み出し方法を案出することに成功した。ただし特許申請の都合上、詳細の記述は差し控える。

○ スペースワイヤ (SpaceWire) の開発

SpaceWire は次世代のシリアル通信規格の 1 つである。通信速度が可変、ロジックがコンパクトで、リモートノードのバスに直接アクセスする機能(RMAP 機能)が、下位のレイヤーに実装されており、通信経路を柔軟に変更できるなどの特徴を持つ。そのため、低消費電力が不可欠で、後から発生した故障が修理ができないという、衛星に特有な条件にも適合しており、衛星内の通信規格として極めて有力である。じっさい日米欧の科学衛星の標準規格として、次世代衛星に多く採用されつつある。

湯浅らは、このデジタル技術の開発を中心となって進めてきた。今年度は、8 ノードのネットワーク型システムを試作し、一部の接続が切れた時に迂回経路を探して自動的に再接続する機能を確認した。奈良で開かれた SpaceWire 国際会議において実際に展示し [60]、その場で接続の切断、自動復帰のデモンストレーションを行うなど、その信頼性の高さには大きな反響があった。また時刻付けのための Time

Code という仕様を取り込み、仕様通り $3 \mu\text{s}$ の精度でリモートノードを絶対時刻付けできることを実証した [65]。

7.1.9 小型衛星計画への参加

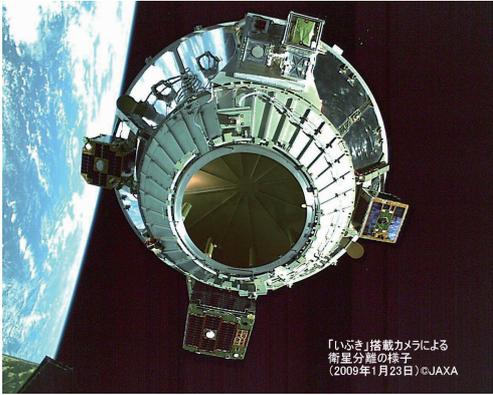


図 7.10: Small satellites launched at 23 Jan 2009, photo by Ibuki satellite. SDS-1 is located to the bottom, and Rising is to the right. Credit JAXA.

○ 技術実証衛星 1 号機 SDS-1 における重力波検出器

湯浅、中澤らは、坪野研や JAXA と共同で、JAXA の小型技術実証衛星 SDS-1 に搭載される、SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) 実験に参加した。SWIM は、SpaceWire に基づくシステムの実証とともに、小型重力波検出器の軌道上での動作実証も兼ねている。

SDS-1 衛星は 2009 年 1 月 23 日に H2A ロケット 15 号機により、地球観測衛星「いぶき」のピギーバック衛星の 1 つとして打ち上げられ、以後、順調に運用を続けている。SWIM は湯浅立ち会いのもと、2 月 10 日に立ち上げられ、SpaceWire 通信まわりの試験を実施し、各機器が完璧に動作している事を確認した。これは日本で初めて、SpaceWire に基づく衛星搭載機器の動作が宇宙空間で実証されたことを意味し、ASTRO-H などへの応用の道が開かれた。SDS-1/SWIM は現在も運用され、重力波アンテナの運用などを実施中である [71, 122]。

○ 雷観測衛星 Sprite における雷雲ガンマ線検出器

榎戸、上田、中澤らは、JAXA との協力の下で、東北大学の主宰する SPRITE-Sat 衛星計画 (現名 Rising 衛星) に参加し、その搭載装置の 1 つとして、雷からの突発的なガンマ線を宇宙から検出す TGC 装置 (Terrestrial Gamma-ray Counter) の開発を進めてきた [68]。同衛星は前項の SDS-1 衛星とともに「いぶき」衛星のピギーバックとして打ち上げられた。宇宙空間で、姿勢の決定、消費電力の調整など行いつつ運用してきたが、2 月 4 日に、姿勢安定のためのマストを進展したところ、電力不足に陥り、上空からのデータを受信できなくなり、6 月 15 日現在、復旧していない。幸い衛星の通信機そのも

のは生きており、東北大を中心に復旧への努力が続けられている。

TGC 装置は、重さ 1 kg、電力 0.7 W というコンパクトな装置で、CsI 結晶をアバランシェフォトダイオード (APD) で読み出すことで、雷に伴う数 ms という短いガンマ線パルスの検知を狙っている。APD による読み出しは、ASTRO-H 衛星でも鍵となる要素技術の 1 つであるため、TGC 開発は重要な経験となった。

○ 小型ガンマ線衛星 CAST 計画

中澤らを中心に、次世代の MeV ガンマ線全天観測を目的として、半導体コンプトンカメラに基づく小型衛星 CAST (Compton All Sky Telescope) 計画の検討を進めている。検出器技術は ASTRO-H の SGD 検出器を基本に、600 keV までだった帯域を 2 MeV 以上にまで広げ、ポインティング方向だけを観測する方法から、広い視野を見る方向へ変更するなど、設計変更を導入する。2009 年の 3 月には、日欧米の関係者をほぼ一同に集めたワークショップを JAXA にて開催し、MeV ガンマ線帯域に隠される多くのサイエンスについて議論を行なうとともに、ガンマ線レンズとの組み合わせ感度の大幅向上を図るなどのアイデアを検討した。

7.2 気球による反物質探査

7.2.1 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着目しつつ、継続的に推進している。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、研究を推進している。太陽活動極小期にあたる 2006 年度、南極周回気球による長時間宇宙線観測実験 (第 2 回) を実現し、南極周回軌道、高度 34 38 km において、24.5 日間に亘る観測に成功、周回軌道一周半の飛翔観測後、南極点から約 1,000 km の高雪原に着地した。観測データは無事に回収され、解析が進められている。実データサイズは、第 1 回観測 (2004 年) の 6.2 倍となる 13.5 TB に達し、宇宙線観測イベントは、5 倍を上回る 47 億イベントに達した。BESS-Polar II 実験のまとめを表 7.2 b に示す。

2008 年度は、BESS-Polar I (2004 年南極周回観測) における科学観測結果をまとめ公表するとともに、BESS-Polar II 実験のデータ解析を進めた。BESS-Polar 実験では、2007–2008 にかけての太陽活動極小期に、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大きな焦点となる。

表 7.2 b: BESS-Polar II 気球飛翔実験のまとめ

	Polar I	Polar II
観測時間 (日)	8.5	24.5
飛翔高度 (km)	37-39	34-38
残留大気 (g/cm ²)	4-5	4.5-8
データサイズ (TB)	2.1	13.5
観測事象数 (10 ⁹)	0.9	4.7
トリガー頻度 (kHz)	1.4	3.4
Live-Time Fraction	0.8	0.77

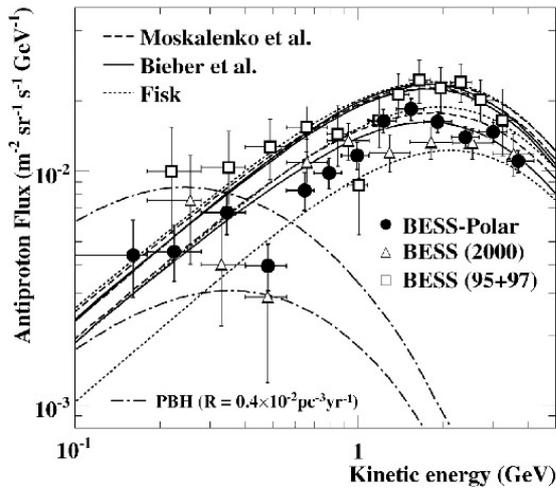


図 7.11: Antiproton flux observed in the BESS-Polar I experiment, compared with the previous flights around solar minimum (95+97) and maximum (2000).

7.2.2 BESS-Polar I 観測結果

BESS-Polar 第 1 回観測 (BESS-Polar I, 2004) では、観測時間が 8.5 日、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、最終的には 0.1-4.2 GeV の範囲で 1520 イベントの反陽子流束を検出した。それまでのカナダ北部での BESS 実験における 1 フライトデータの約 4 倍に相当し、統計精度が大幅に向上した。また BESS-Polar 実験から導入した中間飛行時間カウンター (MTOF) を活用した解析によって、エネルギースペクトル範囲を 0.1 GeV まで広げることができた。2008 年度には、データ解析の最終結果をまとめ公表した [26]。図 7.11 に BESS-Polar 実験によって得られた反陽子スペクトルを示すとともに、前回の太陽活動極小期 (BESS95+97) の観測値、理論的予想値との比較を示す。表 7.2 c には、BESS 実験でこれまでに、観測された低エネルギー宇宙線反陽子流束の進展を示す。BESS-Polar-I は太陽活動の過渡期であり、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との予想と整合する。この結果は、太陽活動極小期の BESS-Polar-II (2007-2008 年) における観測結果と比較される重要な基準データとなる。

7.2.3 BESS-Polar II のデータ解析

BESS-Polar II 実験は、2007 年 12 月 23 日、打ち上げに成功した。観測器のチューニングを経て 2 日後から、高度 34-38km での定常観測状態となり、南極周回軌道を 1 周半、24.5 日の科学観測に成功した。観測時間は、前回の約 3 倍に達し、観測データサイズでは、6 倍以上の 13.5TB、宇宙線観測事象では、5 倍以上に相当する約 47 億事象の観測に成功した。この間、超伝導スペクトロメータは、一部粒子検出器の高電圧電源の不安定性が発生したものの、基本性能を保持し、観測立体角を維持して、連続観測に成功した。2007 年度の測定器としての基本解析、キャリアプレーションの成功に続き、2008 年度には、さらにデータ解析がすすみ、観測器全体のキャリアプレーションに成功するとともに、反陽子粒子束の決定にむけた解析の詰め作業が進められた。粒子束を決定する重要なプロセスとなる、粒子識別結果を図 7.12 に示す。

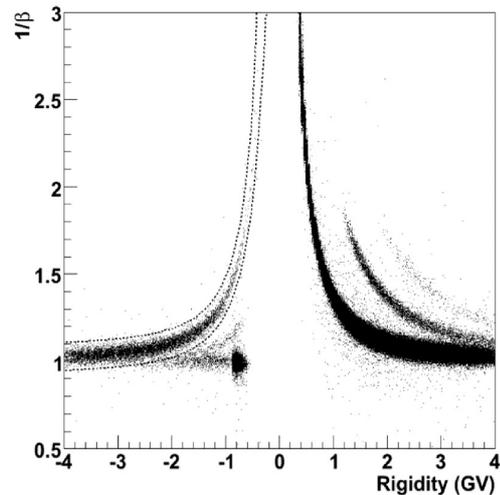


図 7.12: -1 v.s. Rigidity plot and antiproton selection band, obtained in the BESS-Polar II experiment.

7.2.4 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力実験として 1993 年に第一回観測を実現して以来、15 年の間に、南極での観測 2 回を含み、合計 11 回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。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、太陽活動による宇宙線流束が受ける変動を観測し続けてきた。2007 年度の第 2 回南極周回気球実験では、南極周回軌道、高度 34-38km において 24.5 日間に亘る観測を実現し、宇宙線観測総数は 47 億イベント

に達している。2008 年度には、全観測データの解析が進み、太陽活動極小期における反陽子粒束の決定にむけた解析が詰めの段階にまで至った。BESS 超伝導スペクトロメータ大立体角による精密観測、南極周回長時間観測、太陽活動極小期観測を重ね合わせることで、かつてない統計精度で、宇宙起源反粒子の存在を探りつつある。

表 7.2 c: BESS 実験における低エネルギー反陽子検出数

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

Observation at solar minimum

<【報文】>

(原著論文)

- [1] Terada, Y., Hayashi, T., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Okada, S., Nakamura, R., Naik, S., Bamba, A., & Makishima, K.: “Suzaku Discovery of Hard X-ray Pulsations from AE Aquarii”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, 387-397 (2008)
- [2] Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamoto, S., Negoro, H., (2 名): “Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, 585-604 (2008)
- [3] Nakazawa, K., Sarazin, C. L., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Okuyama, S., & Makishima, K., (7 名): “Hard X-ray Properties of the Merging Cluster Abell 3667 as Observed with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, in press (2009)
- [4] Yamada, S., Itoh T., Makishima K., & Nakazawa K.: “Suzaku Results on the Obscured Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, in press (2009)
- [5] Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T., & Makishima K.: “Suzaku Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, in press (2009)

- [6] Abdo, A.A., (118 名), Okumura, A., (65 名): “The Fermi Gamma-Ray Space Telescope Discovers the Pulsar in the Young Galactic Supernova Remnant CTA 1”, *Science*, **322**, 1218-1221 (2009)
 - [7] Abdo, A. A., Ackermann, M., (167 名), Okumura, A., (84 名): “Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C”, *Science*, **323**, 1688-1693 (2009)
 - [8] Tanaka, T., Uchiyama, Y., Aharonian, F. A., Takahashi, T., Bamba, A., Hiraga, J. S., Kataoka, J., Kishishita, T., Kokubun, M., Mori, K., Nakazawa, K., (3 名): “Study of Nonthermal Emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku”, *Astrophys. J.* **685**, 988-1004 (2008)
 - [9] Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Nakazawa, K., Matsushita, K., & Fukazawa, Y.: “A Galaxy Merger Scenario for the NGC 1550 Galaxy from Metal Distributions in the X-Ray Emitting Plasma”, *Astrophys. J.* **691**, 971-983 (2009)
 - [10] Furuzawa, A., Ueno, D., Hayato, A., Ozawa, M., Tamagawa, T., Bamba, A., Hughes, J., Kunieda, H., Makishima, K., (7 名): “Doppler-Broadened Iron X-Ray Lines From Tycho’s Supernova Remnant”, *Astrophys. J.* **693**, L61-L65 (2009)
 - [11] Enoto, T., (7 名), Makishima, K., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Sakamoto, T., Stella, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., (3 名): “Suzaku Observation of the New Soft Gamma Repeater SGR 0501+4516 in Outburst”, *Astrophys. J.* **693**, L122-L126 (2009)
 - [12] Gandhi, P., Makishima, K., Durant, M., Fabian, A. C., (5 名): “Rapid optical and X-ray timing observations of GX 339-4: flux correlations at the onset of a low/hard state”, *Mon. Not. Roy. Astro. Soc.* **390**, L29-L33 (2008)
- Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 「すざく」第3特集号
- [13] Fukazawa, Y., Mizuno, T., Watanabe, S., Kokubun, M., (13 名) Enoto, T., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uehara, Y., Yamada, S., Yuasa, T., (6 名): “Modeling Reproducibility of Suzaku HXD PIN/GSO Background”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 17-33 (2009)
 - [14] Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., (9 名), Makishima, K., Miyawaki, R., Morigami, K., Murakami, T., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., (23 名) “Design and In-Orbit Performance of the Suzaku Wide-Band All-Sky Monitor”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 35-53 (2009)
 - [15] Hyodo, Y., Ueda, Y., Yuasa, T., Maeda, Y., Makishima, K., & Koyama, K.: “Timing and Spectral Study of AXJ1745.6-2901 with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 99-106 (2009)
 - [16] Paizis, A., Ebisawa, K., Takahashi, H., (6 名), Yamada, S., Yamaoka, K., & Yuasa, T.: “Broad-Band Spectrum of the Black Hole Candidate

- IGRJ17497-2821 Studied with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 107-113 (2009)
- [17] Tamagawa, T., Hayato, A., Nakamura, S., Terada, Y., (17 名), Makishima, K.: “Suzaku Observations of Tycho’s Supernova Remnant”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 167-174 (2009)
- [18] Miyawaki, R., Makishima, K., Yamada, S., Gandhi, P., Mizuno, T., Kubota, A., Tsuru, T. G., & Matsumoto, H.: “Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 263-278 (2009)
- [19] Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Mizuno, T., Miyawaki, R., Gandhi, P., Kawaharada, M., Senda, A., Yoshida, T., Kubota, A., & Kobori, H.: “Spectral Transitions of an Ultraluminous X-Ray Source, NGC 2403 Source 3”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 279-289 (2009)
- [20] Kawano, N., Fukazawa, Y., Nishino, S., Nakazawa, K., Kitaguchi, T., Makishima, K., (7 名): “Constraint of Non-Thermal X-Ray Emission from the On-Going Merger Cluster Abell 3376 with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 377-386 (2009)
- [21] Nakagawa, Y. E., Mihara, T., Yoshida, A., Yamaoka, K., Sugita, S., Murakami, T., Yonetoku, D., Suzuki, M., Nakajima, M., Tashiro, M. S., & Nakazawa, K.: “Suzaku Observations of SGR1900+14 and SGR1806-20”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 387-393 (2009)
- [22] A. Yamamoto, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, K.C. 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.* **42**, (2008) 442-449
- [23] 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.* **42**, 1664-1669 (2008)
- [24] M. Sasaki, S. Haino, K. Abe, H. Fuke, T. Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, K.C. 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: Progress with BESS”, *Adv. Space Res.* **42**, 50 (2008)
- [25] H. Fuke, Y. Tasaki, 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. Tanaksa, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “Search for fractionally charged particles in cosmic rays with BESS spectrometer”, *Adv. Space Res.* **41**, 2050 (2008)
- [26] K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, A. Itazaki, K.C. Kim, T. Kumazawa, M.H. Lee, Y. Makida, S. Matsuda, K. Matsumoto, J.W. Mitchell, A.A. Moiseev, Z. Myers, J. Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, J.F. Ormes, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R.E. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Takeuchi, K. Tanaka, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “Measurement of cosmic-ray low-energy antiproton spectrum with the first BESS-Polar Antarctic flight”, *Physics Letters B* **670**, 103-108 (2008)
- (会議収録)
- [27] Ohno, M., Uehara, T., Takahashi, T., Fukazawa, (14 名), Enoto, T., Miyawaki, R., Nakazawa, K., Makishima, K., (11 名): “The spectral properties of the GRB prompt gamma-ray emission observed by the Suzaku Wide-band All-sky Monitor”, *Gamma-Ray Bursts 2007* (AIP Conf. Proc.) **1000**, 101-104 (2008)
- [28] Tashiro, M. S., Terada, Y., Urata, Y., Onda, K., (13 名), Enoto, T., Miyawaki, R., Nakazawa, K., Makishima, K., (11 名): “Status of GRB Observations with the Suzaku Wideband All-sky Monitor”, *Gamma-Ray Bursts 2007* (AIP Conf. Proc.) **1000**, 162-165 (2008)
- [29] Kunieda, H., Takahashi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., & Ogasaka, Y.: “Hard x-ray imaging system for XEUS”, *SPIE* **7011** 70110D (2008)
- [30] Takahashi, T., Kelley, R., Mitsuda, K., Kunieda, H., (9 名), M. Makishima, K., Koyama, K., Madejski, G. M., Mori, K., Mushotzky, R., Nakazawa, K., (11 名): “The NeXT Mission”, *SPIE* **7011** 70110O (2008)
- [31] Kokubun, M., Nakazawa, K., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Kataoka, J., Katagiri, H., Mizuno, T., Makishima, K., (22 名), Kitaguchi, T., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Ueda, T., Uehara, Y., Okuyama, S., (14 名): “Hard X-ray imager (HXI) for the NeXT mission”, *SPIE* **7011** 70110R (2008)
- [32] Tamagawa, T., Hayato, A., Abe, K., Iwamoto, S., Nakamura, S., Harayama, A., Iwahashi, T., Makishima, K., Hamagaki, H., & Yamaguchi, Y. L.: “Gain properties of gas electron multipliers (GEMS) for space applications”, *SPIE* **7011** 70113V (2008)
- [33] Hayato, A., Tamagawa, T., Abe, K., Nakamura, S., Takanori, I., Harayama, A., Makishima, K., Yasuda, N., Kitamura, H., Sakurai, H., & Tokanai,

- F.: “Heavy ion irradiation test to gas electron multipliers”, *SPIE* **7011** 70113W (2008)
- [34] Aono, H., Takeda, S., Ishikawa, S., Odaka, H., Kokubun, M., Watanabe, S., Takahashi, T., Nakazawa, K., (4名): “Application of double-sided silicon strip detectors to Compton cameras”, *SPIE* **7021** 70211G (2008)
- [35] M. Hasegawa for the BESS Collaboration, “BESS Polar-II Experiment: 2007-2008 Scientific Flight in Antarctica”, *The 28th International Symposium on Space Technology and Science* (2008)
- [36] A. Yamamoto for the BESS Collaboration: “BESS-Polar: Search for cosmic-ray antiparticles of primary origins”, *Proc. 3rd Int. Workshop Comprehensive study of the high energy universe (VHEPA-3)*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77 Suppl. B**, 45–48 (2008)
- [37] K. Yoshimura, A. Yamamoto *et al.*: “BESS-Polar Experiment – Progress and Future Prospect-”, *Proc. Int. Workshop Advances in Cosmic Ray Science*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78 Suppl. A**, pp. 29–34 (2009)
- (学位論文)
- [38] Kitaguchi, Takao: “*Suzaku* Studies of Energetic Neutrons from a Solar Flare and the Atmosphere”, 博士学位論文
- [39] 上田剛:「次期宇宙X線衛星 ASTRO-H に搭載する硬X線・軟ガンマ線検出器の機構開発」, 修士学位論文
- [40] 奥山翔:「宇宙ガンマ線イメージャに向けた高屈折率結晶シンチレータの蛍光収集法の開発」, 同上
- [41] 上原悠一:「『すざく』による活動銀河核からの鉄輝線と広帯域連続 X 線の研究」, 同上 (天文学専攻)
- (国内雑誌)
- [42] 牧島一夫:「宇宙におけるプラズマ現象と長距離相互作用」, 日本物理学会誌、2008年8月号、595
- [43] 榎戸輝揚, 土屋晴文:「雷雲は天然の粒子加速器か?」, 天文月報 (日本天文学会)、2008年11月号、667-676
- <【学術講演】>
- (国際会議)
- 招待講演
- [44] Makishima, K.: “*Suzaku* Observations of Black-Hole Binaries and ULXs”, *Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations* (2008年6月10日、理化学研究所和光キャンパス)
- [45] M. Hasegawa for the BESS Collaboration: “BESS Polar-II Experiment: 2007-2008 Scientific Flight in Antarctica”, *The 28th International Symposium on Space Technology and Science* (2008).
- [46] J. Mitchell for the BESS Collaboration: “The BESS investigation of the origin of cosmic-ray antiprotons and search for cosmological antimatter”, *The 37th COSPAR Scientific Assembly*, Montreal (2008).
- [47] M. Sasaki for the BESS Collaboration: “The BESS-Polar II long duration flight above Antarctica”, *The 37th COSPAR Scientific Assembly*, Montreal (2008).
- [48] A. Yamamoto for the BESS Collaboration: “Search for antiparticle in cosmic rays with BESS”, *The 6th RESCEU symposium*, University of Tokyo (2008).
- [49] K. Sakai and A. Yamamoto: “Antiproton observation by the BESS Polar Experiment” *International Workshop on Cosmic Rays*, Waseda University, Tokyo (2008).
- The 37th COSPAR Scientific Assembly*, Montreal (2008)、一般講演
- [50] M. Hasegawa *et al.*: “Solar-cell power system for the BESS Polar experiment ”
- [51] T. Hams *et al.*: “Performance of the BESS-Polar II Time-of-Flight counter ”
- [52] A. Horikoshi *et al.*: “Development of a thin scintillator-array Time-of-Flight hodoscope with fiber bundle readout onboard BESS-Polar II ”
- [53] K. Sakai *et al.*: “Flight performance of BESS-Polar II Aerogel Cherenkov counter ”
- [54] K. C. Kim *et al.*: “The cosmic ray 2H/1H and 3He/4He ratios measured from BESS in 2000 solar maximum ”
- [55] R. Orito *et al.*: “Data acquisition system for the BESS-Polar experiment ”
- その他の一般講演
- [56] Makishima, K., Enoto, T., Mihara, T., Nakajima, M., Nakazawa, K., & Terada, Y.: “Recent *Suzaku* Results on Strongly Magnetized Neutron Stars”, *The X-ray Universe 2008* (2008年5月27~30日, Granada)
- [57] Yamada, S., Makishima, K., Takahashi, H., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., & Nakazawa, K.: “New observational insights into the Low/Hard state of Cyg X-1 with *Suzaku*”, *The X-ray Universe 2008* (2008年5月27~30日, Granada)
- [58] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yuasa, T., Yamada, S., Kato, H., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Okano, M., Nakamura, S., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “Observations of high-energy gamma rays from winter thunderclouds”, *International Congress on Plasma Physics 2008*, (2008年9月8~12日, 福岡)
- [59] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., (7名): “A simple super-resolution algorithm based on cross-correlation for sparsely sampled pulse waveforms”, *IEEE Nuclear Science Symposium*, (2008年10月19~25日, Dresden)

- [60] Yuasa, T., Kokuyama, W., Makishima, K., Nakazawa, K., (5名): “A Portable SpaceWire/RMAP Class Library for Scientific Detector Read Out Systems”, *International SpaceWire Conference*, (2008年11月4~6日, 奈良)
- [61] Enoto, T.: “Suzaku observations of SGR 0501+4516 and AXP 4U 0142+61”, *Thirty Years of Magnetars: New Frontier* (2009年2月1~8日, Aspen)
- [62] Enoto, T., Nakagawa, Y., Rea, N., Makishima, K., Esposito, P., Hurley, K., Yamada, S., Nakazawa, K., & Yamaoka, K., “Suzaku observations on hard X-rays of SGRs and AXPs”, *Neutron Stars & Gamma Ray Bursts 2009*, (2009年3月30日~4月4日, Alexandria, Egypt)
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋季大会 (2008年9月20~23日, 山形大学)
- [63] 牧島一夫, 山田真也, 高橋弘充, 久保田あや, 堂谷忠靖, 海老沢研, 北本俊二, 根来均, 上田佳宏, 山岡和貴: 「『すざく』衛星による Low-Hard 状態における Cyg X-1 の観測 (II)」_J, 22pSH-6
- [64] 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 国分紀秀, 川原田円, 柴崎徳明, 古徳純一: 「『すざく』衛星による AXP 4U 0142+61 の硬 X 線放射の観測」_J, 22pSH-8
- [65] 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 高橋忠幸, 能町正治, 高島健, 国分紀秀, 小高裕和, 萩原利土成, 安東正樹, 石徹白晃治, 穀山渉, 高橋弘充: 「NeXT 衛星等に向けた SpaceWire I/F の開発」_J, 22pSH-9
- [66] 深沢泰司, 大杉節, 水野恒史, 片桐秀明, 高橋弘充, 奥村暁, 牧島一夫, (16名): 「GeV ガンマ線観測衛星 GLAST の初期ステータス」_J, 23aSH-1
- [67] 奥村暁, 牧島一夫, 水野恒史, 片桐秀明, 河合誠之, 金井義和, 本田守弘, 釜江常好, Markus Ackermann, Seth Digel, Stefan Funk, 他 GLAST チーム: 「GLAST 軌道における宇宙線バックグラウンドの評価」_J, 23aSH-2
- [68] 上田剛, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 三谷烈史, 高島健, 坂野井健, 氏家恵理子, 笠羽康正, 吉田和哉, 高橋幸弘, 森國城, 牧島一夫: 「小型衛星による雷ガンマ線検出をめざした地球起源ガンマ線カウンターの開発」_J, 23aSH-9
- [69] 土屋晴文, 榎戸輝揚, 山田真也, 湯浅孝行, 川原田円, 北口貴雄, 国分紀秀, 加藤博, 岡野眞治, 中村聡史, 牧島一夫: 「2007 年中における冬季雷雲からのガンマ線観測」_J, 23aSH-12
- [70] 西野翔, 深沢泰司, 林克洋, 中澤知洋, 田中孝明: 「『すざく』衛星による Perseus 銀河団の温度構造解析」_J, 22pSH-7
- [71] 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, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, (9名): 「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 VI (衛星への搭載)」_J, 22pSG-6
- [72] 坂井賢一、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II 実験、反陽子流束解析報告 (1)」_J, No. 2610
大気球シンポジウム (2008年9月, JAXA 宇宙科学研究本部)
- [73] 坂井賢一、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II 測定器」
- [74] 佐々木誠、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II」
- [75] 槇田康博、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II マグネット性能」
- [76] 楠本彬、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II : データ収集システム」
日本天文学会・秋の年会 (2007年9月11~13日, 岡山理科大学)
- [77] 牧島一夫: 「『すざく』による銀河系内コンパクト天体の観測結果ハイライト」_J, B02a
- [78] 中澤知洋, 川原田円, 北口貴雄, 奥山翔, 滝沢元和, 井上進, 深沢泰司, 松下恭子, 佐藤拓也, Craig Sarazin, Daniel R. Wik, Alexis Finoguenov, 牧島一夫: 「『すざく』が見た衝突銀河団の硬 X 線スペクトルとその磁場」_J, B22a
- [79] 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 国分紀秀, 川原田円, 柴崎徳明, 古徳純一: 「Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 の非熱的な硬 X 線パルス放射の観測」_J, J46a
- [80] 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋, 久保田あや, 高橋弘充, 堂谷忠靖, 海老沢研, 北本俊二, 山岡和貴, 「すざく」Cyg X-1 GRO J1655-40 解析チーム: 「『すざく』が切り開いたハード状態におけるブラックホールの新しい描像」_J, B03a
- [81] 上原悠一, 中澤知洋, 山田真也, 牧島一夫: 「X 線衛星『すざく』を用いた MCG-6-30-15 の広帯域スペクトルの解析」_J, S07a
- [82] 奥山翔, 中澤知洋, 湯浅孝行, 北口貴雄, 牧島一夫: 「ファイバーシンチレータと SSD を用いた線撮像検出器の開発」_J, W46a
- [83] 高橋弘充, 白井裕久, 永江修, 深沢泰司, 北口貴雄, 牧島一夫: 「『すざく』で観測したエディントン限界に近い低質量 X 線連星系の質量降着流」_J, B04a
- [84] 玉川徹, 早藤麻美, 平賀純子, 馬場彩, 寺田幸功, 牧島一夫, 國枝秀世, 古澤彰浩, 上野大輔, 小澤碧, Jack Hughes, Una Hwang, ほか Suzaku Tycho チーム: 「『すざく』による Tycho 超新星残骸の観測 - 粒子加速から元素合成まで」_J, B11a
- [85] 大野雅功, 国分紀秀, 鈴木素子, 高橋忠幸, (19名), 中澤知洋, 榎戸輝揚, 牧島一夫, (7名): 「すざく衛星搭載 WAM によるガンマ線バーストの広帯域高感度観測」_J, B16a
- [86] 寺田幸功, 守上浩市, 原山淳, 林多佳由, 石田学, 牧島一夫: 「強磁場激変星みずがめ座 AE 星の降着流変動」_J, J43a
- [87] 兵藤義明, 小山勝二, 上田佳宏, 湯浅孝行, 牧島一夫, 前田良知: 「すざくによる低質量中性子星連星系 AX J1745.6-2901 の観測 II」_J, J45a

- [88] 中川友進, 三原建弘, 吉田篤正, 山岡和貴, 杉田聡司, 鈴木素子, 中島基樹, 村上敏夫, 米徳大介, 田代信, 中澤知洋: 『すざく』衛星による軟ガンマ線リピーター SGR 1900+14/1806-20 の観測_⓵、J49a
- [89] 早藤麻美, 玉川徹, 上野大輔, 古澤彰浩, 國枝秀世, 小澤碧, 馬場彩, 牧島一夫, Jack Hughes: 『すざく』でみる Tycho 超新星残骸の玉ねぎ構造_⓵、K02a
- [90] 増田智, 簗島敬, 下条圭美, 寺田幸功, 高橋忠幸, 石川真之介, 国分紀秀, 渡辺伸, 田島宏康, 中澤知洋, 奥山翔, S. Krucker, R. Lin, S. Christe, B. Ramsey, M. Gubarev, 他 FOXSI チーム: 『FOXSI ロケット実験計画の概要』_⓵、M59a
- [91] 古澤彰浩, 上野大輔, 國枝秀世, 早藤麻美, 玉川徹, 小澤碧, 馬場彩, 牧島一夫, Jack Hughes: 『すざく』衛星を用いた鉄輝線解析による Tycho 超新星残骸の構造解析_⓵、Q36a
- [92] 小波さおり, 玉川徹, 松下恭子, 佐藤浩介, 磯部直樹, 千田篤史, 早藤麻美, 牧島一夫: 『すざく』で観測された近傍渦巻銀河 NGC4258 の星間ガスの重元素組成比_⓵、R06a
- [93] 川原田円, 北口貴雄, 中澤知洋, 牧島一夫, 山崎典子, 太田直美, 深沢泰司, 松下恭子, 佐藤浩介, 大橋隆哉: 『すざく』衛星による MS 1512.4+3647 銀河団の重元素の研究_⓵、T07a
- [94] 菅原知佳, 滝沢元和, 中澤知洋, 奥山翔: 『すざく』衛星による Abell 2319 銀河団ガスの温度構造とバルク運動の測定_⓵、T10b
- [95] 池尻祐輝, 深沢泰司, 深水浩司, 片岡淳, 戸泉貴裕, 和田健介, 中澤知洋, 国分紀秀, 高橋忠幸, 田島宏康, 森国城: 『APD による NeXT 衛星軟線検出器 BGO アクティブシールドの光読み出し』_⓵、W29a
- [96] 大杉節, 深澤泰司, 水野恒史, 片桐秀明, (12 名), 牧島一夫, 杉崎睦, 福井康雄: 『GLAST ガンマ線天文衛星の打ち上げ成功報告と LAT 望遠鏡の性能』_⓵、W41a
- 日本天文学会・春の年会 (2009 年 3 月 24~27 日、大阪府立大学)
- [97] 牧島一夫: 『ブラックホール連星の鉄輝線: 真に広がっているか?』_⓵、A18a
- [98] 中澤知洋: 『次期 X 線天文衛星 ASTRO-H (ex-NeXT) 搭載硬 X 線イメージャ(HXI) の開発の現状 (III)』_⓵、W61a
- [99] 奥村暁, 牧島一夫, 釜江常好, Seth Digel, 片桐秀明, 林克洋, 水野恒史, 福井康雄, ほか Fermi/LAT チーム: 『Fermi 衛星によるオリオン分子雲の観測』_⓵、Q17a
- [100] 榎戸輝揚, 中川友進, 牧島一夫, 山岡和貴, 山田真也, 中澤知洋, 村上弘志, 国分紀秀, 坂本貴紀, 吉田篤正: 『すざく』による軟ガンマ線リピーター SGR 0501+4516 の ToO 観測 (1)_⓵、J14a
- [101] 山田真也, 牧島一夫, 上原悠一, 中澤知洋, 高橋弘充, 堂谷忠靖, 久保田あや, 上田佳宏: 『すざく』が捉えた Very High 状態: GX 339-4 の広帯域 X 線観測_⓵、J20a
- [102] 上原悠一, 山田真也, 中澤知洋, 寺島雄一, 牧島一夫: 『すざく』による活動銀河核からの X 線放射の異なる変動成分への分解_⓵、S04a
- [103] 岩切涉, 寺田幸功, 三原建弘, 牧島一夫, 榎戸輝揚, 中島基樹, Lorella Angelini: 『すざく』衛星による X 線連星 4U1626-67 のサイクロトロン共鳴吸収構造の観測_⓵、J50a
- [104] 山本堂之, 中島基樹, 藤井紫麻見, 三原建弘, 牧島一夫: 『X 線連星パルサー 4U 0115+63 の 1999 年/2004 年アウトバースト時のサイクロトロン共鳴線の振る舞い』_⓵、J51a
- [105] 山口弘悦, 早藤麻美, 玉川徹, 牧島一夫, 勝田哲, 木村公, 澤田真理, 兵藤義明, 小山勝二, 森浩二: 『すざく』による大マゼラン星雲内超新星残骸 N103B の観測_⓵、K09a
- [106] 早藤麻美, 玉川徹, 吉井理恵, 山口弘悦, 平賀純子, 望月優子, 寺田幸功, 馬場彩, 高橋忠幸, 内山泰伸, 田中孝明, 衣笠建三, 牧島一夫: 『すざく』による超新星残骸の稀少元素探査 ~ ケプラー超新星残骸 ~_⓵、K12b
- [107] 水野恒史, 林克洋, 高橋弘充, 片桐秀明, (7 名), 奥村暁, 牧島一夫, 福井康雄, 林田将明, 田島宏康, 釜江常好, Seth Digel, ほか Fermi LAT collaboration: 『フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による、拡散線放射の観測』_⓵、Q16a
- [108] 小波さおり, 玉川徹, 松下恭子, 佐藤浩介, 磯部直樹, 瀬田裕美, 松田桂子, 牧島一夫: 『すざく』で観測された S0 銀河 NGC1316 の星間ガスの重元素組成比_⓵、R11b
- [109] 川原田円, 北口貴雄, 中澤知洋, 牧島一夫, 山崎典子, 太田直美, 深沢泰司, 松下恭子, 佐藤浩介, 大橋隆哉: 『すざく』による MS 1512.4+3647 銀河団プラズマの重元素組成の研究_⓵、T03a
- [110] 小宮山円, 松下恭子, 佐藤浩介, 大橋隆哉, 山崎典子, 竹井洋, 中澤知洋: 『すざく』衛星による Fornax 銀河団のオフセット観測_⓵、T05a
- [111] 菅原知佳, 滝沢元和, 中澤知洋, 奥山翔: 『すざく』衛星による Abell 2319 銀河団の広帯域スペクトル解析_⓵、T07a
- [112] 真喜屋龍, 戸谷友則, 中澤知洋: 『すざく』による EGRET 未同定天体の観測: 大規模構造形成に伴う非熱的放射の探査_⓵、T08a
- [113] 渡邊瑛里, 中澤知洋, 浜名崇, 宮崎聡, 岡部信広, 滝沢元和, 川原田円: 『X 線と弱重力レンズによる ZwCl0823.3+4250 銀河団周辺の大規模構造フィラメントの解析』_⓵、T12b
- [114] 大野雅功, 国分紀秀, 鈴木素子, 高橋忠幸, (18 名), 中澤知洋, 榎戸輝揚, 牧島一夫, (9 名): 『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニター (HXD-WAM) の現状 (VII)_⓵、W40a
- [115] 藤永貴久, 尾崎正伸, 馬場彩, 堂谷忠靖, 小高裕和, 穴吹直久, 高橋宏明, 木村公, 阪口壘, 中嶋大, 林田清, 常深博, 村上弘志, 武井大, 平賀純子, 幸村孝由, 渡辺辰雄, 鶴剛, 富田洋, 湯浅孝行: 『SpaceWire を使った ASTRO-H SXI データ取得システムの構築』_⓵、W52b
- 日本物理学会・春の年会 (2009 年 3 月 27~30 日、立教大学)

- [116] 水野恒史, 林克洋, 高橋弘充, 片桐秀明, (7名), 奥村暁, 牧島一夫, 福井康雄, 田島宏康, 釜江常好, Seth Digel, ほか Fermi LAT Collaboration: 「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡で見た拡散線放射」, 27aXD-10
- [117] 山岡和貴, 杉田聡司, 田代信, 寺田幸功, (19名), 中澤知洋, 榎戸輝揚, 牧島一夫, (9名): 「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (V)」, 28pSH-2
- [118] 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 高橋忠幸, 能町正治, 高島健, 国分紀秀, 小高裕和, 寺田幸功, 藤代巖, 程島文夫, 田苗明, 遠山正明: 「SpaceWire I/F を用いた衛星内時刻配信の検証」, 28pSH-7
- [119] 土屋晴文, 榎戸輝揚, 鳥居建男, 中澤知洋, 湯浅孝行, 福山太郎, 鳥井俊輔, 山口貴弘, 加藤博, 岡野眞治, 牧島一夫: 「高山における雷雲からの高エネルギー放射線の観測」, 30aSP-8
- [120] 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 勝田隼一郎, 小高裕和, 石川真之介, 青野博之, 杉本宗一郎, 古閑優, Peter von Ballmoos, 中澤知洋, 内山泰伸: 「ガンマ線レンズを用いた新世代ガンマ線検出システムの開発」, 28aSH-3
- [121] 常深博, 林田清, 山崎典子, 中澤知洋, 大橋隆哉, 深澤泰司, 鶴剛: 「高分解 X・ガンマ線撮像分光学の開拓」, 30pSP-7
- [122] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, (10名): 「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 VII (打ち上げと初期運用)」, 30pSC-8
- [123] 坂井賢一、他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II 実験、反陽子流束解析報告 (1)」
- その他の学会
- [124] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kato, H., Nakamura, S., & Makishima, K.: “Observations of high-energy gamma rays from winter thunderclouds on the Sea of Japan”, 地球惑星合同大会 E207 セッション (2008 年 5 月 30 日 幕張)
- [125] 榎戸輝揚, 三谷烈史, 中澤知洋, 牧島一夫, 坂野井健, 高島健, 吉田和哉, 高橋幸弘: 「SPRITE-SAT 搭載の小型ガンマ線検出器の開発と製作」, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) (2008 年 10 月 9-12 日 仙台)
- [126] 楠本彬、他 BESS Collaboration, 「BESS-Polar II: データ収集システム」, 大気球シンポジウム (2008 年 9 月、JAXA 宇宙科学研究本部)
- [127] 榎戸輝揚, 中川友進, 牧島一夫, 山岡和貴, 山田真也, 中澤知洋, 村上弘志, 国分紀秀, 坂本貴紀, 吉田篤正, 「すざく」チーム: 「すざく衛星を中心としたマグネター研究の最新成果 (1)」, 第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)
- [128] 榎戸輝揚, 三谷烈史, 上田剛, 牧島一夫, 坂野井健, 高橋幸弘, 高島健, 中澤知洋: 「雷雲ガンマ線の宇宙観測を狙う小型ガンマ線検出器の製作と今後」, 第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)
- [129] 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋, 上原悠一, 高橋弘充, 堂谷忠靖, 北本俊二: 「『すざく』によるブラックホールの観測」, 第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)
- [130] 山田真也: 「X 線で探る BH 時空 (2): 「すざく」衛星による最新結果」, 第 2 回ブラックホール磁気圏勉強会, (2009 年 2 月 22-24 日、名古屋大学)
- (セミナーなど)
- [131] 牧島一夫: 「X 線・ガンマ線で探る宇宙の高エネルギー現象」, 熊本大学理学部集中講義 (2008 年 7 月 22-24 日、熊本大学)
- [132] 牧島一夫: 「牧島宇宙放射線研究室最終レビュー」 (2008 年 8 月 4 日、理化学研究所和光キャンパス)
- [133] 榎戸輝揚, 土屋晴文, 湯浅孝行, 山田真也, 牧島一夫, & GROWTH Collaboration: 「雷雲ガンマ線の地上観測と粒子加速」, 第 1 回宇宙天気サマースクール (2008 年 8 月 28-31 日、山梨清泉寮)
- [134] 牧島一夫: 「『すざく』観測結果のハイライト III」, ビッグバン宇宙国際センター夏の学校 (2008 年 8 月 31 日、浅虫温泉)
- [135] 山田真也: 「『すざく』が切り開いたハード状態におけるブラックホールの新しい描像」, 宇宙高エネルギー物理学セミナー (2008 年 10 月 10 日、千葉大学)
- [136] 牧島一夫: 「MAXI で解き明かす激動宇宙の姿」, 第 29 回宇宙ステーション利用計画ワークショップ (2008 年 12 月 8 日、一橋記念講堂)
- [137] 牧島一夫: 「極大からのアプローチ～宇宙での元素合成を探る～」, 理研「物質の創成研究」終了シンポジウム (2008 年 12 月 22 日、理化学研究所和光キャンパス)
- [138] 牧島一夫: 「ブラックホールの素顔を暴く」, 首都圏中高教員研修会 (2009 年 1 月 6 日、理化学研究所和光キャンパス)
- [139] 湯浅孝行: 「SpaceWire 標準組み込みソフトウェアの開発」, 第三回 SpaceWire ユーザ会, (2009 年 1 月 21 日、JAXA 相模原)

II

2008年度 ビッグバン宇宙国際研究センター全般に関する報告

1 教員，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫（センター長 / 教授; 併任）

横山 順一（教授）

茂山 俊和（准教授）

樽家 篤史（助教）

E. Mueller（外国人客員教授）

V. Berezhinsky（外国人客員教授）

A. Starobinsky（外国人客員教授）

滝脇 知也（特任研究員）

川中 宣太 (4/1-9/30)（特任研究員）

中村 航 (10/1-3/31)（特任研究員）

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担当者

（無印はセンター固有の教員、上添字付きは研究協力者）

- | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1 . 初期宇宙進化論 | 横山 順一 | 樽家 篤史 | 佐藤 勝彦 ¹ | 須藤 靖 ¹ |
| 2 . 銀河進化理論 | 茂山 俊和 | | | |
| 3 . 可視光近赤外観測 | 吉井 譲 ³ | 峰崎 岳夫 ³ | 青木 勉 ³ | |
| 4 . サブミリ波観測 | 坂井 南美 | 山本 智 ¹ | | |
| 5 . 暗黒物質観測 | 蓑輪 眞 ¹ | 井上 慶純 ¹ | | |
| 6 . 銀河と宇宙構造の研究 | 岡村 定矩 ² | 嶋作 一大 ² | | |
| 7 . 飛翔体による宇宙観測 | 牧島一夫 ¹ | 山本 明 ⁴ | | |

¹ 物理学専攻、² 天文学専攻、³ 天文学教育センター、⁴ KEK

2 シンポジウム・研究会

2.1 暗黒エネルギー研究国際ネットワーク (DENET)

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

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

2008年5月19日～21日にハワイ島コナにおいて、国際会議 Cosmology Near and Far: Science with WFMOS を開き、すばる観測所と Gemini 天文台が共同で提案している広域分光装置 WFMOS の科学的意義について議論を行った。WFMOS は銀河サーベイを用いたダークエネルギー研究において不可欠な分光装置であり、国内外のダークエネルギー研究者からその動向について注目を集めている。今回の国際会議では、日本側の研究協力機関から多くの研究者が出席し、日本の研究成果を知らしめただけでなく、国際共同プロジェクト推進に向けた協力関係を確認する場となり、世界の天文学コミュニティーへ強く日本の研究体制をアピールすることができた。

また、8月30日～9月2日には青森県浅虫温泉において Dark energy in the Universe というタイトルのサマースクールを行い、海外の協力機関などから講師を招いて、国内の大学院生と若手研究者を対象とするダークエネルギーに関する系統的な講義を行った。

2.2 JSPS-CNRS 二国間協力事業日仏合同ワークショップ「初期宇宙論」 (日仏交流 150 周年記念事業)

日時：2008年5月14日(水) - 5月16日(金)

場所：日光霧降コンベンションホール

プログラム

5月14日(水)

1:15 - 5:55

Jun 'ichi Yokoyama	Welcome
Renata Kallosh	D3/D7 brane inflation
Shinji Mukohyama	Brane inflation in string cosmology
Takeshi Kobayashi	Conformal Modulated Reheating
Masakazu Sano	Moduli fixing and T-duality in type II brane gas models
Shunichiro Kinoshita	Stability of deformed Freund-Rubin compactification
Tsutomu Kobayashi	Low energy effective theory in 6D braneworlds
Yuuiti Sendouda	Generic higher curvature gravity theories in ADM formalism
Larrisa Lorenz	Entropy perturbations at the end of brane inflation

5月15日(木)

9:00 - 12:00

Cedric Deffayet	Spherically symmetric solutions of massive gravity
Shuntaro Mizuno	Constraints on scalar-tensor dark energy
Ryo Nagata	Reconstruction of primordial fluctuation spectrum from WMAP 5yr data
Toyokazu Sekiguchi	Primordial helium abundance from CMB: a current constraint and forecast
Jerome Martin	Cosmological perturbations in DBI inflation

1:10 - 5:50

Andrei Linde	Conceptual Issues in Inflation
Masahide Yamaguchi	D-term chaotic inflation and leptogenesis
Takeshi Chiba	Initial conditions for vector inflation
Yuko Urakawa	Solution to the IR divergence problem for the interacting scalar field
Kazunori Nakayama	Probing reheating temperature of the universe with gravitational wave background
Ryo Saito	Non-Gaussianity in primordial black hole formation
Shuichiro Yokoyama	Primordial Non-Gaussianity in multi-scalar inflation
Teruaki Suyama	Non-Gaussianity, spectral index and tensor modes in mixed inflaton and curvaton models

5月16日(金)

9:00 - 12:00

Martin Lemoine	On curvaton cosmology including realistic curvaton decay into dark matter, baryons and radiation
Kohei Kamada	Dissipative effect on MSSM inflation
Fuminobu Takahashi	The Anthropic Solution to the strong CP problem and its Cosmological Implications
Masahiro Yamaguchi	Axionic mirage mediation
Jun 'ichi Yokoyama	Concluding remarks

2.3 Cosmology Near and Far: Science with WFMOS

日時 : 2008年5月19日(月) - 5月21日(水)

場所 : Waikoloa Beach Marriott, Waikoloa, Hawaii

プログラム**5月19日(月)**

9:00 - 12:40 Introductions / Galactic archeology 1 (Chair: Y.Suto/R. Ibata)

D. Simons, S. Miyama	Welcome address
J.Jensen	An Introduction to the WFMOS Project
R.Wyse	Cosmology with the Thin and Thick Disks of the Milky Way
K.Freeman	Elements in the Disk
M.Chiba	Near-field cosmology: formation of the stellar halo
C.Kobayashi	Chemodynamical Simulation of the Milky Way Galaxy for Galactic Archaeology

14:40 - 17:00 Galaxy surveys 1 (Chair: R.Ellis)

T.Yamada	Towards Deep and Wide-Field High-Redshift Surveys with WFMOS
L.Sodre	Spectral Analysis of WFMOS Galaxy Spectra
Y.Koyama	Wide-field observation of distant clusters of galaxies
A.Fritz	The Evolution of Cluster Early-Type Galaxies Since $z=1$
H.Yee	The Red-Sequence Cluster Survey

5月20日(火)

9:00 - 12:20 Galaxy surveys 2 / Galactic archeology 2 (Chair: K.Ohta/G. Lewis)

N.Tamura	FMOS: An overview of a very near-future instrument for wide-field NIR MOS and scientific objective
G.Dalton	Science with VISTA
M.Ouchi	WFMOS Studies of Galaxy Formation and Reionization: Synergistic Effects on Hyper-Suprime, JWST, and ELT Surveys
T.Kodama	The Ultimate Studies of Environmental Effects in the Cosmic Webs in the Distant Universe
R.Ibata	M31 and M33: Clues to Galaxy Formation
V.Smith	Useful Abundance Ratios for Chemically Identifying Stellar Populations
A.Bunker	The History of Star Formation and Metal Enrichment

14:00 - 18:00 Auxiliary science 1 / BAO 1 (Chair: M.Do/M. Takada)

P.McDonald	IGM
A.Dey	Tracing the Formation, Evolution and Assembly of Massive Galaxies
S.Sharma	Searching for Groups with WFMOS Eyes
T.Goto	$z > 7$ QSO search and $z=1$ cluster counts: synergy with HyperSuprimeCam
T.Matsubara	Recent progress in theory of BAO with galaxy surveys
D.Eisenstein	BOSS
A.Taruya	Accurate modeling for matter power spectrum and baryon acoustic oscillations
N.Yoshida	Simulations of Baryon Acoustic Oscillations

5月21日(水)

9:00 - 12:20 Auxiliary science 2 / Dark energy (Chair: N.Yoshida/GN.Sugiyama)

S.Miyazaki	Hyper Suprime-Cam Project Status
Y.Komiyama	HSC Camera Design
M.Takada	A prospect for constraining neutrino mass with WFMOS
E.Linder	Current Efforts in Dark Energy
K.Glazebrook	w from WiggleZ to WFMOS

14:00 - 16:20 BAO 2 / Dark energy (Chair: M. Iye/A. Taruya)

G.Hill	The Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment (HETDEX)
Y.Matsuda	WFMOS follow-ups of a HSC narrow-band BAO survey
D.Parkinson	Optimising Baryon Acoustic Oscillation Surveys
K.Koyama	Modified Gravity
K.Yamamoto	Testing gravity with large galaxy redshift surveys

posters

- T. Hiramatsu Cosmological power spectra in a closure theory
 M. Ishigaki Kinematics and chemical abundance of metal-poor stars in the outer Galactic halo
 T. Nishimichi Systematic effects on BAO measurements
 S. Saito Probing neutrino masses through nonlinear matter power spectrum with WFMOS survey
 R. Takahashi Covariance Matrix for Baryon Acoustic Oscillation from Numerical Simulations

2.4 ビッグバン宇宙国際研究センター 第三回公開講演会 「暗黒エネルギーと宇宙の未来」

日時：2008年7月31日(金) 10:30 - 15:30

場所：東京大学本郷キャンパス理学部1号館中央棟2階233号室(東京都文京区本郷)

プログラム

午前の部 (10:30-11:50)

- 須藤 靖 宇宙は何からできている (40分)
 横山順一 宇宙をあやつるダークエネルギー (40分)

午後の部 (14:00-15:20)

- 須藤 靖 宇宙は何からできている (40分)
 横山順一 宇宙をあやつるダークエネルギー (40分)

2.5 第8回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会：'Dark Energy in the Universe' サマースクール

日時：2008年8月30日(土) - 9月2日(火)

場所：「本陣の宿 柳の湯」(青森県青森市大字浅虫字山下236)

<http://www4.ocn.ne.jp/~yanagiyu/>

プログラム

8月30日(土)

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

- 牧島 一夫 センター長挨拶・連絡事項 (10分)
 峰崎 岳夫 MAGNUM プロジェクト成果報告 (40分)
 山本 智 星形成から惑星系形成への物質進化(サブミリ波プロジェクト成果報告) (40分)

15:30 - 15:45 休憩

15:45 - 17:25 afternoon session II (座長 樽家)

2.5. 第8回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会: 'Dark Energy in the Universe' サマースクール65

- 川中 宣太 ブラックホール磁気流体円盤コロナからのX線放射とX線連星への応用 (20分)
井原 隆 SXDS領域における遠方Ia型超新星の発生頻度 (20分)
滝脇 知也 超新星における磁場と不安定性の役割 (20分)
茂山 俊和 球状星団中のHe-rich物質の起源 (20分)
諏訪 雄大 ガンマ線バースト中心エンジンと重力波 (20分)

17:40 - 18:00 poster presentation (1人2分)

- Takahiro Nishimichi A study of nonlinear clustering and redshift-space distortion using N-body simulations
Shun Saito Constraint on neutrino masses with nonlinear galaxy power spectrum
Hajime Kawahara Log-normal distribution Model of density and temperature fluctuation in cluster gas
Yuuiti Sendouda Can PBHs constrain the spectral shape of the cosmological perturbation?
Ryo Saito non-linear effects associated with primordial black hole formation
Takeshi Kobayashi Conformal Modulated Reheating
Shunichiro Kinoshita Stability of Freund-Rubin compactification
Keisuke Izumi Massive spin-2 ghost in de Sitter space
Takashi Hiramatsu 1-loop perturbation theory based on a closure approximation
Hayato Mikami 3D-MHD jets production in core-collapse supernovae explosions
Norio Narita Subaru HDS Ground-based Transmission Spectroscopy for the Transiting Exoplanet HD189733b

8月31日(日)

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

- 牧島 一夫 「すぎく」の観測結果のハイライト (40分)
蓑輪 眞 太陽アクシオン探索実験 (40分)

10:20 - 10:35 休憩・ポスター

10:35 - 11:55 morning session II (座長 滝脇)

- 中山 和則 非熱的暗黒物質とその検出可能性 (20分)
筒井 亮 ガンマ線バーストを用いた観測的宇宙論 (20分)
浅田 秀樹 重力レンズにおける摂動法 (20分)
小林 努 Relativistic stars in $f(R)$ dark energy models, and absence thereof (20分)
水野 俊太郎 Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation (20分)

14:00 - 18:00 summer school I (Chair: Y. Suto)

- Yasushi Suto Opening Address (10分)
Kazuya Koyama Modified gravity as an alternative to dark energy (1/3) (60分)
Alan Heavens Probing dark energy with weak lensing (1/3) (60分)

16:10 - 16:30 休憩・ポスター

16:30 - 18:10 summer school II (Chair: S. Mizuno)

- Andrei V. Frolov Dark energy models in F(R) gravity (60分)
 Jun'ichi Yokoyama Higgsflation (20分)
 Damien A. Easson Cosmology of moving branes and spinflation (20分)

9月1日(月)

8:30 - 12:00 summer school III (Chair: J. Yokoyama)

- Andrei V. Frolov Can F(R) dark energy really work? (60分)
 Alan Heavens Probing dark energy with weak lensing (2/3) (60分)
 Kazuya Koyama Can F(R) dark energy really work? (2/3) (60分)

10:10 - 10:30 休憩・ポスター

14:10 - 18:00 free discussion

9月2日(火)

8:30 - 12:00 summer school IV (Chair: K. Ichiki/R. Nagata)

- Atushi Taruya Signature of primordial non-Gaussianity on matter power spectrum (20分)
 Fuminobu Takahashi Non-Gaussianity from Radiation and/or CDM (20分)
 Takashi Hamana Subaru weak lensing survey and Hyper SuprimeCam (20分)
 Alan Heavens Probing dark energy with weak lensing (3/3) (60分)
 Kazuya Koyama Modified gravity as an alternative to dark energy (3/3) (60分)

10:10 - 10:30 休憩・ポスター

2.6 第7回 RESCEU 国際シンポジウム

「RESCEU Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology」

日時：2008年11月11日(火)-14日(金)

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

11月11日(火)

- 3:00 受付開始 ポスター
 5:00 ウェルカムパーティー, ポスター

11月12日(水)

9:00 - 12:50 morning session I (座長 横山/川崎)

2.6. 第7回 RESCEU 国際シンポジウム「RESCEU Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology」67

- K. Sato Opening Address (5分)
M. Yamamoto Opening Address (5分)
K. Makishima Opening Address (5分)
E. Kolb Taking Sides on Dark Energy (45分)
K. Koyama Large primordial non-Gaussianity from early universe (45分)
K. Olive BBN Concordance: What's the matter with Li (45分)
K. Kohri Cosmological models with long-lived SUSY particles (45分)

10:50 - 11:20 休憩

2:00 - 6:00 afternoon session I (座長 小玉/白水)

- A. Dolgov Quantum anomalies and superluminous propagation. Is it possible? Is it dangerous?
(45分)
A. Vilenkin Holographic measure of the multiverse (45分)
4:00 Poster presentation

3:30 - 4:00 休憩

11月13日(木)

9:00 - 12:30 morning session II (座長 鈴木/長滝)

- J. Lattimer The Equation of State for Supernovae and Neutron Stars (45分)
K. Kotake Multidimensional modeling of core-collapse supernovae: new challenges and perspectives (45分)
W. Hillebrandt Recent Progress in Type Ia Supernova Modeling and its Implication for Cosmology (45分)
J. Beacom The Diffuse Supernova Neutrino Background (45分)

10:30 - 11:00 休憩

2:00 - 6:00 afternoon session II (座長 向山/須藤)

- K. Maeda Cosmology in Higher Dimensions (45分)
P. Steinhardt Inflation, Dark Energy and Extra Dimensions (45分)
J. Yokoyama What can we learn about cosmophysics by observing only one Universe? (45分)
K. Sato From supernovae to inflation (45分)
6:30 Banquet at Hibiya Matsumoto-ro

3:15 - 3:45 休憩

11月14日(金)

9:00 - 12:50 morning session III (座長 樽家/Lee)

- G. Boerner The universal mass accretion history and density profile of dark matter haloes (45分)
C. Park Cosmology from Topology of Large-Scale Structures of the Universe (45分)
K.W. Ng CMB Polarization (45分)
A. Ishibashi On the acceleration of our universe and the effects of inhomogeneities (45分)

10:30 - 11:00 休憩

1:45 - 6:30 afternoon session III (座長 戸谷/茂山)

- A. Yamamoto Search for primordial antiparticle in cosmic rays with the BESS (45 分)
- T. Yamamoto Probing Extreme Universe through Ultra High Energy Cosmic Ray (45 分)
- V. Berezhinsky Diffusion of Ultra High Energy Cosmic Rays in expanding universe (45 分)
- T. Kamae Gamma-ray Sky seen with Fermi Large Area Telescope (45 分)
- C. Pethick Neutrino processes in dense matter (45 分)
- 6:00 Conclusion

4:00 - 4:30 休憩

3 プレプリント・リスト

RESCEU-83/08

Strange Filamentary Structures (“Fireballs”) around a Merger Galaxy in the Coma Cluster of Galaxies *Yoshida, M., Yagi, M., Komiyama, Y., Furusawa, H., Kashikawa, N., Koyama, Y., Yamanoi, H., Hattori, T., Okamura, S.* ApJ, 688, 918-930

RESCEU-82/08

Dependence of Clustering Strength on Stellar Mass and SFR for LBGs at $z \sim 3$ *Yoshida, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Ouchi, M.* ASPC, 399, 276

RESCEU-81/08

A close relationship at $z \sim 2$: submillimetre galaxies and BzK-selected galaxies *Takagi, T., Ono, Y., Shimasaku, K., Hanami, H.* MNRAS, 389, 775-786

RESCEU-80/08

Testing the Target Selection for Future Spectroscopic BAO Surveys by SDF and SXD *Data Sumiyoshi, M., Oshige, S., Totani, T., Glazebrook, K., Akiyama, M., Morokuma, T., Motohara, K., Shimasaku, K., Yoshida, M., Hayashi, M., Kashikawa, N., Kodama, T.* ASPC, 399, 487

RESCEU-79/08

Dark-Halo Masses, Star Formation Rates, and Stellar Masses of High-Redshift Galaxies *Shimasaku, K., Hayashi, M., Motohara, K., Kashikawa, N., Kodama, T., Ouchi, M.* ASPC, 399, 75

RESCEU-78/08

Galaxy Formation and Evolution Probed with Lyman- α blobs *Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., Yoshida, M., Ueda, Y.* ASPC, 399, 280

RESCEU-77/08

Near Infrared Photometry of Lyman- α Emitters at $z=3.1$ and 3.7 in the Subaru/XMM-Newton Deep Field *Ono, Y., Shimasaku, K., Ouchi, M., Yoshida, M., Akiyama, M., Okamura, S.* ASPC, 399, 294

RESCEU-76/08

Probing the History of Cluster Assembly by Intracluster Planetary Nebulae *Okamura, S.* ASPC, 399, 352

RESCEU-75/08

Deep- and Wide-field K-band Imaging of the Subaru Deep Field: Implications for Galaxy Formation at $z \sim 2$ *Motohara, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Yoshida, M., Kashikawa, N., Kodama, T.* ASPC, 399, 274

RESCEU-74/08

Evolution of Galaxy Clusters from an AKARI Mission Program, CLEVLIm *Im, M., Lee, H. M., Lee, M. G., Ko, J., Shim, H., Kodama, T., Koyama, Y., Takagi, T., Watarai, H., Matsuhara, H., Wada, T., Oyabu, S., Hanami, H.* ASPC, 399, 382

RESCEU-73/08

Panoramic and Multi-Wavelength Study of the Distant Cluster RXJ1716 at $z=0.81$ *Koyama, Y., Kodama, T., Tanaka, M., Shimasaku, K., Okamura, S.* ASPC, 399, 361

RESCEU-72/08

Mapping dusty star formation in and around a cluster at $z = 0.81$ by wide-field imaging with AKARI *Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Tanaka, M., Lee, Hyung M., Im, M., Matsuhara, H., Takagi, T., Wada, T., Oyabu, S.* MNRAS, 391, 1758-1770

RESCEU-71/08

Suprime-Cam LAE Survey at Redshift 7.3 – Ultimate Limit with New Red-Sensitive CCDs *Iye, M., Kashikawa, N., Furusawa, H., Ota, K., Ouchi, M., Shimasaku, K.* ASPC, 399, 61

RESCEU-70/08

Cryogenic VPH grisms for MOIRCS *Ichikawa, T., Ichiyama, K., Ebizuka, N., Murata, C., Taniguchi, Y., Okura, T., Harashima, M., Uchimoto, Y. Katsuno, Maruyama, M., Iye, M., Shimasaku, K.* SPIE, 7014, 70141S-70141S-8

RESCEU-69/08

Near-Infrared Spectroscopy of BzK Galaxies with Subaru/MOIRCS *Hayashi, M., Motohara, K., Shimasaku, K., Onodera, M., Uchimoto, Y. K., Kashikawa, N., Yoshida, M.* ASPC, 399, 282

RESCEU-68/08

First light of UT 15-band dichroic-mirror camera *Doi, M., Hayano, J., Utsunomiya, H., Ihara, Y., Tokita, K., Sako, S., Okamura, S., Takanashi, N., Morokuma, T., Furusawa, H., and 16 coauthors* SPIE, 7014, 70140F-70140F-12

RESCEU-67/08

Instruments with Many Dichroic Mirrors and CCDs *Doi, M., Hayano, J., Utsunomiya, H., Ihara, Y., Tokita, K., Takanashi, N., Sako, S., Okamura, S., Morokuma, T., Furusawa, H., and 10 coauthors* ASPC, 399, 491

RESCEU-66/08

The Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Coma Cluster Survey. I. Survey Objectives and Design *Carter, D., Goudfrooij, P., Mobasher, B., Ferguson, Henry C., Puzia, Thomas H., Aguerra, Alfonso L., Balcells, M., Batcheldor, D., Bridges, Terry J., Davies, Jonathan I., and 27 coauthors including Okamura, S.* ApJS, 176, 424-437

RESCEU-65/08

Neutrino mixing and mass hierarchy in Gaussian landscapes *L.Hall, M.Salem and T.Watari* Phys.Rev.D79 (2009) 025010

RESCEU-64/08

Band-power reconstruction of the primordial fluctuation spectrum by the maximum likelihood reconstruction method *Ryo Nagata and Jun'ichi Yokoyama* Phys.Rev. D79 (2009) 043010

RESCEU-63/08

Gravitational wave background as a probe of the primordial black hole abundance *Ryo Saito, Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-62/08

Reconstructing Cosmological Matter Perturbations using Standard Candles and Rulers *Ujjaini Alam, Varun Sahni, Alexei A. Starobinsky*

RESCEU-61/08

Constraints on the time variation of the fine structure constant by the 5-year WMAP data *Masahiro Nakashima, Ryo Nagata, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-60/08

Reconstruction of the primordial fluctuation spectrum from the five-year WMAP data by the cosmic inversion method with band-power decorrelation analysis *Ryo Nagata and Jun'ichi Yokoyama* Phys. Rev. D 78 (2008) 123002

RESCEU-59/08

Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5 *Takeshi Kobayashi and Shinji Mukohyama* Physical Review D 79, 083501 (2009)

RESCEU-58/08

Signature of Primordial Non-Gaussianity on Matter Power Spectrum *Atsushi Taruya, Kazuya Koyama and Takahiko Matsubara* Physical Review D 78 (2008) 123534

RESCEU-57/08

A new method of alpha ray measurement using a Quadrupole Mass Spectrometer *Y. Iwata, Y. Inoue, M. Minowa* Nucl. Instr. Meth. A 577 (2007) 619-622

RESCEU-56/08

Trace Element Analysis of Potassium by Resonance Ionization Mass Spectrometry *Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa*

RESCEU-55/08

Search for solar axions with mass around 1 eV using coherent conversion of axions into photons *Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto, M. Minowa* Phys. Lett. B (2008)

RESCEU-54/08

Status report of the Tokyo axion helioscope experiment *Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ota, T. Mizumoto, A. Yamamoto*

RESCEU-53/08

Tokyo Axion Helioscope *M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto*

RESCEU-52/08

In-Orbit Timing Calibration of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku *Terada, Y., Enoto, T., Miyawaki, R., (7 coauthors), Kamae, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Kuroda, Y., Makishima, K., Masukawa, K., Mizuno, T., Murakami, T., Nakazawa, K., (11 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S25-S34

RESCEU-51/08

Suzaku Observations of Hercules X-1: Measurements of the Two Cyclotron Harmonics *Enoto, T., Makishima, K., Terada, Y., Mihara, T., Nakazawa, K., Ueda, T., Dotani, T., Kokubun, M., Nagase, F., Naik, S., Suzuki, M., Nakajima, M., Takahashi, H.* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S57-S68

RESCEU-50/08

Low/Hard State Spectra of GRO J1655?40 Observed with Suzaku *Takahashi, H., Fukazawa, Y., Mizuno, T., Hirasawa, A., Kitamoto, S., Sudoh, K., Ogita, T., Kubota, A., Makishima, K., Itoh, T., Parmar, A., (15 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S69-S84

RESCEU-49/08

Measuring the Broad-Band X-Ray Spectrum from 400eV to 40keV in the Southwest Part of the Supernova Remnant RXJ1713.7?3946 *Takahashi, T., Tanaka, T., Uchiyama, Y., Hiraga, J. S., Nakazawa, K., Watanabe, S., Bamba, A., Hughes, J. P., Katagiri, H., (7 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S131-S140

RESCEU-48/08

Suzaku Detection of Extended/Diffuse Hard X-Ray Emission from the Galactic Center *Yuasa, T., Tamura, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Makishima, K., Bamba, A., Maeda, Y., Takahashi, T., Ebisawa, K., Senda, A., Hyodo, Y., Tsuru, T. G., Koyama, K., Yamauchi, S., Takahashi, H.* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S207-S222

RESCEU-47/08

Discovery of a Bright Transient Ultraluminous X-Ray Source, Suzaku J1305-4931 in NGC 4945 *Isobe, N., Kubota, A., Makishima, K., Ghi, P., Griffiths, R. E., Dewangan, G. C., Itoh, T., Mizuno, T.* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S241-S250

RESCEU-46/08

Suzaku Wide-Band X-Ray Spectroscopy of the Seyfert2 AGN in NGC 4945 *Itoh, T., Done, C., Makishima, K., Madejski, G., Awaki, H., Gandhi, P., Isobe, N., Dewangan, G. C., Griffiths, R. E., Anabuki, N., Okajima, T., (5 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S251-S262

RESCEU-45/08

Wide-Band Spectroscopy of the Compton Thick Seyfert2 Galaxy Markarian 3 with Suzaku *Awaki, H., Anabuki, N., Fukazawa, Y., Gallo, L. C., Ikeda, S., Isobe, N., Itoh, T., Kunieda, H., Makishima, K., Markowitz, A., (8 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S293-S306

RESCEU-44/08

Suzaku Observation of HCG 62: Temperature, Abundance, and Extended Hard X-Ray Emission Profiles *Tokoi, K., Sato, K., Ishisaki, Y., Ohashi, T., Yamasaki, N. Y., Nakazawa, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hoshino, A., Tamura, T., Egawa, C., Kawano, N., (5 coauthors)* Publ. Astr. Soc. Japan 60, Special Issue 1, S317-S332

RESCEU-43/08

Possible Suzaku detection of non-thermal X-ray signals from a rotating magnetized white dwarf *Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Makishima, K., Naik, S., Hayashi, T., Okada, S., Nakamura, R., Enoto, T* Adv. Space Res. 41, 512-517

RESCEU-42/08

The Suzaku Observation of the Nucleus of the Radio-loud Active Galaxy Centaurus A *Markowitz, A., Takahashi, T., Watanabe, S., Nakazawa, K., Fukazawa, Y.* Astrophys. J. 672, 209-224

RESCEU-41/08

Broadband X-Ray Spectroscopy of A0535+262 with Suzaku *Naik, S., Dotani, T., Terada, Y., Nakajima, M., Mihara, T., Suzuki, M., Makishima, K., Sudoh, K., Kitamoto, S., Nagase, F., Enoto, T., Takahashi, H* Astrophys. J. 672, 516-523

RESCEU-40/08

Suzaku Discovery of Hard X-ray Pulsations from AE Aquarii *Terada, Y., Hayashi, T., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Okada, S., Nakamura, R., Naik, S., Bamba, A., Makishima, K.* Publ. Astr. Soc. Japan 60, in press

RESCEU-39/08

Search for fractionally charged particles in cosmic rays with BESS spectrometer *H. Fuke, Y. Tasaki, 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* Adv. Space Res. 41, 2050

RESCEU-38/08

Search for Antihelium with BESS *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* Adv. Space Res., in press

RESCEU-37/08

BESS-Polar Experiment *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* Adv. Space Res., in press (2008) doi: 10.1016/j.asr.2007.05.043.

RESCEU-36/08

Search for Primordial Antiparticle with BESS *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* Adv. Space Res. 42, 442

RESCEU-35/08

Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State *Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T.,* Publ. Astr. Soc. Japan, 60, in press (2008)

RESCEU-34/08

The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) – VII. Clustering Segregation with Ultraviolet and Optical Luminosities of Lyman-Break Galaxies at $z \sim 3$ *Yoshida, M., Shimasaku, K., Ouchi, M., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Okamura, S.* ApJ, 679, 269-278

RESCEU-33/08

The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Ly α Emitters from $z=3.1$ to 5.7 in the 1 deg² Field: Luminosity Functions and AGN *Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Simpson, C., Saito, T., Ueda, Y., Furusawa, H., Sekiguchi, K., Yamada, T., Kodama, T., Kashikawa, N., Okamura, S., Iye, M., Takata, T., Yoshida, M., Yoshida, M.* ApJS, 176. 301-330

RESCEU-32/08

The Reionization and Galaxy Evolution Probed by $z=7$ Lyman Alpha Emitters *Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Kobayashi, M. A. R., Totani, T., Nagashima, M., Morokuma, T., Furusawa, H., Hattori, T., Matsuda, Y., Hashimoto, T., Ouchi, M.* ApJ, 677. 12-26

RESCEU-31/08

The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) - II. Optical Imaging and Photometric Catalogs *Furusawa, H., Kosugi, G., Akiyama, M., Takata, T., Sekiguchi, K., Tanaka, I., Iwata, I., Kajisawa, M., Yasuda, N., Doi, M., Ouchi, M., Simpson, C., Shimasaku, K., Yamada, T., Furusawa, J., Morokuma, T., Ishida, C. M., Aoki, K., Fuse, T., Imanishi, M., Iye, M., Karoji, H., Kobayashi, N., Kodama, T., Komiyama, Y., Maeda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Nakata, F., Noumaru, J., Ogasawara, R., Okamura, S., Saito, T., Sasaki, T., Ueda, Y., Yoshida, M.* ApJS, 176. 1-18

RESCEU-30/08

The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey *Adelman-McCarthy, J. K., Agueros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bailer-Jones, C. A. L., Baldry, I. K. 153 coauthors including Okamura, S. Shimasaku, K.* ApJS, 175. 297-313

RESCEU-29/08

Deep Spectroscopy of Systematically Surveyed Extended Ly α Sources at $z \sim 3-5$ *Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S., Ouchi, M., Akiyama, M., Yoshida, M., Ueda, Y.* ApJ, 675, 1076-1094

RESCEU-28/08

GUT Relations from String Theory Compactifications *R.Tatar and T.Watari*

RESCEU-27/08

New Aspects of Heterotic-F Theory Duality *H.Hayashi, R.Tatar, Y.Toda, T.Watari and M.Yamazaki*

RESCEU-26/08

A Theoretical Framework for R-parity Violation *M.Kuriyama, H.Nakajima and T.Watari*

RESCEU-25/08

ν -Process Nucleosynthesis in Population III Core-Collapse Supernovae *Yoshida, T., Umeda, H., and Nomoto, K.* ApJ 772 (2008) 1043-1053

RESCEU-24/08

The broad-lined Type Ic supernova 2003jd *Valenti, S., Benetti, S., Cappellaro, E., Patat, F., Mazzali, P., Turatto, M., Hurley, K., Maeda, K., Gal-Yam, A., Foley, R. J., Filippenko, A. V., Pastorello, A., Challis, P., Frontera, F., Harutyunyan, A., Iye, M., Kawabata, K., Kirshner, R. P., Li, W., Lipkin, Y. M., Matheson, T., Nomoto, K., Ofek, E. O., Ohyama, Y., Pian, E., Poznanski, D., Salvo, M., Sauer, D. N., Schmidt, B. P., Soderberg, A., and Zampieri, L.* MNRAS 383 (2008) 1485-1500

RESCEU-23/08

How Much ^{56}Ni Can Be Produced in Core-Collapse Supernovae? Evolution and Explosions of 30-100 M_{\odot} Stars *Umeda, H. and Nomoto, K.* ApJ 673 (2008) 1014-1022

RESCEU-22/08

Asphericity in Supernova Explosions from Late-Time Spectroscopy *Maeda, K., Kawabata, K., Mazzali, P. A., Tanaka, M., Valenti, S., Nomoto, K., Hattori, T., Deng, J., Pian, E., Taubenberger, S., Iye, M., Matheson, T., Filippenko, A. V., Aoki, K., Kosugi, G., Ohyama, Y., Sasaki, T., and Takata, T.* Science 319 (2008) 1220-1223

RESCEU-21/08

The r-Process in Supersonic Neutrino-driven Winds: The Role of the Wind Termination Shock *Kuroda, T., Wanajo, S., and Nomoto, K.* ApJ 672 (2008) 1068-1078

RESCEU-20/08

Neutrino mass effects on vector and tensor CMB anisotropies in the presence of a primordial magnetic field *K. Kojima, K. Ichiki, D.G. Yamazaki, T. Kajino, and G.J. Mathews* Physical Review D

RESCEU-19/08

Electromagnetic Properties of the Early Universe *K. Takahashi, K. Ichiki, N. Sugiyama* Physical Review D

RESCEU-18/08

Primordial Neutrinos, Cosmological Perturbations in Interacting Dark-Energy Model: CMB and LSS *K. Ichiki and Y. Y. Keum* J. Cosmo. Astropart. Phys.

RESCEU-17/08

Cosmic microwave background constraints on a decaying cosmological term related to the thermal evolution *R. Nakamura, M. Hashimoto, K. Ichiki* Physical Review D

RESCEU-16/08

Cosmic Shear from Scalar-Induced Gravitational Waves *D. Sarkar, P. Serra, A. Cooray, K. Ichiki, D. Baumann* Physical Review D

RESCEU-15/08

Probing the Nature of the Weakest Intergalactic Magnetic Fields with the High Energy Emission of Gamma-Ray Bursts *K. Ichiki, S. Inoue and K. Takahashi* Astrophys. J.

RESCEU-14/08

Effects of a Primordial Magnetic Field on Low and High Multipoles of the CMB *D. G. Yamazaki, K. Ichiki, T. Kajino and G. J. Mathews* Physical Review D

RESCEU-13/08

A novel method to construct stationary solutions of the Vlasov-Maxwell system *Suzuki, Akihiro; Shigeyama, Toshikazu* Physics of Plasmas, Volume 15, Issue 4, pp. 042107-042107-5 (2008)

RESCEU-12/08

The Origin of Carbon Enhancement and the Initial Mass Function of Extremely Metal-poor Stars in the Galactic Halo *Komiya, Yutaka; Suda, Takuma; Minaguchi, Hiroki; Shigeyama, Toshikazu; Aoki, Wako; Fujimoto, Masayuki* Y. The Astrophysical Journal, Volume 658, Issue 1, pp. 367-390

RESCEU-11/08

Searching for a Companion Star of Tycho's Type Ia Supernova with Optical Spectroscopic Observations *Ihara, Y.; Ozaki, J.; Doi, M.; Shigeyama, T.; Kashikawa, N.; Komiyama, K.; Hattori, T.* Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.4, pp.811-826

RESCEU-10/08

Impact of Rotation on Neutrino Emission and Relic Neutrino Background from Population III Stars *Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato*

RESCEU-9/08

Non-gaussianity from the bispectrum in general multiple field inflation *Frederico Arroja, Shuntaro Mizuno and Kazuya Koyama*

RESCEU-8/08

Single-field inflation, anomalous enhancement of superhorizon fluctuations, and non-Gaussianity in primordial black hole formation *Ryo Saito, Jun'ichi Yokoyama and Ryo Nagata*

RESCEU-7/08

Probing reheating temperature of the universe with gravitational wave background *Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-6/08

Decaying D-branes and Moving Mirrors *Tomoyoshi Hirata, Shinji Mukohyama and Tadashi Takayanagi*

RESCEU-5/08

Space laser interferometers can determine the thermal history of the early Universe *Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-4/08

Higgsflation at the GUT-scale in a Higgsless Universe *Nemanja Kaloper, Lorenzo Sorbo, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-3/08

Affleck Dine leptogenesis via multiple flat directions *Kohei Kamada and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-2/08

Constraints on scalar-tensor models of dark energy from observational and local gravity tests *Shinji Tsujikawa, Kotub Uddin, Shuntaro Mizuno, Reza Tavakol and Jun'ichi Yokoyama*
Physical Review D 77 (2008) 103009

RESCEU-1/08

Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds from the correlation signals of ground-based interferometers *Naoki Seto and Atsushi Taruya* Physical Review D 77 (2008) 103001