

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

Annual Report
2005

平成17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 2005 年度 研究活動報告	iv
1	初期宇宙進化論	1
1.1	初期宇宙・相対論	1
1.2	観測的宇宙論	5
1.3	天体核・素粒子物理	8
1.4	TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論	9
2	銀河進化管理論	21
2.1	系外銀河	21
2.2	銀河系	21
2.3	超新星の観測	22
2.4	元素の起源	23
2.5	超新星爆発に伴う現象の自己相似解	23
2.6	Ia 型超新星	23
2.7	極超新星	24
2.8	大質量星の進化	24
2.9	種族 III 星の痕跡	25
3	可視光近赤外観測	33
3.1	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)	33
4	サブミリ波観測	41
4.1	富士山頂サブミリ波望遠鏡	41
4.2	テラヘルツ帯ヘテロダイン検出素子の開発	42
4.3	星形成領域の観測研究	44
5	暗黒物質観測	47
5.1	暗黒物質探索実験	47
5.2	アクシオンヘリオスコープ実験	47
5.3	共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出	48
6	銀河と宇宙構造の研究	50
6.1	宇宙論	50
6.2	すばる望遠鏡による高赤方偏移銀河と大構造の研究	50
6.3	銀河進化と環境効果	52
6.4	銀河に属さない惑星状星雲	53
6.5	スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS)	53
6.6	機器開発	54
7	気球観測による反物質探査, 衛星による X 線・γ 線観測	57
7.1	宇宙 X 線衛星「すざく」の誕生	57
7.2	炭素合成プロセスの現場検証	58
7.3	銀河団の物理学	59
7.4	コンパクト天体からの X 線放射	60
7.5	星間空間などでの高エネルギー現象	61
7.6	将来に向けての技術開発	61
7.7	BESS 気球実験グループ (山本、佐貫)	67

II	2005 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	72
1	教官，職員，および研究員	74
2	シンポジウム・研究会	75
2.1	第 4 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	75
3	プレプリント・リスト	77

I

プロジェクト別 2005年度 研究活動報告

1 初期宇宙進化論

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

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

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

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。WMAP 衛星を代表とするような宇宙背景輻射の精細観測データを用いて、宇宙論的パラメータをマルコフチェーンモンテカルロ法によって求めたり、Cosmic Inversion という独自の方法を開発することによって初期ゆらぎのスペクトルを再構築する研究を推進している。また、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・キューサー分布 2 体相関関数の探求を行っている。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。

質量の大きい星は進化の最終段階で中心にブラックホールもしくは中性子星を形成し超新星爆発を起こす。「超新星・高密度天体」を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいかにかに合体しながら核子物質へ移行するのか、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。本プロジェクトでは爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の 2 次元 3 次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。従来中性子形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしている。これらのシミュレーションとともに、実際の超新星ニュートリノの将来観測から得られる、超新星モデルあるいは素粒子モデルへの示唆・予言に関する研究も行なっている。また近年、超新星爆発との関連が示唆されているガンマ線バーストや、ガンマ線バーストが一つの候補天体となっている超高エネルギー宇宙線についての研究も進めている。

1.1 初期宇宙・相対論

超弦理論における宇宙論

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

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚しく進展し、その枠内でインフレーションを議論する事が可能になりつつある。本研究では、超弦理論におけるワープしたコンパクト化 (KKLT シナリオ)

において、反 D ブレーンの動きがダークマターとして振舞う事を示した [25, 72, 188, 263, 264, 265, 266]。この様な性質は、反 D ブレーンに限らず、サイクルに巻きつけた D ブレーンにも共通で、ワープしたコンパクト化から正の 4 次元宇宙項を得るシナリオにおいて、非常に一般的な帰結であると考えられる。

6 次元ブレーン宇宙モデル

上述の KKLT シナリオでは、ワープしたコンパクト化の大局的な解が知られていない為、簡単なモデルの解析によって、一般的性質を調べる事が有益である。そこで、6 次元のブレーン宇宙モデルを提唱し、その性質を詳しく調べた [26, 28, 73, 100, 240, 188, 189, 190, 138, 199, 200, 263, 264, 265, 266]。このモデルは、(i) ブレーン上の 4 次元時空、(ii) ワープした余剰次元、(iii) フラックスによる余剰次元の安定化等の、KKLT シナリオの重要な特徴を捉えたものになっている。また、Randall-Sundrum 5 次元ブレーンワールドを、6 次元に拡張したものとみなすこともできる。

我々が提唱した 6 次元のワープしたフラックスコンパクト化モデルの動的安定性を調べた。背景時空に対する軸対称な摂動を考え、スカラー・ベクトル・テンソル全てのタイプについて解析を行った。結果として、不安定なモードはどのタイプにも存在せず、ゼロモードはテンソル型にだけ存在することがわかった。このゼロモードは 4 次元の重力子に対応するものである。また、各タイプの Kaluza-Klein モードも求めた。[28, 190, 100]

非超対称 D ブレーン と 3 パラメーター解

D ブレーン とは、超弦理論からその存在が予言されている高次元物体である。D ブレーンをソースとして作られる時空をブラックブレーン時空と呼ぶが、これは高次元ブラックホール的一种であり、D ブレーンが重力系と深く関わっている証拠のひとつだと考えられている。シュワルツシルトブラックホールのような現実的なブラックホールと対応すると考えられるのは、超対称性を持たない D ブレーンであるため、そうした非超対称 D ブレーンがソースとなるような時空について調べた。結果、非超対称 D ブレーンに対応するのは 3 パラメーター解と呼ばれる時空であり、時空が持つチャージの 1 つが、D ブレーン上に励起した開弦のタキオンの真空期待値に対応することが明らかになった [18, 66, 149, 143, 182, 250, 251, 252, 255]。

タキオン凝縮によるブレーン生成の動的な記述

不安定な D ブレーンが閉弦の真空へと崩壊したり、安定で次元の低い D ブレーンへと変化していく過程をタキオン凝縮という。この中で、(4+1) 次元の不安定 D ブレーンが (3+1) 次元の安定な D ブレーンへと移行する過程に注目し、タキオン凝縮によってブレーンワールド時空を生成するモデル考案した。

D-term インフレーションと宇宙紐問題

超重力理論に基づくインフレーションモデルには F-term に基づくものと D-term に基づくものがあるが、前者はインフラトンが過大な質量を持たないためにはパラメタの微調整を必要とするのに対し、後者はより自然にインフレーションを起こせるという利点があった。しかし、後者は必然的に宇宙紐の生成を予言し、そのエネルギースケールは線形密度ゆらぎの振幅が観測値をとるためには、かなり大きくなければならなかった。そして近年の宇宙背景放射の精細観測データによってそのような高エネルギーの宇宙紐の存在は否定されてしまった。このような状況に鑑み、われわれはこれまで顧慮されてこなかったケーラーポテンシャルの高次項を取り入れることによって、宇宙紐のエネルギースケールを観測に矛盾することなく下げることができることを示した [2]。

また、別の可能性として、D-term インフレーションの枠内でインフラトンをスニュートリノと同定した場合、宇宙紐問題を回避できるとともにレプトン非対称の生成も可能であることを示した [3]。

熱場の理論と宇宙論

熱浴中の非平衡場の進化を定式化し、インフレーション後の再加熱期を念頭に、崩壊生成物がインフラトンより重い熱的質量を持つ場合のインフラトンの散逸率を求めた。この問題に関しては、このような状況ではインフラトンの散逸は起こらないとされてきたが、このような直観的な理解は誤りであり、このときも散逸は起こることを示し、その正確な値を求めた [4]。また、この定式化をモジュライの振動に応用し、微分結合がある場合モジュライの散逸率がこれまで考えられていたよりもはるかに大きな値を持つことを示した [5]。

タキオニックな場による宇宙再加熱と PBH 生成

インフレーション後の再加熱時に起こるパラメトリック共鳴 (preheating) は、指数関数的な揺らぎの成長を引き起こすことが知られている。本研究では、この急激な揺らぎの成長のために引き起こされる (初期宇宙起源) ブラックホール (PBH) の生成について、タキオニックな場によるモデルを用いて議論を行なった。PBH の存在量は観測から上限が得られており、大量な PBH 生成は preheating モデルに制限を与えることになる。この研究では 2 および 3 次元のシュミレーションを行い、揺らぎの進化等を非摂動的な領域まで追うことに成功した。その結果、期待された PBH の大量生成は起こりえず、タキオニックな場による宇宙再加熱のシナリオの妥当性が確認された。

宇宙初期のバリオン数生成

最近の観測から、宇宙の化学組成の進化がこれまで考えられてきたより早い段階から始まっているこ

とが明らかになってきた。また、宇宙初期のバリオン数生成機構から小さなスケールでバリオン数密度が非常に高くなる可能性が示唆されている。これを受け、バリオン数密度が非常に高い領域でどのような元素合成がおこるのかを重元素まで含めて解析をおこなった。その結果元素合成は中性子過剰核、陽子過剰核の両サイドを通して反応が進むというこれまで全く知られていなかった反応経路を通ることがわかった。またこれまで起源が明らかでなかった陽子過剰核も生成される事が分かった。[38, 127]

重力のヒッグス機構

ダークエネルギーは、現代宇宙論における最も興味深い謎の1つである。現在の宇宙の大部分を占めていると考えられているにも関わらず、我々はその正体を知らない。この状況は、宇宙規模の長距離における重力に、新しい物理を紐解くヒントが隠されているかもしれないと予感させる。そこで、一般相対性理論を宇宙規模の長距離において変更する可能性を探るため、重力にヒッグス機構を応用することを提唱し、その性質についての研究を行なった。素粒子論においてヒッグス機構が果たしている役割を思い起こせば、これが重力法則を長距離で変更する恐らく唯一の方法であると予想される。実際、このシナリオでは、他の理論 (massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデル等) が抱える問題 (巨視的スケールでの強結合によって生じる、制御不能な量子補正) を回避できることが分かっている。

具体的には、まず、重力のヒッグス機構の最も簡単な例である「ゴースト場凝縮」について、ブラックホール周辺での振舞いや、その他の非線形ダイナミクスを詳細に調べた [24, 71, 259, 260, 261, 262]。また、この理論の持つシフト対称性をゲージ化する事で、理論を拡張し、その性質を調べた [29, 201]。

宇宙背景重力波の検出について

現在、重力波をとらえようと、世界各地で重力波検出器の建造、または計画が活発化しており、宇宙を見る新しい窓として大変期待されている。CMBの重力波版ともいえる宇宙背景重力波 (CGB) は、重力の相互作用が極めて弱いことからわかるように、その強い透過力から宇宙誕生の瞬間にまで迫ることのできる観測対象になる。しかしながらこのことは同時に、重力波検出が極めて難しいことを意味する。そこでこのような性質を併せ持つに CGB に対して、効率の良い検出方法について模索してきた。非常に微弱である CGB の信号は、基本的には検出器のノイズに埋もれてしまう。このような現実的状况から、CGB の検出を可能にするためには、効率のよい統計処理 (データ解析) ならびに検出器の感度向上の工夫が必要となる。そこで CGB の信号ならびにノイズに対して、非ガウス性まで考慮した効率のよい統計処理について研究を行なった。また、検出器のデザインも重力波を捕らえる上で、大事な要素となる。そ

こで、次世代のデザインを考慮に入れた検出器の感度曲線を明確にし、CGB の検出可能性について議論した。

次世代宇宙重力波干渉計による宇宙背景重力波 (GWB) の探査

長年の実験準備期間を経て、(地上) 重力波干渉計による科学的データが入手可能となり、重力波観測実験は現在新たな時代に突入した。一方、宇宙空間に重力波干渉計を打ち上げる (LISA) 計画も着実に進んでおり、次世代型の干渉計を議論する機運が近年になって高まっている。こうした状況を踏まえ、我々は次世代型の宇宙重力波干渉計について具体的な研究を行なった。候補となる幾つかの干渉計の設計をモデル化し、それらによって宇宙背景重力波の探査をどの程度向上させることが可能か、具体的な評価を行なった。フォアグラウンドとなりうる重力波源を考慮したうえで、現在検討がすすめられている Faby-Perot 型の宇宙重力波干渉計が、LISA 型のものよりも優れていることを示し、さらには、背景重力波の双極子成分の観測可能性についても議論を行なった。

高次元ブラックホール・ブレーンとその安定性

ブラックホールのトポロジー変化を具体的に研究しうるひとつの例として、高次元におけるブラックホール・ストリング相転移を挙げることができる。この (相転移) 現象は多様な性質を持つことが指摘されている。我々は、高次元方向にチャージが特殊な形で広がった場合 (smeared と呼ばれる) について、ブラックブレーンのトポロジカルな相転移について研究を行なった。この結果、次元数に応じて相転移の次数が変化することを見出し (臨界次元の存在)、また臨界次元が統計平均の取り方に依存することを発見した。一方、ブラックブレーンがもつ Gregory-Laflamme 不安定性の一般性およびその物理的起源を探るため、ブラックブレーンの安定性についての研究を行なった。可能なすべての摂動についての安定性を調べた結果、ブラックブレーンには唯一つの不安定性 -Gregory-Laflamme 不安定- しか存在しないことが示された。この事実は、我々にこの不安定性の特殊性と起源について理解を深める洞察を与えた。

膜宇宙での始原的ブラックホールの生成と蒸発

始原的ブラックホールの生成と蒸発に着目し、Randall と Sundrum の提案したブレーン宇宙モデルの検証を進める研究を行なった。始原的ブラックホールが蒸発し放出される光子および反陽子の量をブレーン宇宙の性質を取り込んで計算し、地球近傍における測定結果と比較した。成果として、ブラックホールの存在量およびブレーン宇宙を特徴付けるパラメーターへの制限が得られた [86, 130, 135, 160]。

スライシングによる 4 次元膜上のブラックホールの構成

Dvali と Gabadadze と Porrati によって提案された高次元膜宇宙における 4 次元ブラックホール解を構成するために、バルクを「切る」スライシングの手法を用いて解析を行なった。結果として、5 次元ブラックストリング解におけるスライスが存在と唯一性、および 5 次元・4 次元 Schwarzschild 解、5 次元静的 Black Ring 解、4 次元 C-metric 解それぞれにおけるスライスの非存在を見出した [181]。

ブレーンワールドにおけるインフラトン揺らぎ

Randall-Sundrum の 5 次元ブレーン宇宙モデルにおけるインフラトンの量子揺らぎについて調べた。ブレーン上のインフラトンの揺らぎは、5 次元のバルク時空の計量の揺らぎと結合するため、結果的に作られる曲率揺らぎのパワースペクトルは、4 次元のインフレーション理論の予言からずれることが予想される。本研究では、インフラトンと 5 次元計量の結合系の時間発展を数値的に追うことで、曲率揺らぎのパワースペクトルが高周波側で減衰し、その減衰分が 5 次元計量の揺らぎへと転嫁されることが確かめられた [194]。

ブレーンワールドにおける背景重力波

インフレーション中の時空の量子論的揺らぎを起源とする背景重力波には、宇宙自体が極めて小さいスケールだったころの情報を保持していると考えられており、超弦理論や M 理論が示唆する高次元空間に対する唯一の直接的なプローブとなる。本研究では、Randall と Sundrum による 5 次元ブレーン宇宙モデルを用いて、背景重力波のスペクトルに現れる高次元の効果について考察した。標準的なシナリオでは輻射優勢期に高次元効果が現れるが、本年度はより一般的な状況を想定し、宇宙の状態方程式を変えて背景重力波の進化のシミュレーションを行った。その結果、Kaluza-Klein モードの励起の度合いが、状態方程式に依存しないある一定の法則に従うことを発見した。これにより、高次元効果の相殺は輻射優勢期特有のものであることが示された [37, 126, 134, 156, 268, 269, 79, 80]。また、この法則は 5 次元のバルク時空の詳細に関係なく、ブレーンの速度に対するローレンツファクタにのみ依存することを示唆するシミュレーション結果を得た [203]。

ブレーンワールドにおける Kaluza-Klein モードによるエネルギー損失

ブレーンワールドでの動的現象からは、ブレーン上を伝わる重力波の他に余剰次元方向へ伝わる重力波の Kaluza-Klein (KK) モードが生成される。重力波はエネルギーを運ぶためこのようなモードの存在

は重力波源の新たなエネルギー損失として寄与する。そこで本研究では Randall-Sundrum モデルにおいて、線形摂動の KK モードからの反作用をあらわす重力場の 2 次摂動を考えることにより、重力波の KK モードによる重力波源のエネルギー損失率を求めた [23, 69, 70, 124, 137, 187, 178]。

ブラックホールの微視的状态と滑らかな時空構造

D ブレーンが作るブラックホール時空には、ホライズンの無い滑らかな時空が存在することが近年明らかになった。この時空においては、ホライズンはブラックホールが取る様々な状態を粗視化したときに現れる。また、ブラックホールのエントロピーはその様々な状態を足し上げることで得られる。この時空は超対称性を持つ特殊な時空であるが、より一般的なブラックホールでもこの現象が成り立つかどうかを検証するために、超対称性を持たない D ブレーンに対応する古典解について調べた [67]。その結果、非超対称な古典解の中には滑らかにはならないものがあることがわかり、超対称性を持たない系が持つ特異点を解消するには弦の長さの効果を取り入れるなどの、別のメカニズムが必要であるという示唆が得られた。

タキオン凝縮による低次元 D ブレーンへの崩壊

我々の住む宇宙は D ブレーンというソリトンに閉じ込められていると考えられている。non-supersymmetric な D ブレーンはタキオン凝縮によって次元の異なる supersymmetric な D ブレーンに崩壊する。宇宙初期にはこのような次元の移り変わりが激しく起こり、その結果現在の 4 次元の宇宙が出来てきたと考えるのが自然である。我々はタキオン凝縮のダイナミカルな過程を超重力理論の枠組で解析した。[195]

ブラックホールのミクロな状態

ブラックホールは一般相対論の帰結として存在すると考えられているが、ブラックホールの存在する時空上で量子論を考えると、量子論の基盤としているユニタリー性が一見保たれていないようにみえるという問題ある。またブラックホールはエントロピーを持っているが、そのエントロピーに相当する内部自由度がどこにあるのかこれまで知られていなかった。これらの問題に対し、D ブレーンの解析からブラックホールの一つ一つのミクロな状態は特異点をもたない滑らかな幾何学で表現できる可能性が分かってきた。我々は non-supersymmetric なブラックホールにおける特異/非特異性の解析を行った。[139, 81, 204]

原始ブラックホール

外国人客員教授 Bernard J. Carr 氏が約 4 ヶ月間滞在し、原始ブラックホールの宇宙論的帰結、原始ブラックホール形成における自己相似解の意義、等の研究を行った [63, 92, 93]。

1.2 観測的宇宙論

宇宙背景輻射の非等方性による初期曲率ゆらぎの再構築

WMAP 衛星等で宇宙背景輻射の温度ゆらぎや偏光の精細観測データが得られるようになってきているが、われわれはこのような観測データから出発して、初期曲率ゆらぎのパワースペクトルを再構築する研究を推進している。これまで行ってきた温度ゆらぎのデータに基づいた再構築に加え、偏光のゆらぎを用いた方法を開発した。とくに、偏光と温度ゆらぎの双方を適度なバランスで考慮することによって、温度ゆらぎだけでは再構築できなかった、遷移関数のゼロ点付近の様子も精度よく再現できるようになった。さらに、双方の観測データを併用することにより、初期ゆらぎの形状をまったく仮定することなく、宇宙論的パラメタを推定できる、新しい方法を提唱した [1]。

宇宙背景輻射の精細観測データと宇宙論的パラメタ

宇宙背景輻射の精細観測データや Ia 型超新星の観測を用いて宇宙論的パラメタやダークエネルギーの性質に対し、マルコフチェーンモンテカルロ法によってさまざまな観点から制限を課した。とくに、CPT の破れに関して、宇宙背景輻射の精細観測データが有用な制限を与えることを示した [7, 8, 9, 10, 11]。

低周波帯域での宇宙背景重力波のスカイマップ作成

[42, 133, 162, 215, 235] 現在、地上でレーザー干渉計を主とする重力波の検出装置が建設・稼働中だが、近い将来、スペース干渉計の打ち上げにより、幅広い周波数帯での重力波観測が可能となる。そのスペース干渉計のターゲットの 1 つに考えられているのが、背景重力波であり、その起源は、連星系や重力崩壊星などから放射される天体起源と、宇宙初期の高エネルギー状態で生成される初期宇宙起源とに大別される。本研究では、背景重力波の種類と起源の特定に貴重な手がかりを与え、かつ、宇宙論的情報としても有用な、背景重力波の全天マップの構築方法について考察した。具体的には、干渉計の 1 次元時系列データから、2 次元強度分布を再構成する方法論を定式化し、スペース干渉計 LISA を念頭に、低周波帯域でのスカイマップ作成についての具体的なデモンストレーションを行った。その結果、低周波

帯域での角度分解能は、多重極成分で $\ell \leq 5$ に限られるものの、銀河系内・系外から来る背景重力波の区別に使えることがわかった。

一般化変分原理を用いた自己重力多体系の非平衡進化の解析

[163, 140, 205, 236] 孤立した N 体自己重力系は、一般に、自由落下時間で力学的に安定な状態に落ち着き (ビリアル平衡)、その後、2 体緩和により、じわじわと構造が進化していく。だが、重力熱的不安定性と呼ばれる熱力学的不安定性のせいで、安定な熱平衡状態には移行しない。我々は、以前、系統的な恒星衝突系の N 体シミュレーションを行い、重力熱的不安定性が起こる前に、準平衡な状態が存在し、系の特徴は、恒星ポリトロープと呼ばれる 1-パラメータ系列の分布関数で、よく近似できることを発見した。本研究では、こうしたシミュレーションの振る舞いを解析的な立場から理解するために、自己重力系のフォッカー・プランクモデルをベースに、準平衡状態のタイムスケールの定量的な評価を行った。自己随伴性が満たされない拡散方程式系にも適用可能な一般化変分原理を用いて、恒星ポリトロープを特徴づける 1-パラメータ、ポリトロープ指数の時間発展方程式を導出、その方程式を近似的に解くこと、解析的なタイムスケールの表式を得た。得られた結果は、以前のシミュレーション結果ともよく一致し、不安定状態に入る臨界点近傍では、一般的に、ポリトロープ指数の進化はスローダウンすることが示された。

銀河団の温度推定の系統誤差と宇宙の密度ゆらぎ振幅

我々が現在目にしている宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎや宇宙の大規模構造、銀河団などの天体は宇宙初期に生成された質量密度のゆらぎがその形成の起源であると考えられている。この意味で、密度ゆらぎのパワースペクトルは宇宙の平均質量密度などと並ぶ基本的な物理量である。スペクトルの形状に関しては理論予言が可能であり、観測的にもおおむね一致した結果が得られつつある。その一方で、スペクトルの振幅に関しては観測データによる一致が得られていない。スペクトルの振幅を表すパラメータとしては σ_8 と呼ばれるものが用いられるが、観測される銀河団の数密度から推定した σ_8 は 0.7 程度の値になるのに対し、宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎスペクトルなどから得られる値は 0.9 程度と大きく異なっている。しかし、最近になり、銀河団の数値シミュレーションなどから銀河団の質量の推定に系統的な誤差がある可能性が指摘された。銀河団の数密度から σ_8 を推定する方法は、観測的に見積もられた銀河団の質量と銀河団ガスの温度の相関関係を利用するため、その系統誤差の度合に応じて σ_8 の値も系統的に変化する。我々は、その度合をさまざまに変化させながら、銀河団の個数密度から求まる σ_8 の値がどのように変化するかを調べた。その

結果、観測的に推定された銀河団の質量の、真の質量に対する比が 0.7 程度であれば、 σ_8 の値が 0.9 程度になり、宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎスペクトルなどから得られる値と無矛盾となることを指摘した。[35]

ガンマ線バーストとクエーサーを背景光とした WHIM 吸収線系の検出可能性

WHIM (Warm/Hot Intergalactic Medium) を検出する新たな試みとして、ガンマ線バースト (GRB) の X 線残光 (GRB 残光) を背景光源とした場合の金属吸収線に着目した。これは QSO 吸収線による WHIM 検出の QSO を GRB 残光に置き換えたものである。この方法の利点のひとつは、GRB が宇宙論的距離 (例えば $z=1$ 程度) で起こるので、長い距離を稼ぐことができ、そのため間に WHIM が存在する確率が高くなることである。一方、明るいクエーサーは比較的近く (Mkn421 の場合、 $z=0.03$) に存在するので短い距離しか稼げない。また、もう一つの利点は、残光が充分暗くなった後に WHIM 自身からの輝線観測が可能になる点であり、これは常時輝き続けているクエーサーでは不可能である。我々は次世代衛星 (例えば XEUS) の性能を仮定し、宇宙流体シミュレーションを用いて、GRB 残光中の金属吸収線の模擬スペクトルを衝突、光電離平衡を仮定して作成し、GRB 残光中の WHIM による吸収線が検出可能であることを示した。また、DIOS の性能を仮定した輝線の模擬観測も同時に行った。この結果、XEUS を用いれば明るいガンマ線バーストを背景光とした WHIM 吸収線系の検出が可能であること、さらに、数十個程度の明るいクエーサーもこの方法論のターゲットとなり得ることを示した [103]。

重力多体専用計算機 GRAPE-5/GRAPE-6 システムを用いた PPPM 法・TreePM 法による宇宙論的 N 体シミュレーション

宇宙論的な N 体シミュレーションは宇宙の大規模構造形成の研究において大きな役割を果たしている。宇宙論的な N 体シミュレーションの特徴としては境界条件として周期境界条件を採用することにある。この為、PPPM 法や TreePM 法といった長距離力を PM 法で計算する手法が使われる場合が多い。この場合、単距離力は逆自乗則ではなく、それにカットオフが入った形になる為これまでは GRAPE を用いた計算の高速化が不可能であった。GRAPE-5 及び GRAPE-6 では、逆自乗則にカットオフの入った力も高速に計算可能であり、これらを用いて PPPM 法と TreePM 法の高速化及び並列化を行なった。[45]

WHIM における重元素イオンの非平衡電離状態

これまでの、WHIM の研究では理論・観測を問わず WHIM 中のイオンは電離平衡状態にある仮定し

ていたが、密度が極めて希薄な WHIM では、電離平衡に達するまでの時間が宇宙年齢に匹敵する程長くなるため、電離平衡の仮定は正しくない。そこで、電離平衡の仮定を外してイオンの電離状態の時間進化を直接解くことによって、より現実的な酸素イオンの電離状態を調べた。より具体的には、宇宙の大規模構造形成の数値流体シミュレーションで得られたバリオンの熱史に沿って、水素・ヘリウムの他に酸素・鉄・窒素・炭素などの重元素の電離状態の時間進化を調べた。その結果、輝線や吸収線の強度比が電離平衡を仮定した場合と比較して

大きく異なるため、電離平衡を仮定して WHIM の温度などを評価すると、実際の温度を正しく評価できなくなる可能性があることが分かった。[110, 120, 217]

重力レンズによるクエーサーの狭輝線放射領域のサイズ測定

近傍のクエーサーを含む活動銀河核周辺の狭輝線放射領域は、そのサイズと光度が理論で予想されたとおりの正の相関を示す。しかし遠方のクエーサーにおいては、同じ理論では説明できない、近傍と異なる様相を示しているという示唆がなされている。これは狭輝線放射領域やクエーサーそのものの進化が関連していると考えられるが、示唆そのものの根拠に議論の余地がある。それは、遠方になればなるほど見かけのサイズが小さくなることから、サイズの測定そのものが困難となること、実際にこの示唆が直接のサイズ測定を行っていないことにひとつの原因がある。そこで、重力レンズ効果が光源天体の見かけ上のサイズを引き伸ばすことを利用し、このような研究を次の段階へと導くためのサイズの直接測定の可能性を調べた。レンズ天体の質量分布の不定性を考慮すると、既存の観測データからはサイズ測定が困難であることが判明したが、今後の観測によって実際のサイズ測定が可能であること、またその手法を示した。[44]

大分離角重力レンズクエーサー SDSSJ1004+4112 による背景銀河の多重像の発見

強い重力レンズの効果で 4 重像をもっているクエーサー SDSSJ1004+4112 をハッブル宇宙望遠鏡で観測した結果、 $z = 0.68$ にあるレンズ天体銀河団の影響で多重像をもつ 3 つの背景銀河を発見した。これらのうち 2 個はケック望遠鏡での分光フォローアップ観測の結果、 $z = 3.33$ および $z = 2.74$ であることが確認された。このような多重像の同定は、銀河団の質量分布の再構築と宇宙論パラメータの制限にユニークなツールとなる [52]。

3 軸不等楕円体ハローモデルの解析的導出

冷たい暗黒物質モデルのもとで形成される暗黒ハローは一般に球対称分布から大きく外れた構造を持

つことが知られている。この構造をゼルドビッチ近似を用いて解析的に計算したところ、すでに数値シミュレーションから得られている3軸不等楕円体近似の軸比の分布関数を良く再現することを発見した。この結果は、暗黒ハローの質量分布プロファイルを理論的により正確に予言する道を開くと考えられる[54]。

宇宙論的密度ゆらぎの位相相関解析

通常、宇宙論的密度ゆらぎの研究は、理論的にも観測的にほとんど2点統計の解析に限られている。スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログから、2点相関に登場する(線形)バイアスの、銀河環境依存性についてはかなり詳細な研究が可能となった[53]。一方、2点統計には登場しない、位相の相関についての研究はまだ発展途上である。我々は、ジーナス統計を用いたスローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログ解析から、位相相関の定量化を行った[55]。さらに、摂動論から計算される位相の確率分布関数を用いた新たな位相相関解析方法を開発し、シミュレーションデータ及びスローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログに応用した。その結果、バイアスの摂動展開の2次の係数と1次の係数(線形バイアス)の間に、有意な相関があることを経験的に発見した[56]。

SDSS クエーサー 2 点相関関数とバリオン密度パラメータ

典型的なクエーサーは銀河よりも数百倍も明るく、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) によって得られたクエーサーの分布は赤方偏移にして23といった深宇宙にまで及んでいる。このようなクエーサーサンプルを用いると銀河よりも遥かに大きなスケールの宇宙の大規模構造を探る事が可能となる。我々はSDSSによって得られた過去最大のクエーサーサンプルを用い、赤方偏移空間のクエーサー2点相関関数を求め、バリオン密度パラメータ及び宇宙定数に対して制限を与えた。[51]

SDSS 銀河を用いた銀河系ダストマップの検証

我々の銀河によるダスト吸収はあらゆる天文学的観測に重要な影響を及ぼす最も基本的なデータである。現在広く利用されている銀河吸収のマップはSchlegel, Finkbeiner & Davis(1998)によるものであるが、これはダストの放射量にいくつかの仮定を与えて推測された値である。これらの仮定は、光学的に厚い領域が存在する場合、視線方向に様々な温度のダストが重なり合っていた場合等で、観測的に重要となる真の吸収量との間に系統的な誤差が生じている可能性がある。我々はSDSSによって得られた銀河の光度分布と計数からダスト吸収量を見積もり、

Schlegel らのダスト吸収マップの検証を行っている。[211, 119]

すばる望遠鏡によるトランジット惑星系の大気元素探索

本研究室ではすばる望遠鏡・高分散分光器を用いて、太陽系外惑星系の中でも惑星による恒星の「食」が観測されている「トランジット惑星系」の観測的研究を行っている。このような惑星系では、惑星が主星の前面にいる時といない時のスペクトルを比較することで、惑星の外層大気中にある元素に由来した追加吸収を探ることができる。(このような手法はTransmission Spectroscopyと呼ばれている)

我々は2002年にトランジット惑星系HD 209458の可視領域での高分散分光観測を行い、Na, Li, H α , H β , H γ , Fe, Caなどの元素についてTransmission Spectroscopyの手法を用いて惑星大気の探索を行った。その結果、大気による追加吸収は検出できなかったが、全ての元素の追加吸収に対して、これまでの地上観測で最も強い制限を与えた[39, 82, 83, 84, 128, 157, 158, 159]。

太陽系外トランジット惑星 HD209458b のロシター効果

トランジットを起こす太陽系外惑星系は、トランジットの最中にRossiter効果と呼ばれる現象を起こす。そのため、恒星の視線方向速度をドップラー効果を用いて測定すると、トランジット中は本当の速度からずれて見える。この現象は、恒星同士の連星の場合に対しては、古くから知られ研究されている。Rossiter効果を観測すると、恒星の自転軸の向きと惑星の公転軸の向きのずれを測定できる。これは、惑星系の角運動量の起源や進化を考える上で、重要な情報である。

我々のグループは太陽系外トランジット惑星系HD 209458のデータを解析し、親星の自転軸と惑星の公転軸に小さなずれがあることを検出した。軸のずれの大きさは $4.4 \pm 1.4^\circ$ で、太陽系の場合の値 $3-10^\circ$ と同程度であることがわかった。これほど細かい精度で軸のずれの大きさを求めたのは初めてである。[40]

太陽系外トランジット惑星のリングの検出可能性

ロシター効果は主星の自転速度が十分速ければ惑星のシグナルの増幅器として使用することもできる。このことを用いると、太陽系外惑星の周りにおけるリングや衛星といった、微細な構造を検出することが可能になると予想される。我々は特に惑星のリングについて、ロシター効果を用いた検出可能性がどの程度のものか、定量的に議論をした。

宇宙論スケールでの重力法則のずれに対する制限

現在様々な観測により、我々の宇宙のエネルギーの7割がダークエネルギーであり、このため宇宙は加速膨張を行っていると言われている。しかし、ダークエネルギーの起源・正体は謎のままである。このような状況下で近年、ダークエネルギーを「重力法則の変更」として理解する視点が出始めてきた。このように重力が変更された場合、その影響が宇宙論スケールでの Newton 重力の変更として現れることが期待される。しかし、これまでは太陽系以上のスケールで Newton 重力が成り立っているかはわかっていなかった。

このような観点から我々は、ダークエネルギーを重力理論の変更という観点から捉え、その結果として生じるであろう宇宙論スケールでの Newton ポテンシャルのずれにより、大規模構造形成がどのように変更されるかを調べている。Newton ポテンシャルが変更した場合のクラスターリングを、準解析的な手法もしくは N 体シミュレーションを用いて予言する。そして、その結果と銀河のクラスターリングの観測とを比較することで、宇宙論スケールでの Newton ポテンシャルの変更に対し制限を行った [87, 131, 122, 213, 223, 234]

ダークハローのバイアスの非線形性とバイスペクトル

宇宙論的密度ゆらぎの2点統計は銀河の光度・色・形状に依存することが知られている。しかし、最近の観測によると3点統計を見るとこのような銀河の性質に対する依存性は見られない。我々はハロー、ピークのバイアスモデルによりこのことを解析的に説明した。さらに、シミュレーションデータ、スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログを使った3点統計の計算を行うことで、赤方偏移歪み、サーベイの形状の効果を検証し、最終的に上述の3点統計の性質はバイアスの非線形性に起因するものであると結論づけた。[121],[219]

1.3 天体核・素粒子物理

ガンマ線バースト起源の背景重力波

ガンマ線バースト (GRB) に付随する莫大なニュートリノ放射に着目し、その際に発生する重力場のメモリー効果について調べた。まずは一つの GRB からのメモリー効果の大きさについて定式化を行い、さらに GRB の赤方偏移分布を考慮して宇宙論的距離まで足しあげることで、メモリー効果を背景重力波と見なしたときのスペクトルを作成した。その結果、インフレーション起源の背景重力波に対する観測の窓とされる 0.1Hz 帯において $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-20}$ 程度の寄与があることを示した [36]。

特殊相対論的流体計算によるマグネター、ガンマ線バーストの起源

超新星爆発という現象は重い星の重力崩壊から生じるが、その時に達成される高温高密度な環境は地上では達成できず、極限的な状態の実験場として長年注目を集めてきた。近年の観測で超新星とは別の現象だと考えられてきたガンマ線バーストもある種の重力崩壊の結果とわかり、この重力崩壊現象の多様性に更なる注目が集まっている。我々はその多様性の原因として自転や磁場の違いに着目しており詳細な数値シミュレーションを行ってきた。強磁場中での流体計算には特殊相対性理論に基いた計算を行う必要があるが本年度は完全特殊相対論的磁気流体コードを完成させ、世界に先駆けた研究を行った。その結果強磁場中での重力崩壊で生じる将来マグネターとなるであろう原始中性子星はもとの自転プロファイルにより保有する磁場の形状が大きく異なることを示した。また、このような強磁場重力崩壊では極方向にジェット状の衝撃波が生じることが知られていたが、このジェットが星の外まで伝播する様子のシミュレーションに成功した。このことにより、星の中心部の重力崩壊と星の外で起こるガンマ線バーストをつなげて議論できるようになった。また、多様性を述べるために質量、自転、磁場の初期条件化に関して広いパラメータ領域でたくさんのモデルの計算を行った。このことにより、ジェット放出の有無に対して臨界的な初期条件が分かった。[77, 78, 125, 154, 155, 231, 180, 209, 210, 192, 193, 232, 221, 267]

第一世代星の自転磁場重力崩壊

近年、HE0107-5240 のような極端に金属量の少ない星が見つかりはじめている。このような超金属欠乏星は宇宙のごく初期に生まれた第一世代の星と関係性が強いと考えられるので、そのような星が観測できるようになったことで、初期宇宙の進化を解き明かす鍵となる第一世代の星への関心が高まっている。

このような第一世代星の重力崩壊のシミュレーションはほとんど行われていない。そこで我々は、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、初期に十分強い磁場 (10^{12}G) を持つような天体は、重力崩壊の際にジェット状の爆発を起こすことを示した。また、最終的に残るブラックホール の大きさや放出されるニュートリノの量と、初期の回転則・強さの相関関係も明らかにした [75, 76, 153, 145, 179, 191, 208]。さらに、そのような天体の起こす現象の質量依存性についても計算を行い、あまりに重い天体は強磁場を有していても爆発は起こさないことを示した [220]。

暗黒物質対消滅とガンマ線背景放射

観測されている宇宙背景ガンマ線のうち、多くの部分はブレーザーなどの天体起源と考えられている

が、そのうち一部のエネルギー領域では、暗黒物質対消滅の兆候が見えているという可能性が以前から指摘されてきた。今回我々は、暗黒物質ハローの密度プロファイルが、シミュレーションから指摘されているように普遍的であるという仮定の元、いかなるエネルギー領域においても暗黒物質対消滅は、背景ガンマ線の主要構成要素となることはできないということを証明した。[19, 184, 207, 177].

また宇宙ガンマ線背景放射の起源を探る手法として、非等方性の議論を行った。まず最初に暗黒物質対消滅による非等方性の等式化を行い、それによりブレーザーなど通常の天体起源によるシグナルとは異なったものが得られることを示した。さらに GLAST 衛星による検出可能性の評価を行い、1 年程度の観測で有意なシグナルを得られることを示した [22, 144, 226].

さらに暗黒物質対消滅による銀河外ガンマ線背景放射への寄与として、中間質量ブラックホール (IMBH) 周りの暗黒物質の増加 (スパイク構造) の効果を議論した。今回我々は、中間質量ブラックホールの進化を考慮し、それらの周りからの暗黒物質対消滅が、観測されている背景ガンマ線にどの程度の寄与を与えうるかを定量的に評価した結果、観測を上回ってしまうことを証明した。[225]

重力崩壊型超新星でのジェット生成と高エネルギーニュートリノ放射

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。この事実は、我々の GRB に対する理解を大きく深めると同時に、新たな疑問を投げかけている。すなわち「全ての超新星は GRB にみられるような、相対論的ジェットを伴っているのか?」という事である。この疑問に対する完全な答えは、光による観測からだけでは得ることができない。我々は、ジェット中の粒子加速により作られるニュートリノを検出する事により、この疑問に答えることができ、さらにいくつかの物理的示唆が得られる事を示した。[20, 68, 148, 183, 227, 228].

近傍銀河からの超新星ニュートリノの検出可能性

超新星爆発を引き起こす機構である、重力崩壊の際にはおびただしい量のニュートリノが、10 秒程度の時間スケールで放出されると考えられている (ニュートリノバースト)。今回我々は、比較的近く (数メガパーセク) の銀河でおこった超新星からのニュートリノバーストの検出可能性と、それが与える示唆についての研究を初めて行った。この手法で、現在提案されているハイパーカミオカンデや UNO といったメガトン (SK の 20 倍程度) 級の体積を持つ検出器を用いれば、10 メガパーセク以内の銀河で起こった超新星から、統計的にも超新星 1987A に匹敵する程度のイベントが稼げる事を示された。これにより超新星ニュートリノのスペクトルの情報を着実に得ることができるうえ、重力崩壊の時間を 10 秒の精度で

知ることができる。後者に関しては、関連する重力波や、その他のシグナルに強い制限を与える上でも、非常に重要な情報となることが期待される。[21, 185]

数値シミュレーションを用いた超高エネルギー宇宙線の伝搬

荷電粒子である宇宙線は宇宙空間に存在する磁場と相互作用し、その軌道を曲げる。これは超高エネルギー宇宙線でも例外でなく、伝搬中に有意な角度曲がるということがいくつかの先行研究で指摘されてきた。この曲がりのため、宇宙線のソースから地球までの伝搬過程を解き、到来方向分布を計算することには膨大な計算時間がかかるという困難があった。多くの宇宙線は磁場による曲がりにより地球に届かないからである。我々はこの計算上の困難を、宇宙線伝搬過程の逆過程に着目し、地球に届くものだけの計算を扱うという手法を開発し、解決した。この手法を用い、今まで誰もなし得なかった銀河磁場と銀河間空間磁場を同時にとり入れた伝搬計算を行なうことによって、地球での到来方向分布を計算した。また、これを AGASA 観測の結果と比較することにより、宇宙線ソースの数密度を求めた。[41, 102, 88, 89, 90, 132, 161, 146] 銀河間空間磁場は観測においても不定性が大きいため、観測に矛盾しない範囲で磁場の大きさを変え、銀河間空間磁場が伝搬に与える影響を考察した。[196] また、超高エネルギー宇宙線は磁場による曲がり小さいことから、ソースの分布を反映した到来方向分布が実現されることが予想される。この様子を定量的に考察した。[214, 146]

原子核パスタの相図

超新星や中性子星のような高密度天体の内部では原子核がその形状を球形から棒形、板形へと変化させる可能性があることが指摘されている。我々は量子分子動力学法 (QMD) と呼ばれるシミュレーションによって原子核パスタがこれら高密度天体中に存在することを示し、その相図が核パラメータの不定性の範囲内でどの程度変化するか温度ゼロ、有限温度の両方について調べた。[74, 101, 152, 202, 242] また、超新星におけるパスタ相のニュートリノオパシティについても QMD の結果を用いて計算を行ない、方向、温度によって著しく散乱断面積が変化することを示した。[101]

1.4 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論

現在、標準理論を超える理論の有力な候補の一つとして、超対称性を持つように拡張された標準理論 (超対称標準理論) が考えられている。この理論は、階層性問題が解消される可能性があること、標準理

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

4 次元共形場理論による FCNC 問題の解決

これらの問題を解決する一つの解決策として 4 次元超共形場理論を応用したものがある。4 次元超共形場理論を用いることで SUSY-FCNC 問題を解決するスペクトラムを実現し、また重い質量により十分早くグラヴィティーノを崩壊させることが原理上可能であることは知られていたが、具体的で有望なモデルは存在していなかった。柳田、井沢、伊部、中山、新原、は、超対称性を自発的に破るモデルを 4 次元超共形場理論に埋め込むことで具体的にそのようなモデルを構築することに成功した [58, 59]。

LCSUGRA と宇宙論

またもうひとつの解決策として、ミニマルな超重力理論が考えられている。ミニマルな超重力理論では、スレプトンやスクォークが高エネルギーで普遍的な質量を持つため SUSY-FCNC 問題を起こさない。またミニマルな超重力理論では、暗黒物質の量から比較的重い、すなわち比較的短寿命のグラヴィティーノが予言されるので、初期温度の制限が比較的緩くなることが分かる。その結果、宇宙のバリオン数を右巻きニュートリノで説明するのに必要な温度 ($T \gtrsim 10^{6-7}$ GeV) まで上げてても gravitino 問題が生じないことが知られている。このようなミニマルな超重力理論は大きな cutoff スケールを導入することで実現することができる (LCSUGRA)。

しかしながら、LCSUGRA では繰り込み不可能な演算子の係数は制限され、繰り込み不可能な演算子を利用したインフレーションモデルで観測を説明できるか不明瞭であった。そこで、柳田、井沢、伊部、新原は new inflation モデルを LCSUGRA のもとで考察した [62]。この理論ではさらに inflation セクターのパラメーターからグラヴィティーノの質量がきまり、ビッグバン元素合成の予言、宇宙背景輻射の揺らぎの観測、宇宙に存在するバリオンの非対称性を LCSUGRA のもとで説明できるか非自明であったが、自然なパラメーターで実現されることを示した。

Randall-Sundrum 模型の現象論

また、標準模型を超えた理論の他の候補として高次元時空を利用した Randall-Sundrum 模型が考えられている。この模型では階層性問題が時空の計量から説明され、また湯川相互作用の大きさを $O(1)$ の相互作用で説明することが可能となるため非常に魅力的であると考えられている。

しかしながら、単純な模型では陽子の寿命が短いと言う点や、ニュートリノのマヨラナ質量が観測と比べて大きすぎるといった点があることが知られている。そこで中島は、修士論文において Randall-Sundrum 模型における現象論の基本的な性質をまとめ、陽子崩壊やニュートリノ質量に関連した問題の原因となる繰り込み不可能な演算子を、新たな対称性を導入することによって禁止する方法について考察した。

<報文>

(原著論文)

- [1] Noriyuki Kogo, Misao Sasaki and Jun'ichi Yokoyama, "Constraining cosmological parameters by the cosmic inversion method," *Progress of Theoretical Physics* **114** (2005) 555 – 572.
- [2] Osamu Seto and Jun'ichi Yokoyama, "Hiding cosmic strings in supergravity D-term inflation," *Physical Review* **D73** (2006) 023508 (7 pages).
- [3] Kenji Kadota and Jun'ichi Yokoyama, "D-term inflation and leptogenesis by right-handed sneutrino," *Physical Review* **D73** (2006) 043507 (7 pages).
- [4] Jun'ichi Yokoyama, "Can oscillating scalar fields decay into particles with a large thermal mass?" *Physics Letters B* **635** (2006) 66 – 71.
- [5] Jun'ichi Yokoyama "Thermal background can solve the cosmological moduli problem," *Physical Review Letters* **96** (2006) 171301.
- [6] Kazunori Kohri and Masahiro Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama, "Neutralino dark matter from heavy gravitino decay," *Physical Review* **D72** (2005) 083510 (9 pages).
- [7] Gong-Bo Zhao, Jun-Qing Xia, Bo Feng, and Xinmin Zhang "Probing dynamics of dark energy with supernova, galaxy clustering and the three-year wilkinson microwave anisotropy probe (wmap) observations," *astro-ph/0603621*
- [8] Gong-Bo Zhao, Jun-Qing Xia, Bo Feng, and Xinmin Zhang "Probing inflation and dark energy with current cosmological observations," *astro-ph/0603393*
- [9] Bo Feng, Mingzhe Li, Jun-Qing Xia, Xuelei Chen, and Xinmin Zhang "Searching for CPT violation with wmap and boomerang," *astro-ph/0601095*
- [10] Pei-Hong Gu, Xiao-Jun Bi, Bo Feng, Bing-Lin Young, and Xinmin Zhang "Detecting dark energy in long baseline neutrino oscillations," *hep-ph/0512076*

- [11] Jun-Qing Xia, Gong-Bo Zhao, Bo Feng, Hong Li, and Xinmin Zhang “Observing dark energy dynamics with supernova, microwave background and galaxy clustering,” *Physical Review* **D73** (2006) 063521.
- [12] M. Kawasaki and T. Yanagida, “511-keV gamma ray from moduli decay in the galactic bulge,” *Phys. Lett.* **B624** (2005) 162.
- [13] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, “Conformally sequestered SUSY breaking in vector-like gauge theories,” *Phys. Rev. D* **73**, 015004 (2006)
- [14] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, “More on conformally sequestered SUSY breaking,” *Phys. Rev. D* **73**, 035012 (2006).
- [15] M. Tanimoto and T. Yanagida, “A Higher-dimensional origin of the inverted mass hierarchy for neutrino,” *Phys. Lett.* **B633** (2006) 567.
- [16] F. Takahashi and T. Yanagida, “Unification of dark energy and dark matter,” *Phys. Lett.* **B635** (2006) 57.
- [17] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “Minimal supergravity, inflation, and all that,” To appear in *Phys. Lett. B*.
- [18] Tsuguhiko Asakawa, Shinpei Kobayashi and So Matsuura, Escited D-branes and Supergravity Solutions, *Int. J. Mod. Phys.* **A21**, 1503 (2006)
- [19] Shin’ichiro Ando: “Can Dark Matter Annihilation Dominate the Extragalactic Gamma-Ray Background?”; *Phys. Rev. Lett.* **94**, 171303 (2005)
- [20] Shin’ichiro Ando and John F. Beacom: “Revealing the Supernova–Gamma-Ray Burst Connection with TeV Neutrinos”; *Phys. Rev. Lett.* **95**, 061103 (2005)
- [21] Shin’ichiro Ando, John F. Beacom, and Hasan Yüksel: “Detection of Neutrinos from Supernovae in Nearby Galaxies”; *Phys. Rev. Lett.* **95**, 171101 (2005)
- [22] Shin’ichiro Ando and Eiichiro Komatsu: “Anisotropy of the cosmic gamma-ray background from dark matter annihilation”; *Phys. Rev. D* **73**, 023521 (2006)
- [23] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda, and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld, *Class. Quant. Grav.* **22**, 3911 (2005).
- [24] S. Mukohyama, “Black holes in the ghost condensate,” *Phys. Rev. D* **71**, 104019 (2005).
- [25] S. Mukohyama, “anti-D-brane as dark matter in warped string compactification,” *Phys. Rev. D* **72**, 061901 (2005).
- [26] S. Mukohyama, Y. Sendouda, H. Yoshiguchi and S. Kinoshita, “Warped flux compactification and brane gravity,” *JCAP* **0507**, 013 (2005).
- [27] T. Shiromizu, S. Tomizawa, Y. Uchida and S. Mukohyama, “Kaluza-Klein bubble and celestial sphere in inflationary universe,” *Gen. Rel. Grav.* **37**, 1823 (2005).
- [28] H. Yoshiguchi, S. Mukohyama, Y. Sendouda and S. Kinoshita, “Dynamical stability of six-dimensional warped flux compactification,” *JCAP* **0603**, 018 (2006).
- [29] H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler, “Spontaneous Lorentz breaking at high energies,” arXiv:hep-th/0603010, to appear in *JHEP*.
- [30] North-South Neutrino Asymmetry in Strongly Magnetized and Rotating Stellar Cores, *Astrophys. J.*, 618 (2005) 474. (astro-ph/0409244) Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato
- [31] R-Process Nucleosynthesis in MHD Explosions of Core-Collapse Supernovae (astro-ph/0504100) Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato
- [32] Explosion Mechanism, Neutrino Burst, and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae Reports on Progress in Physics 69 (2006), 971. (astro-ph/0509456) Kei Kotake, Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi
- [33] Magnetohydrodynamic Simulations of A Rotating Massive Star Collapsing to A Black Hole Astrophys. J. in printing (astro-ph/0602457) Shinichirou Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Masa-aki Hashimoto, and Katsuhiko Sato
- [34] Explosive Nucleosynthesis in GRB Jets Accompanied by Hypernovae Astrophysical J in printing (astro-ph/0601111) Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, and Katsuhiko Sato
- [35] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Systematic bias in an estimate of the cluster mass and the fluctuation amplitude from cluster abundance statistics; Publications of the Astronomical Society of Japan, **58**(2006) 291-297 (astro-ph/0602015)
- [36] Takashi Hiramatsu, Kei Kotake, Hideaki Kudoh and Atsushi Taruya : “Gravitational wave background from neutrino-driven gamma-ray bursts”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **364** (2005) 1063
- [37] Takashi Hiramatsu : “High-energy effects on the spectrum of inflationary gravitational wave background in braneworld cosmology”, *Phys. Rev. D* **73**(2006)084008
- [38] S. Matsuura, S. Fujimoto, S. Nishimura, M. Hashimoto, K. Sato: Heavy Element Production in Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis, *Phys.Rev.***D72** (2005) 123505.
- [39] Norio Narita, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Christopher J. Leigh,

- Bun'ei Sato, Motohide Tamura, and Toru Yamada: Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2006) 471-480 (astro-ph/0504540)
- [40] Joshua N. Winn, Robert W. Noyes, Matthew J. Holman, David B. Charbonneau, Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, Norio Narita, Edwin L. Turner, John A. Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, and Steven S. Vogt: Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System; The Astrophysical Journal **631** (2005) 1215 – 1226 (astro-ph/0504555)
- [41] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field” , ApJ, 639, 803-815 (2006)
- [42] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer. II. Perturbative reconstruction of a low-frequency sky map; Physical Review D **72** (2005) 104015 (19 pages) (gr-qc/0507114)
- [43] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami: Antonov problem and quasi-equilibrium states in an N-body system; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **364** (2005) 990 – 1010 (astro-ph/0509745)
- [44] Atsunori Yonehara: Constraining the size of the narrow line region in distant quasars, Astrophys. J. in press (astro-ph/0603802)
- [45] Kohji Yoshikawa and Toshiyuki Fukushima: PPPM and TreePM Methods on GRAPE Systems for Cosmological N-Body Simulations; Publications of the Astronomical Society of Japan **57** (2005) 849–860
- [46] Hideaki Kudoh and Umpei Miyamoto. On non-uniform smeared black branes, Class.Quant.Grav. pp3853-3874, 2005
- [47] Hideaki Kudoh, Atsushi Taruya, Takashi Hiramatsu, Yoshiaki Himemoto. Detecting a gravitational-wave background with next-generation space interferometers. Phys.Rev. D73, 064006, 2006
- [48] Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Bruce Bassett, Hideaki Kudoh Black hole production in tachyonic preheating JCAP 0604:001,2006
- [49] Masaki Ando et al. (the TAMA collaboration) Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses. Phys.Rev.D71:082002,2005
- [50] Hideaki Kudoh Origin of black string instability Phys.Rev. 2006 (hep-th/0602001)
- [51] Kazuhiro Yahata, Yasushi Suto, Issha Kayo, Takahiko Matsubara, Andrew Connolly, Daniel Vanden Berk, Ravi Sheth, István Szapudi, Scott F. Anderson, Neta Bahcall, Jon Brinkmann, István Csabai, Xiaohui Fan, Jon Loveday, Alexander S. Szalay, and Donald York: Large Scale Clustering of Sloan Digital Sky Survey Quasars: Impact of the Baryon Density and the Cosmological Constant; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2005) 529 – 540 (astro-ph/0412631)
- [52] Keren Sharon, Eran O. Ofek, Graham P. Smith, Tom J. Broadhurst, Dan Maoz, Christopher S. Kochanek, Masamune Oguri, Yasushi Suto, Naohisa Inada, and Emilio E. Falco: Discovery of multiply imaged galaxies behind the cluster and lensed quasar SDSS J1004+4112; The Astrophysical Journal **629**(2005) L73 – L76 (astro-ph/0507360)
- [53] Idit Zehavi, Zheng Zheng, David H. Weinberg, Joshu A. Frieman, Andreas A. Berlind, Michael R. Blanton, Roman Soccimarro, Ravi K. Sheth, Michael A. Strauss, Issha Kayo, Yasushi Suto, M. Fukugita, O. Nakamura, N.A. Bahcall, J. Brinkmann, J.E. Gunn, G.S. Hennessy, Z. Ivezic, G.R. Knapp, J. Loveday, A. Meiksin, D.J. Schlegel, D.P. Schneider, I. Szapudi, M. Tegmark, M.S. Vogeley, D.G. York (for the SDSS Collaboration): The luminosity and color dependence of the galaxy correlation function; The Astrophysical Journal **630**(2005)1 – 27 (astro-ph/0408569)
- [54] Jounghun Lee, Yipeng Jing and Yasushi Suto: An Analytic Model for the Axis-Ratio Distribution of Dark Matter Halos from the Primordial Gaussian Density Field; The Astrophysical Journal **632**(2005) 706–712 (astro-ph/0504623)
- [55] Changbom Park, Yun-Young Choi, Michael Vogeley, J. Richard Gott III, Juhan Kim, Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Myeong-Gu Park, Yasushi Suto, and David H. Weinberg: Topology Analysis of the Sloan Digital Sky Survey: I. Scale and Luminosity Dependences; The Astrophysical Journal **633**(2005) 11–22 (astro-ph/0507059)
- [56] Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Yasushi Suto, Changbom Park, Alexander S. Szalay, and Jon Brinkmann: Fourier phase analysis of SDSS galaxies; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2005) 709-718 (astro-ph/0506194)
- [57] M. Kawasaki and T. Yanagida, “511-keV gamma ray from moduli decay in the galactic bulge,” Phys. Lett. **B624** (2005) 162.
- [58] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinkawa and T. Yanagida, “Conformally sequestered SUSY breaking in vector-like gauge theories,” Phys. Rev. D **73**, 015004 (2006)

- [59] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, “More on conformally sequestered SUSY breaking,” *Phys. Rev. D* **73**, 035012 (2006).
- [60] M. Tanimoto and T. Yanagida, “A Higher-dimensional origin of the inverted mass hierarchy for neutrino,” *Phys. Lett.* **B633** (2006) 567.
- [61] F. Takahashi and T. Yanagida, “Unification of dark energy and dark matter,” *Phys. Lett.* **B635** (2006) 57.
- [62] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “Minimal supergravity, inflation, and all that,” To appear in *Phys. Lett. B*.
- [63] T. Harada, M. Maeda, and B.J. Carr, “Non-existence of self-similar solution containing a black hole in a universe with a stiff fluid or scalar field or quintessence,” *Physical Review D*. **74**, 024024 (2006).
- (会議抄録)
- [64] Jun'ichi Yokoyama, “Decaying into the thermal medium in the early Universe,” *Proc. PASCOS 05*, (AIP, 2006) 82 – 86.
- [65] S. Kawamura et al. (including J. Yokoyama and A. Taruya) “The Japanese space gravitational wave antenna DECIGO,” *Proc. 6th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (Amaldi6)*, Kise Nago, Okinawa, Japan. *Class.Quant.Grav.***23** (2006) S125 – S132.
- [66] Shinpei Kobayashi, Tsuguhiko Asakawa, Shunji Matsuura and So Matsuura: Geometrical Aspects of D-branes : Boundary States and Gravity Solutions; *Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation*
- [67] Shunji Matsuura and Shinpei Kobayashi: Geometrical Aspects of D-branes : Black Hole Entropy and Microstates; *Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation*
- [68] 安藤真一郎: 「Failed GRB から的高エネルギーニュートリノ」
- [69] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld, *Proceedings of the 59th Yamada conference: “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology”* (Tokyo, June 2005) in press
- [70] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, and Takahiro Tanaka: Second order perturbation and energy loss by the KK modes in the RS model, *Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation* (Tokyo Institute of Technology, November 2005)
- [71] S. Mukohyama, “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, *Proceedings of the 59th Yamada conference “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology”*, Tokyo, Japan, June 2005.
- [72] S. Mukohyama, “Cosmology with Warped String Compactification”, *Proceedings of the 15th workshop on General Relativity and Gravitation*, presented at Tokyo Institute of Technology, December 2005.
- [73] Y. Sendouda, S. Mukohyama, S. Kinoshita, H. Yoshiguchi, “Covariant boundary conditions for perturbation in compactified codimension-two braneworlds,” *Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation*, 261-264.
- [74] Gentaro Watanabe and Hidetaka Sonoda: Recent progress on understanding “pasta” phases in dense stars, *Proceedings of the 2nd Argonne/MSU/JINA/INT RIA Workshop on “Reaction Mechanisms for Rare Isotope Beams”* (AIP Conference Proceedings 791), ed. B. A. Brown, 101-111 (2005).
- [75] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes”; *Proceedings of International Symposium on “Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05)”*, in press
- [76] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes”; *Proceedings of International Workshop on “Energy Budget in the High Energy Universe”*, in press
- [77] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Jet Formation from Strongly Magnetized Core-Collapse; ,*Proceedings of Yamada Conference 2006*
- [78] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Total Simulations of Magneto-driven jet from Core-Collapse Supernovae; ,*Proceedings of COE Symposium Waseda*
- [79] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, 59th Yamada Conference, June 2005, Tokyo
- [80] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, YKIS2005, June 2005, YITP
- [81] S.Matsuura, S.Kobayashi: PROCEEDINGS OF THE FIFTEENTH WORKSHOP ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION in JAPAN, p.143 (2005)
- [82] Norio Narita et al. in the 59th Yamada conference: “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology” June 20-24, 2005 at the University of Tokyo, “A Search for the Exospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS”

- [83] Norio Narita et al. in "International Symposium on Origins of Life and Astrobiology: ISOLAB '05" June 27-July 1, 2005 at Niigata, "A Search for the Exospheric Components of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS"
- [84] Norio Narita et al. in Tenth Anniversary of 51 Peg-b: "status of and prospects for hot Jupiter studies" August 22-26, 2005 at Observatoire de Haute-Provence(OHP), France, "Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b"
- [85] 成田 憲保: すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星系の観測的研究、第1回 21世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (2005 年 11 月 21 日)
- [86] Yuuiti Sendouda, Kazunori Kohri, Shigehiro Nagataki, Katsuhiko Sato, "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld," Proceedings of the 59th Yamada conference, in press.
- [87] Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida, Yasushi Suto: "Galaxy Clustering Constraints on Deviations from Newtonian Gravity at Cosmological Scales"; Proceedings of the 59th Yamada conference on Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology, Universal Academy Press, 2006, in press
- [88] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field", Proceedings of the 59th Yamada Conference, in press
- [89] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field", Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, vol.17, 175
- [90] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field", Proceedings of , Energy Budget of High Energy Universe, in press
- [91] Atsunori Yonehara: Constraining the size of narrow line region at high-z, Proceedings of Asian-Pacific Regional IAU Meeting 2005
- [92] B.J. Carr, 2006, "Primordial black holes as a probe of inflation, dark matter and extra dimension," Proceedings of 15th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, ed. T. Shiromizu et al., p 21-24.
- [93] B.J. Carr, Carr, 2006, "Primordial Black Holes: Do they exist and are they useful?" In Inflating Horizons of Particle Physics and Cosmology, p 129-149, ed. H. Susuki et al., Universal Academy Press.
- (国内雑誌)
- [94] 向山信治: "M 理論が宇宙論の謎を解く", 月刊天文ガイド 2005 年 12 月号, pp.6-9.
- [95] 佐藤勝彦: 相対論百年【3】 宇宙の誕生と未来 天文教育 (天文教育普及研究会) 2005 年 5 月号 74 号 Vol.17 No.3 2
- [96] 須藤 靖: "学会誌の記事を楽しく読むために: 宇宙物理編", 日本物理学会誌 **61** (2006) pp.52-53.
- [97] 須藤 靖: "観測的宇宙論の来し方行く末", パリティ **21**(2006) pp.4-13.
- [98] 須藤 靖: "大学での教育・研究をとりまく環境 - 東京大学物理学教室の場合 -", 日本天文学会誌 天文月報 **99**(2006)pp.97-101.
- (学位論文)
- [99] 安藤真一郎: "Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae" (博士論文)
- [100] 吉口寛之: "Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification" (博士論文)
- [101] Hidetaka Sonoda: Nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics (修士論文)
- [102] Hajime Takami: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields" (Master thesis)
- [103] 河原 創: 軟 X 線精密分光を用いた宇宙の暗黒バリオン探索 (修士論文)
- (著書)
- [104] 佐藤勝彦: 「アインシュタインの考えた宇宙」 実業の日本社、2005 年 12 月
- [105] 佐藤勝彦: 「ホーキング、宇宙のすべてを語る」 (翻訳) S. ホーキング ランダムハウス講談社 2005 年
- [106] 佐藤勝彦: 「みるみる理解できる相対性理論」 (監修) Newton 別冊 ニュートンプレス 2005
- [107] 佐藤勝彦: 「大宇宙・七つの不思議」 (監修) PHP 文庫, PHP 研究所 2005
- [108] 横山順一: 「宇宙 地球 地震と火山」 (第一部) 古今書院, 2006
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [109] Katsuhiko Sato: From supernovae to inflation; The 59th Yamada Conference on Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology (Univ. Tokyo, Japan, June 2005)
- [110] Kohji Yoshikawa: Non-equilibrium Ionization State of Warm-Hot Intergalactic Medium on October 11, 2005 at Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium (Kanagawa, Japan)

- [111] Jun'ichi Yokoyama "Can oscillating scalar field decay into a particle with a large thermal mass?" Post-YKIS symposium on gravitation and cosmology (Kyoto University, July 2005).
- [112] 工藤秀明 Black holes with extra dimensions: the black-hole black- string transition; 研究会"Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics : Relativistic Astrophysics" (2005 年 5 月 5 日、USA, カリフォルニア, UCLA)
- [113] Yasushi Suto: The Rossiter effect of transiting extrasolar planets on January 19, 2006 at the 10th workshop on Gravitational Microlensing and Related Topics - extrasolar planets and cold dark matter (Nagoya, Japan)
- [114] Yasushi Suto: Future plans of Subaru and HyperSuprime-Cam/WFMOS on February 22, 2006 at WFMOS Science Team meeting (Pasadena, USA)
- [115] Yasushi Suto: Searching for emission and absorption signatures of warm/hot intergalactic medium with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor on June 2, 2005 at ICTP conference on Numerical Cosmology (Trieste, Italy).
- [116] Yasushi Suto: Constraints on deviations from Newton's law of gravity from large-scale structure on July 12, 2005 at The 18th University College London Astronomy Colloquium on; THE INTERFACE BETWEEN COSMOLOGY AND GALAXY FORMATION (London,UK)
 - The 1st KChina-Japan-Korea workshop on; Galaxy formation and numerical simulation (November 9-12, 2005, Zhouzhuang, China)
- [117] Yasushi Suto: Recent activities of observational cosmology group at University of Tokyo
- [118] Yasushi Suto: Summary talk and discussion topics
- [119] Kazuhiro Yahata, Atsunori Yonehara, Yasushi Suto, Edwin Turner & Tom Broadhurst Examining the reliability of the SFD dust map using the SDSS galaxy number counts
- [120] Kohji Yoshikawa: Emission and Absorption Diagnostics of Warm-Hot Intergalactic Medium
- [121] Takahiro Nishimichi, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yahata, Chiaki Hikage, Issha Kayo, Yipeng Jing: Non-linear biasing effects in three point statistics
- [122] Akihito Shirata, Chiaki Hikage, Issya Kayo, Naoki Yoshida, Takahiko Matsubara, Tetsuya Shiromizu and Yasushi Suto: Constraints on the deviation from Newton's law of gravity from SDSS galaxy clustering ~with 2 and 3 point statistics~
 - The 59th Yamada Conference on Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology (Univ. Tokyo, Japan, June 2005)
- [123] Shin'ichiro Ando: "Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae"
- [124] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld
- [125] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Jet Formation from Strongly Magnetized Core-Collapse
- [126] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: "Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology"
- [127] S. Matsuura, S. Fujimoto, S. Nishimura, M. Hashimoto, K. Sato: Heavy Elements production in Inhomogeneous BBN
- [128] Norio Narita et al.: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology" June 20-24, 2005 at the University of Tokyo, "A Search for the Exospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS"
- [129] Yasuhiro Ohta: The Rossiter Effect for Extrasolar Ringed Planets
- [130] Yuuiti Sendouda: "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld"
- [131] Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida and Yasushi Suto: Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales
- [132] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field"
- [133] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Making the skymap of gravitational-wave backgrounds with space interferomete
 - Yukawa International Seminar 2005 (Kyoto, Japan, June 2005)
- [134] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: "Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology"
- [135] Yuuiti Sendouda: "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld"
 - The 15th Workshop on General Relativity and Gravitation (Tokyo Institute of Technology, November 2005)
- [136] Yoshiaki Himemoto: Detecting a stochastic background of gravitational waves in presence of non-Gaussianity

- [137] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, and Takahiro Tanaka: Second order perturbation and energy loss by the KK modes in the RS model
- [138] Yuuiti Sendouda: "Covariant boundary conditions for perturbation in compactified codimension-two braneworlds"
- [139] S.Matsuura, S.Kobayashi: Geometrical Aspects of D-branes: Black Hole Microstates,
- [140] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami, Takashi Okamura: Generalized variational principle for stellar dynamics and quasi-equilibrium states in N-body system
- [141] 工藤秀明、樽家篤史発表題目 "Gravitational-wave backgrounds probed with a space-based interferometer"
- [142] 工藤秀明、樽家篤史、平松尚志、姫本宣朗発表題目 "Detecting a gravitational-wave backgrounds with next-generation space interferometers"
- [143] Shinpei Kobayashi, Tsuguhiko Asakawa, Shunji Matsuura and So Matsuura: "Geometrical Aspects of D-branes : Boundary States and Gravity Solutions"
 - International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe (ICRR, Japan, February 2006)
- [144] Shin'ichiro Ando and Eiichiro Komatsu: "Cosmic Gamma-Ray Background Anisotropy from Dark Matter Annihilation"
- [145] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: "Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes"
- [146] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field"
 - その他
- [147] Jun'ichi Yokoyama "Decaying into thermal medium in the early universe," PASCOS05 (Kyongju, Korea, May 2005)
- [148] Shin'ichiro Ando and John F. Beacom: "TeV neutrinos from jets in core-collapse supernovae"; TeV Particle Astrophysics (Fermi National Accelerator Laboratory, July 2005)
- [149] Shinpei Kobayashi, Tsuguhiko Asakawa and So Matsuura: "Non-BPS D-brane Systems and Supergravity Solutions" Strings 05 (Toronto, Canada, July 2005)
- [150] Shin'ichiro Ando: "Relic supernova neutrino background: Current status and prospects of future detectors"; Next Generation of Nucleon and Neutrino Detectors (Centre Paul Langevin, Aussois, Savoie, France, April 2005)
- [151] Yoshiaki Himemoto: Detecting a stochastic background I in the presence of non Gaussianity by the generalized crosscorrelation statistic; 6h Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave 沖縄万国津梁館 (2005 年 6 月 20 日)
- [152] Hidetaka Sonoda, Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka, Toshikazu Ebisuzaki: Phase diagrams of nuclear "pasta" investigated by QMD simulation, Hawaii 2005 second joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS, Kapalua, Hawaii, September 2005
- [153] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: "Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes" (Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05) ; 2005 年 11 月)
- [154] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Total Simulations of Magneto-driven jet from Core-Collapse Supernovae ,COE Symposium,Tokyo Waseda University (September 2005)
- [155] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae ,Omeg2005,University of Tokyo(November 2005)
- [156] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: "Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology", COSMO05, August 2005, Germany
- [157] Norio Narita et al. in "International Symposium on Origins of Life and Astrobiology: ISOLAB '05" June 27-July 1, 2005 at Niigata, "A Search for the Exospheric Components of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS"
- [158] Norio Narita et al. in Kobe International School of Planetary Sciences 2005: "Origin of Planetary Systems" July 11-17, 2005 at Awaji Yumebutai International Conference Center, Hyogo, "Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b"
- [159] Norio Narita et al. in Tenth Anniversary of 51 Peg-b: "status of and prospects for hot Jupiter studies" August 22-26, 2005 at Observatoire de Haute-Provence(OHP), France, "Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b"
- [160] Yuuiti Sendouda: "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld," Albert Einstein Century International Conference, Paris, France, July 2005
- [161] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic

- Field”, 29th International Cosmic Ray Conference (August 3-12, 2005, University of Pune, India)
- [162] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Making the skymap of gravitational-wave backgrounds with space interferometer, Post-YKIS, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University, July 27 - 28, 2005
- [163] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami: Description of quasi-equilibrium states in self-gravitating N-body system, The 3rd 21COE Symposium “Astrophysics as interdisciplinary science”, Waseda University, September 1 - 3, 2005
- [164] Atsunori Yonehara: Constraining the size of narrow line region at high-z, Asian-Pacific Regional IAU Meeting 2005 (parallel session 3: Compact Objects, AGN and High Energy/Cosmic Ray Astrophysics), Bali, July 2005
- [165] Atsunori Yonehara, Hiroyuki Hirashita, Philipp Richter: The Origin of chromatic feature in multiple quasars, “the 10th workshop on Gravitational Microlensing and Related Topics - extrasolar planets and cold dark matter”, Nagoya, January 2006
- [166] 工藤秀明 Black holes with extra dimensions: the black-hole black-string transition 国際会議 Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics: Relativistic Astrophysics (University of California, Los Angeles, USA) 2005 年 5 月
- [167] 工藤秀明”Black Hole/String Transition :Origin of the Instability and the Effects of Charge” 国際会議 Scanning New Horizons:GR Beyond 4 Dimensions, University of California, Santa Barbara, USA, 2006 年 1 月
- [168] 工藤秀明題名 Discussion: Do Static Black Holes Exist on Randall-Sundrum Branes? 国際会議 Scanning New Horizons:GR Beyond 4 Dimensions, University of California, Santa Barbara, USA, 2006 年 1 月
- [169] Yasushi Suto: Searching for warm/hot intergalactic medium with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor), on June 7, 2005 at cosmology seminar at Department of Astronomy, University of Bologna, Italy.
- [170] Yasushi Suto: Investigation of the Rossiter effect of a transiting planet to determine the spin-orbit misalignment on Ku;y 15, 2005 at Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, UK.
- [171] Yasushi Suto: High-resolution spectroscopic observations of a transiting extrasolar planet HD209458b, on October 19, 2005 at Planet and life seminar, University of Texas at Austin, USA.
- [172] Yasushi Suto: Exploring warm/hot intergalactic medium with DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) on October 20, 2005 at Cosmology seminar, University of Texas at Austin, USA.
- [173] Jun’ichi Yokoyama “A new solution to the cosmological moduli problem” CICHEPII (Cairo, Egypt, January, 2006)
- [174] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と未来第 7 回アジア・太平洋高度衛星通信国際フォーラム 11月29日
(国内会議)
一般講演
・ RESCEU 研究会 (婦恋村鹿沢、2005 年 8 月)
- [175] 横山順一: モジュライ問題
- [176] 小林晋平: Strings 2005 報告
- [177] 安藤真一郎: 「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」
- [178] 木下俊一郎, 工藤秀明, 仙洞田雄一, 佐藤勝彦: ブレーンワールドにおける孤立系からの Kaluza-Klein モードとその 2 次摂動
- [179] 諏訪 雄大, 滝脇 知也, 固武 慶, 佐藤 勝彦: 巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成
- [180] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦:
大質量星を伝搬する磁気優勢ジェットのシミュレーション
- [181] 仙洞田雄一: “DGP ブレーンモデルでのブラックホール解”
・ 日本物理学会 2005 年秋季大会 (大阪市立大学、2005 年 9 月)
- [182] 小林晋平, 浅川嗣彦, 松浦俊司, 松浦壮: Stringy Interpretation of Classical Geometry via Non-BPS D-brane Systems
- [183] 安藤真一郎, John F. Beacom: 「重力崩壊型超新星からのジェット生成に伴う高エネルギーニュートリノ放射」
- [184] 安藤真一郎: 「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」
- [185] 安藤真一郎, John F. Beacom, Hasan Yüksel: 「近傍銀河からの超新星ニュートリノの検出可能性」
- [186] 姫本 宣朗: Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussianity II
- [187] 木下俊一郎, 工藤秀明, 仙洞田雄一, 佐藤勝彦: ブレーンワールドにおける孤立系からの Kaluza-Klein モードとその 2 次摂動
- [188] 向山信治: “Cosmology with Warped Flux Compactification”
- [189] 向山信治, 仙洞田雄一, 吉口寛之, 木下俊一郎: “Warped Flux Compactification and Brane Gravity”
- [190] 吉口寛之, 木下俊一郎, 仙洞田雄一, 向山信治: “Dynamical stability of 6D warped flux compactification”

- [191] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成
- [192] 滝脇知也、固武慶、山田章一、佐藤勝彦：強磁場超新星の特殊相対論的シミュレーション
- [193] 滝脇知也、固武慶、山田章一、佐藤勝彦：大質量星中の磁気優勢ジェットのシミュレーション
- [194] 平松尚志、小山和哉：“Numerical study of brane inflaton perturbations”
- [195] 松浦俊司、高橋慶太郎、小林晋平、姫本宣朗：Creation of brane world via tachyon condensation
- [196] 高見 一、吉口寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線の到来方向分布と大規模構造磁場
- [197] 樽家 篤史、工藤 秀明、姫本 宣朗、平松 尚志：On the optimal detection of a stochastic gravitational-wave background in presence of noise nonrelation
- [198] 工藤秀明、樽家篤史、平松尚志、姫本宣朗、題名 GW background in the LISA data and Extraction method of their multipoles
- ・日本物理学会 2006 年春季大会（愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月）
- [199] 仙洞田雄一、向山信治、吉口寛之、木下俊一郎：“コンパクトな 2 次元余剰空間を持つブレイン時空の安定性”
- [200] 木下俊一郎、向山信治、仙洞田雄一、吉口寛之：“コンパクトな 2 次元余剰空間を持つ black hole 時空の性質”
- [201] 向山信治：“Gauged Ghost Condensation”
- [202] 園田英貴、渡邉元太郎、佐藤勝彦、泰岡顕治、戎崎俊一：QMD によるパスタ相の相図の不定性の研究
- [203] 平松尚志、Sanjeev Seahra、小山和哉、樽家篤史：“Transfer function of tensor perturbations in braneworld cosmology”
- [204] 松浦俊司、小林晋平：D-brane, geometry and thermodynamics.
- [205] 樽家 篤史、阪上 雅昭、岡村 隆史：一般化変分原理を用いた自己重力多体系の準平衡状態の解析
- [206] 工藤秀明、宮本雲平題名 Origin of black string instability
- ・日本天文学会 2005 年秋季年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月）
- [207] 安藤真一郎：「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」
- [208] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成
- [209] 滝脇知也、固武慶、山田章一、佐藤勝彦：大質量星の強磁場重力崩壊とジェット生成、伝播のシミュレーション
- [210] 滝脇知也、固武慶、山田章一、佐藤勝彦：強磁場超新星とプロトマグネターの誕生
- [211] 矢幡 和浩、米原 厚憲、須藤 靖、Edwin Turner、Tom Broadhurst SDSS 銀河データを用いたダスト吸収マップの検証
- [212] 成田 憲保：トランジット惑星系における Rossiter 効果 I. HD209458 での観測結果
- [213] 白田 晶人、加用 一者、日影 千秋、吉田 直紀、松原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖：宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限 II：高次相関
- [214] 高見 一、吉口寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線を用いた大規模構造の探索可
- [215] 樽家 篤史、工藤 秀明：Mapping gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer
- [216] 米原厚憲：狭輝線アークから得られた狭輝線放射領域のサイズ
- [217] 吉川 耕司：Non-equilibrium Ionization State of Warm-Hot Intergalactic Medium
- [218] 須藤 靖：太陽系外惑星系の主星自転軸と惑星公転軸間の角度の決定
- ・日本天文学会 2006 年度春季年会（和歌山大学、2006 年 3 月）
- [219] 西道 啓博、矢幡 和浩、日影 千秋、加用 一者、樽家 篤史、Yipeng Jing：ダークハローバイアスの非線形性とバイスペクトル
- [220] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の重力崩壊とその質量依存性
- [221] 滝脇知也、固武慶、山田章一、佐藤勝彦：超新星の磁気駆動爆発の系統的研究
- [222] 成田 憲保：分野の枠を越えた若手研究者が発信する新しい理科教育の試み
- [223] 白田 晶人、日影 千秋、加用 一者、吉田 直紀、松原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖：宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限 III：摂動論を用いた 3 点統計量の推定
- [224] 高見 一、吉口寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線の到来方向分布と起源天体分布の相関
- [225] 堀内俊作、安藤真一郎、佐藤勝彦：中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅：銀河外ガンマ線背景放射への寄与
- ・その他
- [226] 安藤真一郎、小松英一郎：“Cosmic Gamma-Ray Background Anisotropy from Dark Matter Annihilation and Detectability at GLAST”；研究会「次世代ガンマ線衛星 GLAST で切り開く高エネルギー宇宙物理学」（東京工業大学、2005 年 11 月）
- [227] 安藤真一郎、John F. Beacom：「Failed GRB から的高エネルギーニュートリノ」；研究会「ガンマ線バースト 2005 — HETE-2, Swift, Suzaku で築く GRB 観測 —」（石川厚生年金会館、2005 年 12 月）
- [228] 安藤真一郎、John F. Beacom：「Failed GRB から的高エネルギーニュートリノ」；理論天文学懇談会シンポジウム（京都大学基礎物理学研究所、2005 年 12 月）

- [229] 佐藤勝彦: 宇宙年齢、暗黒エネルギー問題と人間原理
宇宙論山田財団理事会・評議会講演、5月29日
- [230] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生 — 物理学の描く創世記 —
日本電気学会特別講演、東京 5月20日
- [231] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 現実的状态
方程式、ニュートリノ冷却入り SRMHD; 相対論的
MHD ミニワークショップ;(千葉大 9月)
- [232] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新
星と GRB; GRB2005 (金沢大学 12月)
- [233] 成田 憲保: すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星系の
観測的研究、第1回 21世紀 COE QUESTS RA 若
手交流シンポジウム (2005年11月21日)
- [234] 白田 晶人、日影 千秋、加用 一者、吉田 直紀、松
原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖: 宇宙論スケールでの
Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制
限 高次相関; 東京工業大学 21世紀 COE プログラ
ム「量子ナノ物理学」第2回公開シンポジウム (五
反田ゆうぼうと、2006年3月16日-17日)
- [235] 樽家 篤史, 工藤 秀明, 姫本 宣朗, 平松 尚志: スペ
ース干渉計で背景重力波の非等方性を探る (DECIGO-
WG ミーティング, 国立天文台, 2005/5/12)
- [236] 樽家 篤史, 阪上 雅昭, 岡村 隆史: 一般化変分原理を
用いた自己重力多体系の準平衡進化の解析 (天体力
学 N 天体力学研究会, 潮来富士屋ホテル, 2006/3/1-4)
- 招待講演
- [237] 横山順一 「始めも終わりもインフレーション」日本
物理学会 2005 年秋季大会 宇宙項シンポジウム (大
阪市立大学、2005 年 9 月)
- [238] 横山順一 「宇宙初期の熱的非平衡過程」東北大学
21 世紀 COE 「物質階層融合科学の構築」素粒子・
天文合同研究会「初期宇宙の解明と新たな自然像」
- [239] 安藤真一郎: “Neutrino Probes of Extragalactic Su-
pernovae”; 第 17 回ニュートリノ研究会 (東京大学
宇宙線研究所, 2005 年 6 月)
- [240] S. Mukohyama, “Warped Flux Compactification
and Brane Gravity”, Post-YKIS2005 Workshop
“Extra-dimensions — Achievements, Unsolved
problems and Prospects —”, Kyoto, Japan, July
2005.
- [241] 向山信治: “Black hole entropy and related topics”,
東京工業大学 宇宙物理学理論グループ研究会、群
馬 (2005 年 10 月 16 日)
- [242] 園田英貴: 高密度天体で現れる原子核パスタへの
QMD によるアプローチ、ミクロからマクロへ、マ
クロからミクロへ—秩序形成、精密計算への理論的
アプローチ—(京都大学基礎物理学研究所、2005 年
11 月)
- [243] 平松尚志: “重力波天文学の夜明け・・・の少し前”,
国立天文台, 天塾 (2005 年 11 月 26 日)
- [244] 米原厚憲: 天体の構造と重力レンズ現象、基礎物理学
研究所研究会「ミクロからマクロへ、マクロからミ
クロへ —秩序形成、精密計算への理論的アプロ
ーチ」、京都、2005 年 11 月
- [245] 須藤 靖: 宇宙の果てから太陽系外惑星へ、科研費特
定領域研究会「太陽系外惑星科学の展開」西はりま
天文台 (2005 年 9 月 6 日)
- [246] 須藤 靖: 太陽系外惑星系 HD209458 におけるロシ
ター効果の観測、連星・変光星ワークショップ 2005
国立科学博物館新宿分館 (2005 年 10 月 30 日)
- [247] 須藤 靖: ダークエネルギーと WFMOS、超広視野撮
像/分光器で目指す観測的宇宙論国立天文台 (2006
年 3 月 13 日)
- [248] 須藤 靖: HSC/WFMOS への道: open discussion、
超広視野撮像/分光器で目指す観測的宇宙論国立天
文台 (2006 年 3 月 14 日)
- (セミナー)
- [249] 横山順一: “Cosmic Inversion 宇宙背景輻射の非
等方性による初期ゆらぎのスペクトルの再構築”
東京大学天文学研究教育センター談話会 (2005 年 6
月 9 日)
- [250] 小林晋平: “D-反Dブレーン系のタキオンと超重力理
論の古典解について”, 京都大学大学院理学系研究
科 素粒子論研究室 セミナー (2005 年 7 月 6 日)
- [251] 小林晋平: “非 BPS Dブレーンによる高次元ブラッ
クホール解の弦理論的解釈” 京都大学総合人間学部
重力・宇宙論研究室 セミナー (2005 年 7 月 7 日)
- [252] 小林晋平: “非 BPS D ブレーン系と超重力理論の古
典解との関係” 東京工業大学大学院理工学研究科
素粒子理論研究室 セミナー (2005 年 7 月 20 日)
- [253] 横山順一: “Cosmic Inversion 宇宙背景輻射の非等
方性による初期ゆらぎのスペクトルの再構築” 東京
大学理学部天文学教室談話会 (2006 年 1 月 31 日)
- [254] 横山順一: “Thermal dissipation in the early Uni-
verse,” 東京大学理学部素粒子論研究室セミナー
(2006 年 2 月 16 日)
- [255] 小林晋平: “D-branes and their geometrical as-
pects” 京都大学理学部 天体核研究室 宇宙論セ
ミナー (2006 年 3 月 6 日)
- [256] Shin'ichiro Ando: “Neutrino Probes of Ex-
tragalactic Supernovae”; Astroparticle Physics
group, Max-Planck-Institut für Physik (April
2005)
- [257] 安藤真一郎: “Neutrino Probes of Galactic and Cos-
mological Supernovae”; 東京大学宇宙線研究所 佐々
木研究室 (2005 年 5 月)
- [258] 安藤真一郎: “Astroparticle Physics with Super-
nova Neutrinos”; 京都大学基礎物理学研究所 (2005
年 10 月)
- [259] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in
Higgs Phase”, 東北大学 素粒子論研究室 セミ
ナー (2005 年 6 月 9 日)
- [260] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in
Higgs Phase”, KEK Theory Seminar (2005 年 6
月 14 日)
- [261] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in
Higgs Phase”, 首都大東京 素粒子理論研究室 セ
ミナー (2005 年 6 月 15 日)

- [262] 向山信治: “Dynamics of Gravity in a Higgs Phase”, 京都大学基礎物理学研究所 セミナー (2005 年 7 月 11 日)
- [263] 向山信治: “Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, University of Victoria, Departmental Seminar (2005 年 8 月 31 日)
- [264] 向山信治: “Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, University of Toronto, CITA Seminar (2005 年 9 月 8 日)
- [265] 向山信治: “Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, 大阪市立大学 宇宙物理研究室 セミナー (2005 年 11 月 17 日)
- [266] 向山信治: “Cosmology with Warped String Compactification”, University of California at Davis, Joint Theory Seminar (2006 年 2 月 13 日)
- [267] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 重力崩壊型超新星の磁気流体シミュレーション; 首都大学東京 セミナー (12 月)
- [268] 平松尚志: “Numerical study of cosmological tensor perturbations in brane-world”, 早稲田大学, 理論宇宙物理学研究室セミナー (2005 年 4 月 22 日)
- [269] 平松尚志: “Numerical study of cosmological tensor perturbations in brane-world”, 大阪市立大学, 宇宙物理 (重力) 研究室コロキウム (2005 年 7 月 8 日)
- [270] 工藤秀明: “Probing anisotropies of gravity-wave backgrounds with space interferometers” (2005 年 9 月, イスラエル, エルサレム大学)
- [271] 須藤 靖: 第 2 の地球を探る、サイエンスカフェ 丸ビルカフェーズ (2005 年 4 月 23 日)
- [272] 須藤 靖: 宇宙の組成を探る、上智大学理工学部物理学科コロキウム (2005 年 4 月 28 日)
- [273] 須藤 靖: 銀河宇宙から宇宙背景輻射へ、中央大学理工学部物理学科談話会 (2005 年 5 月 26 日)
- [274] 須藤 靖: 太陽系外惑星探査最前線、杉並区立科学館講演会 (2005 年 6 月 11 日)
- [275] 須藤 靖: 太陽系外惑星の公転軸はちょびり傾いていた、日本天文学会 2005 年度秋季年会記者発表 札幌かでる 2・7 (2005 年 10 月 5 日)
- [276] 須藤 靖: 進化する宇宙像、日本大学文理学部桜麗祭講演会 (2005 年 10 月 29 日)
- [277] 成田 憲保: Transmission Spectroscopy and the Rossiter-McLaughlin Effect、第 25 回系外惑星系セミナー 国立天文台 (2005 年 4 月 19 日)
- (集中講義他)
- [278] 佐藤勝彦: 明星大学理工学部 12 月 20-22 日
- [279] 佐藤勝彦: 東京大学学術俯瞰講義 物質の生い立ち ー素粒子、原子、宇宙ー 10 月ー11 月
- [280] 横山順一: 甲南大学大学院理工学研究科 「宇宙論」 (2005 年 7 月)
- (その他)
- [281] 横山順一: 金沢大学公開講座 サイエンストーク 「宇宙の科学」 (2005 年 10 月 1 日)
- [282] 向山信治: アインシュタイン メモリアル 「弦が結ぶ音楽と科学のハーモニー」、パネリスト (世界物理年冬のイベント、東京オペラシティ、2005 年 12 月 13 日)
- [283] 宇宙理論研究室が主体となって、国際会議 「The 59th Yamada conference: Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology」 (June 20-24, 2005) を開催した。
- [284] 成田 憲保: もうひとつの地球探しをしよう、科学技術館ユニバースゲスト (2005 年 7 月 23 日)
- [285] 成田 憲保: 太陽系外惑星研究の面白さ～研究の現状とこれからの展望について～、第 16 回天塾 国立天文台 (2005 年 7 月 23 日)
- [286] 成田 憲保: もうひとつの地球を探して、サマーサイエンススクール 2005 in 妙高高原 (2005 年 7 月 31 日)
- [287] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生 ～ 物理学の描く創世記 ～ 東京大学 5 月祭講演 5 月 29 日
- [288] 佐藤勝彦: 暗黒物質、暗黒エネルギー問題は現代物理学の暗雲か? 経団連技術同友会 東京、10 月 18 日
- [289] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と進化 ー現代物理学の描く創世記ー東レ市民講演会、朝日マリオン、9 月 22 日
- [290] 佐藤勝彦: 相対性理論と宇宙論江戸川大学講演、柏 11 月 5 日
- [291] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と未来岐阜大学フォーラム講演 12 月 7 日

2 銀河進化理論

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

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

近年の観測技術の進歩により、より遠くの天体、より暗い天体についての詳細な観測データが大量に得られるようになってきた。遠くの天体を観測するということ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た。超新星を標準光源として仮定することによって宇宙の幾何学的な性質を導こうという試みもある。この研究には遠方の超新星と近傍の超新星の性質の差異を知ることが重要である。また、遠方の天体として着目されている γ 線バーストについて、その起源と超新星の関連について研究している。特に、近年注目されている極超新星と呼ばれる非常に爆発エネルギーの大きな超新星の爆発モデルを計算し、観測と比較することでその特徴を明らかにしつつある。極超新星は非常に大量の重元素を放出するので銀河の化学進化における役割も究明する必要がある。極超新星の1つ SN 1998bw は γ 線バーストと同時期に空のほぼ同じ方角で起こった。また、SN 2003dh は GRB030329 の残光の中に見え始めそのスペクトルは SN 1998bw と良く似ていた。そこで、これら2つの現象がどのように結びつくのかという観点で研究を進めている。

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

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 系外銀河

Modelling “The Antennae” (NGC 4038/39)

Two model galaxies consisting of a bulge, a disk, and a halo are set to approach each other such that they will go through tidal interaction and produce a product resembling the cross-tailed morphology of The Antennae. The vast parameter space of the model is narrowed down by assumptions of the initial orbits, and trials and errors in searching for the best-fit solution. So far the simulations have been N-body with only collisionless particles, smoothed particle hydrodynamics particles will be adopted to follow the evolution of the gas in the disk so that simulation results can be compared with the observed properties of the Antennae.[89]

2.2 銀河系

銀河初期における炭素過剰星の起源

銀河系ハローに属する星で $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ となる重元素含有量が少ない星に炭素含有量が多い星が多く見られる。この星は連星に属していてより早く進化した星が外層を放出したときにそこに多く含まれる炭素によって表面が汚染されたものだというシナリオを基に、現在の炭素過剰星の軌道周期分布と炭素組成の相関などを調べた。The Astrophysical Journal に投稿済み。[117, 125]

超新星が駆動する星形成を取り込んだ銀河系形成シミュレーション

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

球状星団形成と化学進化

銀河系の星が生まれる元になったガス雲同士の衝突によって球状星団が形成されるというシナリオと、衝撃波によって圧縮されたガスから星ができるという銀河系ハローで成功した仮定を用いて、一つの球状星団中の星がほぼ同じ鉄の濃度を持つための条件を調べた。その結果、質量が $10^6 M_\odot$ ほどのガス雲同士では、相対速度が 33 km s^{-1} 以上で衝突すれば、星形成は1世代だけで終了し、観測を説明できる。銀河系の重力場内では 200 km s^{-1} でガス雲は動いていると考えられるので都合が良い。しかし、ガス雲の質量が $3 \times 10^7 M_\odot$ だと星形成を1世代で終わらせる相対速度は $\sim 700 \text{ km s}^{-1}$ となり、ほとんどのガス雲は何世代もの星を持った星団となると期待され、 ω Centauri の様な大きな球状星団の起源と考えられる。我々はこのシナリオに基づいた球状星団の重元素量の分布を求め、観測と比較し良い一致を見た。また、 ω Centauri の化学力学進化モデルを構築した。現在は、Hubble 宇宙望遠鏡によって発見された2つの主系列の起源を、後から産まれた星が先に生まれて進化し AGB になった星が放出した He-rich なガスを降着して青くなるというシナリオによって説明することを試みている。

2.3 超新星の観測

極超新星 2003jd の「すばる FOCAS」による輝線スペクトル観測

川端弘治 (広島大学) を PI として、前田, Mazzali, Pian らと超新星、極超新星の ToO 観測を実施している。極超新星 SN 2003jd の後期スペクトルを観測し、その酸素の輝線スペクトルが double peak になっていることを発見。ジェット状非球対称爆発のモデルの予測と非常に良く一致することを示した。[66]

変種 Ia 型超新星 2002ic の「すばる IRCS」による赤外スペクトル観測

本原 (天文センター), Kotak (Imperial College, London) 等との共同研究。変種 Ia 型超新星 2002ic の後期の近赤外スペクトル観測を実施。解析中。

Ia 型超新星 2003hv の「すばる OHS/CISCO」による近赤外スペクトル観測

本原 (天文センター), 前田, C. Gerardy, (Imperial College, London), R. Fesen (Dartmouth 大学), 等との共同研究。Ia 型超新星の一年後の nebula spectra が flat top になっていることを観測した。

超新星の光度曲線の MAGNUM による観測

吉井, 富田, 峯崎 (天文センター), 小林 (国立天文台) 等による超新星 SNe 2002ic, 2004dj, 2004et の測光観測データを解析し、他の超新星、理論モデルとの比較を行なっている。

特異な SN2005bf の光度曲線、スペクトルモデル

P. Mazzali (Trieste 天文台), J. Deng (NAOC), 前田 (総合文化), M. Modjaz, R. P. Kirshner (CfA), 稲田, 峰崎, 吉井 (天文センター), 川端 (広島大), 家 (天文台), G. C. Anupama, D. K. Sahu, T. P. Prabhu (インド天文学研究所) との共同研究。超新星 SN2005bf は最初 Ic 型超新星として報告されたが、その後、He の吸収線が強くなり、Ib 型超新星へと変化した。この超新星はスペクトルも特異であったが、光度曲線も爆発後 10 日程度でピークを持ち、少し減光したが再び増光し始め、爆発後 40 日間に絶対等級で -18 等程度という非常に遅く明るいピークを示した。ピーク後の減光は非常に早く通常のモデルでは説明ができなかった。我々は、この超新星の double-peak であることを ^{56}Ni が double-peak な分布を持つこと、ピーク後の早い減光は ^{56}Ni から放射されたガンマ線が通常の場合よりも効率的に抜けていくことで再現した。このモデルは、本超新星で He の吸収線が時間とともに強くなっていき、吸収線の速度が増加していくことも定性的に説明することが可能であった。以上の研究により、本超新星の爆発物質の質量は $6-7 M_\odot$ であり、爆発エネルギーは $E = 1.3 \times 10^{51} \text{ erg}$ 、放出された ^{56}Ni の質量は $0.3 M_\odot$ であることを求めた。[6, 22, 83]

2.4 元素の起源

銀河初期における軽元素の起源

Ic 型に分類される超新星の外層は炭素と酸素からできていて爆発直後に相対論的な速度までに加速され、星間物質中の水素やヘリウムと破碎反応を起こし、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 ${}^6\text{Li}/\text{O}$ 、 Be/O を再現できることがわかった。結果は The Astrophysical Journal に発表した。[3, 47, 48, 49, 50, 51, 85, 86, 122, ?]

超新星における Si 合成と超新星起源グレインの Si 同位体比

吉田 (東北大学) との共同研究. 超新星起源プレソーラーグレインは太陽系 Si 同位体比と比べて 28Si の過剰や大きい $29\text{Si}/30\text{Si}$ 比を特徴として示す。この研究では超新星 ejecta の混合を考慮して超新星を起こす星の質量や爆発のエネルギーに対する Si 同位体比の取り得る範囲を調べた。その結果、 $15M_{\odot}$ 程度以下の比較的軽い星の超新星爆発や極超新星から超新星起源プレソーラーグレインに見られる Si 同位体比の特徴を再現できることが得られた。[25, 63]

2.5 超新星爆発に伴う現象の自己相似解

星の表面を通過する超相対論的衝撃波に対する自己相似解

これまで、星の表面を通過する衝撃波を記述する自己相似解は非相対論的で平行平板近似が成り立つ星表面ごく近傍に関してのみ得られていたが、我々は平行平板ではあるが、衝撃波が超相対論的に進む場合の自己相似解を見いだして、The Astrophysical Journal に発表した。この現象の結果として加速された外層のエネルギー分布も導き、非相対論的な場合と比較した。[1, 104, 114]

超相対論的な速度の物質と周辺物質の衝突によって発生する波に関する自己相似解

若い超新星残骸を記述する自己相似解を、衝撃波の速度が超相対論的な場合に拡張した。結果は The Astrophysical Journal に発表済み。[5, 113]

2.6 Ia 型超新星

Ia 型超新星残骸の中心にある伴星を同定する方法

爆発から数 100 年経った Ia 型超新星残骸は自由膨張している大量の鉄を含んでいる。その幾らかは中性で基底状態にあると期待される。もし、残骸の中に取り残された伴星のスペクトルを観測すると、そのスペクトルには星の手前にある中性の鉄による吸収線が可視光領域にも見えるはずであることを見出した。鉄は $\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$ ほどで膨張しているので吸収線は中心波長から青い方にだけ広がる非対称な形に見える。もし、星が残骸の後ろ側にあれば吸収線は中心波長に関して対称になる。従って、吸収線の形態によって星と残骸の相対的な位置関係が推測できる。我々は、若い超新星が星間物質と衝突して出す X 線によって鉄がイオン化される過程を定量的に計算し、どれくらいの中性の鉄が残骸中に残っているかを調べ、吸収線の観測可能性や星と残骸の位置関係を調べられるかを実際にある Ia 型と考えられている超新星の残骸について検討している。[4, 105, 115, 116, 123, 124]

軸対称回転白色矮星の角運動量分布と質量

Yoon らが一次元の球対称モデルによって回転白色矮星の進化を角運動量輸送、熱的進化を含めて研究し、論文として出版された。そこで回転の効果を含めた軸対称の白色矮星モデルの構造計算において Yoon らの球対称モデルによる角運動量輸送の計算結果を再現するような回転則を用いた計算を行い、剛体回転とは異なり二次元の計算においても Ia 型超新星の母天体としての白色矮星の質量に有意な差が得られるという結果を得た。[19, 62]

回転を加味した Steady-Burning による Ia 型超新星の母天体モデル

斎尾 (東北大学) との共同研究. 白色矮星の進化において広く受け入れられている Steady-Burning モデルに回転の効果を導入した場合の計算を行い、それが Ia 型超新星の母天体としての白色矮星の進化にどのような影響を与えうるのか、降着率や核燃焼シェルの厚みなどの観点から研究を進めている。

Ia 型超新星の 3 次元スペクトルモデル

P. A. Mazzali (Trieste 天文台)、前田 (東大総合文化) との共同研究. Ia 型超新星の初期スペクトルに見られる CaII の吸収線は、その速さと強さが超新星の明るさや他のイオンの速度などと相関がなく、Ia 型超新星の多様性として注目されている。この多様性が爆発の 3 次元構造に起因すると考え、独自に 3 次元輻射輸送コードを開発し、様々な 3 次元構造を仮定して Ia 型超新星の初期スペクトルを理論的に計算した。その結果、観測されている頻度を説明するには非常に厚いトラスカ、光球を隠す程度の大きさの複数の “blob” が必要なが分かった。[37, 70, 71, 94, 95]

Ia 型超新星の初期スペクトルに見られる多様性

P. A. Mazzali (Trieste 天文台)、S. Benetti (Padova 天文台) との共同研究. 近年観測量が飛躍的に増加している、Ia 型超新星の最大光度以前のスペクトルを爆発モデルから理論的に計算したスペクトルと比較することで、それらの多様性の起源を探っている。特に、爆発モデルを区別し得る炭素の分布や、最も顕著な多様性を見せる CaII のラインの起源について調べている。[15, 16, 35]

Ia 型超新星の元素合成における金属量依存性

チャンドラセカール質量モデルに基いた元素合成計算を、各金属量の progenitor(進化計算の結果へリウム燃焼終了時の化学組成) を用いて元素合成計算を行い、各元素の金属量依存性を調べている。これにより、Ia 型超新星の明るさのばらつきの原因追求や、銀河の化学進化の再検討などへの応用が可能になる。金属量の違いは星中の物質の陽子・中性子数の違いとして表れ、金属量が多いほど中性子の割合が多くなる。解析中のデータから、Mn や Niといった中性子過剰な安定核を主たる同位体にもつ元素は金属量依存性が大きい傾向にある。逆に、安定な Cr は主に陽子・中性子数の等しい質量数が 52 の Fe 原子核が崩壊してできるので、Ni(質量数 56) と金属量依存性がほぼ等しく金属量依存性は小さい。[69, 92]

Ia 型超新星 SN 2005ke の X 線の光度曲線のモデル

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

Ia 型超新星 SN 2002ic の光度曲線のモデル

蜂巢 (総合文化)、Deng (北京天文台) との共同研究. スペクトル中に水素を示す Ia 型超新星 SN 2002ic の光度曲線を、周囲に星周物質が存在している白色矮星の爆発というモデルによって説明した。質量放出率が約 $10^{-2} (v_w/1000 \text{ km/s}) M_\odot/\text{yr}$ の星風によって作られた星周物質が約 $3M_\odot$ 存在すれば観測をうまく説明できる光度が得られる。さらに星周物質が極方向に低密度、赤道方向に高密度に分布するモデルを考えることで、スペクトルの高速度成分も説明できるようになる。

2.7 極超新星

SN2003jd

Mazzali (Trieste 天文台)、川端 (広島大学)、前田 (総合文化)、家 (国立天文台) との共同研究. すばる望遠鏡と微光天体分光撮像装置 (FOCAS) を用いてガンマ線バーストを伴わない極超新星 (極端に爆発の規模の大きい超新星) SN2003jd のスペクトル撮影を行い、これが高速ジェットを激しく噴出している爆発を横からみた場合の理論予測 (同グループが 2002 年に発表) と極めて良く一致することを発見した。この結果から、極超新星の大部分は高速ジェットを伴うガンマ線バースト母天体であり、ジェットが我々に向いている場合にのみガンマ線バーストとして観測されるという関係が明らかになった。

2.8 大質量星の進化

大質量星の進化の金属量依存性

主系列星から重力崩壊直前までの大質量星 ($\sim 13M_\odot - 10000M_\odot$) の進化を詳しい元素合成とともに計算し、その初期質量と金属量に対する依存性を調べている。特に Pop III 星の元素合成が Pop I, II 星のものとのように異なるか調べている。[119, 20, 22, 23, 24, 33, 57, 61, 73, 74, 75, 97, 98, 99, 100]

極端な金属欠乏星の形成

岩本 (日本原子力研究所)、前田 (総合文化) との共同研究. すばる望遠鏡によって $[\text{Fe}/\text{H}] < -5$ という極端な金属欠乏星 HE1327-2326 が最近新たに発見された。その星と以前に発見されていた HE0107-5240 が第一世代星であるかどうかということについて議論が存在していたが、この星が極めて特異な元素組成を示していることに着目し、宇宙の第一世代の大質量星の進化を計算し、それらが超新星爆発を起こして放出するガスの重元素の組成を推定したところ、この星で観測された特異な元素組成と見事に合致すること

を明らかにし、重元素をごくわずかにだけ含むガスから生まれた第二世代星であることを示した.[12, 65]

2.9 種族 III 星の痕跡

低金属 low- α 星に刻まれた Pop III 炭素爆燃型超新星の痕跡

Low- α 星は質量数が 4 の倍数の元素の含有量が鉄に比べて少ない星である。重元素量が少ない星にも Low- α 星が 3 個 (BD 80 245 と HD 134439/40) 見つかった。これらの星の観測された元素組成から我々はこれらの星の起源を考察した。その結果、初期質量が 3.5 から 5 $M_{\odot}$ の第一世代の星が炭素爆燃型超新星爆発を起こし、掃き集めたガスからこれらの星が生まれたとすれば観測された元素組成が説明できることを指摘した。この結果が正しければ、銀河初期には大質量星しか産まれないという議論の反証にもなる。The Astrophysical Journal に発表済み。[2, 87, 88]

極端な金属欠乏星の元素組成と種族 III 超新星における元素合成

種族 III 超新星における元素合成計算を太陽質量の 13–50 倍の質量を持つ星について行い、観測されている極端な金属欠乏星の元素組成、トレンドと比較した。私たちのモデルでその元素組成、トレンドがうまく再現できることを示し、その yield を提出した。

種族 III 超新星の相対論的ジェットと金属欠乏星の元素組成

前田 (総合文化), 岩本 (JAERI) との共同研究。相対論的多次元流体力学コードを用いて、大質量星の中心から高速なジェットを放出する計算を行った。注入する全エネルギーを一定にして、最終的に星間空間に放出される超新星の yield のエネルギー注入率に対する依存性を調べた。その結果、yield はエネルギー注入率の大きい場合が Extremely Metal-Poor Stars の元素組成に、小さい場合が Hyper Metal-Poor Stars に、その中間の場合が C-rich Extremely Metal-Poor Stars に対応していると考えることが可能であることを示した。[75, 99]

種族 III の巨大質量星の進化、爆発、元素合成

第一世代の星の候補として、存在の可能性が指摘されている金属を含まない巨大質量星、500 $M_{\odot}$ と 1000 $M_{\odot}$ の金属を含まない星について、進化、爆発、元素合成の計算を行った。140 $M_{\odot}$ から 300 $M_{\odot}$ の星は、酸素燃焼の段階で中心の密度・温度の組合せが電子・陽電子対生成の不安定領域に入り、核反応

が暴走して星全体が爆発する PairInstability Supernovae (PISN) となることが示されている。それに対して、今回の 500 $M_{\odot}$ と 1000 $M_{\odot}$ の計算では、電子・陽電子対生成の不安定領域に入っても PISN とはならず、進化が加速されて鉄のコアが形成され、重力崩壊を起こした。また、2 次元ジェット状爆発モデル (maeda. et. al2003) による爆発・元素合成計算の結果、爆発により放出される各重元素質量比が、 $[O/Fe] < 0$, $[Mg/Fe]$, $[Si/Fe]$, $[S/Fe] > 0$ となり、銀河団ガスの組成や M82 銀河のガス組成を説明できることを示した。また、主系列 (水素燃焼段階) の間に、銀河間ガスの水素、ヘリウムを再電離させるのに十分な UV 光子を供給できること、最終的なブラックホールの質量が、500 $M_{\odot}$ の星では約 250 $M_{\odot}$ 、1000 $M_{\odot}$ の星では約 500 $M_{\odot}$ で、最近見つかった中間質量ブラックホールと質量が同程度になることも示した。今後は、accretion や星同士の衝突・合体による質量増加の効果を取り入れて、進化の様子がどのように変化するかを調べてゆく。[34, 58, 59, 68, 90, 91, 93]

超新星爆発における r 過程元素合成

鉄より重い元素の大半 (金、銀、プラチナ等の貴金属、長寿命放射性元素ウランやトリウムなど)、すなわち速い中性子捕獲反応 (r 過程) 元素の起源は未だに明らかにされていない。我々は、超新星爆発の数値流体力学シミュレーションおよび一般相対論を考慮した原始中性子星からのニュートリノ風の半解析的な数値計算を行い、超新星における r 過程元素合成の計算を行った。その結果、低質量超新星 (太陽質量の約 8–10 倍) の流体力学的爆発における中性子過剰物質中、または大質量超新星 (太陽質量の約 20–30 倍以上) のニュートリノ加熱による高エントロピー物質中で r 過程が起こる可能性が高いことを示した。[39]

超新星爆発における rp 過程元素合成

未だに起源天体が明らかにされていない亜鉛やその他の重元素の陽子過剰同位体 (p 過程核種) は速い陽子捕獲反応 (rp 過程) により合成される可能性が指摘されていたが、超新星爆発では、ゲルマニウム 64 等のベータ崩壊の寿命 (約 1 分) が超新星中心付近の時間尺度 (1 秒以下) に比べて長いため、質量数 64 より重い陽子過剰核は作られないと考えられてきた。申請者は、前述のニュートリノ風モデルを用いて陽子過剰な物質中における元素合成の計算を行った。その結果、陽子の反電子ニュートリノ捕獲により生じた中性子の捕獲により、寿命の長いベータ崩壊が迂回され、rp 過程により質量数 100 以上の陽子過剰核が合成されることを示した。このニュートリノ誘起 rp 過程はこれまで知られていなかった元素合成過程であり、多くの陽子過剰核の起源となる可能性がある。[40]

すばる望遠鏡による超金属欠乏星の観測

すばる望遠鏡 (HDS: S05A) を用いて、銀河系ハローの超金属欠乏星の元素組成の観測を行った。我々は、これまでの観測で最も低い r 過程元素の値をもつ星を数個発見した。その観測値と我々の銀河化学進化モデルの計算結果との比較により、 r 過程元素の起源は低質量超新星 (太陽質量の 10 倍程度) である可能性が高いことを示した。また、これまでの観測ではほとんどデータの得られていない紫外領域に吸収線をもつ貴金属元素 (銀、パラジウムなど) の測定に成功した。これより、2 種類の r 過程 (弱 r 過程: 質量数 100 以下、主 r 過程: 質量数 100 以上) が存在することを示した。[41]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Nakayama, K., & Shigeyama, T., "Self-similar Evolution of Relativistic Shock Waves Emerging from Plane-parallel Atmospheres", 2005, *ApJ*, 627, 310
- [2] Tsujimoto, T., & Shigeyama, T., "Relics of Metal-free Low-Mass Stars Exploding as Thermonuclear Supernovae", 2006, *ApJ*, 638, L109–L112
- [3] Nakamura, K., Inoue, S., Wanajo, S., & Shigeyama, T., "Light-Element Production in the Circumstellar Matter of Energetic Type Ic Supernovae", 2006, *ApJ*, 643, L115–L118
- [4] Ozaki, J., & Shigeyama, T., "A method to identify the companion stars of type Ia supernovae in young supernova remnants", 2006, *ApJ*, 644, 954–958
- [5] Nakamura, K., & Shigeyama, T., "Self-similar solutions for the interaction of relativistic ejecta with an ambient medium", 2006, *ApJ*, 645, in press
- [6] Anupama, G. C., Sahu, D. K., Deng, J., Nomoto, K., Tominaga, N., Tanaka, M., Mazzali, P. A., & Prabh, T. P. 2005, "The Peculiar Type Ib Supernova SN 2005bf: Explosion of a Massive He Star with a Thin Hydrogen Envelope?", *ApJ*, 631, L125–L128.
- [7] Deng, J., Kawabata, K. S., Hattori, T., Pian, E., Mazzali, P. A., & Nomoto, K. 2005, "Supernovae 2005ma and 2005mc", *Central Bureau Electronic Telegrams*, ed. D. W. E. Green, 334, 1.
- [8] Deng, J., Kawabata, K. S., Pian, E., Mazzali, P. A., & Nomoto, K. 2005, "Supernova 2005lz in UGC 1666", *Central Bureau Electronic Telegrams*, ed. D. W. E. Green, 337, 1.
- [9] Deng, J., Tominaga, N., Mazzali, P. A., Maeda, K., & Nomoto, K. 2005, "On the Light Curve and Spectrum of SN 2003dh Separated from the Optical Afterglow of GRB 030329", *ApJ*, 624, 898–905.
- [10] Frebel, A., Aoki, W., Christlieb, N., Ando, H., Asplund, M., Barklem, P. S., Beers, T. C., Eriksson, K., Fechner, C., Fujimoto, M. Y., Honda, S., Kajino, T., Minezaki, T., Nomoto, K., Norris, J. E., Ryan, S. G., Takada-Hidai, M., Tsangarides, S., & Yoshii, Y. 2005, "Nucleosynthetic signatures of the first stars", *Nature*, 434, 871–873.
- [11] Hoefflich, P., Baade, D., Fesen, R., Gerardy, C., Kawabata, K., Khokhlov, A., Maeda, K., Motohara, K., Nomoto, K., Patat, F., Tominaga, N., Wang, L., & Wheeler, J. C. 2005, "3D Signatures of off-center Delayed-Detonation Models", *American Astronomical Society Meeting 206*, #27.07.
- [12] Iwamoto, N., Umeda, H., Tominaga, N., Nomoto, K., & Maeda, K. 2005, "The First Chemical Enrichment in the Universe and the Formation of Hyper Metal-Poor Stars", *Science*, 309, 451–453.
- [13] Kusakabe, M., Iwamoto, N., & Nomoto, K. 2005, "p-Process Nucleosynthesis in the Carbon Deflagration Model for Type Ia Supernovae", *Nuclear Physics A*, 758, 459–462.
- [14] Mattila, S., Lundqvist, P., Sollerman, J., Kozma, C., Baron, E., Fransson, C., Leibundgut, B., & Nomoto, K. 2005, "Early and late time VLT spectroscopy of SN 2001el - progenitor constraints for a type Ia supernova", *A&A*, 443, 649–662.
- [15] Mazzali, P. A., Benetti, S., Stehle, M., Branch, D., Deng, J., Maeda, K., Nomoto, K., & Hamuy, M. 2005, "High-velocity features in the spectra of the Type Ia supernova SN 1999ee: a property of the explosion or evidence of circumstellar interaction?", *MNRAS*, 357, 200–206.
- [16] Mazzali, P. A., Kawabata, K. S., Maeda, K., Nomoto, K., Filippenko, A. V., Ramirez-Ruiz, E., Benetti, S., Pian, E., Deng, J., Tominaga, N., Ohyama, Y., Iye, M., Foley, R. J., Matheson, T., Wang, L., & Gal-Yam, A. 2005, "An Asymmetric Energetic Type Ic Supernova Viewed Off-Axis, and a Link to Gamma Ray Bursts", *Science*, 308, 1284–1287.
- [17] Nomoto, K., Maeda, K., Tominaga, N., Ohkubo, T., Deng, J., & Mazzali, P. A. 2005, "Hypernovae and Gamma-Ray Bursts", *ApSS*, 298, 81–86.
- [18] Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H., Tominaga, N., Ohkubo, T., Deng, J., & Mazzali, P. A. 2005, "Nucleosynthesis in Black-Hole-Forming Supernovae", *IAU Colloquium 192: Cosmic Explosions: On the 10th Anniversary of SN1993J*, ed. J. M. Marcaide & K. W. Weiler (Berlin: Springer), 287–296.
- [19] Nomoto, K., Suzuki, T., Deng, J., Uenishi, T., & Hachisu, I. 2005, "Progenitors of Type Ia Supernovae: Circumstellar Interaction, Rotation, and Steady Hydrogen Burning", in *ASP Conf. Ser. 342: 1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses*, ed. M. Turatto, et al. (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 105–114.

- [20] Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Ohkubo, T., & Deng, J. 2005, “Nucleosynthesis in Hypernovae and Population III Supernovae”, *Nuclear Physics A*, 758, 263–271.
- [21] Terasawa, T., Tanaka, Y. T., Takei, Y., Kawai, N., Yoshida, A., Nomoto, K., Yoshikawa, I., Saito, Y., Kasaba, Y., Takashima, T., Mukai, T., Noda, H., Murakami, T., Watanabe, K., Muraki, Y., Yokoyama, T., & Hoshino, M. 2005, “Repeated injections of energy in the first 600ms of the giant flare of SGR1806 - 20”, *Nature*, 434, 1110–1111.
- [22] Tominaga, N., Tanaka, M., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Deng, J., Maeda, K., Umeda, H., Modjaz, M., Hicken, M., Challis, P., Kirshner, R. P., Wood-Vasey, W. M., Blake, C. H., Bloom, J. S., Skrutskie, M. F., Szentgyorgyi, A., Falco, E. E., Inada, N., Minezaki, T., Yoshii, Y., Kawabata, K., Iye, M., Anupama, G. C., Sahu, D. K., & Prabh, T. P. 2005, “The Unique Type Ib Supernova 2005bf: A WN Star Explosion Model for Peculiar Light Curves and Spectra”, *ApJ*, 633, L97–L100.
- [23] Umeda, H., & Nomoto, K. 2005, “Variations in the Abundance Pattern of Extremely Metal-Poor Stars and Nucleosynthesis in Population III Supernovae”, *ApJ*, 619, 427–445.
- [24] Umeda, H., Tominaga, N., Maeda, K., & Nomoto, K. 2005, “Precursors and Main Bursts of Gamma-Ray Bursts in a Hypernova Scenario”, *ApJ*, 633, L17–L20.
- [25] Yoshida, T., Umeda, H., & Nomoto, K. 2005, “Si Isotopic Ratios in Supernovae for Presolar Grains”, *ApJ*, 631, 1039–1050.
- [26] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T. 2006, “HE 1327-2326, an Unevolved Star with $[\text{Fe}/\text{H}] < -5.0$. I. A Comprehensive Abundance Analysis”, *ApJ*, 639, 897–917.
- [27] Fröhlich, C., Hauser, P., Liebendörfer, M., Martínez-Pinedo, G., Thielemann, F.-K., Bravo, E., Zinner, N. T., Hix, W. R., Langanke, K., Mezzacappa, A., & Nomoto, K. 2006, “Composition of the Innermost Core-Collapse Supernova Ejecta”, *ApJ*, 637, 415–426.
- [28] Fugazza, D., D’Avanzo, P., Malesani, D., Della Valle, M., Pian, E., Chincarini, G., Stella, L., Tagliaferri, G., Deng, J., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “Supernova 2006aj = GRB 060218”, *Central Bureau Electronic Telegrams*, ed. D. W. E. Green, 410, 1.
- [29] Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., Totani, T., Ohta, K., Iye, M., Hattori, T., Aoki, W., Furusawa, H., Hurley, K., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Komiyama, Y., Mizumoto, Y., Nomoto, K., Noumaru, J., Ogasawara, R., Sato, R., Sekiguchi, K., Shirasaki, Y., Suzuki, M., Takata, T., Tamagawa, T., Terada, H., Watanabe, J., Yatsu, Y., & Yoshida, A. 2006, “An optical spectrum of the afterglow of a γ -ray burst at a redshift of $z = 6.295$ ”, *Nature*, 440, 184–186.
- [30] Maeda, K., Mazzali, P. A., & Nomoto, K. 2006, “Optical Emission from Aspherical Supernovae and the Hypernova SN 1998bw”, *ApJ*, in press. (astro-ph/0511389)
- [31] Maeda, K., Nomoto, K., Mazzali, P. A., & Deng, J. 2006, “Nebular Spectra of SN 1998bw Revisited: Detailed Study by One- and Two-dimensional Models”, *ApJ*, 640, 854–877.
- [32] Mazzali, P. A., Deng, J., Pian, E., Malesani, D., Tominaga, N., Maeda, K., Nomoto, K., Chincarini, G., Covino, S., Della Valle, M., Fugazza, D., Tagliaferri, G., & Gal-Yam, A. 2006, “Models for the Type Ic Hypernova SN 2003lw associated with GRB 031203”, *ApJ*, in press. (astro-ph/0603516)
- [33] Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Kobayashi, C., & Maeda, K. 2006, “Nucleosynthesis Yields of Core-Collapse Supernovae and Hypernovae, and Galactic Chemical Evolution”, *Nuclear Physics A*, in press. (astro-ph/0605725)
- [34] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Suzuki, T., Tsuruta, S., & Rees, M. J. 2006, “Core-Collapse Very Massive Stars: Evolution, Explosion, and Nucleosynthesis of Population III 500–1000 $M_{\odot}$ Stars”, *ApJ*, in press.
- [35] Pastorello, A., Sauer, D., Taubenberger, S., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Kawabata, K. S., Benetti, S., Elias-Rosa, N., Harutyunyan, A., Navasardyan, H., Zampieri, L., Iijima, T., Botticella, M. T., Di Rico, G., Del Principe, M., Dolci, M., Gagliardi, S., Ragni, M., & Valentini, G. 2006, “SN 2005cs in M51 I. The first month of evolution of a subluminescent SN II plateau”, *MNRAS*, in press. (astro-ph/0605700)
- [36] Sadakane, K., Arai, A., Aoki, W., Arimoto, N., Takada-Hidai, M., Ohnishi, T., Tajitsu, A., Beers, T. C., Iwamoto, N., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “Chemical Abundances in the Secondary Star of the Black Hole Binary V4641 Sgr (SAX J1819.3-2525)”, *PASJ*, in press.
- [37] Tanaka, M., Mazzali, P. A., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “3D Models for High Velocity Features in Type Ia Supernovae”, *ApJ*, in press.
- [38] Wanajo, S., Nomoto, K., Iwamoto, N., Ishimaru, Y., & Beers, T. C. 2006, “Enrichment of Very Metal Poor Stars with Both r-Process and s-Process Elements from 8–10 $M_{\odot}$ Stars”, *ApJ*, 636, 842–847.
- [39] Wanajo, S. & Ishimaru, Y., “r-Process Calculations and Galactic Chemical Evolution”, 2006,

- Nucl. Phys. A (Special Issue on Nuclear Astrophysics /eds. K. Langanke, F.-K. Thielemann, & M. Wiescher), 647, in press (astro-ph/0511518)
- [40] Wanajo, S., "The rp-Process in Neutrino-driven Winds", 2006, ApJ, 647, in press (astro-ph/0602488)
- [41] Honda, S., Aoki, W., Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Ryan, S. G., "Neutron-capture elements in the very metal-poor star HD122563", ApJ, 643, 1180
- [42] Wanajo, S., Nomoto, K., Iwamoto, N., Ishimaru, Y., & Beers, T. C., "Enrichment of Very Metal-Poor Stars with Both r-Process and s-Process Elements from 8 – 10 $M_{\odot}$ Stars", 2006, ApJ, 636, 842
- [43] Wanajo, S., Itoh, N., Goriely, S., Samyn, M., & Ishimaru, Y., "The r-Process in Supernovae with New Microscopic Mass Formulae", 2005, Nucl. Phys. A, 758, 671
- [44] Tomizawa, N., Wanajo, S., Asahara, R., Itoh, N., & Nozawa, S., "Production of the Light r-Process Nuclei in Neutrino-driven Winds", 2005, Nucl. Phys. A, 758, 667
- [45] Wanajo, S., Itoh, N., Nomoto, K., Ishimaru, Y., & Beers, T. C., "The r-Process in Prompt Explosions from Collapsing O-Ne-Mg Cores", 2005, Nucl. Phys. A, 758, 615
- [46] Ishimaru, Y., Wanajo, S., Aoki, W., Ryan, S. G., & Prantzos, N., "First Enrichment of r-Process Elements in Our Galaxy", 2005, Nucl. Phys. A, 758, 603
- (会議抄録)
- [47] Nakamura, K., & Shigeyama, T., 2005, "Light Elements Produced by Type Ic Supernovae", in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003*, eds. M. Terasawa, et al. (Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.), 446–455
- [48] Nakamura, K., & Shigeyama, T., 2005, "Aspherical Explosion of Type Ic Supernovae", 2005, in *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, Proceedings of the Yamada Conference LIX, eds. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press, Inc.), 261–262
- [49] Nakamura, K., & Shigeyama, T., 2005, "Acceleration of Supernova Ejecta and Light Elements Nucleosynthesis", in *Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology*, eds. K. Sato & S. Nagataki (Tokyo: Universal Academy Press), 457–458.
- [50] Shigeyama, T., Nakamura, K., Wanajo, S. & Inoue, S., 2006, "Light Element Production in Type Ic Supernovae", in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005*, in press
- [51] Nakamura, K., Inoue, S., Wanajo, S., Suzuki, T. & Shigeyama, T., 2006, "Light Elements Produced in Nitrogen-rich Type Ic Supernovae", in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005*, in press
- [52] Maeda, K., Nomoto, K., & Mazzali, P. A. 2005, "Two Dimensional Models of the Light Curve and Nebular Spectra of SN 1998bw", in ASP Conf. Ser. 342: 1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses, ed. M. Turatto, et al. (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 389–392.
- [53] Mazzali, P. A., Nomoto, K., Deng, J., Maeda, K., Iwamoto, K., Filippenko, A. V., & Foley, R. T. 2005, "SN 1998bw and Other Hyperenergetic Type Ic Supernovae", IAU Colloquium 192: Cosmic Explosions: On the 10th Anniversary of SN1993J, ed. J. M. Marcaide & K. W. Weiler (Berlin: Springer), 391–402.
- [54] Mazzali, P. A., Nomoto, K., Deng, J., Maeda, K., & Tominaga, N. 2005, "The Properties of Hypernovae in Gamma Ray Bursts", in ASP Conf. Ser. 342: 1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses, ed. M. Turatto, et al. (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 366–371.
- [55] Mazzali, P. A., Nomoto, K., Deng, J., Maeda, K., & Tominaga, N. 2005, "Hypernovae and Gamma-Ray Bursts", ASP Conf. Ser. 332: The Fate of the Most Massive Stars, ed. R. Humphreys & K. Z. Stanek (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 385–389.
- [56] Nomoto, K., 2005, "Yields of supernovae formed in a zero-metal environment and the abundances pattern of extremely metal-poor stars", IAU Symp. 228: From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution, ed. V. Hill, et al. (Cambridge: Cambridge University Press), 287–296.
- [57] Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Ohkubo, T., Deng, J., & Mazzali, P. A. 2005, "Hypernovae, Black-Hole-Forming Supernovae, and First Stars", ASP Conf. Ser. 332: The Fate of the Most Massive Stars, ed. R. Humphreys & K. Z. Stanek (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 374–384.
- [58] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J. 2005, "Population III very-massive stars — their evolution and explosion", IAU Symp. 228: From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution, ed. V. Hill, et al. (Cambridge: Cambridge University Press), 167–168.
- [59] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., & Yoshida, T. 2005, "Evolution, Explosion and Nucleosynthesis of Pop III Super-Massive Stars", *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003*, ed. M. Terasawa, et al. (Singapore: World Scientific), 175–184.

- [60] Tominaga, N., Deng, J., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Mazzali, P. A., & Kawabata, K. 2005, “A Hypernova Model for SN2003dh/GRB030329”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003*, ed. M. Terasawa, et al. (Singapore: World Scientific), 326–335.
- [61] Tominaga, N., Umeda, H., Iwamoto, N., Maeda, K., & Nomoto, K. 2005, “Nucleosynthesis in Population III Supernovae and Abundance Patterns of Extremely Metal-Poor Stars”, *Recent Advances in Astrophysics and Planetary Science — from the early universe to the Solar system —*, ed. A. Habe, T. Kozasa, & K. Kuramoto (Sapporo: Hokkaido University), 16–17.
- [62] Uenishi, T., & Nomoto, K. 2005, “Axisymmetric Models of Pre-supernova Rotating White Dwarfs”, in *ASP Conf. Ser. 342: 1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses*, ed. M. Turatto, et al. (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 399–400.
- [63] Yoshida, T., Umeda, H., & Nomoto, K. 2005, “Silicon Isotopic Ratios of Presolar Grains from Supernovae”, *36th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 1556.
- [64] Deng, J., Mazzali, P. A., Tominaga, N., Maeda, K., Nomoto, K., Matheson, T., Kawabata, K. S., Stanek, K. Z., & Garnavich, P. M. 2006, “Properties of Hypernova SN 2003dh/GRB 030329”, *New Horizon of Gamma-Ray Burst Astronomy*, ed. N. Kawai & T. Nakamura (Tokyo: RIKEN), in press.
- [65] Iwamoto, N., Umeda, H., Tominaga, N., Nomoto, K., & Maeda, K. 2006, “The First Chemical Enrichment in the Universe and the Formation of Hyper Metal-Poor Stars”, *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, ed. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 289–290.
- [66] Maeda, K., Kawabata, K., Nomoto, K., & Mazzali, P. A. 2006, “Hypernovae 1998bw and 2003jd: A Link to Gamma-Ray Bursts”, *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, ed. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 259–260.
- [67] Nomoto, K., Maeda, K., Tominaga, N., Ohkubo, T., Umeda, H., Deng, J., & Mazzali, P. A. 2006, “Aspherical Explosions of Hypernovae-Light Curves and Nucleosynthesis”, *New Horizon of Gamma-Ray Burst Astronomy*, ed. N. Kawai & T. Nakamura (Tokyo: RIKEN), in press.
- [68] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., Maeda, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J. 2006, “Evolution, Explosion of Population III Very Massive Stars — Their Roles as First Generation Stars”, *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, ed. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 293–294.
- [69] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., & Yoshida, T. 2006, “Nucleosynthesis by Type Ia Supernova for different Metallicity”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies — New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, ed. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), in press.
- [70] Tanaka, M., Mazzali, P. A., Maeda, K., & Nomoto, K. 2006, “Aspherical Ejecta of Type Ia Supernovae Inferred From High Velocity Features”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies — New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, ed. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), in press.
- [71] Tanaka, M., Nomoto, K., Maeda, K., & Mazzali, P. A. 2006, “Aspherical Explosion Models for Type Ia Supernovae”, *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, ed. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 263–264.
- [72] Tominaga, N., Deng, J., Maeda, K., Umeda, H., Nomoto, K., Mazzali, P. A., & Kawabata, K. 2006, “A light curve model for SN2003dh associated with GRB030329”, *New Horizon of Gamma-Ray Burst Astronomy*, ed. N. Kawai & T. Nakamura (Tokyo: RIKEN), in press.
- [73] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, “Nucleosynthesis in Population III Supernovae: Comparison with Abundances of Extremely Metal-Poor Stars”, *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, ed. H. Suzuki, et al. (Tokyo: Universal Academy Press), 291–292.
- [74] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2006, “Population III Core-Collapse Supernova Yields and Extremely Metal-Poor Star Abundance Pattern”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies — New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, ed. S. Kubono, et al. (New York: American Institute of Physics), in press.
- [75] Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Iwamoto, N., & Nomoto, K. 2006, “Explosive Nucleosynthesis Induced by Relativistic Jets in Population III Supernovae”, *Energy Budget in the High Energy Universe*, ed. J. Hisano & K. Sato (Singapore: World Scientific), in press.
- [76] Wanajo, S., “The rp-Process in Core-collapse Supernovae”, 2006, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies* / ed. S. Kubono, W. Aoki, T. Kajino, T. Motobayashi, and K. Nomoto (AIP), 345
- [77] Wanajo, S. & Ishimaru, Y., “Actinide Production in Supernovae and Nucleocosmochronology”, 2006, *The 59th Yamada conference: Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology* / ed. H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto, and K. Sato (Universal Academy Press), 285
- [78] Ishimaru, Y., Wanajo, S., Aoki, W., Ryan, S. G., & Prantzos, N., “Early Galactic Chemical Evolution and the Origin of Heavy Elements”, 2006,

- The 59th Yamada conference: Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology / ed. H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto, and K. Sato (Universal Academy Press), 287
- [79] Honda, S., Aoki, W., Ishimaru, Y., Wanajo, S., Ryan, S. G., Kajino, T., Ando, H., & Beers, T. C., "Subaru/HDS Studies of r-Process Elements in Metal-Poor Stars from Near-UV Spectra", 2006, IAU Symposium No. 228 – From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution / ed. V. Hill, P. François, & F. Primas (Cambridge University Press), 429
- [80] Wanajo, S. & Ishimaru, Y., "The "Weak" r-Process in Core-collapse Supernovae", 2006, IAU Symposium No. 228 – From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution / ed. V. Hill, P. François, & F. Primas (Cambridge University Press), 435
- [81] Ishimaru, Y., Wanajo, S., Aoki, W., Ryan, S. G., & Prantzos, N., "Chemical evolution of the Galactic halo and the Origin of Precious Metals", 2006, IAU Symposium No. 228 – From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution / ed. V. Hill, P. François, & F. Primas (Cambridge University Press), 489
- [82] Wanajo, S., "The r-Process in Supernova Explosions from the Collapse of ONeMg Cores", 2005, Origin of Matter and Evolution of Galaxies / ed. M. Terasawa, S. Kubono, T. Kishida, T. Kajino, T. Motobayashi, and K. Nomoto (World Scientific), 279
- (国内雑誌)
- [83] 富永望, 田中雅臣, 野本憲一, Mazzali, P. A., Deng, J., 前田啓一, 梅田秀之, Modjaz, M., Kirshner, R. P., 稲田直久, 峰崎岳夫, 吉井謙, 川端弘治, 家正則, Anupama, G. C., Sahu, D. K., Prabhu, T. P. 2005 : " 特異な Ib 型超新星 2005bf の光度曲線、スペクトルモデル", 研究会 OHP 集 ガンマ線バースト 2005 –HETE-2, Swift, Suzaku で築く GRB 観測–, 2005 年 12 月, 247-248.
- [84] 野本憲一, 富永望 2005 : "超新星爆発のメカニズム", 月刊天文ガイド, 2005 年 11 月, 6-9.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [85] Shigeyama, T., Nakamura, K., Wanajo, S. & Inoue, S.: "Light Element Production in Type Ic Supernovae", Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005, Tokyo, Japan, 2005/11/08–11/11.
- [86] Nakamura, Inoue, S., K., Wanajo, S., Suzuki, T., & Shigeyama, T.: "Light Element Produced by Nitrogen-rich Type Ic Supernovae", Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005, Tokyo, Japan, 2005/11/08–11/11.
- [87] Tsujimoto, T., & Shigeyama, T.: "Implications of elemental abundances in metal-poor stars", Carbon Rich Ultra Metal-Poor Stars in the Galactic Halo, Ringberg Castle Tegernsee, Germany, 2005/11/28–12/2
- [88] Tsujimoto, T., & Shigeyama, T.: "Interpretation of Abundance Patterns in Dwarf Spheroidals & the Galactic halo", LOCAL GROUP COSMOLOGY, Aspen Center for Physics, Colorado, USA, 2006/02/05–11
- [89] Chan, S. T., Nakasato, N., & Nomoto, K.: "Dynamical Modeling of NGC 4038/39 (The Antennae)", East-Asia Young Astronomers Meeting, Kiyosato, Japan, 2006/2/14–2/18.
- [90] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J.: "Population III very-massive stars — their evolution and explosion", IAU Symposium: "From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution", Paris, France, 2005/5/23–29.
- [91] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Tsuruta, S., & Rees, M. J.: "Evolution and Explosion of Population III Very-Massive Stars — Their Roles as First Generation Stars", 59th Yamada conference: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology", Tokyo, Japan, 2005/6/28–30.
- [92] Ohkubo, T., Umeda, H., Nomoto, K., & Yoshida, T.: "Nucleosynthesis by Type Ia Supernova for different Metallicity", Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05) — New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology, Tokyo., Japan, 2005/11/7–11.
- [93] Ohkubo, T., Umeda, H., Maeda, K., Nomoto, K., Suzuki, T., Tsuruta, S., & Rees, M. J.: "Core-Collapse Very Massive Stars: Evolution, Explosion, and Nucleosynthesis of Population III 500 – 1000 Solar-Mass Stars", Energy Budget in the High Energy Universe, Kashiwa, Japan, 2006/2/22–24.
- [94] Tanaka, M., Nomoto, K., Maeda, K., & Mazzali, P. A.: "Aspherical Explosion Models for Type Ia Supernovae", The 59th Yamada conference, Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology, Tokyo, Japan, 2005/6/20–24.
- [95] Tanaka, M., Mazzali, P. A., & Nomoto, K.: "Aspherical Ejecta of Type Ia Supernovae Inferred from Spectroscopic Peculiarity", Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05), New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology, Tokyo, Japan, 2005/11/8–11.
- [96] Tanaka, M., Tominaga, N., Nomoto, K., Maeda, K., Mazzali, P. A., & Deng, J.: "The Unique Type Ib Supernova 2005bf: A WN Star Explosion Model for Peculiar Light Curves and Spectra", Energy Budget in the High Energy Universe, Chiba, Japan, 2006/2/22–24.

- [97] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K.: “Nucleosynthesis in Population III Supernovae: Comparison with Abundances of Extremely Metal-Poor Stars”, *The 59th Yamada conference Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology*, Hongo, Japan, 2005/6/20–6/24.
- [98] Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K.: “Population III Core-Collapse Supernova Yields and Extremely Metal-Poor Star Abundance Pattern”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005*, Hongo, Japan, 2005/11/8–11.
- [99] Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K.: “Explosive Nucleosynthesis Induced by Relativistic Jets in Population III Supernovae”, *Energy Budget in the High Energy Universe*, Kashiwa, Japan, 2006/2/22–24.
- [100] Umeda, H., Tominaga, N., Iwamoto, N., Nomoto, K. & Maeda, K.: “The Abundance Pattern and Formation of Extremely Meta-Poor Stars”, *OMEG05 New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology*, Tokyo, Japan, 2005/11/8–11.
- [101] Wanajo, S.: “The rp-process in core-collapse supernovae”, *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005*, Tokyo, Japan, 2005/11/08–11/11
- [102] Wanajo, S.: “Actinide Production in Supernovae and Nucleocosmochronology”, 59th Yamada conference: Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology, Tokyo, Japan, 2005/06/20–06/24
- [103] Wanajo, S.: “The “Weak”r-Process in Core-collapse Supernovae”, *IAU Symposium No. 228 – From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution*, Paris, France, 2005/05/23–05/27
- 招待講演
(国内会議)
一般講演
- [104] 茂山俊和; 星の表面を光速に近い速さで通過する衝撃波の自己相似解, 第4回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 国民休暇村 鹿沢高原, 群馬県吾妻郡嬭恋村鹿沢温泉, 2004/08/22–24.
- [105] 尾崎仁; ティコの超新星における伴星同定の可能性, 第4回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 国民休暇村 鹿沢高原, 群馬県吾妻郡嬭恋村鹿沢温泉, 2004/08/22–24.
- [106] 茂山俊和; Origin of ${}^6\text{Li}$ in metal-poor stars; ””, 新世紀における銀河宇宙観測の方向: その5, 2005/12/01–03
- [107] 梅田秀之, 富永望, 前田啓一, 野本憲一: “Precursors and Main Bursts of Gamma-Ray Bursts in a Hypernova Scenario”, 第18回理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」, 2005/12/25–27.
- [108] 大久保琢也, 梅田秀之, 前田圭一, 野本憲一, 鶴田幸子, M. J. Rees: “300 太陽質量を超える巨大質量星の進化・爆発・元素合成, 中間質量ブラックホールの起源”, 活動銀河核と銀河の共進化ワークショップ, 国立天文台, 2006/3/15–17.
- [109] 富永望: “特異な Ib 型超新星 2005bf の光度曲線, スペクトルモデル”, 研究会「ガンマ線バースト 2005 — HETE-2, Swift, Suzaku で築く GRB 観測」, 石川厚生年金会館 ウェルシティ金沢, 2005/12/15–16.
- [110] 和南城 伸也; 超新星爆発における r 過程元素合成, 第4回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会, 国民休暇村 鹿沢高原, 群馬県吾妻郡嬭恋村鹿沢温泉, 2004/08/22–24.
- [111] 和南城伸也; 「超新星爆発における r 過程元素合成」, 基研研究会「ミクロからマクロへ, マクロからミクロへ 秩序形成・精密計算への理論的アプローチ」研究会, 京都大学, 湯川記念館, 2005/11/16–18.
- [112] 和南城伸也; 「超新星爆発における r 過程および p 過程元素合成」, 第18回理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」研究会, 京都大学, 湯川記念館, 2005/12/25–27.
- 日本天文学会 2005 年秋季年会、札幌国際会議場
2005/10/06–08
- [113] 中村航, 茂山俊和: ”超新星の ejecta と星周物質との相互作用領域における相対論的自己相似解”、H32b
- [114] 中山和則, 茂山俊和: ”星表面を通過する相対論的衝撃波の自己相似解”、H33c
- [115] 井原隆, 土居守, 茂山俊和: ”SNR Tycho 領域の測光に基づく Ia 型超新星伴星の候補探査”、H30b
- [116] 尾崎仁, 茂山俊和: ”Ia 型超新星残骸中のイオン分布計算の観測的妥当性”、H73a
- [117] 小宮悠, 須田拓馬, 藤本正行, 皆口裕樹, 茂山俊和: ”超金属欠乏星における炭素星の起源”、N06a
- [118] 和南城伸也, 石丸友里: ”超新星爆発における r 過程元素合成と宇宙年齢の下限値”、N08a
- [119] 大久保琢也, 梅田秀之, 前田啓一, 野本憲一, 鶴田幸子, M. J. Rees: 300 $M_{\odot}$ を超える巨大質量星の進化と爆発・元素合成. A09a
- [120] 田中雅臣, 前田啓一, 野本憲一: 非球対称な Ia 型超新星爆発のスペクトルモデル, H72a
- [121] 富永望, 梅田秀之, 野本憲一, 前田啓一: 種族 III 極超新星の相対論的ジェットによる元素合成と金属欠乏星の元素組成, H67a
- 日本天文学会 2006 年春季年会、和歌山大学
2004/3/27–29
- [122] 中村航, 和南城伸也, 茂山俊和, 井上進: ”IIc 型超新星の星周物質との相互作用による軽元素合成”、N15a
- [123] 尾崎仁, 茂山俊和, 井原 隆, 土居守, 柏川伸成, 小宮山裕: ”すばるによる Tycho’s SNR での伴星候補天体の分光観測に対する理論的考察”、K08a
- [124] 井原隆, 尾崎仁, 土居守, 茂山俊和, 柏川伸成, 小宮山裕: ”SNR Tycho 領域の分光観測による Ia 型超新星伴星の探査”、K07b

- [125] 小宮悠、須田拓馬、茂山俊和、皆口裕樹、青木和光、藤本正行:”初期銀河ハローの質量関数 ～炭素過剰金属欠乏星の進化モデルから～”、P01a
- [126] 和南城伸也:”超新星ニュートリノ風における陽子捕獲元素合成”、K14a
- [127] 大久保琢也、梅田秀之、野本憲一、吉田敬: Ia 型超新星による元素合成の金属量依存性. K16c
- [128] 田中雅臣, 富永望, 野本憲一, P. A. Mazzali, J. Deng, 前田啓一, 梅田秀之, 川端弘治, 家正則: 特異な Ib 型超新星 SN 2005bf (1) スペクトル解析, K17a
- [129] 田中雅臣, P. A. Mazzali, 前田啓一, 野本憲一: Ia 型超新星の初期スペクトルにおける高速度吸収線, K21b
- [130] 富永望, 田中雅臣, 野本憲一, 梅田秀之, P. A. Mazzali, J. Deng, 前田啓一, 稲田直久, 峰崎岳夫, 吉井讓: 特異な Ib 型超新星 SN 2005bf (2) 光度曲線・爆発モデル, K18a
- [131] 富永望, 田中雅臣, 前田啓一, 野本憲一, E. Pian, P. A. Mazzali, J. Deng, 川端弘治, 服部亮, 青木賢太郎, 家正則, 小杉城治, 佐々木敏由紀, 高田唯史: GRB/XRF 060218 に付随した SN 2006aj の測光・分光観測, Z03

(セミナー)

- [132] 和南城伸也; 「超新星爆発における r 過程元素合成」, 東大物理学教室宇宙理論研究室セミナー, 2005/06/02
- [133] 和南城伸也; 「超新星爆発における r 過程元素合成」, 早大理工総研原子核理論研究室セミナー, 2005/07/07
- [134] 和南城伸也; 「超新星ニュートリノ風における r 過程元素合成」, 東大天文学教室談話会, 2005/07/19

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)

3.1 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 ト—— (吉井・峰崎)

老朽化が進んでいた MAGNUM 望遠鏡の観測ドームを昨年度後半に交換し雨漏りや動作不調などを根本的に解決することに成功したが、新しいドームでは近くにあるラジオ塔からの電波放射を起源とする検出器読みだしノイズが増加してしまった。電磁波強度の調査の結果、旧ドームと微妙に異なる新ドームの形状がラジオ波の放射をカメラ部により集中させていることがわかった。そこでカメラを覆い隠すように電波シールドを設置した。軽量化と通気性の確保のため、アルミフレームを電波反射メッシュシートで覆うような構造とした。このシールドの設置によりラジオ塔からの電波起源のノイズを大幅に削減することに成功した。

MAGNUM で実現している遠隔観測システムは現地で独立して動作する無人自動観測システムとそれらの動作を監視し必要であれば観測監視担当者に警告を知らせる遠隔観測監視システムより成り立っており、二ヶ月間程度の連続した期間にわたって現地完全無人・自動観測遠隔監視による観測遂行に成功している。いっぽうで今年度もいくつかの装置について保守修理・交換などを行ないトラブルの防止ないし早期回復に努め、おおむね順調なモニター観測を遂行している。

活動銀河核のモニター観測をはじめとする観測成果についてはそれぞれについて項目をあらためて説明する。

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

MAGNUM 観測所の自動観測システム用に開発した赤外線雲モニターについて、その 5 年間の運用実績およびハレアカラ天気の詳細データを解析し、雲モニター自身の設計、製作ノウハウ、データ解析方法と共に欧文報告としてまとめた。

我々が開発した赤外線全天雲モニターは、2000 年にハワイ州マウイ島ハレアカラ山頂の MAGNUM 観測

所に設置され、2001 年から同観測所の自動観測に用いられている。冷却機構を持たずに波長 $10\mu\text{m}$ 帯に感度のある赤外線カメラと非球面パノラマ光学系の組み合わせにより、ほぼ全天に渡って雲の熱放射を直接撮影し、リアルタイムで天気情報を解析し、自動観測システムに伝えている。また風雨に耐えメンテナンスフリーの構造を備えている。MAGNUM 観測所での成功を受け、その兄弟機がマウナケアサイト、アタカマサイト、国内の岡山観測所、木曾観測所等に設置されている。

その MAGNUM 観測所雲モニターが取得した 5 年間のデータを、望遠鏡による可視近赤外線観測データと共に解析し、その運用上の性能とハレアカラ天気の評価を評価した。主な結果は以下である。

(1) 雨センサー出力と雲モニター出力との相関から、雨滴検出時の 96% において、雲モニターが曇天もしくは雨という報告を出している。これは降雨のほぼ 96% に対しては雲モニターによって事前にドーム閉対処が出来ていると解釈できる。(2) 長期にわたる標準星の観測フラックスから、装置のスループット変化と大気減光の影響を取り除くと、フラックスのばらつきが 2-3% 残る。これから、雲モニターによる薄雲検出の限界から生じる測光への影響が 2-3% 存在すると考えられる。(3) 雲モニターが見積もった雲の、波長 $10\mu\text{m}$ 光学的厚さと、MAGNUM 望遠鏡での観測で見積もられた光学的厚さの関数は、比例係数が 1 のオーダーであるが相関が悪く、両者の関係を構築するには 2 波長観測と現在よりも高密度のデータ取得欠かせないことが分かった。

また、5 年分の天気データ統計は、快晴率 56%、部分的観測可能率 19%、観測不可能率 15% を示し、すばる望遠鏡におけるの観測ログの情報と比較して、ハレアカラとはほぼ同等の晴天率と考えられる。また、月別平均では、冬 (12 月-2 月) および夏場 (5 月-9 月) の晴天率が高く、春 (3 月 4 月) と晩秋 (10 月 11 月) の夜間の晴天率が悪い傾向が見られた。

Seyfert 銀河 Markarian 744 の可視赤外変光遅延時間の観測と、Ia 型超新星 SN2004bd による距離指数の推定

Markarian 744 (NGC3786) は赤方偏移 $z = 0.00893$ の 1.8 型 Seyfert 銀河である。1995 年にバースト的な増光が観測され、可視 V バンドに対する近赤外 K バンドの変光遅延時間が 32 ± 7 日と報告された (Nelson 1996)。

MAGNUM プロジェクトでは、2002 年 4 月からこの天体の可視近赤外測光モニターを本格的に開始し、2005 年 7 月までに約 1000 日間におよぶ測光モニターデータが得られている。このうち、新たに解析した 2003 年 12 月以降のデータから、これまでに解析したデータと比べてより明確な変光ピークを検出した。また、K バンド変光曲線が V バンド変光曲線に追従した変化を見せている様子もはっきり見ることができた。

新たに加わった Mrk744 の測光データに対して Cross Correlation Function (CCF) 解析とモンテカルロ法

による誤差推定を行なうと、V,K バンド間の変光遅延時間は $21.4^{+5.2}_{-4.6}$ 日となった。この値は、Nelson (1996) による 1995 年のバーストのデータから今回と同じ手法で求めた 1995 年当時の変光遅延時間 31.7 ± 6.9 より小さくなっている。また、1995 年と 2004–2005 年の平均 V バンド等級を比べると、変光遅延時間の長い 1995 年の方が 0.61 等明るいことがわかった。このことは、約 10 年の間に Mrk744 の可視紫外等級が暗くなり、それにつれてダストオーラスの内径が小さくなったと理解できる。

また Mrk744 には、2004 年 4 月、Ia 型超新星 SN2004bd が出現した。この超新星の変光曲線を利用して Mrk744 の距離指数を独立に求め、活動銀河核における変光遅延と絶対光度の相関について検証を試みた。

超新星の距離推定は、Multicolor Light Curve Shape method (MLCS)(e.g. Riess et al. 1996) および stretch method (e.g. Perlmutter et al. 1997) に従って行なった。MLCS は、可視 B,V,R,I バンドで得られた変光曲線とカラー曲線を最小 2 乗法によってテンプレート変光曲線にフィットし、超新星の絶対光度を求めるものである。また stretch method は、テンプレート変光曲線を時間軸方向に伸び縮みさせて観測変光曲線とフィットし、拡大縮小率 (stretch factor) s から絶対光度を求める。今回の観測で得られた SN2005bd の B,V,I 変光曲線に対して、上記の手法から距離指数 $\mu_V = 33.3$ (MLCS), $\mu_V = 33.6$ (stretch method) が得られた。これらの結果は、これまでの MAGNUM プロジェクトによる観測によって示された、変光遅延と絶対光度の相関 (Minezaki et al. 2004) に基づいた Markarian744 の距離指数の推定値 $\mu_V = 33.3$ とほぼ一致するものであった。このことにより、活動銀河核の可視赤外変光遅延と可視絶対光度の相関関係を支持するひとつの根拠を示した。

MAGNUM プロジェクトによる近傍 Seyfert 銀河の可視赤外変光の観測と変光遅延時間の検出

MAGNUM プロジェクトでは、約 70 個の活動銀河核に対して測光モニター観測をおこなっている。これらの測光データから、活動銀河核における可視紫外放射の変化に対するダストオーラスからの近赤外放射の応答について調べるため、観測対象天体の中から十分なモニター期間が得られた近傍 Seyfert 銀河を選んで測光を行ない、変光曲線を得た。

解析した 5 天体 (Markarian 110, Markarian 335, Markarian 509, Markarian 79, Markarian 817) のうち全ての天体で、V, K バンドともに χ^2 検定上 99.9% の有意水準で変光を示した。またこれらのうち、Mrk 110, Mrk 335, Mrk509, Mrk 817 で変光ピークまたはボトムを観測しており、なおかつ K バンドの変光が V バンドの変光に追従する様子がはっきりみられた。

変光ピークまたはボトムが観測された天体に関して、Cross Correlation Function (CCF) 解析により VK バンド間変光遅延時間を求めてみると、それぞれ Mrk110: 72.3 日, Mrk335: 133.2 日, Mrk509: 93.6

日, Mrk817: 69.4 日の変光遅延が得られた。

この研究は、今後母銀河成分の見積もりなどを行なって絶対等級と変光遅延時間の相関について調べたり、可視近赤外カラーの時間的変化を調べるなど、継続中の課題である。

低光度セイファート銀河 NGC4395 の可視赤外線日内変光の観測

近傍活動銀河核 NGC4395 は絶対光度 $M_V \approx -11$ mag とたいへん暗いが、Seyfert 1 的な広幅輝線を持ち、最も光度が小さいセイファート 1 型活動銀河核とされるユニークな天体である。CIV 広幅輝線の reverberation mapping によって見積もられたブラックホール質量は $M_{BH} = 3.6 \times 10^5 M_\odot$ と活動銀河核としてはかなり小さい。X 線、紫外線、可視光において数時間以下のタイムスケールにもなる非常に速い変光現象が観測されており、さらに 2004 年 5 月 1 日に行なった NGC4395 活動銀河核の集中的なモニター観測により、われわれは近赤外線 J, H バンドにおける数時間スケールでの変光現象を初めて検出した。

われわれはその後も NGC4395 について長期的な可視赤外線モニター観測を続け、数日から数ヶ月のタイムスケールにおける大きな変光現象を確認した。集中モニター観測と長期モニター観測の結果を総合して検討した結果、数時間のタイムスケールで変光する近赤外線放射成分は NGC4395 活動銀河核の降着円盤の外側領域を起源とするものであること、いっぽうでより長いタイムスケールで変光する別の近赤外線放射成分が存在し、それはダストオーラス起源の熱放射 (放射温度は $T = 1320 - 1710$ K) 成分であることがわかった。

可視および近赤外線における降着円盤起源の放射成分の速い変光は中心の狭い領域からの X 線あるいは紫外線放射の変動が標準的な降着円盤を照らすことで引き起こされていると解釈できる。そこでそれらの変光の波長間時間差を調べることで降着円盤の大きさを推定することができる。速い変光を示す近赤外線変光の遅延時間により推定された降着円盤の外側領域の大きさはほぼ同時期に観測が行なわれた CIV 広幅輝線放射領域の大きさよりも小さいことがわかった。

近傍セイファート銀河 NGC4151 の H β 輝線 reverberation mapping 観測との共同観測

2004 年度末から 2005 年度始めにかけてオハイオ州立大学の Peterson 教授を中心として近傍活動銀河核の H β 広幅輝線の reverberation mapping 観測を行なった。これらの活動銀河核はこれまでも reverberation mapping が行なわれているが、今回の観測では 1 ヶ月以上の期間中はほぼ毎日観測を行い、その精度を大きく向上させた。MAGNUM 望遠鏡ではこの観測に時期を合わせてダストオーラスの reverberation mapping のため可視赤外線モニター観

測を行なった。これらの観測により活動銀河核の広幅輝線領域とダストトラスの構造を reverberation mapping によって精密に比較することができる。なかでも近傍セイファート銀河 NGC4151 は観測期間中に大きな変光が検出され、 $H\beta$ 広幅輝線放射領域の半径は $6.6^{+1.1}_{-0.8}$ 光日、中心ブラックホールの質量は $4.57^{+0.57}_{-0.47} \times 10^7$ 太陽質量であることがわかった。また活動銀河核の統一モデルからの予想どおり、ダストトラス内半径は $H\beta$ 広幅輝線放射領域よりも大きい。他の活動銀河核についても解析中である。

北黄極領域における遠方 ($z \geq 1$) 活動銀河核のモニター観測

活動銀河核までの距離を測定し、 Ω_0, Λ_0 などの宇宙論パラメーター、暗黒エネルギーを精査するため、MAGNUM 望遠鏡と赤外線天文衛星「あかり」を組み合わせた観測を実現するため、1)MAGNUM 望遠鏡による先行観測を推進し、また 2)「あかり」への観測提案を行った。

活動銀河核までの距離から宇宙論パラメーターなどを決めるさいには、遠方 ($z \geq 1$) の天体を利用できれば非常に有利であるが、そのために必要な赤外域の観測には、赤方偏移のためスペース望遠鏡を使うことがたいへん有効である。そこで我々は MAGNUM 望遠鏡と、2006 年 2 月に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」を併用することを以前より構想・推進してきた。

今年度の成果としては、可視域での先行モニター観測をさらにすすめ、光度曲線のスパンを大幅に拡大できたことが挙げられる。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、赤外域での光度曲線と比較することで可視赤外交光遅延の検出に利用できる、本質的な意義を持つものである。観測天体は、サーベイヤーである「あかり」でモニター観測を行えるよう、周回軌道の極にあたる北黄極領域に分布するものから選んだ。データを解析した結果、大半の天体において有望な変光を検出することができた。得られた光度曲線をもとに観測天体を取捨選択することで、「あかり」でモニター観測するのにもっとも適した天体を選定した。これらの結果を受けて、MAGNUM と「あかり」による共同観測を、「あかり」が試験観測期を終えて可能になり次第モニターを開始できるよう、「あかり」に提案中である。

ガンマ線バースト可視赤外線残光の多波長観測

MAGNUM 望遠鏡を用いて活動銀河核のモニター観測以外にもいくつかの観測を行なっている。ここではガンマ線バースト残光の可視赤外線多波長観測結果について報告する。

Swift 衛星が 2004 年 11 月に打ち上がり、ガンマ線バースト天体の検出数が飛躍的に増大している。そこでハワイ大学と共同で Swift 衛星によって検出されたガンマ線バースト天体の残光の可視近赤外線多

波長観測するプロジェクトを立ち上げた。ガンマ線バースト発生直後の明るい時期にすぐに観測を行ない、多波長観測によって短波長側のフラックスの急減(「ドロップアウト」)を検出することで、超遠方にあるガンマ線バーストをいち早く同定しようという試みである。MAGNUM 望遠鏡は常に可視・近赤外線撮像装置が運用状態にあるのでこの種の観測に有利である。そして実際に、のちに $z = 6.29$ というこれまでに知られているもっとも遠方の天体に匹敵する赤方偏移であることが判明する GRB050904 の残光を、バースト後 ~ 0.5 日の時点で可視赤外線観測することに成功した。可視光の R, I バンドでは残光は検出されず赤外線の J, H, K バンドで残光が検出されるという「ドロップアウト」が期待通りに観測され、その赤方偏移を $z > 6.18$ と推定した。

他にも 10 個以上のガンマ線バーストの残光観測を行っており、the gamma ray bursts coordinates network に報告している。

超新星の可視赤外線多波長モニター観測

MAGNUM 望遠鏡を用いて活動銀河核のモニター観測以外にもいくつかの観測を行なっている。ここでは最近に遂行された超新星のモニター観測についてまとめて報告する。

2005 年 5 月に発生した超新星 Ib 型 SN2005bf はそのスペクトルおよび光度曲線に特異な性質が見られた。MAGNUM 望遠鏡では可視から近赤外線の広い波長範囲 ($BVR I J H K$ バンド; $0.4 - 2.2 \mu\text{m}$) の測光観測を行なった。広い波長域の測光観測は理論的な光度曲線モデルを観測と比較するうえで、より正確な輻射光度を求める意味で重要である。他の観測の結果と合わせ理論的モデルと比較検討した結果、SN2005bf は水素外層を失った 25 – 30 太陽質量の大質量星 (おそらく WN 型星) が爆発したものであることがわかった。また爆発のさいにはジェットが発生したと考えられる。

その他に SN2004dj, SN2005cs, SN2006aj, SN2006X の観測を行なった。

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

重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 は銀河ではなく 1 つの銀河団によって重力レンズされたクエーサーであり、また重力レンズ現象はそれを引き起こしている天体 (レンズ天体) の質量のみによるため、この SDSS J1004+4112 は銀河団、特に銀河団の中心部分の詳細な質量分布を直接的に構築できる非常に稀でかつ有用な天体である。しかし、その有用性に反し、レンズ天体が銀河団であるがゆえに質量モデルの構築が難しく、通常の場合のように「レンズされた像の位置」や「それらの明るさの比」および「レンズ現象を引き起こしている天体の位置」の情報のみからレンズ天体の質量分布を一意的に導出するのは不可能であり、より多くのコンストレイ

トを必要とする。理論的な見積もりによると、各レンズ像(レンズされたクエーサー像)の光路差の測定値がそのコンストレイントの1つとして有用であることが示されており、そこで我々はMAGNUM望遠鏡を用いて各レンズ像のtime delayの測定を行っている。このtime delayの値は最長でおよそ数百日から数千日程度と見積もられているため未だ確定的な観測値は得られていないが、他の望遠鏡では難しいと予測されるより遠い位置にあるレンズ像のtime delay(より長いtime delay)の測定を目指し今後さらに観測を継続させていく予定である。また、これらの観測データは同天体のチャンドラ望遠鏡によるX線観測との比較となる可視光観測のデータとしても用いられており、各レンズ像の明るさの比が可視とX線で大きく異なるのを示すことに成功した。現在さらなるチャンドラ望遠鏡によるX線観測を提案中であり、それに対応する可視光観測としてもこの観測によるデータを用いる予定である。

ν GC 銀河の分布

我々はN体シミュレーションによるダークハローの合体系統譜から、準解析的銀河形成モデルを使い、数値銀河カタログ(NUmerical Galaxy Catalog; ν GC)を作成してきた。現在は、ダークマターの分布とカタログ銀河の分布を二体相関関数及びパワースペクトラムの時間変化から比較している。また、その一方で、現在は100Mpc立方の 512^3 体計算のデータを用いているが、新たに100Mpc立方の 1024^3 体計算を実行中である。今回の計算によって、従来の計算の質量分解能が十分であったか否かが検証できる予定である。というのも、同じ 512^3 体計算でも、100Mpc立方の計算と200Mpc立方の計算では、銀河の光度関数の再現性が大きく異なり、100Mpc立方の計算のほうが観測に近い結果を再現することが出来たからである。

銀河形成の準解析的手法と高精度N体シミュレーションに基づく「数値銀河カタログ」の構築

宇宙論に関する最新の理論と観測は、冷たいダークマター(CDM)が物質の質量の大半を占め、さらにエネルギー密度はダークエネルギー(あるいは宇宙定数)がCDMの数倍を占めるという宇宙モデルを確立した。CDMモデルでは、構造形成過程はCDMの重力により支配されている。また「冷たい」という特質から、短波長の密度揺らぎが大きい振幅を持っている。これより、宇宙初期に小さい天体が形成され、それらの合体(クラスターリング)により大きい天体が形成されるという階層的構造形成過程を辿ることが帰結される。一方、銀河のような宇宙論的スケールのもとに形成されてきた天体を理解するためには、CDMの合体成長過程をベースにした理論を構築しなければならない。つまり、CDMだけではなく、銀河も小さい銀河がまず形成され、それらの合体を通じてより大きい銀河が形成されてきたと考えるのが自然で

ある。そのため、これまでの現象論的な銀河進化モデルに代わり、近年はCDM構造形成に基づきより本質的なレベルからの銀河形成過程を調べることが重要であるとの認識が広まりつつある。

我々は、CDM宇宙モデルに基づいた銀河形成の「三鷹モデル」を開発してきた。これは、いわゆる準解析的アプローチに基づく銀河形成モデルの一つである。三鷹モデルは海外のグループによるモデルでは今まで考慮されていなかったプロセス、例えば爆発的星形成に伴う大量の超新星爆発が誘発するガスの銀河からの放出に対する銀河の星の分布への力学的応答など、を取り入れており、これにより初めて矮小銀河の性質を説明するのに成功するなど多くの成果を上げてきた。今回、このモデルを、矢作らによる世界最高精度のN体シミュレーションと合体させ、より良いダークマターハローの形成史を考慮し、かつ銀河の空間分布も計算可能にするモデル、「数値銀河カタログ(ν GC)」を構築した。

ν GCは理論的に構築された銀河の擬カタログである。従って、観測的に得られた銀河カタログと同様の解析をすることで、ダイレクトに観測結果と比較することが可能である。我々は、まず銀河の基本的な性質、即ち光学的・力学的性質やサイズなどの構造の統計的な分布を調べた。その結果、 ν GCは銀河の光度関数やガス質量関数などを良く説明できることがわかった。また、 ν GCがベースにしているN体シミュレーションの分解能は、現在publicにされている他の同様なカタログに比べても良いが、この分解能の違いは結果に重大な違いをもたらすことも示した。「三鷹モデル」の場合と同様に、矮小銀河の性質も再現できていることもわかった。これは世界最高精度のN体シミュレーションが実現可能になったことに大きく依っている。近傍銀河の性質だけでなく、深宇宙での銀河についても良く説明していることもわかった。 ν GCが導き出した銀河のナンバーカウントは、最新の「すばる望遠鏡」のSuprimeCamによる今までにない大量のデータに基づく銀河のカウントと実に良く一致し、 ν GCの持つ能力を見せつけた。

ν GCにより作られたデータは、幾つかのグループに渡され解析が進められている。例えばKashikawa et al. (2006, ApJ, 637, 631)によれば、すばる望遠鏡SuprimeCamを用いた「すばるディープサーベイ」により得られた赤方偏移 $z=4,5$ のライマン・ブレイク銀河の光度関数や、それらの大スケールでの二体相関関数と ν GCは非常に良く一致することが示されている。今後も高精度観測データと比較し解釈する際の基礎的な理論モデルとして ν GCが活用されることが期待される。

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

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

近年, CDM 宇宙モデルに基づき, いわゆる準解析的アプローチに基づく銀河形成モデル「三鷹モデル」が開発されてきた. このモデルは海外のグループによるモデルでは今まで考慮されていなかったプロセスを取り入れており, 初めて矮小銀河の性質を説明するのに成功している. しかし依然として TF 関係については, 観測と比較してベキ則が合わないこと, 全体的に暗くなるという問題が残されていた. モデルにおける TF 関係の傾きは, 超新星フィードバックの強さに依存するので, フィードバックが強く働く低質量銀河での TF 関係は, 大質量銀河のものとは傾きがずれてしまう. 但しフィードバックは, 観測される光度関数を説明するうえでは必要不可欠である. さらにこの問題は, 諸外国の準解析的モデルでも共通しており, 解決が急務とされていた. 矮小銀河では重力ポテンシャルが浅いため, 超新星爆発により暖められて銀河ガスが銀河外へ放出される, すなわち超新星フィードバックの割合が大きいと考えられるが, それだけ力学的応答の度合も高くなるとも予想される. 従って力学応答は, 低質量銀河の形成を議論する際には欠かせないプロセスであると考えられる. 今回, ディスク銀河における, 星形成に伴う大量の超新星爆発が誘発するガスの銀河からの放出に対する銀河の星の分布への力学的応答を考慮することにより, 超新星フィードバックが強く働く矮小銀河においても TF 関係が再現可能か検証した.

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

Loh & Spilar test による宇宙論パラメータの決定

Loh & Spilar test とは, 赤方偏移毎の銀河計数を用いた幾何学テストを応用したものである. 本テストは, 宇宙論パラメータと銀河の光度進化の度合を, 共に決定出来るという利点を持つ. 又, 抑も銀河の進化が無視出来ると考えられる比較的近傍 ($z \leq 0.5$) で宇宙論パラメータを制限出来る. よって, 大規模な銀河のサーベイカタログが利用出来る現在では, 高

精度で宇宙論パラメータが決定出来るものと期待している.

我々は, 本テストを銀河の観測データに適用した時の, 宇宙論パラメータの決定精度を推定した. 又, 光度・数密度進化等の銀河特有の特性や, 観測精度等の観測データの特性が, 宇宙論パラメータの決定精度に与える影響に関して検討を行い, これらの影響を軽減する為の理論的な方法論の確立を試みた.

この為に, 我々は観測データ等の特性に関して現実的な値を仮定した数値シミュレーションを行った. その結果, 近傍宇宙の観測からは減速定数 q_0 を最も良く制限する事が出来る事, 又 30000 個程度の銀河のカタログを用いると, 0.05 程度の統計誤差で決定できる事が分かった. 一方, 宇宙曲率 κ_0 の決定精度は 1.2 程度であって, この値は超新星による結果と同程度である. この決定誤差を減少させるには $z \sim 1$ 程度までのデータが必要な事が判明した. 又, 銀河の光度進化があった場合にも, 減速定数 q_0 に対する決定精度に与える影響は無視出来る事が分かった. 更に, 光度関数に誤差が存在する場合においても, 本テストを適用する観測データの範囲を選択する事によりその影響を押える事が出来る事が分かり, その方法の確立を行った. 一方, 銀河の数密度に進化があった場合は, 減速定数に対して系統的な誤差を与える事が分かった. 具体的には, 銀河の数密度が $(1+z)$ のベキで起こると仮定すると, 減速定数に対してそのベキ指数程度誤差が生じる事が分かった. 但し, 現実的な数密度進化の範囲では, これによる系統的誤差も無視出来る程度である事が分かった. これにより, 本テストの有用性が理論的に確立された.

現在, 我々はこれらの結果を元に, SDSS の銀河カタログに本テストを適用して, 予備的な結果を得ている.

超新星爆発による星形成の連鎖による化学進化を考慮した銀河進化モデル

昨今の様々な観測機器による大量の観測結果を使って, 銀河進化を解釈する際には, 星間物質の化学進化と恒星等の力学進化を同時に扱うモデルが必要である. 従来, 我々を含む様々な研究グループがおこなってきた SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) による化学力学銀河進化モデルでは, 星間物質の化学進化の取り扱いが原始的な手法にとどまっていた. 従来の手法では, 10^{6-7} 太陽質量の恒星の集団を SSP (Single Stellar Population) として扱っていたため, 化学進化の時間解像度には限界があった. そのため, 銀河形成初期に形成された重元素の少ない恒星 (主としてハロー星) をうまく再現できない. 化学進化は主に超新星爆発によって進行していくため, 超新星爆発のモデル化が必要であるが, 従来の手法では, 銀河形成初期または宇宙初期の星間物質の進化を精密にモデル化するのに必要な解像度を得ることができない.

我々は, SPH 法による化学力学銀河進化モデルに, サブグリッドモデルとして「超新星爆発による星形成の連鎖」を導入することで, 化学進化の精密化をおこなっている. 「超新星爆発による星形成の連鎖」

とは、超新星爆発によって形成された殻状構造が力学的に不安定になり次の世代の星を形成し、それが連鎖反応のように続いていくことである (Tsujimoto, Shigeyama & Yoshii 1999). SPH 法による銀河モデルでは、星間物質を 10^6 – 10^7 太陽質量の粒子 (ガス粒子) の集まりとしてモデル化する。我々は、連鎖反応がこのガス粒子内部で起こっていると仮定して、ガス粒子内部の星形成と化学進化をモデル化し、宇宙初期における星間物質の化学進化を計算した。これは、丁度、天の川銀河におけるハロー星の形成時期に相当しているので、我々の結果をハロー星の観測事実と比較検討することで、いままでのモデルでは難しかったハロー星の精密化学力学モデルが構築可能になった。さらに、統一的な銀河形成モデルを構築するために、以下のような改良を加えた。「超新星爆発による星形成の連鎖」による星形成と化学進化は、星間物質の重元素量が少なく星間物質の放射冷却率が低い時に効果的であると考えられ、実際、銀河円盤で観測されている星形成率は単純化された星形成モデルで説明できる。よって、我々のモデルでは、星間物質の重元素量に応じて星形成のモデルを切り替え、重元素量が十分大きい場合には銀河円盤での星形成モデルに切り替えるようにした。結果、ハロー星については観測されている重元素量分布を再現できるだけでなく、ハロー星の力学状態の指標である軌道の離心率の分布についても再現できた。これにより、宇宙初期の星形成は本研究で導入した超新星爆発による星形成モードが支配的であり、星間物質の重元素量が増えるに従って、銀河円盤で観測されるような通常の星形成モードに移行するというシナリオがもっともらしいことがわかってきた。

<<報文>>

((原著論文))

- [1] Berger, E., Kulkarni, S. R., Fox, D. B., Soderberg, A. M., Harrison, F. A., Nakar, E., Kelson, D. D., Gladders, M. D., Mulchaey, J. S., Oemler, A., Dressler, A., Cenko, S. B., Price, P. A., Schmidt, B. P., Frail, D. A., Morrell, N., Gonzalez, S., Krzeminski, W., Sari, R., Gal-Yam, A., Moon, D.-S., Penprase, B. E., Jayawardhana, R., Scholz, A., Rich, J., Peterson, B. A., Anderson, G., McNaught, R., Minezaki, T., Yoshii, Y., Cowie, L. L., & Pimblet, K.: Afterglows, Redshifts, and Properties of Swift Gamma-Ray Bursts; *ApJ*, **634**, 501-508, (2005)
- [2] Frebel, A., Aoki, W., Christlieb, N., Ando, H., Asplund, M., Barklem, P. S., Beers, T. C., Eriksson, K., Fechner, C., Fujimoto, M. Y., Honda, S., Kajino, T., Minezaki, T., Nomoto, K., Norris, J. E., Ryan, S. G., Takada-Hidai, M., Tsangarides, S., & Yoshii, Y.: Nucleosynthetic signatures of the first stars; *Nature*, **434**, 871-873, (2005)
- [3] Matsuoka, Y., Oyabu, S., Tsuzuki, Y., Kawara, K., & Yoshii, Y.: O I Line Emission in the Quasar PG 1116+215; *PASJ*, **57**, 563-568, (2005)
- [4] Minowa, Y., Kobayashi, N., Yoshii, Y., Totani, T., Maihara, T., Iwamuro, F., Takami, H., Takato, N., Hayano, Y., Terada, H., Oya, S., Iye, M., & Tokunaga, A. T.: Subaru Super Deep Field with Adaptive Optics. I. Observations and First Implications; *ApJ*, **629**, 29-44, (2005)
- [5] Nagashima, M., Yahagi, H., Enoki, M., Yoshii, Y., & Gouda, N.: Numerical Galaxy Catalog. I. A Semianalytic Model of Galaxy Formation with N-Body Simulations; *ApJ*, **634**, 26-50, (2005)
- [6] Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L., & Yoshii, Y.: GRB 050416: Optical/NIR observations.; GRB Coordinates Network, Circular Service, **3312**, (2005)
- [7] Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L., & Yoshii, Y.: GRB 050421: NIR observations.; GRB Coordinates Network, Circular Service, **3313**, (2005)
- [8] Tominaga, N., Tanaka, M., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Deng, J., Maeda, K., Umeda, H., Modjaz, M., Hicken, M., Challis, P., Kirshner, R. P., Wood-Vasey, W. M., Blake, C. H., Bloom, J. S., Skrutskie, M. F., Szentgyorgyi, A., Falco, E. E., Inada, N., Minezaki, T., Yoshii, Y., Kawabata, K., Iye, M., Anupama, G. C., Sahu, D. K., & Prabhu, T. P.: The Unique Type Ib Supernova 2005bf: A WN Star Explosion Model for Peculiar Light Curves and Spectra; *ApJL*, **633**, L97-L100, (2005)
- [9] Aoki, W., Frebel, A., Christlieb, N., Norris, J. E., Beers, T. C., Minezaki, T., Barklem, P. S., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Eriksson, K., Steinhauer, A., Deliyannis, C. P., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Ando, H., Yoshii, Y., & Kajino, T.: HE 1327-2326, an Unevolved Star with $[Fe/H] < -5.0$. I. A Comprehensive Abundance Analysis; *ApJ*, **639**, 897-917, (2006)
- [10] Price, P.A., Minezaki, T., Cowie, L.L., Kakazu, Y., & Yoshii, Y.: GRB 060306: MAGNUM observations.; GRB Coordinates Network, Circular Service, **4854**, (2006)
- [11] Suganuma, M., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Enya, K., Tomita, H., Aoki, T., Koshida, S., & Peterson, B. A.: Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies; *ApJ*, **639**, 46-63, (2006)
- [12] Tomita, H., Deng, J., Maeda, K., Yoshii, Y., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Suzuki, T., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Aoki, T., Enya, K., & Suganuma, M.: The Optical/Near-Infrared Light Curves of SN 2002ap for the First 1.5 Years after Discovery; *ApJ*, (2006) in press
- [13] Price, P.A., Cowie, L.L., Minezaki, T., Schmidt, B.P., Songaila, A., & Yoshii, Y.: Cosmological Implications of the Very High Redshift GRB 050904; *ApJ*, (2006) in press

((会議抄録))

- [14] Aoki, W., Beers, T. C., Christlieb, N., Frebel, A., Norris, J. E., Honda, S., Takada-Hidai, M., Asplund, M., Ando, H., Ryan, S. G., Tsangarides, S., Nomoto, K., Fujimoto, M. Y., Kajino, T., & Yoshii, Y.: Chemical Abundance Patterns of Extremely Metal-Poor Stars with $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3.5$; Proc. of IAU Symposium **228** “From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution”, 195-200, (2005)
- [15] Frebel, A., Aoki, W., Christlieb, N., Ando, H., Asplund, M., Barklem, P. S., Beers, T. C., Eriksson, K., Fechner, C., Fujimoto, M. Y., Honda, S., Kajino, T., Minezaki, T., Nomoto, K., Norris, J. E., Ryan, S. G., Takada-Hidai, M., Tsangarides, S., & Yoshii, Y.: The new record holder for the most iron-poor star: HE 1327 2326, a dwarf or subgiant with $[\text{Fe}/\text{H}] = -5.4$; Proc. of IAU Symposium **228** “From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution”, 207-212, (2005)
- [16] Minowa, Y., Kobayashi, N., Yoshii, Y., Totani, T., Takami, H., Takato, N., Hayano, Y., & Iye, M.: Subaru Deep Field with Adaptive Optics; Proc. of the ESO Workshop “Science with Adaptive Optics”, 365, (2005)
- [17] Yoshii, Y.: Historical perspectives on Dark Energy; Proc. of Probing the Dark Universe with Subaru and Gemini, 3.1, (2005)
- <<学術講演>>
((国際会議))
一般講演
- [18] Koyama, H., Nagashima, M., Yoshii, Y.: Dynamical response to supernova-induced gas removal in disk galaxies; 9th Asian-Pacific Regional Meeting of International Astronomical Union, Bali International Convention Center, Indonesia, 2005/07/26–29.
- [19] Nagashima, M., Yahagi, H., Enoki, M., Yoshii, Y. & Gouda, N.: Numerical Galaxy Catalog: a semi-analytic galaxy formation model with high-resolution N-body simulations; 9th Asian-Pacific Regional Meeting of International Astronomical Union, Bali International Convention Center, Indonesia, 2005/07/26–29.
- [20] Yoshii, Y.: Historical Perspectives on Dark Energy; Workshop “Probing the Dark Universe with Subaru and Gemini”, Waikoloa, Hawaii, 2005/11/06–09.
- ((国内会議))
学会発表
- [21] 美濃和 陽典, 小林 尚人, 吉井 讓 (東大理), 戸谷 友則 (京大理), 高見 英樹, 高遠 徳尚, 早野 裕, 家 正則 (国立天文台): 「Subaru Super Deep Field 遠方銀河のサイズ, 形態の観測的研究」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [22] 小山 博子 (早稲田大), 長島 雅裕 (京大), 吉井 讓 (東大理): 「超新星フィードバックによる質量放出に伴うディスク銀河の力学応答」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [23] 続 唯美彦 (東大宇宙線研), 川良 公明, 松岡 良樹, 吉井 讓 (東大理), 大藪 進喜 (宇宙航空研究開発機構): 「紫外・可視の Fe 輝線と光電離モデル, 衝突励起モデルとの比較」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [24] 榎 基宏 (国立天文台), 長島 雅裕 (京大), 矢作 日出樹 (東大理), 吉井 讓 (東大理), 郷田 直輝 (国立天文台): 「クエーサー形成の環境依存症」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [25] 富田 浩行, 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 越田 進太郎, 山内 雅浩 (東大理), 小林 行泰, 菅沼 正洋 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (宇宙機構), B. A. Peterson (ANU): 「MAGNUM プロジェクト 1. I 型活動銀河核の赤外波長域変動成分分析」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [26] 峰崎 岳夫, 吉井 讓, 富田 浩行, 青木 勉 (東大天文センター), 小林 行泰, 菅沼 正洋 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (JAXA/ISAS), 越田 進太郎, 山内 雅浩 (東大理), B.A. Peterson (ANU): 「MAGNUM プロジェクト 2. NGC4395 の 1 年スケールの変光現象」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [27] 松岡 良樹 (東大天文センター), 大藪 進喜 (JAXA/ISAS), 続 唯美彦 (東大宇宙線研究所), 川良 公明, 吉井 讓 (東大天文センター): 「OI 輝線強度比から示唆される, AGN の Fe 放射領域の物理状態」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [28] 岡島 礼奈, 吉井 讓 (東大理): 「コンパクト電波源をサンプルとする θ - z 関係とジェット統計について」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [29] 田坂 守, 吉井 讓, 峰崎 岳夫 (東大理): 「Loh & Spillar test による宇宙論パラメータの決定に関する理論的考察」日本天文学会 2005 年秋季年会, (札幌コンベンションセンター, 2005 年 10 月)
- [30] 富永 望, 田中 雅臣, 野本 憲一, 梅田 秀之 (東大理), P.A. Mazzali (Trieste Obs.), J. Deng (NAOC), 前田 啓一 (東大総合文化), 稲田 直久, 峰崎 岳夫, 吉井 讓 (東大天文センター): 「特異な Ib 型超新星 SN 2005bf (2) 光度曲線・爆発モデル」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)
- [31] 古河 貴裕 (東大理), 吉井 讓 (東大理): 「Numerical Galaxy Catalog と Shapelets を用いた Image Simulation」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)

- [32] 越田 進太郎 (東大理), 吉井 譲, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 富田 浩行 (東大天文センター), 小林 行泰, 菅沼 正洋 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (JAXA/ISAS), 山内 雅浩 (東大理), B.A. Peterson(ANU): 「MAGNUM プロジェクト: Markarian 744 における可視・赤外変光遅延時間の変化」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)
- [33] 田坂 守, 吉井 譲, 峰崎 岳夫 (東大理), 「Simulation data を用いた Loh & Spillar test の有効性の検討について」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)
- [34] 近藤 莊平, 小林 尚人, 美濃和 陽典, 吉井 譲 (東大理), Christopher W. Churchill (New Mexico State Univ.), Alan Tokunaga (IfA, UH), 辻本 拓司, 高遠 徳尚, 家 正則, すばる望遠鏡 IRCS/AO チーム (国立天文台): 「NaI D 吸収線で探る, 高赤方偏移 Damped Lyman- α System におけるダスト吸着」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)
- [35] 小山 博子 (早稲田大), 長島 雅裕 (京大), 吉井 譲 (東大理): 「Tully-Fisher 関係に及ぼす, 超新星フィードバックに伴う力学応答の効果」日本天文学会 2006 年春季年会, (和歌山大学, 2006 年 3 月)

一般講演

- [36] 小山 博子, 長島 雅裕, 吉井 譲: 「Tully-Fisher 関係における, 超新星フィードバックに伴う力学応答の重要性」銀河系研究会 2006, 2006 年 2 月 20 日-22 日.

4 サブミリ波観測

——優れた観測サイト「富士山山頂」から 分子雲の形成を探究——（山本（智）・岡）

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

サブミリ波、テラヘルツ領域（波長1 mmから0.1 mm）は天文学においてまだ十分に開拓されていない波長域である。本研究室では、わが国ではじめてサブミリ波望遠鏡（口径1.2 m）を富士山頂に設置して観測を行ってきた。とくに、中性炭素原子が放つ微細構造スペクトル線（ $^3P_1 - ^3P_0$ 492 GHz, $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz）の広域観測を行い、星間分子雲の形成、進化を研究している。また、このような研究を銀河系スケールに発展させる目的で、口径18 cm可搬型サブミリ波望遠鏡を開発し、チリ・アタカマ砂漠の高地（標高4800 m）で運用している。さらに、天文学教育研究センターと国立天文台が中心となって推進しているASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) プロジェクトにも参加するとともに、わが国の電波天文学コミュニティが北米、ヨーロッパのコミュニティとともに建設しているALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 計画にも協力している。

これらの研究とともに、国立天文台野辺山観測所の45 m電波望遠鏡、ミリ波干渉計などを用いて、星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成にともなう化学進化に着目し、種々の分子スペクトル線による観測を展開している。

一方、テラヘルツ帯での天文観測は技術的な困難のために未開拓の状況にある。とくにヘテロダイナ検出による高周波数分解能観測についてはほとんど手がついていない。本研究室では、テラヘルツ帯での観測を開拓するために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ（HEB）ミクサ素子の開発を行っている。研究室内に専用の素子製造装置を導入し、ミクサ素子の開発研究を進めている。この素子を用いて、1.47 THzにある窒素イオンの微細構造スペクトル線（ $^3P_1 - ^3P_0$ ）の広域観測を実現することで、銀河系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、プラズマ相が星間分子雲の形成と進化に与える役割を解明する。この研究を通してテラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

4.1 富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡（口径1.2 m）はわが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡であり、東京大学大学院理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センターのプロジェクトとして国立天文台、分子科学研究所、JAXAなどの研究者と共同で推進してきた。この望遠鏡は無人遠隔運用をはじめて実現した電波望遠鏡でもある。1998年に富士山頂に設置してから7シーズンにわたる運用で、かつてない規模で中性炭素原子サブミリ波スペクトル線（ $^3P_1 - ^3P_0$, 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz）の観測を展開してきた。その結果を一酸化炭素分子の分布などと比較することにより、星間分子雲の形成、進化について炭素の主要な存在形態の変化という視点から切り込むことができた。

しかし、2004年10月以降、気象庁富士山測候所が非常駐化し、望遠鏡への電力供給ができなくなった。2005年にかけて、富士山測候所の送電設備を利用して商用6600 V電力の自前での供給を試みたが、度重なる雷災に見舞われ、そのシーズンの望遠鏡の運用を行うことができなかった。このような状況にあって、望遠鏡の無人遠隔運用を継続することは困難であると判断し、富士山頂サブミリ波望遠鏡を2005年8月をもって閉鎖するに至った。2005年8月には、重要な観測装置群の撤去を行った上で、レドームとアンテナの解体を行った。今後、2年にわたり、望遠鏡下部機器室、および、鉄筋コンクリート基礎の撤去を行う予定である。

富士山頂サブミリ波望遠鏡はわが国のサブミリ波天文学を本格的に創生し、星間分子雲形成という新しい問題を提起したのみならず、わが国がサブミリ波における能力向上を掲げてALMAに参加する上でも少なからぬ貢献をした。今後は、これまでに取得した50平方度を超える中性炭素原子のサーベイデータをもとに、内外のミリ波・サブミリ波望遠鏡でのフォローアップ観測を進め、星間分子雲の形成進化について研究を展開していく計画である。

おうし座暗黒星雲における中性炭素原子の分布

おうし座暗黒星雲は距離が140 pcにある低質量星形成領域であり、これまで星形成に関して活発な研究が行われている領域である。近傍に大質量星や超新星残骸などが付随しておらず、自発的な分子雲形成・進化を研究する上で格好の対称である。そこで、富士山頂サブミリ波望遠鏡では1998年の設置当初からこの領域で中性炭素原子輝線（ $^3P_1 - ^3P_0$ ）の広域サーベイ観測を推進してきた。暗黒星雲では一般に輝線強度が弱い（ ~ 1 K）ので、広域サーベイには時間を要する。しかし、専用望遠鏡の強みを生かして、おうし座暗黒星雲の約70%の領域のサーベイを実現した。このデータを名古屋大学の4 m電波望遠鏡による $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ のデータと比較することにより、以下のことが明らかになった。

- (1) A_V が2等以下の希薄な星間雲 (diffuse cloud)

では $\text{CI}/^{13}\text{CO}$ 輝線強度比が顕著に高く現れる。このことを用いると分子雲に付随する希薄なエンベロープの分布を描き出せる。

(2) $\text{CI}/\text{C}^{18}\text{O}$ 輝線強度比は、おうし座暗黒星雲内の領域ごとに異なる。すなわち、分子雲内部で中性炭素原子の存在比が領域ごとに異なる。

(3) HCL2 , L1495 領域では $\text{CI}/\text{C}^{18}\text{O}$ 比が高い領域が存在し、そこに希薄なエンベロープが付随している。一方、 B18 領域ではそのような領域は存在しない。

YSO に占める T-Tauri 型星の割合を見ると、 HCL2 , L1495 , B18 の順に高くなっており、この順に分子雲の物理進化が進んでいると判断できる。中性炭素原子は炭素がまだ一酸化炭素分子として固定される前の化学進化の初期で豊富に存在することを考えられるが、上記の結果は主にその効果として理解できる。

M17 領域の高速度成分

活発な大質量星形成領域である M17 において、 $\Delta V \simeq 40 \text{ km s}^{-1}$ もの線幅を持つ $[\text{CI}]$ 輝線の高速度成分を、可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡によって 2002 年度に検出した。この高速度成分について、富士山頂サブミリ波望遠鏡による $[\text{CI}]$ および $\text{CO } J=3-2$ 輝線、さらになんてん望遠鏡グループの提供による $\text{CO } J=1-0$ 輝線のデータから、 C^0/CO 比が 3-4 と高いガス雲であることを明らかにしていた。本年度は野辺山 45m 鏡を用い、 $\text{CO } J=1-0$ 、 $^{13}\text{CO } J=1-0$ 、 $\text{HCO}^+ J=1-0$ の輝線で高空間分解能、高感度の観測を行なった。ここで高速度成分内に 1 pc スケールの構造が見つかり、これらが重力束縛されておらず大規模な乱流によるものであることがわかった。この乱流は M17 巨大分子雲を含むスーパーシェルの形成時に活性化された可能性がある。

4.2 テラヘルツ帯ヘテロダイン検出素子の開発

テラヘルツ帯は天文学において未開拓の波長帯である。そこには原子や基本的な分子のスペクトル線が存在し、それらの観測は銀河系における星間物質の全体像を理解する上で、非常に重要である。中でも、窒素イオン (NII) の放つ 1.46 THz のスペクトル線 ($^3P_1 - ^3P_0$) は、プラズマ領域から選択的に放射されるので、高い周波数分解能で観測することで、プラズマ相の分布と運動を詳しく調べることができる。その結果を、中性炭素原子、一酸化炭素分子、水素原子などの分布と比較することにより、銀河系星間雲の 3 つの主要な形態、プラズマ相、原子相、分子相の間の相互作用と相変化を総合的に捉えることが可能になる。

サブミリ波帯では、ヘテロダイン検出素子として SIS (superconductor – insulator – superconductor)

ミクサ素子が広く用いられている。しかし、SIS ミクサでは周波数が超伝導ギャップのエネルギーを超えると、ギャップ間の吸収のために損失が大きくなる。たとえば Nb を超伝導物質に用いたものでは 700 GHz がよい性能が出る限界の周波数となる。従って、テラヘルツ帯の観測のためには SIS ミクサ以外の原理に基づくミクサ素子の開発が求められる。

本研究室では、この目的のために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子の開発を進めている。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、素子内に生じた熱電子を中間周波信号の周期よりも速く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。熱電子の冷却方法として、(1) 拡散によって電極へ逃がす方法 (拡散冷却) と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板にエネルギーを逃がす方法 (格子冷却) の 2 つの方法がある。これらのどちらが主要なメカニズムとなるかは、用いる超伝導物質の物性と素子の構造に依存する。我々は Nb を用いた拡散冷却型の HEB ミクサ素子と、NbTiN を用いた格子冷却型の HEB ミクサ素子の開発を行っている。

HEB ミクサ素子の製作においては、100 nm スケールのマイクロブリッジ構造の形成が必要である。その目的のために研究室内にクリーンブースを設置して、2003 年度から専用装置群の導入を進めてきた。2005 年度には武田先端知ビル VDEC クリーンルーム内にドライエッチング装置、ビッグバン宇宙国際研究センターのクリーンルーム内にマスクアライナーをそれぞれ導入し、素子製作のすべてのプロセスを行うことができるようになった。

Nb を用いた拡散冷却型 HEB 素子の開発

前年度に引き続き、Nb を用いた拡散冷却型 HEB ミクサ素子の開発を進めた。ミクサ素子製作に用いる Nb 薄膜について、スパッタによる成膜条件が抵抗率や T_c 等の物理特性に与える影響について詳細な確認実験を行った。常温抵抗率は、バルクでの値 160 Ωnm に対して、膜厚 40 nm 以上の薄膜ではほぼ一様に 200 Ωnm 程度を示すことがわかった。これは薄膜とバルクの形状差を考えると妥当な値である。一方、膜厚 30 nm 以下では膜面の不均一性によると考えられる抵抗率上昇の傾向が見られた。これにより、HEB ミクサ設計の際に重要な膜厚と抵抗率の相関が把握できた。また、超伝導転移温度を測定するために GM2 段冷凍機を用いた測定システムを立ち上げた。このシステムで測定した超伝導転移温度 T_c は、100 nm 厚で 9 K 台、50 nm 厚で 8 K 台となり、過去の文献 (Wolf et al. 1976) の結果と合致した。以上から、成膜された Nb 薄膜は良好な品質であることが確認できた。

これらの実験結果を踏まえて HEB ミクサ素子の設計を微調整しつつ素子製作実験を行った。その結果、サブミクロンの寸法を持つ図形の薄膜において

は接触抵抗の影響が無視できず、HEB ミクサのインピーダンスを規定する寸法が従来想定していた電極間距離ではなく Nb 細線自体の長さで規定されることが判明した。このことから、HEB ミクサを天文観測などの実用に供する際に重要な性能となる IF 帯域幅や変換損失も Nb 細線自体の長さで決定される可能性も示唆される。さらに細線部のみならず、Nb と金電極の接触している部分全体の形状が素子のインピーダンスに関わってくることがわかり、以上を踏まえて HEB ミクサ素子の設計の改訂を行った。

この設計変更に伴い、電子ビーム描画装置を用いた重ね描画の位置精度を 100 nm スケールまで向上させる必要が生じた。重ね描画の位置調整を手動で行う場合、目印となるマーク画像の目視に頼ることや手の操作のぶれなどの原因で十分な位置精度を確保できない可能性が高いことから、マーク画像の自動認識によるオート描画の実現に取り組んだ。その過程で、従来手動で行っていた際には問題とならなかった石英ウェハ表面のコンディションに改善が必要となったため、デバイス製作プロセスにおけるウェハの洗浄、レジスト材の塗布、プリバーク等の全工程を対象として再検討、追試を行った。その結果これまでに自動描画に十分なコンディションを再現性良く実現、HEB ミクサ素子製作プロセスに適用することが可能となった。現在、これらの技術を総合して、HEB ミクサ素子の製作を進めている。

HEB ミクサ素子の試験環境の整備

製作した HEB ミクサ素子は導波管ミクサマウントに装着し、可搬型 18 cm 望遠鏡の THz 帯受信機デューワーを用いて冷却試験を行った。冷却時に HEB ミクサに特徴的な I-V 曲線が得られ、またその状況で 800 GHz の局部発振信号を入射させたところ I-V 曲線がなまる挙動が明瞭に確認された。これは、製作したミクサ素子が 800 GHz で DC ボロメータとして動作していることを示している。また、これによりこのデューワーの光学系および局部発振器が正しく動作していることも確認され、ミクサの性能評価の一連の実験をこのシステムで行う目処を立てることができた。

エッチング法を用いた HEB の製作法の開拓

従来の Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの開発では、冷却時の素子のインピーダンスが理想値の $27\ \Omega$ を大きく上回ってしまい、ミクサとしての性能が得られない問題が発生していた。その原因としては、Nb と Au の界面における Nb の表面酸化膜が妨げとなって接触抵抗率が増加し、拡散冷却型の特徴である熱電子の拡散が抑制されていることが考えられる。Nb 酸化膜は、製作工程上 Nb の成膜後に大気圧に暴露してしまうことで生成する。今年度はその対策として、真空装置から取り出すことなく Nb の上から Au を成膜し、Nb 表面の酸化を防ぐ方法を試みた。この工程は、本郷キャンパス内に設置された複合成膜装置の

特徴を最大限に生かしたものである。この方法では Nb 細線部の上にも Au の層を作ることになり、後の工程で Au を削るエッチングが必要となる。そのため、まずは Nb 薄膜の上に一度 Au を成膜し、エッチングで Au を除去した後での膜の性質を調べ、適した超伝導特性が保持されることを確認した。また実際のミクサ製作において Au を削る工程では、Au の深い谷底を削るような格好になるため、等方性エッチングでは幾何的に削りにくい場所がある。細線上に Au が残ってしまうと、設計した細線の長さを実現することが難しく、ミクサの特性を制御できない。しかしながら、このエッチング法により HEB ミクサ素子を製作し、性能評価したところ、理想値に近いインピーダンスが得られ、酸化膜の形成を抑制できていることが確認できた。これで、細線長を制御できるようになれば十分に実用的なミクサ素子を製作できることが示唆された。

NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子の開発

Nb を用いた拡散冷却型の HEB ミクサ素子の開発と並行して、NbTiN を超伝導物質に用いた格子冷却型の HEB ミクサ素子の開発を名古屋大学 STE 研究所の前澤裕之氏と共同で進めている。NbTiN は超伝導転移温度が高く（薄膜で 15 K 程度）、石英基板とのマッチングもよいので、新しいタイプの格子冷却型 HEB ミクサとして注目されている。NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の製作のためには、高品質の NbTiN 薄膜を作成することが必要である。本年度は、NbTi ターゲットを用いた反応性スパッタにより NbTiN 薄膜を作成し、そのキャラクタリゼーションを行った。

HEB ミクサの性能は、いかに細線の幅を小さく、膜厚を薄くし冷却効率をあげるにかかっている。冷却効率が高ければ高いほど、変換効率がよくなり中間周波数帯域幅も広がる。このため、素子として扱う上で剥がれにくく、小さな幅の細線を正確に切り出すことができる膜質が要求される。このような薄膜形成を可能にするために、複合成膜装置を用いて NbTiN 薄膜を様々な厚みで作成し、成膜レートやストレスの測定を行った。その結果、膜厚が 150 nm 程度までは、安定して 0.5 GPa 程度のストレスの値が得られるようになった。Nb では 100 nm 程度までは安定していることを考えると、NbTiN の方が膜の不均一性がより高いことが示唆される。

また、HEB ミクサの IF 信号の強さは、LO 信号と RF 信号の強さの相乗平均に比例する。このため、ミクサとして高性能にするためにはできるだけ LO 信号のパワーを大きくすることが望ましい。このためには、高い超伝導転移温度 T_c をもつ薄膜でミクサを作ることが求められる。NbTiN 薄膜は Nb と比べて高い T_c を持つので、有望な材料と言える。NbTiN 薄膜では、スパッタ時に導入する窒素ガスの流量を微量に変えるだけで膜の物性が大きく変わり、 T_c が変化する。そこで、窒素流量を微調整して T_c が最大となるような最適な値 (1.00 sccm) を求めた。さらに、実際の素子では数 nm 程度の膜厚が求められるので、膜厚を薄くした場合の T_c の変化を調べた。図

1のように、膜厚が薄くなるにつれ T_c が下がり、44 nmでは11.5 Kとなった。それでもNbの T_c に比べれば依然として高い値を示しており、NbTiN薄膜の有用性を明らかにできたと言える。また、今回の実験で用いた薄膜はすべて空气中にむき出しの状態であったため、表面が酸化して変質してしまっていた可能性も考えられる。実際の素子では成膜後にそのまま真空中でマスクをかけることで酸化を防げるので、この T_c の値よりは高い値を達成できる可能性がある。

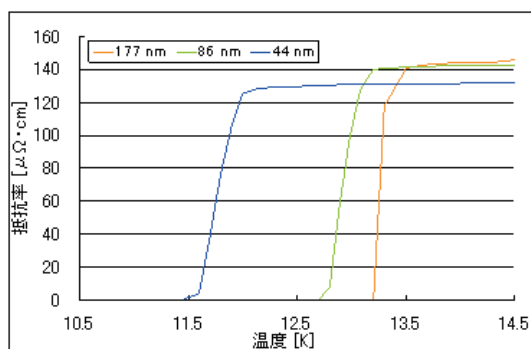


図 4.2 a: 作成した NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の膜厚変化

マスクアライナーの導入と最適化

HEB ミクサ素子のアンテナパターンの作成は光露光によって行う。これはアンテナパターン自体が 1 μm 程度の構造しかもたないの、光露光で十分パターンを描くことができるからである。ウエハにフォトマスクを正確に合わせて露光するために UV マスクアライナーをビッグバン宇宙国際研究センターのクリーンルームに導入した。導入後、ガラスウエハを用いてテスト露光を繰り返し、レジストの塗布方法（前処理を含む）、露光時間の最適化を行った。その結果、目的とするアンテナパターンを精度よく作成することができるようになった。なお、使用したフォトマスクは武田先端知ビルの VDEC の電子ビーム描画装置で作成した。

二層フィルムの電気抵抗の計算

製作した HEB 素子の直流抵抗値が高い問題の原因を追究するために、一定の接触抵抗率 ($\zeta/\Omega\text{nm}^2$) で張り合わされた 2 層フィルムの直流抵抗を計算する方法を定式化した。その結果、作成している HEB 素子の形状について、直流抵抗を計算することができるようになった。接触抵抗率が大きい場合には、直流抵抗は HEB 素子の金電極間隔に依存しないことが確かめられた。実験で求められた抵抗値との比較から、接触抵抗率は $10^7 \Omega\text{nm}^2$ 程度であることが明らかになった。この値は μm スケールでの素子では問題にならないが、HEB 素子のような 100 nm ス

ケールのサイズでは直流抵抗に大きな寄与をする。一方、直流抵抗は熱抵抗と関連しており、接触抵抗率が大きいことは熱伝導が悪いことを意味する。拡散冷却型の HEB 素子では Nb から Au 電極への冷却過程が重要なので、接触抵抗率の低減はミクサ性能に直結する。従って、この点での改善が必要であることがわかった。

4.3 星形成領域の観測研究

星形成領域における複雑な有機分子

近年、小質量原始星 IRAS16293-2422 (Cazaux et al. 2003), NGC1333IRAS4A (Bottinelli et al. 2004), NGC1333IRAS4B (N. Sakai et al. 2006) からギ酸メチル (HCOOCH_3) やシアン化エチル ($\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$) などの複雑な有機分子が検出された。これらの複雑な有機分子は、星間塵表面で生成された NH_3 , H_2CO , CH_3OH などの比較的単純な分子が、星形成に伴って気相へ一気に蒸発することで作られると考えられている。これまで、このような分子は大質量星形成領域のホットコア ($T \geq 100 \text{ K}$, $n \geq 10^6 \text{ cm}^{-3}$) を特徴づけるものとして知られてきた。しかし、これらの検出によって中小質量星形成領域においても高温で高密度な領域が形成され、複雑な有機分子が生成され得ることがわかった。特に、昨年度我々が HCOOCH_3 分子を検出した NGC1333 IRAS4B は他の 2 天体と同じ Class 0 天体であるが、分子流の力学的年齢から数 100 yr と非常に若い段階にあると言われている (Choi, 2001)。このことは、複雑な有機分子が原始星進化のごく初期段階から存在していることを示している。原始星が形成される以前には星間塵からの蒸発はおこらないので、複雑な有機分子は一般に存在しない。このことを考えると、複雑な有機分子は原始星形成の初期段階をトレースする手段として利用できる可能性がある。

しかし、これまで中小質量星形成領域における複雑な有機分子の検出例は上記の 3 天体のみである。そこで我々は、国立天文台野辺山 45 m 鏡を用いて、おうし座領域の小質量原始星 L1527 において複雑な有機分子の検出を試みた。on 点で 18 時間を超える観測を行ったが、 HCOOCH_3 などの分子は検出されなかった (図 2)。rms 雑音から導かれる上限値を吟味したところ、検出できなかった原因が中心星の規模によるものでないことがわかった。L1527 も Class 0 天体であるが、双極分子流の力学的年齢が 15000 yr と若干進化の進んだ天体である。事実、Class 0 から Class I への過渡段階にあるとも言われている。 HCOOCH_3 のような複雑な有機分子が原始星進化のごく初期に生成されることから、進化の進んだ天体で存在量が少なくなっている可能性が考えられる。あるいは、おうし座領域では複雑な有機分子が何らかの理由で生成されにくいことも考えられる。この問題を解決するためには、今後、ミリ波・サブミリ波帯の大口徑望遠鏡により、様々な分子雲に属する様々な原始星で、高感度な観測を系統的に行うことが非常に重要である。

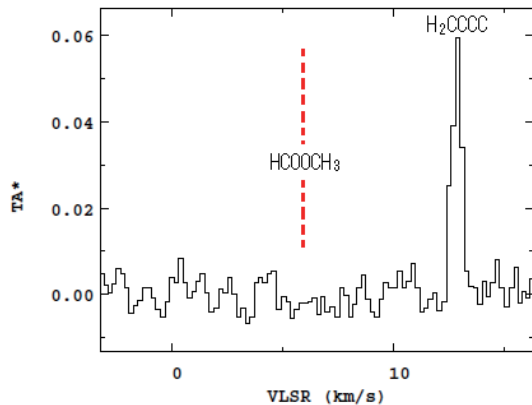


図 4.3 b: L1527 における HCOOCH_3 と H_2CCCC

大質量星形成領域 NGC2264 における HCOOCH_3 の分布

NGC2264 は距離が約 800 pc にある大質量星形成領域である。昨年度、大質量星形成領域に対する複雑な有機分子のサーベイ観測でこの天体を取り上げた。K バンドで最も明るい IRS1 方向で複雑な有機分子が検出されなかったのに対して、IRS1 よりも若く class 0 相当の大質量原始星を含むと言われる MMS3 方向で HCOOCH_3 のスペクトルが検出された。このことは、原始星進化の初期段階で複雑な有機分子が存在するという小質量星形成領域の結果からの予想と一致する。そこで、本年度、野辺山ミリ波干渉計を用いて HCOOCH_3 の空間分布を高分解能で調べた。IRAS1 と MMS3 をともに含む視野を設定して観測した結果、 HCOOCH_3 は MMS3 方向に存在し、IRAS1 方向では検出されないことが確かめられた。詳しい解析は現在進行中である。

星形成領域における H_2CCCC

Class 0 原始星 L1527 での複雑な有機分子の観測の過程において、我々は偶然、炭素鎖分子 H_2CCCC の高励起輝線を検出した (図 2)。これまでこの分子は、TMC-1 など星形成を伴わない分子雲で検出されていたが、星形成領域でこの分子が検出されたのは初めてである。しかも、検出された輝線は TMC-1 で予想される値に比べて遥かに強かった。一般に CCS や CCH などの炭素鎖分子は、炭素がまだ CO に固定される前の非常に若いフェーズでのみ豊富に存在し、星形成が始まる段階では急速に存在量が減少する。したがって、この検出は、L1527 において炭素鎖分子が何らかの理由で生き残り、星形成の結果として中心部分で温められているという可能性を示唆する。その原因の解明は、L1527 における星形成のタイムスケールに関連する重要な情報を与えることが期待される。

CCS と CCH の ^{13}C 同位体種の観測

炭素鎖分子 CCS のスペクトル線は星形成を伴わない分子雲コアの進化を探る上で重要な道具として広く用いられている。しかし、星間分子雲における CCS の生成過程については未だによく理解されていない。それを解明するために、以前、国立天文台野辺山の 45 m 望遠鏡を用いて CCS の ^{13}C 同位体種の観測を行った (池田ら 2002 年)。その結果、 C^{13}CS のスペクトル線は正常な比で観測されたが、 ^{13}CCS はまったく検出できなかった。この結果は、CCS が生成する過程で、2つの炭素が透過でないことを意味しているとともに、 ^{13}CCS で ^{13}C の割合が原子の場合よりも少ない (すなわち希釈されている) ことを示している。これは、CCS の生成メカニズムを大きく絞り込む結果である。しかし、それだけにその結果を独立な観測で再確認することは非常に重要である。その目的で、本年度、CCS の ^{13}C 同位体種の観測を国立天文台野辺山の 45 m 望遠鏡を用いて行った。その結果、 ^{13}CCS のスペクトルが弱いことを確認できる結果を得た。

上記の結果、CCS の主要な生成メカニズムは CCH を経由するルートと CH を経由するルートに絞り込まれることになった。もし前者の場合、CCS と同様に片方の ^{13}C 同位体種が少ないはずである。そこで、CCH の ^{13}C 同位体種の観測を行った。まだ、雑音が大きいが、強度の大きい 4 本の超微細構造成分を足し合わせた結果、2種の ^{13}C 同位体種がともに検出されている可能性が高いことがわかった。もしそうであるとすると、CCS は CH を経由して生成していると結論することができる。その場合、CH の ^{13}C が希釈していることになるが、その原因追求は今後の課題である。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the Southern Milky Way, *Astrophys. J.*, **623**, 889-896 (2005).
- [2] E. Kim and S. Yamamoto: Rotational Spectra of the Deuterated Carbon Chain Molecules: C_3D , C_4D , C_3HD , and C_4HD , *J. Mol. Spectrosc.*, **233**, 93-97 (2005).
- [3] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Detection of HCOOCH_3 toward a Low-Mass Protostar NGC1333, *Pub. Astron. Soc. Japan*, **58**, L15-L18 (2006).
- [4] T. Sakai, T. Oka, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the AFGL 333 Cloud, *Astrophys. J.* in press.
- [5] T. Hirota and S. Yamamoto: Molecular Line Observations of a Carbon-Chain-Rich Core L492, *Astrophys. J.* in press.

(国内雑誌)

- [6] 山本 智: サブミリ波テラヘルツ帯における天文観測、分光研究, **54**, 356-368 (2005).

(学位論文)

- [7] 坂井南美: 複雑な有機分子をプローブとした原始星進化初期過程の探求 (修士論文)

(著書)

- [8] 山本 智: 「原子分子」、物理学大辞典、朝倉書店 (2006)
 [9] 山本 智: 「検出感度と雑音」、「星間分子の観測」、実験化学講座 9、物質の構造 I、日本化学会編、丸善 (2005)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] S. Yamamoto and N. Kuboi: CI Line Survey of Molecular Clouds, Submillimeter Astronomy in the Era of SMA (Boston, June 2005).
 [11] M. Nagai, T. Oka, Y. Moriguchi, Y. Fukui, Y. Sekimoto, and S. Yamamoto: Observational Results on Broad Spectral Line Features of CI and CO Found in the M17 Region, Workshop on Submillimeter Astronomy and Receiver Technologies (Purple Mountain Observatory, Dec. 2005).
 [12] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Exploring an Early Stage of Protostellar Evolution with Complex Organic Molecules, Inaugural Japan-Taiwan ALMA Science Workshop (Taipei, Dec. 2005).
 [13] S. Yamamoto: CI Survey of Molecular Clouds, East-Asian Workshop on Molecular Clouds, (Tokyo, Feb. 2006).

招待講演

- [14] Oka, T., Nagai, M., Kamegai, K., & Tanaka, K.: A CO $J=3-2$ Survey of the Galactic Center, Perspective of Submillimeter Astronomy with ASTE (Tokyo, March, 2006)
 [15] S. Yamamoto: Observational Approach to Chemical Evolution of Molecular Clouds, New Horizon of Astrochemistry and Laboratory Spectroscopy (Mito, March 2006).

(国内会議)

一般講演

- [16] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 大型有機分子をプローブとした原始星進化の初期過程の探求、ALMA 星間化学ワーキンググループ研究会 (国立天文台、2005 年 6 月)
 [17] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 大型有機分子をプローブとした原始星進化の初期過程の探求、第 2 回 ALMA サイエンスワーキンググループ全体会合 (国立天文台、2005 年 7 月)
 [18] 永井 誠、岡 朋治、森口 義明、福井 康雄、関本 裕太郎、山本 智: M17 領域高速度成分の起源を調べる、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)

- [19] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 星形成領域における複雑な有機分子の探査、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)
 [20] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: Detection of HCOOCH₃ toward a Low-Mass Protostar NGC1333IRAS4B、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)
 [21] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、山本 智、酒井 剛、嶋作一大、望月賢治: 遠方原始銀河候補天体の CI 禁制スペクトル線探査、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)
 [22] 永井 誠、岡 朋治、森口 義明、福井 康雄、関本 裕太郎、山本 智: M17 領域における [CI] 輝線高速度成分、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)
 [23] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 小質量原始星 NGC1333IRAS4B における HCOOCH₃ の検出、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)
 [24] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、山本 智、酒井 剛、嶋作一大、望月賢治: 遠方原始銀河候補天体の CI 禁制スペクトル線探査、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)
 [25] 永井 誠: 中性炭素原子輝線で探る星間物質の相変化、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (東京大学、2005 年 11 月)
 [26] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 大質量星形成領域のホットコアにおける大型有機分子、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)
 [27] 新保 謙、坂井南美、芝 祥一、山本 智、前澤裕之、P.G. Ananthasubramanian: 超伝導 HEB ミクサ素子に用いる Nb 薄膜のキャラクタリゼーション、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)
 [28] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、亀谷和久、田中邦彦: ASTE による銀河系中心 CO $J=3-2$ 広域観測 (I)、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)
 [29] 永井 誠、岡 朋治、亀谷 和久、田中 邦彦: ASTE による銀河系中心領域 CO $J=3-2$ 広域観測 (II) — LVG 解析による物理状態の評価、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

招待講演

- [30] 岡 朋治: ASTE による銀河系中心 CO $J=3-2$ 広域観測、先端研究事業ワークショップ「銀河系中心部-分子雲から高エネルギー現象まで」(名古屋大学、2005 年 12 月)

5 暗黒物質観測

——神岡鉱山における暗黒物質探索—— (蓑輪・井上)

蓑輪 研究室では、大型加速器を使わずに新しい工夫により素粒子のさまざまな実験的研究を行なっている。

5.1 暗黒物質探索実験

様々な観測結果から我々の宇宙を構成する物質の大部分は非バリオンの冷たい暗黒物質であることが確実と考えられている。この暗黒物質は Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) として存在する可能性が高く、その候補として超対称性理論から予言される未発見の粒子 neutralino が有力である。WIMP を発見しその正体を明らかにすることは宇宙物理学、素粒子物理学両方の観点から重要である。我々のグループはこの WIMP を直接発見することを目的とした研究を行なっている。

本年度は昨年度に引き続き $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーターを用いた WIMP 観測実験を行った。 CaF_2 は原子核中核子のスピン期待値が大きい ^{19}F を含むため、原子核のスピンに依存した相互作用を通して WIMP を検出するのに有利である。また、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレーターの 50% 程度の発光量があるため、比較的エネルギー閾値を下げるができる。前年度バックグラウンドイベントの低減に効果のあった 6N 高純度銅シールドの厚さを 5cm まで増やして宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設における約 2ヶ月間の WIMP 観測実験を行った。観測されたエネルギースペクトルから原子核のスピンに依存した相互作用における WIMP-陽子、WIMP-中性子の結合定数 a_p と a_n に対する上限値を導出した (図 5.1 a)。この結果は WIMP を発見したと主張するイタリア DAMA グループのパラメータ許容領域の多くの部分を制限している。

残存するバックグラウンドイベントの原因として結晶中にドーブしたユーロピウムの放射性同位体 ^{152}Eu の崩壊が考えられる。 ^{152}Eu は天然に存在する ^{151}Eu が地上で熱中性子を吸収することによって生成される。さらなるバックグラウンドイベントの低減のため、結晶中の ^{152}Eu 生成量の同定、除去方法の検討を行った。地上で約一年間熱中性子を照射された $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を用いて測定を行ったところ、地下に保管した結晶に比べて約 10mBq/kg の ^{152}Eu 含有量の増加が確認された。測定されたエネルギースペクトルから WIMP 観測実験で重要な 10keV electron equivalent 以下の領域でのバックグラウンドイベントの約半分が ^{152}Eu 由来であることが分かった。 ^{152}Eu 含有量の測定として原料の EuF_3 から発生する γ 線の観測

を Ge 検出器を用いて行ったところ、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を用いた測定と矛盾しない結果が得られた。これらの測定からユーロピウムのドーブ量の低減、熱中性子吸収断面積の小さい ^{153}Eu の同位体濃縮がバックグラウンドイベントの低減に有効な方法であると考えられる。 ^{153}Eu の低減により WIMP 観測の感度を約 2 倍にできると考えられるが、WIMP を検出するためには今後のさらなるバックグラウンドイベントの追求、低減が必要である。

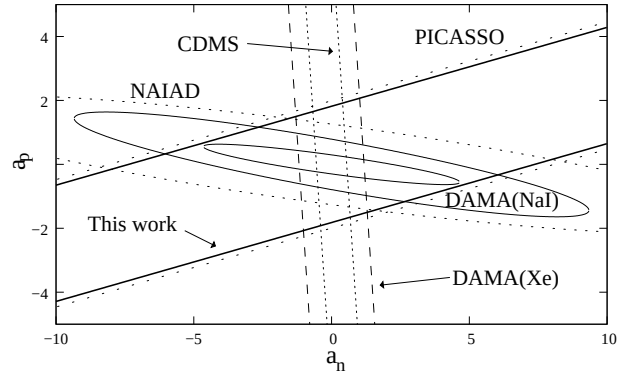


図 5.1 a: WIMP と原子核スピンに依存した相互作用に対する制限。 a_p , a_n はそれぞれ WIMP-陽子、WIMP-中性子の結合定数。WIMP の質量 $50\text{GeV}/c^2$ のとき。

5.2 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、このうち 1eV 付近では太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

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

現在は装置を理学部1号館地下に移設して組み立て・再立ち上げを行っている。それと並行して、1-2eV程度の質量のアクシオン探索のために低温高密度ヘリウムガスを利用した装置のアップグレードを行っている。eV質量領域探索の実験ではヘリウムガスの圧力を様々な値に設定する必要があるため、ガス圧の自動制御装置を製作しており、現在までに常温窒素ガスの制御に成功している。また高密度ヘリウムガスを扱うに当たって、超電導コイルのクエンチによる急激な温度上昇、ガス圧の上昇による爆発に対する安全対策が必要となる。その一貫として、極低温で動作する安全弁の選定、弁の装置が要求するスペックを満たしているかどうかの試験を行った。この実験がうまくいけば、素粒子の大統一理論 (GUT) の予言するアクシオンモデルの検証が行える予定である。

5.3 共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出

太陽ニュートリノのうち $p-p$ 反応による物などや原子炉の放出しているような低エネルギー (MeV程度あるいはそれ以下) の電子ニュートリノ・反電子ニュートリノの有効な検出手段は、有機液体シンチレータと放射化学的方法に限られていると言ってよい。そのうち、塩素やガリウムをターゲットとした従来の放射化学的手法ではニュートリノ捕獲による生成核が適当な半減期の放射性である必要があるので使えるターゲットには制限がある。エネルギー閾値の低い、あるいは断面積の大きい多様な検出ターゲットが使用可能な新しいニュートリノ検出法が開発できれば、原子炉からの反電子ニュートリノ、あるいは低エネルギー太陽ニュートリノの精密観測が可能になる。とくに、原子炉実験では、KamLAND実験が成功した事を受けて混合角 θ_{13} の測定など、さらに精密なニュートリノ振動の検証ができる意義は大きい。

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

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$$

$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z - 1)$$

のように原子番号が ± 1 だけ異なる元素に転換される。この原子をLASERを用いて選択的に共鳴イオン化する。そこで、まず原子の基底状態から中間の励起状態までLASER光により励起し、次に別のまたは同じLASER光により原子をイオン化させる。最初のエネルギーレベル差は元素に特有なもので、LASER光の波長をその元素のエネルギーレベル差に合わせてやることによりその元素のみを選択的にイオン化することができる。イオン化された元素は、Q-mass spectrometer (四重極質量分析器) または Time of Flight Spectrometer (TOF 式質量分析器) によりさらに同位体分析し不純物とより分けることになる。

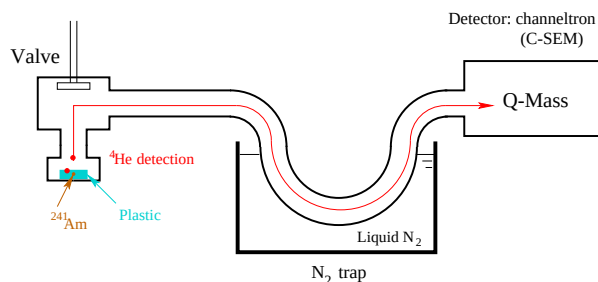


図 5.3 b: ^{241}Am 線源の放出する α 線を蓄積してヘリウム原子として四重極質量分析器で検出する。

この方法の開発研究の第一歩として、Q-mass spectrometerによる微量元素検出能力の検証をした。図 5.3 b に示すように、333.1 kBq の ^{241}Am 線源の放出する α 線を真空容器内に一定時間蓄積して、ヘリウム原子として四重極質量分析器で検出することを試みた。線源はプラスチック容器の密封線源であるので、 α 線は容器中で停止するが、拡散により十分速く容器外にヘリウム原子として出てくる。残留ガスやプラスチック容器からのアウトガスは、液体窒素のトラップでとり除いた。その結果、1 時間 - 20 時間の蓄積時間に対して蓄積時間にほぼ比例する量のヘリウム原子が検出された。また、検出限界はヘリウム原子約 10^8 個であることがわかった。現在の装置では、四重極質量分析器の真空排気を行いながら分析しているために大多数のヘリウム原子が質量分析されることなく捨てられている。この部分を改善すれば、検出限界は何桁も改善するものと考えられる。

この方法により、物質透過力の弱い α 線でも、ヘリウム原子として物質を透過できるならば、放射能の定量が可能であることが示されたわけであり、放射線計測への応用も考えられる。

今後は半導体波長可変レーザーを導入し、実際に共鳴イオン化質量分析器を組み立てて検出能力の実証実験を行い、問題点を洗い出してゆきたい。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Akimoto, Y. Inoue, M. Minowa: Measurement of the thickness of an insensitive surface layer of a PIN photodiode, physics/0504147, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **557** (2006) 684 - 687.
- [2] Y. Shimizu, M. Minowa, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark matter search experiment with $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ scintillator at Kamioka Observatory, astro-ph/0510390, Physics Letters B **663** (2006) 195 - 200.

(会議抄録)

- [3] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark Matter Search with Direction Sensitive Scintillator, Proceedings of the the Fifth International Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin(NOON2004), Eds. Y. Suzuki, M. Nakahata, S. Moriyama and Y. Koshio (World scientific) (2005) pp.395-400, astro-ph/0405598.
- [4] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark Matter Search with Direction Sensitive Scintillators, Proceedings of the the Fifth International Workshop on The Identification of Dark Matter(IDM2004), Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World scientific) (2005) pp.378-383, astro-ph/0411215.

(国内雑誌)

- [5] 蓑輪 眞: 暗黒物質直接探索の現状, 日本物理学会誌, Vol. 60, 2005 年 8 月号 609 – 615.

(学位論文)

- [6] 岩田圭弘: 微量元素分析法による粒子検出のための四重極質量分析計の性能評価、平成 18 年 3 月修士(理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [7] 清水雄輝: 暗黒物質探索の現状、第 4 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、国民休暇村 鹿沢高原 2005 年 8 月 23 日.
- [8] 秋本祐介: Tokyo Axion Helioscope の改良による eV 質量領域のアクシオン探索計画、日本物理学会 2005 年秋季大会、大阪市立大学杉本キャンパス、2005 年 9 月 12 日.
- [9] 岩田圭弘: 中性子捕獲反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ を用いた四重極質量分析計の性能評価、日本物理学会秋の分科会、大阪市立大学杉本キャンパス 2005 年 9 月 12 日.
- [10] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験の現状、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2005 年 11 月 21 日.
- [11] 清水雄輝: 暗黒物質の探索について、平成 17 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表研究会、東京大学宇宙線研究所 柏 2005 年 12 月 16 日.
- [12] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験の現状、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村、2006 年 2 月 27 日.
- [13] 清水雄輝: $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーターを用いた暗黒物質探索実験における結晶内部放射性不純物の低減、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2006 年 3 月 1 日.
- [14] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量粒子検出、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2006 年 3 月 1 日.
- [15] 清水雄輝: 暗黒物質直接観測実験に用いる $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶の放射性不純物の研究、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 28 日.
- [16] 秋本祐介: 低温高密度 He ガスを利用した Tokyo Axion Helioscope の改良とその安全対策、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学、2006 年 3 月 29 日.
- [17] 太田良介: 太陽アクシオン探索に用いるガス圧自動制御装置の開発、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 29 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粒子検出器開発 I、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 30 日.
- [19] 林寛仁: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた粒子検出器開発 II、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学 2006 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・土居・嶋作ら)

6.1 宇宙論

SDSS の luminous red galaxies の二体相関関数にバリオン振動のピークを発見

D. J. Eisenstein (アリゾナ大) らスローン・ディジタル・スカイサーベイ (SDSS) チームとの共同研究. SDSS で見つかった 46,748 個の luminous red galaxies (LRGs; $0.16 < z < 0.47$) の大規模な空間分布を二体相関関数を使って調べたところ, $100h^{-1}$ Mpc のスケールにピークを発見した. このピークの高さと位置は, 宇宙の晴れ上り時に凍結したバリオン振動によるピークの予想と良く一致する. この結果は, 重力不安定による標準的な構造形成論が $z \sim 1000$ から現在まで成立していることを示す. バリオン振動のピークは宇宙の大きさを測る物差しとしても使える. 二体相関関数の全体の形から, 宇宙の密度パラメータや暗黒エネルギーの密度に制限を与えた. 現在標準とされる宇宙論モデルは本観測結果と整合的である. [2]

6.2 すばる望遠鏡による高赤方偏移銀河と大構造の研究

赤方偏移 $z = 6.03$ と 6.04 の Lyman α 輝線銀河の発見

長尾透 (アルチェトリ天文台), 柏川伸成 (国立天文台グループ, M. A. Malkan (UCLA), 村山卓ら東北大学グループ) らの共同研究. $i' - z'$ が非常に赤く (いわゆる i' -drop) 且つ NB921 バンドでの等級が相対的に暗い天体は, $6.0 < z < 6.5$ の Lyman α 輝線銀河である可能性がある. 我々は Subaru Deep Field においてこの測光的性質を示す天体を 2 個分光し, それらが確かに $z = 6.03$ と 6.04 にある輝線銀河であることを確認した. これらの銀河は非常に大きな Lyman α 等価幅を持つことが分かった. 本観測から, i' -drop 銀河のかなりの割合が Lyman α 等価幅の大きな銀河であることが示唆される. [6]

$z = 5.7$ の Lyman α 輝線銀河の性質

土居守 (天文学教育研究センター), 柏川伸成 (国立天文台), M. A. Malkan, C. Ly (UCLA), 松田有一 (京都大学), 大内正己 (STScI) らとの共同研究. 早期宇宙の銀河の性質を調べるために, Subaru Deep Field の 725 arcmin^2 の領域で $z = 5.7$ の Lyman α 輝線銀河 (LAEs) の探索を行なった. 二色図 ($z' - \text{NB816}$ vs $R - z'$) を用いた探索の結果, 89 個の候補天体が見つかった. また, それに続く分光観測によって 34 個が分光同定された. 分光観測はすばる望遠鏡の FOCAS と Keck II 望遠鏡の DEIMOS で行なわれた. これらの測光および分光サンプルは現在のところ $z = 5.7$ LAEs の最大のサンプルである. 得られた主な結果は次の通りである. (i) $z = 5.7$ LAEs の Lyman α 光度の光度関数は, 過去の観測結果よりも大きな値を示す. 過去の観測は, 限界等級が浅いために, $z = 5.7$ LAEs の数密度を過小評価していたと考えられる. (ii) Lyman α 輝線の等価幅は典型的に $233\text{\AA}$ と非常に大きい. サンプルのかなりの天体は, 通常の星形成では実現できないほど大きな等価幅を持つ. それらの LAEs は, 年齢が非常に若い, 金属量が非常に少ないか, IMF が非常に平ら (つまり重い星の割合が高い) である可能性がある. (iii) 静止系遠紫外連続光 (FUV) の光度関数を求め, それを同じ赤方偏移の Lyman-break 銀河の光度関数と比較したところ, 両者はほぼ一致した. この結果は, $z \sim 6$ において, 大部分の星形成銀河が強い Lyman α 輝線を出していることを意味する. (iv) LAEs の空間分布には大スケールの非一様性が見られるが, そのコントラストは, 以前 Subaru/XMM-Newton Deep Field で見つかった大規模構造ほどは高くない.

赤方偏移 $z \sim 4 - 5$ の Lyman-break 銀河 (LBGs) の性質

Subaru Deep Field プロジェクトチームとの共同研究. Subaru Deep Field プロジェクトによる広視野の多色深撮像データを元に, 赤方偏移 $z \sim 4 - 5$ の Lyman-break 銀河の大規模なサンプルを構築した. 先行の $z < 3, \sim 6$ の研究と合わせて銀河の紫外光光度関数の進化, 宇宙の星形成史を調べた結果, 次のことが分かった. 第 1 に, 銀河の紫外光光度関数は $z > 4$ で大きく進化しており, この進化は銀河の特徴的な明るさ M^* の変化によって説明できる. M^* は, $z \sim 6$ から 4 にかけて急激に明るくなり, $z \sim 3$ から現在にかけて顕著に暗くなっている. 第 2 に, 紫外光光度関数から得られる宇宙の全星形成率密度は, $z > 3$ でほぼ一定である. 一方, 星形成率密度を, それを担っている銀河の明るさごとに分けると, 暗い銀河からの寄与は大きく進化していないのに対し, 明るい銀河からの寄与は $z \sim 3 - 4$ に急なピークをもっている. [27], [28], [37], [45], [49]

赤方偏移 $z \sim 4 - 5$ にある Lyman Break 銀河 (LBGs) の空間分布の性質

柏川伸成 (国立天文台) を始めとした Subaru Deep Field プロジェクトとの共同研究. Subaru Deep Field で見つかった $z \sim 4-5$ の LBGs の角度二体相関関数を詳細に調べた. その結果, 過去の観測同様, FUV 光度の大きいものほど強くクラスターしていることが分かった. また, 角度二体相関関数の傾きが FUV 光度に依存する (明るい天体ほど傾きが急である) ことも分かった. 後者の結果は, 重いダークハローが複数の LBGs を抱え込んでいることを示唆する. これらの観測結果と銀河進化モデルとの比較も行なった. [16]

赤方偏移 $z \sim 4$ にある Lyman Break 銀河 (LBGs) の空間分布の性質

大内正己 (STScI) を始めとした Subaru/XMM-Newton Deep Field プロジェクトとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Field の 1 平方度の天域で見つかった $z \sim 4$ の LBGs の角度二体相関関数を詳細に調べた. その結果, $\theta \simeq 7''$ より小さい角度で二体相関関数はベキ乗則から外れ, 大きな超過を示すことが分かった. この結果は, 重いダークハローが複数の LBGs を抱え込んでいることを示唆する. この研究と SDF における同様の研究は, 早期宇宙の銀河とダークハローとの関係を初めて詳細に調べたものであり, ダークハローの中でどのように銀河が成長するかを解明する重要な手掛かりとなる. [8]

赤方偏移 $z \sim 4$ の Lyman-break 銀河 (LBGs) の近赤外撮像観測

本原顕太郎 (天文学教育研究センター) らとの共同研究. United Kingdom Infra-Red Telescope の Wide Field Camera により, Subaru Deep Field (SDF) の一部の近赤外撮像観測を行なった. SDF ではすでに可視光での深撮像観測を行っており, 今回観測した領域では $z \sim 4$ の Lyman-break 銀河を 1000 個強検出している. 今回の近赤外撮像データにおいて, その内の 97 個を同定した. これらの銀河の性質を調べた結果, 可視光光度が大きいほど年齢, または金属量, またはダスト量が大きいという傾向があることが分かった. これは $z \sim 3$ で示唆されている傾向と一致している. [46]

Lyman α 輝線銀河 (LAEs) の光度関数

大内 (STScI), SXDS チームなどとの共同研究. すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) を用いて, $z = 3.1, 3.7, 5.7$ の Lyman α 輝線に対応する狭帯域フィルター (NB503, NB570, NB816) で Subaru/XMM-Newton Deep Field を撮像した. NB503 のデータより, $z = 3.1$ 付近に 1153 個の LAE 候補天体を検出した. その Lyman α 輝線光度関数は他の時代 ($3 < z < 6$) のものと大きく違わないことがわかった. また, LAE 候補天体の UV continuum の光度関数を同じ赤方偏移の LBGs のものと比べると, 暗い

側では光度関数が一致し, 明るい側では LAEs の方が少なくなっていることがわかった.

Subaru/XMM-Newton Deep Field における $z \sim 3-5$ の広がった Lyman α 輝線天体の探査

大内 (STScI), 国立天文台 SXDS グループらとの共同研究. Subaru/XMM-Newton Deep Field において, すばる/Suprime-Cam および 7 枚の中間帯域フィルターを用いて深い撮像を行い, $3.24 \leq z \leq 4.95$ にある空間的に広がった Lyman α 輝線天体を探査した. これまで $z \sim 3.1$ 付近にしか知られていなかったこの種の天体を 900 平方分の広視野で広い赤方偏移範囲にわたって探査することで, 41 個の候補天体を同定した. その結果, $10-30$ kpc 程度に広がった天体が, 初期宇宙においてごく一般的に存在していることが明らかとなった. また既存の観測との光度関数の比較により, これらの天体は高密度領域に偏在していることが示唆された. これら 41 天体のうち, 18 天体について, VLT/VIMOS を用いた深い高分散分光観測を行った. この結果, 18 天体すべてが非常に大きな Lyman α 輝線等価幅を示すことが分かった. このうち特に 6 天体は, 通常の星形成では説明のつかない, $200\text{\AA}$ (静止系) を越える等価幅を持っていた. 6 天体のうち 1 天体では, 70 kpc にわたって広がる輝線成分があり, 銀河風的な速度構造を顕著に示していた. 残り 5 天体は, 明らかな速度構造は持っておらず, また Lyman α 輝線光度と輝線速度幅の間に正の相関を示していた. こうした相関関係は, これらの天体が, 銀河形成最初期におけるガス降着の段階にある可能性を示唆している. 単純なモデルを仮定し, これら 5 天体の質量と数密度を CDM モデルの予測と比較すると, $10^{11}-10^{12} M_{\odot}$ のダークハローが約 10^{-4} の確率で観測されていることになる. [18], [22], [32], [40], [48]

$z = 3.9$ の重力レンズ天体の発見

梅津敬一 (台湾中央研究院), 児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究. RXJ0153 銀河団 ($z = 0.83$) の中心領域に, ほとんど同じ色をした 3 つの天体を発見した. これらを分光したところ, その全てに Lyman α 輝線がみられ, $z = 3.9$ という赤方偏移が得られた. これは, 3 つの銀河がもともとは一つの銀河で, 手前の $z = 0.83$ の銀河団の重力レンズを受けて 3 つの像をなしたことを意味する. 我々は, 重力レンズモデルを構築し 3 つの銀河の位置を再現することに成功した. [38]

赤方偏移 $z \simeq 3.1$ の Lyman α 輝線銀河 (LAEs) が作る大規模構造の分光観測

松田有一ら京都大学グループ, 山田亨ら国立天文台グループ, 林野友紀ら東北大学グループ等との共同研究. すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) の撮像探査で見つかった SSA22 領域の $z = 3.1$ Lyman

α 輝線銀河 (LAEs) の帯状の大規模構造を分光観測し、その三次元構造を調べた。その結果、帯状構造は最低 3 つのフィラメント状の構造からできていることが分かった。また、既に知られている 2 個の巨大な Lyman α 輝線天体は、これらのフィラメントが交差する場所の近くに位置していることも分かった。フィラメントの交差する領域は将来銀河団に成長するのかもしれない。[5]

Subaru Deep Field における BzK 銀河のクラスタリング

本原顕太郎 (東大天文センター) らとの共同研究。 BzK 銀河は、 K バンドで検出したサンプルから $B-z$, $z-K$ のカラーを用いて選出した $z \sim 2$ の銀河である。 BzK 銀河には star-forming 銀河と passively evolving 銀河の二つの種族が含まれる。この $B-z$, $z-K$ カラーを用いた選出方法では、ダスト吸収に依存せずにすべての star-forming 銀河が選出でき、また、二つの種族を分離して選出できる。Subaru Deep Field は多くの可視のデータがそろっているが、それに近赤外のデータを加えるために、英国の赤外線望遠鏡 UKIRT の広視野カメラ WFCAM を用いて、 J と K バンドの観測を行った。この観測で得られた非常に深い K バンドのデータをもとに多数の BzK 銀河を検出し、 BzK 銀河のクラスタリングを調べている。角度二体相関を求めた結果、star-forming BzK も passive BzK もクラスタリングしているが、後者のクラスタリングのほうのはるかに強いことが分かった。この結果の意味は現在考察中である。

6.3 銀河進化と環境効果

$z \sim 1$ の受動的進化銀河の数密度

山田亨ら国立天文台グループ、秋山正幸らハワイ観測所グループ等との共同研究。受動的に進化する銀河 (現在の早期型銀河に対応) の探査を Subaru/XMM-Newton Deep Field の 1 平方度の天域で行ない、約 4000 個の候補天体から成るサンプルを作った。このサンプルの信頼性が十分高いことは、分光追観測によって確認されている。受動的進化銀河の天球面密度は $30'$ スケールで $10 - 30\%$ も異なることがわかった。また、現在見られる早期型銀河の半分以上は、 $z \sim 1$ で既に存在していることが分かった。[13]

PISCES プロジェクトの推進

Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru (PISCES) は国立天文台の児玉忠恭を中心とした、すばる望遠鏡による遠方銀河団の撮像分光サーベイである。Suprime-Cam の広い視野を活かし、銀河団の中心領域から周辺領域に渡る広範囲な銀河環境を観測することで、銀河進化と

環境との関係を系統的に研究することを目的としている。注意深く選ばれた $0.4 < z < 1.3$ の 15 個の銀河団を観測対象としている。2005 年度は 4 つの銀河団 (RDCS0910, RDCS1252, RXJ1716, CL1604) を Suprime-Cam で多色撮像した。現在データ整約と解析を進めている。[4]

RDCS1252-2927 銀河団 ($z = 1.24$) を取り巻く大規模構造の発見

児玉忠恭 (国立天文台), Richard Bower (ダーラム大学) らとの共同研究。現在までに知られている最も遠方の銀河団, RDCS1252-2927 ($z = 1.24$) をすばる主焦点カメラとイギリス赤外望遠鏡の WFCAM を用いて広く深く撮像した。銀河団と同じ赤方偏移到いると思われる銀河を抽出すると、 $z = 1.24$ の銀河団を取り巻くように小さな銀河群が発見された。これらの銀河群にはすでに赤い銀河が多く存在し、 $z \sim 1.2$ においてすでに星形成の環境依存性があることがわかった。[24], [25], [26], [33], [35], [36]

$z < 1$ 銀河団を取り巻く大規模構造の分光フォローアップ

児玉忠恭 (国立天文台), 星貴子 (明星大学), 有本信雄 (国立天文台) らとの共同研究。我々の得た $z = 0.55, 0.83$ の銀河団を取り巻く大規模構造を分光的に確認するために、すばる FOCAS を用いてフォローアップ観測を行った。その結果、発見されたほとんどの構造が本物であることを確認した。さらに、様々な環境にいる赤い銀河の典型的なスペクトルを作りその星形成史を探ったところ、銀河の星形成は 1Gyr 以下の短いタイムスケールで終息したことが示唆された。これは銀河同士の相互作用が星形成を止める引き金となったことを意味しているのかもしれない。[34]

$z < 1$ における銀河進化

児玉忠恭 (国立天文台), 有本信雄 (国立天文台) らとの共同研究。我々はすばる主焦点カメラを用いた遠方銀河団サーベイを行っている。このサーベイの一環で、CL0016 ($z = 0.55$) と RXJ0153 ($z = 0.83$) を多色観測した。測光的赤方偏移を用いて銀河団の距離にある銀河を抽出し、銀河団を取り巻く大規模構造を検出した。次に構造をなしている銀河の色に注目し、その環境依存性を調べると、近傍宇宙で見られているような依存性が $z = 0.83$ においても見られることがわかった。高密度環境にいる銀河は色と明るさの間に非常にタイトな相関を持つことが知られていたが、本研究で銀河の色等級関係ができあがる様子を観測的に初めてとらえた。色等級関係はまず明るい銀河からできあがり、時間とともに暗い銀河が色等級関係にのってくることがわかった。この色等級関係の形成時期は環境に依存していて、高密度環境で最も早く、低密度環境で遅くなっている。つまり、

銀河の星形成は高密度環境にいる大質量銀河から止まり、時間とともに、より低密度環境にいるより小質量の銀河が星形成を止めることが示唆された。[11]

遠方銀河団における早期型銀河の光度関数

児玉忠恭 (国立天文台) らとの共同研究。すばる望遠鏡の主焦点カメラを用いて遠方の銀河団の多色の撮像を行う、PISCES プロジェクトを推進している。その中で、RXJ1716 ($z \sim 0.81$) の 2 バンドのデータの解析結果から銀河団領域の銀河について色等級図を描き、銀河団中の早期型銀河を選びだした。その空間分布は他の銀河団についても見られるような、銀河団コアから伸びるフィラメント構造の存在を示唆した。光度関数からは、これまでの研究で知られていた、同じ時代の銀河団の光度関数と比べて、ほぼ同じ傾向を示すものの、暗い側では早期型銀河は少ないという結果を得た。この結果は同時期の銀河団であっても、その進化の段階にはバリエーションがあり、赤い銀河が多いものや少ないものが存在する可能性を示唆する。現在、より精度の高い議論をすべく、他バンドのデータを解析中である。

fossil group NGC6482 group の近赤外撮像観測

本原顕太郎 (東大天文センター) との共同研究。英国の赤外線望遠鏡 UKIRT の広視野カメラ WFCAM を用いて、fossil group (化石銀河群) NGC6482 group の近赤外撮像観測を行った。fossil group とは、X 線では非常に明るく通常の銀河群のように見えるが、可視近赤外線では明るい銀河が少なく中心にある銀河が孤立しているように見える特異な銀河群である。このような銀河群はこれまで主に X 線を用いた研究が行われてきた。しかし、可視近赤外線を用いた研究はほとんど行われておらず、銀河の光度関数や銀河群内での矮小銀河の分布さえもよくわかっていない。これらを調べることは、このような特異な銀河群の形成過程を解明する上で重要である。今回の観測データは、他の研究に比べて限界等級が非常に深いので、銀河の光度関数などを調べるのに適している。解析の結果次のようなことがわかった。銀河群のメンバー銀河の動径方向の分布から、明るい銀河はほとんど存在しないが、暗い矮小銀河は存在している。また、銀河群の中心に向かって銀河の面密度が減少し、さらに、この銀河群の中心には、矮小銀河さえも存在していないことがわかった。そして、銀河の光度関数から、限界等級まで銀河の数は増え続けることがわかった。このような結果は、fossil group が merging によって形成されたとする説を支持するものであると考えられる。[42]

非対称パラメータと中心集中度を用いた近傍銀河の形態分類

八木雅文 (国立天文台)、中村佳博 (1998 年度卒)、土居守 (天文センター) との共同研究。近傍銀河の

volume-limited サンプル ($N = 349$) と flux-limited サンプル ($N = 707$) を用いて、像の非対称パラメータと形態との相関を調べた。晩期型銀河 (Sdm, Sm, Im) は早期型銀河や渦巻銀河よりも非対称性が高いことが分かった。非対称パラメータと中心集中度とを組み合わせることで、早期型銀河と晩期型銀河を分類できる。[17]

6.4 銀河に属さない惑星状星雲

銀河間空間に広がって存在する星の種族の比較研究

安田直樹 (宇宙線研究所)、柏川伸成 (国立天文台)、Gerhard, O. (バーゼル大学)、Arnaboldi, M. (トリノ天文台)、Freeman, K.C. (ストロムロ山天文台) との共同研究。銀河団中で、特定の銀河に属さず銀河間空間に存在する星の種族がある。この研究は、惑星状星雲を用いる新しい研究手法によってこの銀河間空間種族の星の性質と起源を明らかにすることを目指した。まずおとめ座銀河団において、この種族の空間分布、速度分布、金属量などの特性を明らかにする。次におとめ座銀河団とは異なる力学進化段階にあるかみのけ座銀河団において同種族を検出し、その特性がおとめ座銀河団のものと同じか違うか、違うならどのように違うかを明らかにすることが直接的な研究目的である。おとめ座銀河団についての研究はすでにかなり進んでいる。昨年度は、おとめ座銀河団の約 7 倍遠方にあるかみのけ座銀河団に対して観測の手を広げた。これほど遠方になると、おとめ座銀河団で用いた、狭帯域フィルターによる撮像ではもはや惑星状星雲は検出不可能なため、多スリット分光撮像法 (MSIS) という新しい観測手法を考案した。最初の観測で、40 個の惑星状星雲が検出され、手法の有効性が示された。今年度は、手法の有効性を示す速報論文を出版し、その後全てのデータ解析を完了した。銀河間空間にある 35 個の惑星状星雲の速度分布には二つの成分が見られ、かみのけ座銀河団のような進化の進んだ高密度の銀河団中心でも、なお銀河間空間にある星は十分混じり合っていないことを示唆する興味深い結果が得られた。[3]

6.5 スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS)

スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) の推進

SDSS Collaboration (日本グループは Japan Participation Group: JPG として参加) と共同で進めている。2003 年 4 月に第 1 次データ公開を行って以来、2004 年 3 月に第 2 次、2004 年 10 月に第 3 次、2006 年 1 月に第 4 次のデータ公開を行った。第 4

次データ公開には 6670 平方度の撮像データ (1.8 億個の天体) と 4783 平方度中の 673,280 天体のスペクトルが含まれている. [1], [15]

6.6 機器開発

宇宙空間での使用を目的としたサンプルフィルター の耐性試験

田中幹人, 小宮山裕 (国立天文台) ら HOP/VWFI チームとの共同研究. Hubble Origins Probe (HOP) は, Hubble Space Telescope (HST) の後継機として 2010 年に打ち上げが検討されている, HST と同型の 2.4m 宇宙望遠鏡である. HOP には HST 用に開発された Cosmic Origin Spectrograph (COS) と Wide Field Camera 3 (WFC3) が主な観測機器として搭載されるが, これに加えて, 日本が開発する超広視野カメラ Very Wide Field Imager (VWFI) を載せることが重要な検討課題となっている. VWFI は HST の Advances Camera for Surveys (ACS) の約 20 倍の視野を持つモザイク CCD カメラである. そして, VWFI のフィルターとして広帯域フィルターが使われる予定である. そこで, 今回, 我々は VWFI のサンプルフィルターの宇宙空間での耐性を調べた. 耐性試験に用いたのは, サンプルフィルターとその構成要素である色ガラス, 短波長カット膜蒸着の石英ガラス, および長波長カット膜蒸着の石英ガラスの 4 つのテストピースである. 対象としたフィルターは, 宇宙空間環境で最も影響があると考えられる, 最も赤い Z_R フィルターである. 行った耐性試験は真空試験, 熱サイクル試験, そして, 放射線照射試験である. 各試験の後, 目視とテープを用いてサンプル表面の変化の有無を確認し, また, サンプルの透過率の変化の有無を確認した. 耐性試験の結果は, 放射線照射試験において, 色ガラスにのみ試験前後の透過率に変化が見られた. しかし, その他の試験については, どのテストピースにも変化は見られなかった. このことから, Z_R フィルターとしては, 宇宙空間での耐性があると考えてよい. [43]

<報文>

(原著論文)

- [1] Abazajian, K. et al. (the SDSS Collaboration, 154 authors including S. Okamura and K. Shimasaku), 2005, “The Third Data Release of the Sloan Digital Sky Survey”, *A. J.*, **129**, 1755-1759.
- [2] Eisenstein, D. J. et al. (48 authors including K. Shimasaku) 2005, “Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies”, *Ap. J.*, **633**, 560-574.
- [3] Gerhard, O., Arnaboldi, M., Freeman, K. C., Kashikawa, N., Okamura, S., and Yasuda, N. 2005, “Detection of Intracluster Planetary Nebulae in the Coma Cluster”, *Ap. J.*, **621**, L93-L96.
- [4] Kodama, T., Tanaka, M., Tamura, T., Yahagi, H., Nagashima, M., Tanaka, I., Aimoto, N., Futamase, T., Iye, M., Karasawa, Y., and 14 coauthors including S. Okamura, 2005, “Panoramic Views of Cluster-Scale Assemblies Explored by Subaru Wide-Field Imaging”, *Publ. Astr. Soc. Japan*, **57**, 309-323.
- [5] Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Tamura, H., Yamauchi, R., Murayama, T., Nagao, T., Ohta, K., Okamura, S., Ouchi, M., and 3 coauthors including K. Shimasaku, 2005, “Large-Scale Filamentary Structure around the Proto-cluster at Redshift $z = 3.1$ ”, *Ap. J.*, **634**, L125-L128.
- [6] Nagao, T., Kashikawa, N., Malkan, M. A., Murayama, T., Taniguchi, Y., Shimasaku, K., Motohara, K., Ajiki, M., Shioya, Y., Ohta, K., Okamura, S., and Iye, M. 2005, “Spectroscopy of i -Dropout Galaxies with an NB921-Band Depression in the Subaru Deep Field”, *Ap. J.*, **634**, 142-148.
- [7] Nakata, F., Kodama, T., Shimasaku, K., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Okamura, S., and 5 coauthors, 2005, “Discovery of a large-scale clumpy structure around the Lynx supercluster at $z \sim 1.27$ ”, *M. N. R. A. S.*, **357**, 1357-1362.
- [8] Ouchi, M., Hamana, T., Shimasaku, K., Yamada, T., Akiyama, M., Kashikawa, N., Yoshida, M., Aoki, K., Iye, M., Saito, T., Sasaki, T., Simpson, C., and Yoshida, M. 2005, “Definitive Identification of the Transition between Small- and Large-Scale Clustering for Lyman Break Galaxies”, *Ap. J.*, **635**, L117-L120.
- [9] Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Okamura, S., Kashikawa, N., Iye, M., Kodama, T., and Saito, T. 2005, “The Discovery of Primeval Large-Scale Structures with Forming Clusters at Redshift 6”, *Ap. J.*, **620**, L1-L4.
- [10] Shimasaku, K., Ouchi, M., Furusawa, H., Yoshida, M., Kashikawa, N., and Okamura, S. 2005, “Number Density of Bright Lyman-Break Galaxies at $z \sim 6$ ”, *Publ. Astr. Soc. Japan*, **57**, 447-458.
- [11] Tanaka, M., Kodama, T., Arimoto, N., Okamura, S., Umetsu, K., Shimasaku, K., Tanaka, I., and Yamada, T. 2005, “The build-up of the colour-magnitude relation as a function of environment”, *M. N. R. A. S.*, **362**, 268-288.
- [12] Taniguchi, Y., Ajiki, M., Nagao, T., Shioya, Y., Murayama, T., Kashikawa, N., Kodaira, K., Kaifu, N., Ando, H., Karoji, H., and 30 coauthors including S. Okamura and K. Shimasaku, 2005, “The SUBARU Deep Field Project: Lymanalpha Emitters at a Redshift of 6.6”, *Publ. Astr. Soc. Japan*, **57**, 165-182.

- [13] Yamada, T., Kodama, T., Akiyama, M., Furusawa, H., Iwata, I., Kajisawa, M., Iye, M., Ouchi, M., Sekiguchi, K., Shimasaku, K., Simpson, C., Tanaka, I., and Yoshida, M. 2005, “The Number Density of Old Passively Evolving Galaxies at $z = 1$ in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field”, *Ap. J.*, **634**, 861-878.
- [14] Yamauchi, C., Ichikawa, S., Doi, M., Yasuda, N., Yagi, M., Fukugita, M., Okamura, S., Nakamura, O., Sekiguchi, M., Goto, T. 2005, “Morphological Classification of Galaxies Using Photometric Parameters: The Concentration Index versus the Coarseness Parameter”, *A. J.*, **130**, 1545-1557.
- [15] Adelman-McCarthy, Jennifer K., Agueros, M. A., Allam, Sahar S., Anderson, Kurt S. J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., Baldry, Ivan K., Barentine, J. C., Berlind, A., and 131 coauthors including S. Okamura and K. Shimasaku, 2006, “The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey” *Ap. J. Suppl.*, **162**, 38-48.
- [16] Kashikawa, N., Yoshida, M., Shimasaku, K., Nagashima, M., Yahagi, H., Ouchi, M., Matsuda, Y., Malkan, Matthew A., Doi, M., Iye, M., and 30 coauthors including S. Okamura, 2006, “Clustering of Lyman Break Galaxies at $z = 4$ and 5 in the Subaru Deep Field: Luminosity Dependence of the Correlation Function Slope”, *Ap. J.*, **637**, 631-647.
- [17] Yagi, M., Nakamura, Y., Doi, M., Shimasaku, K., and Okamura, S. 2006, “morphological classification of nearby galaxies based on asymmetry and luminosity concentration” *M. N. R. A. S.*, in press.
- (学位論文)
- [18] 斎藤智樹, “Systematic Survey of Extended Lyman alpha Sources over $z \sim 3 - 5$ ” (博士論文)
- (会議抄録)
- [19] Poggianti, B. M., Bridges, T. J., Yagi, M., Kashikawa, N., Komiyama, Y., Okamura, S., Carter, D., Mobasher, B. 2005, “The Relation Between Galactic Properties and Cluster Structure”, *IAU Symp.*, **216**, 239.
- (国内雑誌)
- [20] 岡村定矩 2005: 「SDSS スローン・デジタル・スカイサーベイ」, 「天文ガイド」, 2005 年 4 月号, 6-9.
- [21] 岡村定矩 2006: 「すばる望遠鏡による宇宙論的観測」 「サイエンスウェブ」, **2**, 54-57 (2006 年 2 月号)
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [22] Saito, T., Shimasaku, K., Okamura, S.: “Systematic Survey of Extended Ly α Sources over $z \sim 3 - 5$ ”, “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology”, *The 59th Yamada conference*, University of Tokyo, Japan, 2005/6/20-24.
- [23] Shimasaku, K. et al.: “Bright Galaxies at $z \sim 6$ in the Subaru Deep Field”, “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology”, *The 59th Yamada conference*, University of Tokyo, Japan, 2005/6/20-24.
- [24] Tanaka, M.: “Watch Me Grow – the Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, *Observer’s Lunch at Durham University*, Durham, UK, 2005/6/22.
- [25] Tanaka, M.: “Subaru Observations of Galaxy Clusters at $z < 1.3$ ”, *Galaxies and Structures through Cosmic Times*, Venice, Italy, 2006/3/26-31.
- [26] Tanaka, M.: “Watch Me Grow – the Build-up of the Colour-Magnitude Relation” *The 9th Asian-Pacific Regional IAU Meeting*, Bali, Indonesia, 2005/7/26-29.
- [27] Yoshida, M., Shimasaku, K., Okamura, S.: “Lyman-break Galaxies at $z \sim 4$ and 5 in the Subaru Deep Field” *Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology*, *The 59th Yamada Conference*, The University of Tokyo, Japan, 2005/6/20-24.
- [28] Yoshida, M., Shimasaku, K., Okamura, S.: “Lyman-break Galaxies at $z > 4$ in the Subaru Deep Field” *Open Questions in Cosmology: the First Billion Years*, MPA/ESO/MPE/USM Joint Astronomy Conference, Garching, Germany, 2005/8/22-26.
- 招待講演
- (国内会議)
- 一般講演
- [29] 岡村定矩: “銀河・銀河団の形成と進化 – 観測の現状と課題 –”, 天文・天体物理若手の会 第 35 回夏の学校, ホテルエバークグリーン富士, 山梨県富士吉田市, 2005/8/4.
- [30] 嶋作一大: “撮像で探る銀河と銀河団”, すばる小委員会シンポ「すばる大改造:2010 年代のすばるを考える」, 国立天文台, 2005/8/23-25.
- [31] 嶋作一大: “遠方銀河の観測の現状と課題”, 「超広視野撮像/分光器で目指す観測的宇宙論」研究会, 国立天文台, 2006/3/13-14.
- [32] 斎藤智樹, 嶋作一大, 岡村定矩: “Systematic Survey of Extended Ly α Sources over $z \sim 3 - 5$ ”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台, 2005/2/22-23.
- [33] 田中賢幸: “Watch Me Grow – the Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 2005 年度天文・天体物理若手の会夏の学校, 山梨県河口湖, 2005/8/4.

- [34] 田中賢幸: “Spiderman was There – the Spectroscopically Confirmed Cosmic Web at $z = 0.8$ ”, 第4回・宇宙における時空・物質・構造の進化, 群馬県婦恋村, 2005/8/22.
- [35] 田中賢幸: “Watch Me Grow – the Build-up of the Colour-Magnitude Relation”, 東京首都大学物理学専攻コロキウム, 首都大学東京, 2005/10/21.
- [36] 田中賢幸: “すばるが見た遠方銀河団”, すばるユーザーズミーティング, 国立天文台, 2005/12/21.
- [37] 吉田真希子: “Subaru Deep Field における $z > 4$ の銀河の性質”, すばるデータ解析講習会, 国立天文台, 2006/2/28.
- (学会発表)
- 日本天文学会 2005 年秋季年会, 札幌コンベンションセンター (2005/10/06-08)
- [38] 梅津敬一 (ASIAA)、田中 賢幸、他: RXJ0152.7–1352 銀河団中心における $z = 3.9$ 銀河の重力レンズ多重像の発見, R71a
- [39] 児玉忠恭 (国立天文台)、田中賢幸、他: PISCES プロジェクト — 銀河団進化と銀河進化の連携 —, R68a
- [40] 斎藤智樹, 嶋作一大, 岡村定矩: $z \sim 3-5$ における広がった Ly α 輝線天体の系統的探査 (2): 高分散分光, R10a
- [41] 田中賢幸、児玉忠恭 (国立天文台): RXJ0152.7–1352 銀河団 ($z = 0.83$) の分光観測, R69a
- [42] 林将央, 嶋作一大, 吉田真希子, 岡村定矩: fossil group NGC6482 group の近赤外撮像観測, R13b
- [43] 林将央, 岡村定矩: 宇宙空間での使用を目的としたサンプルフィルターの耐性試験, W12b
- [44] 星貴子 (明星大学), 児玉忠恭 (国立天文台), 田中賢幸, 他: CL0016 銀河団 ($z \sim 0.55$) に付随するサブクランプの分光観測, R70a
- [45] 吉田 真希子, 嶋作 一大, 岡村定矩: Subaru Deep Field における $z \sim 4, 5$ の Lyman-break 銀河の測光的性質 II, R01a
- [46] 吉田真希子, 嶋作一大, 林将央: UKIRT/WFCAM による Subaru Deep Field の近赤外撮像観測, R06b
- 日本天文学会 2006 年春季年会, 和歌山大学 (2006/03/27-29)
- [47] 岡村定矩, 他: かみのけ座銀河団中にある銀河に属さない惑星状星雲の検出, T16c
- [48] 斎藤智樹, 嶋作一大, 岡村定矩: $z \sim 3-5$ における広がった Ly α 輝線天体の系統的探査, R46a
- [49] 吉田真希子, 嶋作一大, 岡村定矩: Subaru Deep Field における Lyman-beak 銀河から探る宇宙の星形成史, X15b
- [51] 岡村定矩: “宇宙の過去はどこまで見えたか”, 慶応大学小泉信三記念講座, 慶応大学三田キャンパス, 2005/5/19.
- [52] 岡村定矩: “銀河からなる宇宙 – その果てを探る –”, 天文講演会 (アストロトーク), 山口県立山口博物館, 2005/5/29.
- [53] 岡村定矩: “銀河からなる宇宙 – その果てを探る –”, 東京大学柏キャンパス公開日, 公開講演, 柏図書館ホール, 2005/10/29.
- [54] 岡村定矩: “宇宙の果てに迫る”, 東京大学ホームカミングデイ, 理学系研究科講演会, 小柴ホール, 2005/11/19.
- [55] 岡村定矩: “宇宙の果てに迫る”, 駿台学園天文講座 40 周年記念講演, 駿台学園高校ホール, 2006/1/28.
- [56] 岡村定矩: “ビッグバンへの宇宙旅行”, 東京自由大学自由ゼミ, 東京自由大学 (千代田区神田), 2006/2/22.

(解説記事・論評など)

<一般講演など>

(一般講演)

- [50] 岡村定矩: “宇宙の新たな謎 – ダークマターとダークエネルギー”, 第7回理学部公開講演会, 東京大学大学院数理科学研究科大講義室, 2005/4/28.

7 気球観測による反物質探査, 衛星によるX線・ γ 線観測

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

7.1 宇宙X線衛星「すざく」の誕生

宇宙X線衛星 *Astro-E2* [36] は、2005年7月10日の日本時間 12:30 に、三段固体式の M5 ロケット 6 号機を用い、鹿児島県内之浦から打ち上げられ、「すざく」(*Suzaku*, 朱雀) と名付けられた(図 7.1)。「すざく」は、「はくちょう」(1979 年)、「てんま」(1983 年)、「ぎんが」(1987 年)、「あすか」(1993 年) に続く日本 5 機目の X 線衛星で、2000 年 2 月に打ち上げ失敗した *ASTRO-E* の再挑戦機である。「すざく」は地上高度およそ 565 km の円軌道を持ち、1 日に地球を 15 周回する。



図 7.1 a: The launch of *Suzaku* from Uchinoura, with an M-5 rocket, on 2005 July 10.

○ 硬 X 線検出器 (HXD) [17] [18] [19]

「すざく」搭載装置の 1 つである硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、我々が JAXA、広島大、埼玉大、理研、金沢大、阪大、青学大、Stanford 大などと協力して開発したものである。HDX は 10–600 keV の広いエネルギー域と極めて低いバックグラウンドを特徴し、検出器部 (HDX-S)、アナログ電子回路部 (HDX-AE)、デジタル処理部 (HDX-DE) などのコンポーネントから成る。これらは図 7.1 のように、2004 年 4 月末の時点でほぼ完成に漕ぎ着けており、同 7 月からは衛星上で、打ち上げ前の最終試験に供されていた。



図 7.1 b: The *Suzaku* spacecraft under construction, carrying the Hard X-ray Detector sensor part (red circled).

○ HDX の立ち上げ [47] [48] [63] [105]

打ち上げの約 2 週間後、HDX の立ち上げが開始された。7 月 23 日には DE 部、同 25 日には AE 部に電源を投入し、7 月 26 からは 64 個の PIN ダイオード (500 V) と 36 本のフォトチューブ (900 V) の高圧電源の投入に進んだ。印加電圧を徐々に高め、またオン時間を次第に長くする段階を踏み、8 月 5 日には標準的な連続運転を達成できた。これにより HDX の各部分が、打ち上げ時の振動などで破損することなく、正常に作動していることが確認された。ただし検出器部を放射冷却板につなぐ 2 本のヒートパイプのうち、1 本が動作せず、予定した -20° ではなく、 -14° 前後で運用することとなった。

前後して、「すざく」に搭載された CCD カメラ (XIS) と、高精度 X 線分光計 (XRS) の立ち上げも完了した。しかし観測開始の矢先の年 8 月 8 日、XRS の冷媒である液体ヘリウムが一気に気化するという事故が起き、XRS は機能を失い、姿勢を崩した衛星は緊急避難モードに陥った。HXD は高圧をすべてオフし、放電の有無を仔細に検討したが、問題ないと判断されたので、8 月 15 日から高圧の再立ち上げを行なった。同 19 日には定常運用に復帰し、ケンタウルス座 A の観測でファーストライトを達成した [2]。この後「すざく」は、HXD と XIS の 2 種類の検出器で観測を行うことになり、国分は HXD 運用の司令塔を務めている。

○ HXD の軌道上校正

初期観測データを用いた HXD の健康診断 (ゲインの変動など)、機能検証、動作の詳しい校正などを、国分を中心に進めた [90] [91] [92] [96]。HXD はテレメトリ容量の制限のため、機上でフォスウィッチ機能による粗いイベント選別行なって地上に伝送し、その後の地上データ処理で、詳細なフォスウィッチ選別や反同時計数を施す。北口らは修士論文の一環として、初期観測データを用いて、機上と地上のイベント選別パラメータを最適化した [34] [97]。その結果、HXD は目的とする超低バックグラウンドを達成していることが確認された。図 7.1 c は、最適化されたパラメータでの HXD バックグラウンドである。

最適化された状態でも、HXD バックグラウンドは 1 日に最大で 3 倍ほど変動する。その要因は、地磁気 cutoff rigidity に応じた宇宙線強度の場所による違いと、南大西洋地磁気異常帯を通過したのちの検出器の放射化である。長期には、放射化成分の蓄積も問題になる。HXD はオフセット視野をもたないため、バックグラウンドは衛星の場所、反同時計数のカウントなどをもとに、推定して差し引く必要があり、鋭意そのモデル化を進めた [44] [94]。

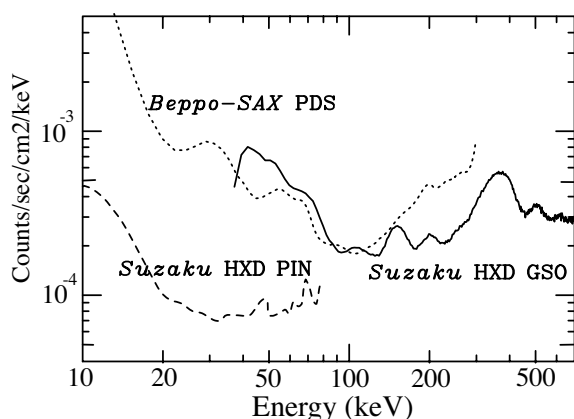


図 7.1 c: Non X-ray backgrounds, per unit effective area, of the HXD (PIN and GSO)[34] compared with that of the BeppoSAX PDS.

○ HXD のソフトウェア整備 [13] [48]

軌道上の校正と並び重要なのが、各種ソフトウェア

の開発およびデータの基本処理である。理研や JAXA と共に、以下の 3 つ作業を進めた。

第 1 は、受信した HXD データに含まれる個々の X 線イベントを処理し、公開すべきデータに変換する基本処理である。地上でのイベント選別、検出器ゲインの追跡、パルスハイトからエネルギーへの変換、イベント時刻づけなどの作業が含まれる。これらソフトウェアは、ユーザーには公開されない。第 2 は、データから得られるスペクトルを解析する際の、装置のエネルギー応答関数の構築と、視野の各位置における有効面積の校正情報で、これらは「校正データベース」として全世界に公開される。

第 3 は、データから差し引くべきバックグラウンドの推定方法を、観測者に公開することである [44] [94]。これには、典型的なバックグラウンドスペクトルの提供、差し引きに使うべき疑似イベントからなるデータファイルの提供、モデルバックグラウンドの生成ツールの公開など、さまざまな段階があり、世界のユーザーに向け最適な方法を模索中である。

○ 「すざく」による初期観測 [76]

「すざく」打上げ後の約 1 年間に観測する天体は、2004 年末の時点で日米の衛星科学ワーキンググループ (SWG) により選定済みだったが、XRS の機能喪失により全面的な見直しが必要となった。そこで 2005 年 10 月半ばまでは、SWG 主要メンバーの電話会議により天体を選び、それらの観測を実行した。2005 年 10 月 12–15 日、JAXA にて SWG 全体会議が開催され、2006 年 3 月末までに SWG として観測すべき約 70 天体を選定した。我々は SWG メンバーとして、この間に取得された全データにアクセス権をもつ。得られたおもな成果は、以下の各項に述べる。

「すざく」は 2006 年 4 月から、完全な公募体制に移行し、JAXA、アメリカ NASA、および欧州 ESA で競争的に選定された観測が実行される。我々も積極的な観測提案を通じて、観測時間を確保している。SWG データも公募観測データも、取得後 1 年を経過すると占有権は消失し、全世界に公開される。

○ HXD シールド部による全天モニター機能 [49] [64] [93] [95] [98] [99]

HXD のシールド部は、主検出器部をアクティブにシールドする機能に加え、50 keV – 5 MeV の広帯域で、ガンマ線バースト、太陽フレア、明るい X 線新星などを監視する、WAM (Wide-Band All-Sky Monitor) 機能をもつ。埼玉大、青学大、理研、広島大などと共同で、WAM による観測を進めた。2006 年 4 月末までに、すでに 50 例を越すガンマ線バースト (あるいはその候補) を検出しており、その一部は *Konus-Wind*、理研の *HETE-2*、アメリカの *Swift* などの衛星と同期したイベントである。

7.2 炭素合成プロセスの現場検証

村島らは 2005 年 9 月「すざく」を用い、惑星状星雲 BD+30° 3639 を観測した。これは中質量星が進化の最終段階に達し、外層を放出しつつ白色矮星に

向かう途上の天体で、速い星風が放出物に衝突することで衝撃波が生じ、高温プラズマが生成され熱的X線を放射する。観測の結果、優れた軟X線感度をもつ「すざく」CCDカメラ(背面照射型の1台)により、図7.2 dのように、電離した炭素からの強い特性X線を検出することに成功した[33][58]。

スペクトルから求まる炭素と酸素の比は、宇宙組成比を90倍も凌駕する。これは星のヘリウム層の下部で、 $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ の核融合で作られた炭素が、対流によりヘリウム層の上部に巻き上げられ、星風として放出されている結果と解釈できる[4][45][43][65][82]。星内部での炭素合成と放出の現場を直接に捉えた貴重な成果で[3][29][31]、村島の学位論文の主要部分となった[33][108][117]。衛星の打ち上げから半年での博士誕生は、従来にない快挙である。

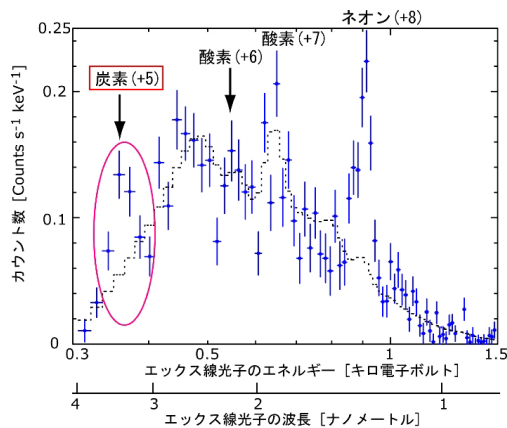


図 7.2 d: The *Suzaku* XIS spectrum of the Planetary Nebula BD+30° 3639, compared with a prediction by an emission model assuming solar abundance ratios (dotted lines) [33][3][29][31].

7.3 銀河団の物理学

○ 銀河団における重元素の空間分布

川原田らは、*XMM-Newton*で観測された12個の銀河団・銀河群を選び、全重力質量、X線放射プラズマ、およびプラズマ中の鉄に対し、半径方向の質量分布を求めた。さらに対応する2MASSサーベイの近赤外線データから、星(銀河)の質量の空間分布を求めた。その結果いずれの天体でも、銀河、全重力質量、プラズマの順に半径方向に大きく広がること、またプラズマ中の重元素は、全重力質量とほぼ相似な半径プロファイルをもつことを発見した[60][88][107]。とくに図7.3 eのように、銀河はプラズマ中の鉄より、ずっと中心に集中して存在する。これは、銀河が重元素を銀河間空間に放出しつつ、宇宙年齢かけてポテンシャルの底に沈み込んで来たことを示唆し、川原田の博士学位論文となった[32]。

「すざく」を用いた銀河団の観測も開始された。Fornax 銀河団では、CCDカメラによる分光の結果、

プラズマ中のFe, Si, Sなどに比べ、酸素はより外に広がっており、プラズマ自体に近い質量プロファイルをもつことが確認された[74][87]。これは川原田の博士論文からも示唆された結果で、II型とIa型の超新星の発生頻度が進化して来たことを示唆する。

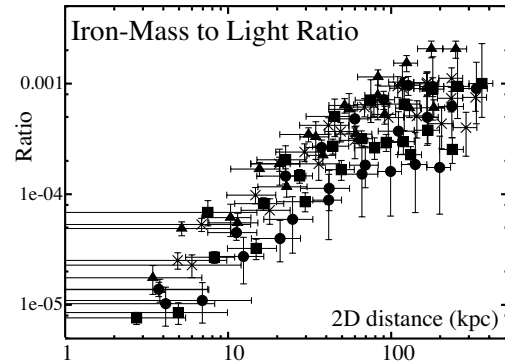


図 7.3 e: Iron-mass to light ratio profiles of 12 clusters of galaxies [32]. The iron mass contained in the hot plasma within a given projected radius is divided by the stellar mass within the same region.

○ 銀河団における銀河の中心落下

牧島らは「銀河が銀河団ポテンシャルの底に沈む」現象は、運動する銀河が銀河団プラズマ中から磁気流体的な抵抗を受ける結果と解釈している。この描像が正しければ、X線分布で規格化した銀河団の可視光(銀河)の広がり、宇宙の進化とともに減少するはずである。

北口らは近傍($z = 0.0183$)のペルセウス銀河団と、 $z = 0.55$ のCL 0016+1609銀河団で、じっさいにX線と可視光の空間分布を比較した。その結果、ペルセウス銀河団の銀河分布は、X線分布で規格化した時、CL 0016+1609のものに比べ、確かに中心に集中していることを見出した[61]。今後は国立天文台や理研と協力して、「すばる」主焦点カメラの公開データなどを用い、研究を進める予定である。

○ 銀河群および銀河団からの非熱的X線

上記の銀河とプラズマの相互作用が起きると、解放された銀河の運動エネルギーは、プラズマ加熱や粒子加速を引き起こすと予測される。じっさい銀河群からは「あすか」により、銀河団からは *BeppoSAX* 衛星により、非熱的な放射の徴候が得られている。

そこで「すざく」で、Fornax 銀河団などの低温銀河団を観測したところ、CCDカメラ(XIS)のエネルギー帯域(0.3–10 keV)で、熱的放射からの超過が検出され、「あすか」の結果を追認できた[87]。より高温の銀河団からは、「すざく」HXDによる非熱的放射の検出が期待される。これまでNGC 3376など数個の銀河団から、HXD-PINにより確かに非熱的信号の気配が得られているが、バックグラウンドの再現性がまだ詰め切れていないため、確定的ではな

い [75][89]。今後、改良したバックグラウンドのモデルを用いて取得済みデータを解析することで、より確実な結論を導きたい。

7.4 コンパクト天体からの X 線放射

○ 弱磁場中性子星からの放射

高橋や牧島らは昨年度に引き続き、また JAXA の三谷らと協力し、質量降着する弱磁場中性子星 (いわゆる LMXB) からの硬 X 線放射の研究を進めた [39] [27] [55]。降着率が Eddington 限界に近づくと、放射圧により電子が飛ばされ、生じた電荷分離によりイオンもひきずられ加速される、という描像を構築しつつある。硬 X 線は、加速された電子による非熱的制動放射かもしれない。「すざく」による 2 例の LMXB の観測も行なわれ、データ解析を待っている。

○ 質量降着型パルサー

強磁場中性子星に質量降着が起きると、X 線パルサーとなり、スペクトル中には電子サイクロトロン共鳴による吸収線が現れる。高橋、岡田、榎戸らは理研などと協力し、*INTEGRAL* 衛星 [20] や *RXTE* 衛星 [10] [56] [57] を用い、いくつかの X 線パルサーでサイクロトロン共鳴エネルギーの光度依存性を研究した。「すざく」では、おもにエネルギースケールの較正目的で Her X-1 を [80]、またアウトバーストした A0535+26 を科学目的で観測し [24] [81]、それぞれ 36 keV と 45 keV に、共鳴構造を再確認することができた [30] [66]。A0535+26 は $4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ という低い光度だったが、共鳴エネルギーは、過去に光度が 2 桁も高かったとき測定された値と、10% 以内で一致していた。以上のことから、サイクロトロン共鳴エネルギーは、X 線光度に依存する場合もそうでない場合もあり、統一的な描像を模索中である。

○ 回転駆動型パルサー

回転駆動パルサー (高速回転する強磁場の中性子星) では、ほぼ (磁場) $\times$ (速度) $\times$ (系のサイズ) に相当するエネルギー (典型的に $\sim 10^{18} \text{ eV}$) まで、粒子が加速されていることが知られている。「すざく」では、かにパルサー (周期 33 msec; 図 7.4 f) および PSR 1509-58 (周期 150 msec) が観測され、広い帯域でパルスが検出できた。宮脇、榎戸、理研の寺田らはそのデータを用いて、HXD の時刻づけ機能 (時間分解能 $61 \mu \text{ sec}$) が正しく働いていることを検証した。SN1987A では、膨張する衝撃波が周囲を加熱することで生じる熱的 X 線が強くなりつつある [67]。パルサー探しも行なっている。

○ 白色わい星での加速現象

強磁場白色わい星は、上記の回転駆動パルサーと似た系で、磁場強度は中性子星のものより 5 桁ほど低い、速度とサイズの積は、中性子星の場合を 3 桁ほど上回る場合がある。よって TeV 領域までの粒

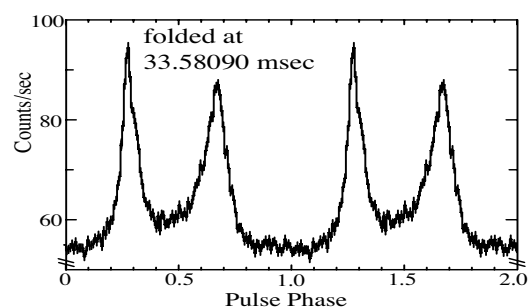


図 7.4 f: Spin-folded light curves of the Crab pulsar, detected in the 20–50 keV band with the *Suzaku* HXD [48]. The signal includes unpulsed nebular emission.

子加速が期待されるが、従来その観測的な証拠は乏しかった。そこで理研の寺田らと協力し、高速 (周期 33 秒) で自転する強磁場白色わい星 AE Aqr を「すざく」により観測したところ、質量降着に伴う熱的な X 線に加え、33 秒の周期で変調された非熱的な硬 X 線を、少なくとも $\sim 50 \text{ keV}$ まで捉えることに成功し、予想を確認することができた。

○ ブラックホール連星

今年度も、理研、広島大などと共同で、質量降着するブラックホールの研究を進め [6] [12]、いくつかの一般講演も行なった [110] [113] [115]。

「すざく」により、Cyg X-1 [69] [79]、GRO J1655-40 [68] [78]、GRS 1915+105, 4U 1630-47 などのブラックホール連星が観測され、高橋らはその解析を進めた。いずれもハード状態にあり、CCD カメラと HXD を合わせることで、図 7.4 g のようにエネルギーにして 3 桁近くにわたり、世界最高の良質なスペクトルが得られた。HXD では数百 keV まで検出できている。ここから、硬 X 線放射の物理学をどう攻めるかが、今後の課題である。

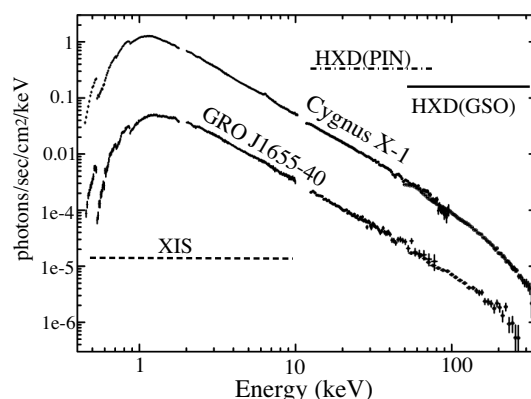


図 7.4 g: Response-removed wide-band spectra of Cyg X-1 and GRO J1655-40 [69].

○ ULX 天体

ULX (Ultra-Luminous compact X-ray) 天体は、恒星質量ブラックホールと活動銀核の巨大ブラックホールとを結ぶ中質量ブラックホールの有力な候補である [11] [28] [40] [53] [54]。宮脇、牧島らは広島大や理研と協力し、NGC 1313 銀河にある 2 つの ULX を選び、「すざく」XIS、XMM-Newton、Chandra などの統一的なデータ解析を進めた。その結果、これら ULX の X 線連続成分は、標準降着円盤ではなくスリム円盤からの放射として、より良く解釈できそうである [70]。さらに一方の ULX には、光学的に薄い高温プラズマの放射が伴う可能性がある。

○ 活動銀河核

「すざく」の試験観測期間には、全体で 20 個を超える 1 型セイファート銀河 [73]、2 型セイファート銀河 [72]、狭線 1 型セイファート [71]、ブレーザー、電波銀河などの活動銀河核が観測された。伊藤らは理研の磯部などと協力し、2 型セイファート NGC 4945 の解析を進めている [86]。100 keV を越える領域まで信号が検出できており、熱的カットオフの有無、円盤からの反射成分の有無、変動にともなうスペクトル変化などが調べられている。

7.5 星間空間などでの高エネルギー現象

○ 星と星形成領域からの X 線

柳田らは Chandra 衛星による星形成領域 NGC 2264 などのデータを解析し、いくつかの中質量星からフレアを検出した [25] [37] [42] [59]。中質量星は一般にコロナ活動も星風も弱いので、フレアは、見えない伴星との間に架橋された磁場が起源かもしれない。

柳田らはまた Cygnus OB2 アソシエーションでは、明るい星に対応しない位置から、硬 X 線の放射を検出した [26] [38]。これは 2003 年度に江副らが、NGC 6334 や NGC 2024 から検出した現象 [8] と同様に、星風の衝突に起因する現象かもしれない。

○ 銀河系に付随するディフューズ X 線放射

京大、JAXA、理研などと共同で、「すざく」を用いた銀河系ディフューズ X 線の研究を進めた。その結果、銀河中心を含む銀経 $\pm 1.5^\circ$ 銀緯 $\pm 0.5^\circ$ の領域ではどの場所からも、温度 ~ 7 keV に相当する強い熱的放射に加え、光子指数 2.2 $\sim$ 3.2 程度の非熱的な放射が、HXD-PIN により 20–50 keV バンドで検出された [83] [84] [85]。これは 2001 年度に国分らが、「あすか」や RXTE を用いて導いた結果をさらに進める結果であり、銀河系の星間空間で、プラズマ加熱や粒子加速が広く起きていることを示す。しかし、その機構やエネルギー源は不明のままである。

○ 電波銀河ローブからの逆コンプトン放射

電波銀河におけるジェット終端ローブからは、相対論的電子による逆コンプトン放射が観測される。理

研や埼玉大と協力し、その研究を進めた [7]。2002 年度に磯部らが明らかにしたように、ローブにおける電子のエネルギー密度は、磁場のエネルギー密度を、1 $\sim$ 2 桁も上回る。正電荷がイオンなのか陽電子なのか確定することが、今後の大きな課題であろう。

○ 直流電場による粒子の加速

宇宙での粒子加速プロセスとしては、統計的過程のみでなく、電場による直接的な加速も重要である。昨年度に岡田らが発見した、球状星団が銀河系のハローの中を運動するさいに生じる加熱・加速現象は、その好例である。今年度はさらに考察を進め、ハロープラズマが球状星団に流入すると、球状星団プラズマ中の電子が後方に流されて電荷分離が生じ、それに伴う準定常的な電場が、電子の分布関数に、超熱的成分と逃走テールを作る可能性を検討した。

電場による加速の典型例として、榎戸らは理研などと協力し、雷に伴う加速現象を観測的に研究する準備を開始した。

7.6 将来に向けての技術開発

○ 撮像型ガンマ線検出器の開発

我々は宮脇らを中心に、1 次元の検出器を用いたフーリエ合成撮像系を開発しており [15]、それに用いる検出器素子として伊藤らは、無機シンチレータを短冊型に重ねたものを、1 次元の半導体光検出器で読み出す方式を開発している [21] [41] [50]。昨年の CsI 結晶に続き本年度は、厚み 0.3 mm の極薄 GSO 結晶を重ね、その発光をピッチ 0.4 mm をもつ片面シリコンストリップ検出器で読み出すことにより、エネルギー数百 keV の軟ガンマ線に対して、 ~ 0.4 mm の 1 次元の位置分解能を得た。

平栗らは修士論文で、1.5 mm 角の BGO 結晶 32 $\times$ 32 個を位置有感フォトチューブ (浜松 H9500) に付け、256 本の信号を専用ヘッドアンプ (クリアパルス 80058) で読み出すことで、662 keV で 1.5 mm の 2 次元の位置分解能を得た (図 7.6 h)。高い蛍光収率を誇る LaBr₃ 結晶 (4 mm 角) を 10 $\times$ 10 に並べたアレイでは、5.4 % (FWHM) のエネルギー分解能を保ちつつ、4 mm の位置分解能を達成した [35] [52] [101]。

平栗らはまた、コーデッドマスク撮像系でマスク起源のバックグラウンドを減らすため、BGO ピクセルを並べアクティブなマスクを制作した。放医研にて、 6×10^9 個の 100 MeV 陽子を照射しマスクを放射化させ、それを LaBr₃ アレイと組み合わせたところ、マスクの発光をフォトチューブで受けて禁止信号とすることで、LaBr₃ の感じるカウント数を半減させることができた [35]。

○ 多結晶シンチレータの開発

柳田、高橋らは企業や東北大 (多元物質研) と共同して新しいシンチレータの開発を続けた [100] [106]。Ce をドープした YAG 多結晶シンチレータでは蛍光の減衰時定数などの特性を測定した [14] [22]。Ce と Nd を共ドープしたシンチレータの評価も行なった

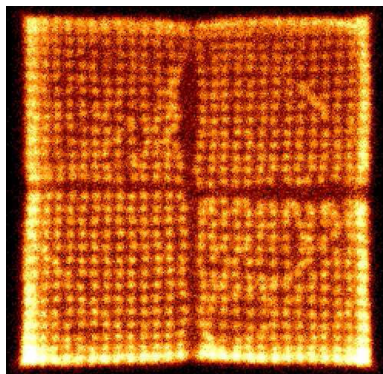


図 7.6 h: Images of uncollimated 662 keV photons, obtained by a gamma-ray imager consisting of 32×32 pixels of BGO scintillators each 1.5 mm squared. The signal is read by a position-sensitive phototube [35].

が、2 種類の活性化物質が互いに相手の発光を吸収するようである [23] [104]。ガンマ線に対する阻止能を高めるため、Y を半分 Gd で置換した GYAG 多結晶シンチレータも製作し、放射線に対し確かに発光すること、また予想通り高い阻止能をもつことを確認した [51] [109]。ただし発光量は YAG の $1/3$ 程度で、結晶の透光性に改善の余地が残る。

○ 宇宙空間での放射化の研究

「すざく」HXD に用いられているシンチレータ (BGO, GSO) が、陽子照射を受けた時にどう放射化するかは、すでに詳しく実験されている。しかし α 粒子による放射化は、実測データが無い。そこで放医研にて 100 MeV/核子のビームを、シンチレータの試験片に照射し、放射化が減衰する様子を測定した [102]。陽子照射と比較して、大きな差はない。

新鋭の無機シンチレータとして注目される、 LaCl_3 および LaBr_3 に対しても、100 MeV 陽子の照射を行なったところ、放射化の程度は BGO や GSO と大差なく、宇宙用に利用できることがわかった [103]。

○ NeXT 衛星に向けての準備

日本の多くの機関と協力して、「すざく」の後継機 NeXT (NEw X-ray Telescope) ミッションの提案を進めた。これは、 ~ 60 keV まで集光できるスーパーミラーに、硬 X 線の撮像検出器を組み合わせたものを主力装置とし [16]、「すざく」HXD をさらに改良して撮像機能をもたせた軟ガンマ線検出器や、「すざく」で実現できなかったカロリメータを搭載するものである。2011 年頃の打ち上げを目ざしており、JAXA 宇宙理学委員会では、VSOP2 計画に続く科学ミッションとして認定された。

< 【受賞】 >

- [1] 牧島一夫: 第 10 回林忠四郎賞 (日本天文学会), 2006 年 3 月 26 日。

< 【新聞記者発表】 >

- [2] 「すざく」チーム (含・牧島研): 「『すざく』搭載観測機器 (硬 X 線検出器)、ケンタウルス座の巨大ブラックホールの観測に成功!」、JAXA による新聞記者発表 (2005 年 8 月 26 日)
- [3] 村島末生、国分紀秀、牧島一夫、古徳純一、村上弘志、松下恭子、林田清、Keith Arnaud、國枝秀世 & 「すざく」チーム: 「『すざく』衛星がとらえた炭素合成の現場～平凡な星の晩年を飾る惑星状星雲は、生命の源～」、日本天文学会・春季年会記者発表 (和歌山、2006 年 3 月 26 日)

< 【報文】 >

(原著論文)

- [4] Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., Kotoku, J., Murakami, H., Matsushita, K., *et al.*: “Suzaku Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639”, *Astrophys. J. Lett.*, in press (2006)
- [5] Young, A., Rudnick, L., Katz, D., DeLaney, T., Kassim, N.E., & Makishima, K.: “Canonical Particle Acceleration in FRI Radio Galaxies”, *Astrophys. J.* **626**, 748-766 (2005)
- [6] Kubota, A., Ebisawa, K., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “On the Temperature Profile of Radiatively Efficient Geometrically Thin Disks in Black Hole Binaries with the ASCA GIS”, *Astrophys. J.* **631**, 1062-1071 (2005)
- [7] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., & Hong, S.: “The XMM-Newton Detection of Diffuse Inverse Compton X-Rays from Lobes of the FR II Radio Galaxy 3C 98”, *Astrophys. J.* **632**, 781-787 (2005)
- [8] Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: “Investigation of Diffuse Hard X-Ray Emission from the Massive Star-forming Region NGC 6334”, *Astrophys. J.* **638**, 860-877 (2006)
- [9] Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Ohashi, T., & Makishima, K.: “The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II”, *Astrophys. J. Suppl.* **161**, 185-223 (2005)
- [10] Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K., & Niko, H.: “A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with RXTE”, *Astrophys. J.*, in press (2006) [astro-ph/0601491]
- [11] Tanaka, T., Sugihara, M., Kubota, A., Makishima, K., & Takahashi, T.: “Spectral Evolution of a Luminous Compact X-Ray Source in NGC 253 with Chandra and XMM-Newton Observatories”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **57**, 507-511 (2005)
- [12] Abe, Y., Fukazawa, Y., Kubota, A., Kasama, D., & Makishima, K.: “Three Spectral States of the Disk X-Ray Emission of the Black-Hole Candidate 4U 1630-47”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **57**, 629-641 (2005)

- [13] Terada Y., Watanabe, S., Ohno, M., Suzuki, M., Itoh, T., Takahashi, I., Sato, G., Murashima, M., Kawano, N., Uchiyama, Y., Kubo, S., Takahashi, T., Tashiro, M., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: “Development of a Monte Carlo Simulator for the *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 902-909 (2005)
- [14] Yanagida, T., Takahashi, H., Itoh, T., Kasama, D., Enoto, T., Sato, M., Hirakuri, S., Kokubun, M., Makishima, *et al.*: “Evaluation of Properties of YAG (Ce) Ceramic Scintillators”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 1836-1841 (2005)
- [15] Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Negoro, H., Kotoku, J., Terada, Y. *al.*: “High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2052-2057 (2005)
- [16] Tajima, H., Kamae, T., Madejski, G., Mitani, T., Nakazawa, K., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Ikagawa, T., Kataoka, J., Kokubun, M., Makishima, K., Terada *et al.*: “Design and Performance of the Soft Gamma-Ray Detector for the *NeXT* Mission”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2749-2757 (2005)
- [17] Ohno, M., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., Kokubun, M., Terada, Y., *et al.*: “Preflight Calibration and Performance of the *Astro-E2*/HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2758-2764 (2005)
- [18] Yamaoka, K., Ohno, M., Terada, Y., Hong, S., Kotoku, J., Okada, Y., Tsutsui, A., Endo, Y., Abe, K., Fukazawa, Y., Hirakuri, S., Hiruta, T., Itoh, K., Itoh, T., Kamae, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kawashima, K., Kishishita, T., Kitaguchi, T., Kokubun, M., *et al.*: “Development of the HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor onboard *Astro-E2*”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2765-2772 (2005)
- [19] Hong, S., Yamaoka, K., Terada, Y., Ohno, M., Tsutsui, A., Endo, Y., Kotoku, J., Okada, Y., Mori, M., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: “Performance of GRB Monitor with *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)” *Nuovo Cim.* **28C**, 821-824 (2005)
- (会議抄録)
- [20] Okada, Y., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: “A search for Cyclotron Resonance Features with *INTEGRAL*”, *Proc. 5th INTEGRAL Workshop: “The INTEGRAL Universe”* (eds. V. Schönfelder, G. Lichti & C. Winkler), p.467 (2005)
- [21] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Makishima, K., *et al.*: “R&D of a New 1-Dimensional Gamma-Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record* **1**, 186-190 (2005)
- [22] Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “The Temperature Dependence of Gamma-Ray Responses of YAG:Ce Ceramic Scintillators”, *ibid.* **3**, 1337-1340
- [23] Yanagida, T., Takahashi, H., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “Evaluation of Basic Properties of Ce-Nd Codoping YAG (Ce) Ceramic Scintillators”, *Proc. Radiation Detectors & Their Uses* (eds. S. Sasaki, T. Shibata, T. Sanami, H. Takahashi, & M. Nakazawa), **19**, 251-260 (2005)
- [24] Inoue, H., Kunieda, H., White, N., Kelley, R., Mihara, T., Terada, Y., Takahashi, H., Kokubun, M., Makishima, K., & The Suzaku Team: “Suzaku Detection of Cyclotron Line near 50 keV for A0535+26”, *Astronomer's Telegram*, #613 (2005)
- [25] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “Large X-ray Flares from B-type Stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 Observed with *Chandra*”, *Proc. Int'l Conf. on Active OB stars* (eds. S. Stefl, S. Owocki, & A. Okazaki), in press (2006)
- [26] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “*Chandra* Observations of OB stars in the Cygnus OB2 Association”, *ibid.*
- [27] Takahashi, H., & Makishima, K.: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, *Proc. Conference “The X-ray Universe 2005”*, p.304 (2006)
- [28] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., Namiki, M., Tanaka, T., & Tsunoda, N.: “Spectral Study of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources with *XMM-Newton* and *Chandra*”, *ibid.*, p.433
- (和文解説)
- [29] 小山勝二, 村上弘志, 牧島一夫, 村島未生, 常深博, 勝田哲, 高橋忠幸, 寺田幸功ほか「すざく」チーム: 「X線天文衛星『すざく』による観測速報(1)」, 天文月報, 2006年3月号
- [30] 竹井洋, 藤本龍一, 満田和久, 久保田あや, 高橋弘充, 上田佳宏, 北本俊二, 堂谷忠靖, 鈴木素子, 寺田幸功, 三原建弘, 牧島一夫, 長瀬文昭, ほか「すざく」チーム: 「X線天文衛星『すざく』による観測速報(2)」, 天文月報, 2006年4月号
- [31] 村島未生, 国分紀秀: 「『すざく』衛星がとらえた炭素の合成と放出の現場～星の内部の錬金術が見えた～」, 理学系研究科ニュース 2006年5月号
- (学位論文)
- [32] Kawaharada, Madoka: “X-ray Study on the Spatial Distribution of Heavy Elements in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies”, 博士学位論文 (物理学専攻)
- [33] Murashima, Mio: “X-ray Study of Planetary Nebulae”, 博士学位論文 (天文学専攻)

- [34] 北口貴雄:「『すざく』衛星搭載硬X線検出器の軌道上校正」, 修士学位論文 (物理学専攻)
- [35] 平栗慎也:「ピクセルシンチレータとアクティブマスクを用いたガンマ線検出器の開発」, 修士学位論文 (物理学専攻)

< 【学術講演】 >

(国際会議)

● 招待講演

- [36] Makishima, K.: “A New X-ray Window to be Opened with *Astro-E2*”, 台湾天文学会 (台湾中央大学, 2005 June 2)

● 一般講演

- [37] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “Large X-ray flares from B-type stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 observed with *Chandra*”, *Int'l Conf. on Active OB stars* (Hokkai-Gakuen Univ., Sapporo; 2005 Aug. 29-Sept. 2)
- [38] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “*Chandra* Observations of OB Stars in the Cygnus OB2 association”, *ibid*
- [39] Takahashi, H., & Makishima, K.: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, “*The X-ray Universe 2005*” Conference (San Lorenzo del Escorial, Spain; 2005 September)
- [40] Miyawaki, R., Sugih, M., Kubota, A., Makishima, K., Namiki, M., Tanaka, T., & Tsunoda, N.: “Spectral Study of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources with *XMM-Newton* and *Chandra*”, *ibid*.
- [41] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Makishima, K., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Honda, T.: “R&D of a New 1-Dimensional γ -Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *IEEE Nucl. Sci. Symp.* (Puerto Rico; 2005 Oct. 25)
- [42] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “X-ray Flares from Young Intermediate Mass Stars in NGC2264 Observed with *Chandra*”, *Protostars and Planets V* (Waikoloa Village, Hawaii; 2005 Oct. 24-28)
- [43] Makishima, K., Murashima, M., Kokubun, M., Murakami, H., Hayashida, K., Matsushita, K., Kotoku, J., Arnaud, K., & Hamaguchi, K.: “The *Suzaku* PV observation of the Planetary Nebula BD+30 °3639”, *Suzaku Science Working Group Meeting* (ISAS/JAXA; 2006 Feb. 20)
- [44] Kokubun, M., Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Anabuki, N., Porter, F., & Takahashi, T.: “*Suzaku* Observation of the Lockman Hole”, *ibid*.

- [45] Kokubun, M., Murashima, M., Makishima, K., Matsushita, K., Kotoku, J., Murakami, H., *et al.* “*Suzaku* Detection of a Highly Carbon Enriched Plasma in BD +30°3639”, *IAU Symposium No.234: Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond* (Waikoloa, Hawaii; 2006 April 3-7)

(国内会議)

- 日本物理学会・秋の分科会 (大阪市大/同志社大/ハワイ, 2005/9/12~9/22)
- [46] 宮坂浩正, 土屋晴文, 牧島一夫, 寺田幸功, 霜田進, 山田豊, 高橋恵美子, 譚有恒:「2005 年 1 月 20 日の太陽フレアにおけるチベット中性子モニターの観測」, 12aSC-6
- [47] 国分紀秀, 釜江常好, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田代信, 寺田幸功, 中澤知洋, 能町正治, 深沢泰司, 牧島一夫ほか HXD-II チーム:「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 I」, 15aSA-11
- [48] 寺田幸功, 釜江常好, 国分紀秀, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田代信, 中澤知洋, 能町正治, 深沢泰司, 牧島一夫, ほか it *Astro-E2* 衛星 HXD-II チーム:「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 II: キャリブレーション& ソフトウェア」, 15aSA-12
- [49] 山岡和貴, 釜江常好, 国分紀秀, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田代信, 寺田幸功, 中澤知洋, 能町正治, 深沢泰司, 牧島一夫他 *Astro-E2* 衛星 HXD-II チーム:「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 III: 広域全天モニタ (WAM) 部」, 15aSA-13
- [50] 伊藤健, 国分紀秀, 宮脇良平, 柳田健之, 平栗慎也, 牧島一夫, 高島健, 田中孝明, 高橋忠幸, 本多庸朗:「結晶シンチレータと Si 半導体を用いた宇宙 γ 線位置検出器の基礎開発 (2)」, 19aYA-9
- [51] 柳田健之, 高橋弘充, 伊藤健, 平栗慎也, 国分紀秀, 牧島一夫, 柳谷高公, 八木秀喜, 繁田岳志, 伊東孝之:「高阻止能を目指した改良型多結晶 YAG:Ce シンチレータの開発」, 19aYA-10
- [52] Hirakuri, S., Kokubun, M., Itoh, T., Yanagida, T., Miyawaki, R., Makishima, K., Kubo, S., & Honda, T.: “R&D of a Low Background Cosmic Hard X-ray Imager with a Position Sensitive PMT and an Active Coded Mask”, KD.00011
- 日本天文学会・秋の年会 (札幌, 2005/10/6~10/8)
- [53] 牧島一夫:「ULX の観測と問題点」, A01a
- [54] 久保田あや, Chris Done, 角田奈緒子, 牧島一夫:「低温度の ULX は 1000 太陽質量のブラックホールを意味するか?」, A02a
- [55] 高橋弘充, 牧島一夫 (東大理):「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究 (2)」, H09a
- [56] 榎戸輝揚, 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫, 中島基樹: *RXTE* 衛星を用いた Cep X-4 のサイクロトロン共鳴吸収線の探索」 H10a
- [57] 中島基樹, 三原建弘, 牧島一夫:「質量降着型 X 線パルサーの X 線光度に依存したサイクロトロン共鳴エネルギーの変化」, H11a

- [58] 村島末生, 国分紀秀, 牧島一夫, 古徳純一: 「*Chandra* 衛星による惑星状星雲からの X 線放射の観測 (3)」, N29b
- [59] 柳田健之, 江副祐一郎, 川原田 円, 国分紀秀, 牧島一夫: 「*Chandra* 衛星による大質量星形成領域 NGC2264 の観測」, P17a
- [60] 川原田 円, 北口貴雄, 佐藤光浩, 牧島一夫, 中澤知洋, 深沢泰司, 松下恭子: 「重元素の空間分布から探る銀河団の進化」, T02a
- [61] 北口貴雄, 川原田 円, 国分紀秀, 牧島一夫: 「銀河団ガスとメンバー銀河の相対的な空間分布の進化 II」, T11b
- [62] 佐藤光浩, 北口貴雄, 川原田円, 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫: 「Abell 1795 での銀河団の重力ポテンシャルの階層構造の検証」, T19a
- [63] 中澤知洋, 釜江常好, 国分紀秀, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田代信, 寺田幸功, 能町正治, 深沢泰司ほか: 「*Astro-E2* 衛星の現状: 硬 X 線検出器 HXD」, W37a
- 第 6 回宇宙科学シンポジウムでのポスター発表 (宇宙科学研究所, 2006/1/5~1/6)
- [64] 寺田幸功, 山岡和貴, 田代信, 深沢泰司, 玉川徹, 佐藤悟郎, 大野雅功, 杉田聡司, 遠藤康彦, 恩田香織, 高橋拓也, 榎戸輝明ほか: 「『すざく』による HXD-WAM を用いた GRB 観測」, P5-32
- [65] 村島末生, 国分紀秀, 古徳純一, 村上弘志, 牧島一夫: 「『すざく』による惑星状星雲の観測と CNO 組成比の推定」, P5-32
- [66] 寺田幸功, 三原建弘, 榎戸輝明, 国分紀秀, 高橋弘充, 牧島一夫, 中島基樹: 「『すざく』による X 線パルサーのサイクロトロン線の観測」, P5-36
- [67] Hasinger, G., 伊藤真之, 馬場彩, 寺田幸功, 榎戸輝明, 森浩二, Bauer, M., 宇野伸一郎: 「『すざく』による超新星残骸 SN1987A の観測」, P5-37
- [68] 高橋弘充, 伊藤健, 国分紀秀, 久保田あや, 山岡和貴, 深沢泰司, 上田佳宏, 大貫宏祐, 高橋忠幸ほか: 「『すざく』による GRO J1655-40 の観測」, P5-45
- [69] 久保田あや, 堂谷忠靖, 平賀純子, 市川喜徳, 海老沢研, 国分紀秀, 伊藤健, 高橋弘充, 牧島一夫ほか: 「『すざく』による Cyg X-1 の観測」, P5-46
- [70] 宮脇良平, 久保田あや, 国分紀秀, 高橋弘充, 牧島一夫, 水野恒史, 並木雅章, 海老沢研: 「『すざく』による渦巻き銀河 NGC1313 と ULX 天体の観測」, P5-47
- [71] 穴吹直久, 林田清, 内田裕之, L. Gallo, 寺島雄一, 井上裕彦, 松本千穂, 宮脇良平, 伊藤健: 「『すざく』による Narrow-Line Seyfert 1 銀河の観測」, P5-48
- [72] 栗木久光, 小川悠, 深沢泰司, 大野雅功, 伊藤健ほか: 「『すざく』による 2 型セイファート銀河の観測」, P5-49
- [73] 渡辺伸, 勝田準一郎, 寺島雄一, 高橋忠幸, 岡島崇, 深沢泰司, 大野雅功, 国分紀秀, 片岡淳一: 「『すざく』による活動銀河核からの硬 X 線放射の観測」, P5-50
- [74] 松下恭子, 深沢泰司, 戸塚都, 太田直美, 中澤知洋, 山崎典子, 大橋隆哉, 北口貴雄, 佐藤光浩: 「『すざく』による Fornax 銀河団の観測」, P5-51
- [75] 深沢泰司, 松下恭子, 太田直美, 川埜直美, 北口貴雄, 国分紀秀, 佐藤光浩, 中澤知洋, 牧島一夫: 「『すざく』による 銀河群・銀河団からの硬 X 線の観測」, P5-52
- 日本天文学会・春の年会 (和歌山, 2006/3/26~3/29)
- [76] 牧島一夫および「すざく」チーム: 「『すざく』衛星 8 ヶ月の成果」, 「すざく」特別講演
- [77] 牧島一夫: 林忠四郎賞受賞記念講演
- [78] 高橋弘充, 伊藤健, 国分紀秀, 久保田あや, 山岡和貴ほか: 「『すざく』チーム: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」, J01a
- [79] 久保田あや, 堂谷忠靖, 平賀純子, 市川喜徳, 海老沢研, Sachindranatha Naik, 国分紀秀, 伊藤健, 高橋弘充, 牧島一夫, 水野恒史ほか: 「『すざく』衛星による Cygnus X-1 の観測」, J08b
- [80] 鈴木素子, 寺田幸功, 三原建弘, 牧島一夫, 国分紀秀, 高橋弘充, 榎戸輝明, Naik, Sachindra ほか: 「すざく衛星による X 線パルサー Her X-1 の観測」, J39a
- [81] 須藤敬輔, 北本俊二, 三原建弘, 寺田幸功, 高橋弘充, 榎戸輝明, 牧島一夫ほか: 「Suzaku 衛星による X 線パルサー A0535+26 の解析」, J43b
- [82] 村島末生, 国分紀秀, 牧島一夫, 古徳純一, 村上弘志, 松下恭子, 林田清: 「『すざく』による惑星状星雲 BD +30° 3639 の元素組成比の測定」, N23a
- [83] 千田篤史, 寺田幸功, 馬場彩, 海老沢研, 村上弘志, 前田良知, 伊藤昭治, 大貫宏祐, 高橋忠幸, 片岡淳, 国分紀秀ほか: 「すざく」チーム: 「『すざく』による銀河中心 Sgr A 領域からの硬 X 線放射の観測」, Q24a
- [84] 大貫宏祐, 中澤知洋, 田村健一, 渡辺伸, 高橋忠幸, 村上弘志, 寺田幸功, 千田篤史, 国分紀秀, 深沢泰司, 小山 勝二: 「『すざく』衛星による銀河中心, および銀河面からの硬 X 線放射の観測」, Q25b
- [85] 田村健一, 村上弘志, 大貫宏祐, 国分紀秀, 小山勝二: 「『すざく』衛星による Sgr B2 領域からの硬 X 線放射の研究」, Q26b
- [86] 伊藤健, 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫, 栗木久光, 磯部直樹ほか: 「『すざく』衛星による 2 型セイファート銀河 NGC 4945 の観測」, S12a
- [87] 松下恭子, 大橋隆哉, 鶴剛, 深沢泰司, 戸塚都, 山崎典子, 中澤知洋, 田村隆幸, 太田直美, 磯部直樹, 浦田裕次, 北口貴雄, 佐藤光浩, 牧島一夫: 「すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測」, T01a
- [88] 川原田円, 北口貴雄, 牧島一夫: 「銀河団プラズマ中の重元素の空間分布」, T07a
- [89] 中澤知洋, 深沢泰司, 牧島一夫, 国分紀秀, 太田直美, 川埜直美, 松下恭, 北口貴雄, 磯部直樹: 「『すざく』衛星による銀河団の硬 X 線放射の探査」, T13b
- [90] 中澤知洋, 釜江常好, 久保田あや, 国分紀秀, 高橋忠幸, 高橋弘充, 田代信, 玉川徹, 寺田幸功, 能町正治ほか: HXD-II チーム: 「『すざく』衛星搭載の硬 X 線検出器 HXD 主検出部の現状」, W51a
- [91] 岸下徹一, 高橋忠幸, 中澤知洋, 渡辺伸, 田中孝明, 田村健一, 牧島一夫, 国分紀秀, 宮脇良平, 北口貴雄, 平栗慎也ほか: HXD チーム: 「すざく衛星搭載 PIN 型シリコン検出器の軌道上校正及び性能評価」, W52a

- [92] 遠藤康彦, 洪秀微, 阿部圭一, 田代信, 山岡和貴, 北口貴雄, 平栗慎也, 国分紀秀, 牧島一夫, 大野雅功ほか HXD チーム:「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 HXD のゲイン変動」, W53a
- [93] 田代信, 山岡和貴, 寺田幸功, 玉川 徹, 久保田あや, 牧島一夫, 国分紀秀, 高橋弘充, 釜江常好ほか HXD チーム:「『すざく』衛星搭載 硬 X 線検出器 広帯域全天モニタ部 (HXD-II/WAM) の現状 (I)」, W54a
- [94] 深沢泰司, 川埜直美, 山崎智紀, 牧島一夫, 国分紀秀, 北口貴雄, 高橋忠幸, 中澤知洋, 渡辺伸, 寺田幸功, 山岡和貴ほか HXD チーム:「『すざく』硬 X 線検出器 (HXD) のバックグラウンド差引の現状」, W55b
- [95] 高橋拓也, 大野雅功, 深沢泰司, 杉田聡司, 山岡和貴, 遠藤康彦, 田代信, 榎戸輝揚, 宮脇良平, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 中澤知洋, 高橋忠幸, 寺田幸功, 玉川徹, 牧島一夫ほか HXD チーム:「『すざく』広帯域全天モニタ (WAM) のバックグラウンド解析」, W56b
- 日本物理学会・春の年会 (松山, 2006/3/27~3/30)
- [96] 国分紀秀, 高橋弘充, 牧島一夫, 寺田幸功, 玉川徹ほか「『すざく』 HXD チーム:「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状」, 28aTF-1
- [97] 北口貴雄, 国分紀秀, 平栗慎也, 宮脇良平, 高橋弘充, 牧島一夫, 寺田幸功ほか「『すざく』 HXD チーム:「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器主検出部の軌道上校正」, 28aTF-2
- [98] 山岡和貴, 田代信, 寺田幸功, 玉川徹, 釜江常好, 久保田あや, 牧島一夫ほか「『すざく』 HXD チーム:「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-II/WAM) の現状 (I)」, 28aTF-3
- [99] 大野雅功, 深沢泰司, 高橋拓也, 山岡和貴, 杉田聡司, 寺田幸功, 玉川徹, 田代信ほか「『すざく』 HXD チーム:「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-II/WAM) の現状 (II)」, 28aTF-4
- [100] 柳田健之, 平栗慎也, 高橋弘充, 榎戸輝揚, 伊藤健, 国分紀秀, 牧島一夫, 荻野拓, 吉川彰, 福田承生:「 γ 線検出用単結晶 LuAG(Pr) シンチレータの基礎特性評価」 28pTA-1
- [101] 平栗慎也, 榎戸輝揚, 国分紀秀, 伊藤健, 柳田健之, 高橋弘充, 北口貴雄, 佐藤光浩, 牧島一夫, 内堀幸夫:「ピクセルシンチレータとアクティブマスクを用いたガンマ線検出器の開発」 28pTF-1
- [102] 佐藤光浩, 北口貴雄, 平栗慎也, 国分紀秀, 牧島一夫, 内堀幸夫:「BGO 結晶および GSO 結晶の 100Mev/核子ヘリウムによる放射化実験」, 28pWG-6
- [103] 榎戸輝揚, 平栗慎也, 高橋弘充, 柳田健之, 伊藤健, 北口貴雄, 国分紀秀, 牧島一夫, 内堀幸夫:「陽子照射時における LaBr3 と LaCl3 の放射化バックグラウンド特性」, 28pWG-11
- その他
- [104] 柳田健之, 高橋弘充, 伊藤健, 平栗慎也, 国分紀秀, 牧島一夫ほか:「共添加多結晶シンチレータ YAG(Ce,Nd) の特性評価」, 日本応用物理学会・秋の講演会, 9p-ZH-6 (徳島大学; 2005 年 9 月 9 日)
- [105] 宮脇良平:「X線衛星『すざく』と硬X線検出器」, 第1回 21世紀 COE “QUESTS” 若手交流シンポジウム (小柴ホール, 2005 年 11 月 21-22 日)
- [106] 柳田健之:「 γ 線検出器用透光性セラミックシンチレータの開発」, 第1回 21世紀 COE “QUESTS” 若手交流シンポジウム (同上)
- [107] 川原田 円:“X-ray Study on the Spatial Distribution of Heavy Elements in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies”, 高宇連・第4回博士論文発表会 (立教大学, 2006 年 3 月 17 日)
- [108] 村島未生:“X-ray Study of Planetary Nebulae”, 高宇連・第4回博士論文発表会 (同上)
- [109] 柳田健之, 高橋弘充, 伊藤健, 平栗慎也, 榎戸輝揚, 佐藤光浩, 国分紀秀, 牧島一夫ほか:「(YGd)₃Al₅O₁₂(Ce) セラミックシンチレータの改良および基礎特性評価」日本応用物理学会・春の講演会, 24a-M-11 (武蔵工大; 2006 年 3 月 24 日)
- (セミナー, 講演会, 談話会)
- [110] 牧島一夫:「見えて来たブラックホールの素顔」, 名古屋大学公開セミナー (名大; 2005 年 8 月 20 日)
- [111] 柳田 健之, 江副祐一郎, 川原田円, 国分紀秀, 牧島一夫:「チャンドラ衛星による白鳥座 OB2 アソシエーションの観測」, 一般公開講演会「あらぶる星々」でのポスター公開 (北海学園大学; 2005 年 9 月 3 日)
- [112] 柳田 健之, 江副祐一郎, 川原田円, 国分紀秀, 牧島一夫:「NGC2264 の B 型星 HD261902 と HD47777 からの巨大フレアのチャンドラ衛星による観測」, 同上
- [113] 牧島一夫:「科学衛星で探るブラックホール」, スーパーサイエンスハイスクール講演会 (神奈川県立柏陽高校; 2005 年 11 月 6 日)
- [114] 牧島一夫:「科学衛星を用いた大気圏外からの天文観測~日本の現状と展望~」, 宇宙開発の政策的な課題に関する第6回懇談会 (文科省; 2005 年 11 月 11 日)
- [115] 牧島一夫:「科学衛星で探るブラックホール」, 市民に向けた第21回湯川記念講演会 (阪大中之島センター; 2005 年 11 月 20 日)
- [116] 牧島一夫:「宇宙での元素合成過程を探る」, 理研・原子核月例コロキウム (理研和光; 2005 年 12 月 22 日)
- [117] 村島未生:「『すざく』による惑星状星雲の X 線観測」, 北海道大学理学部宇宙物理研究室セミナー (北大; 2006 年 2 月 10 日)
- [118] 島一夫:「地上からでは見えない宇宙」, 理研一般公開講演会 (理研和光; 2006 年 4 月 22 日)

7.7 BESS 気球実験グループ (山本、佐貫)

実験経過

BESS 気球実験は、大立体角、高精度薄肉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、メリーランド大が協力し、実験が推進されている。平成17年度には、新たにデンバー大が参加した。本報告では、平成16,17年度にわたる、BESS-Polar 実験、解析の進展を報告する。



図 7.7 i: BESS-Polar ペイロード打上げの様子

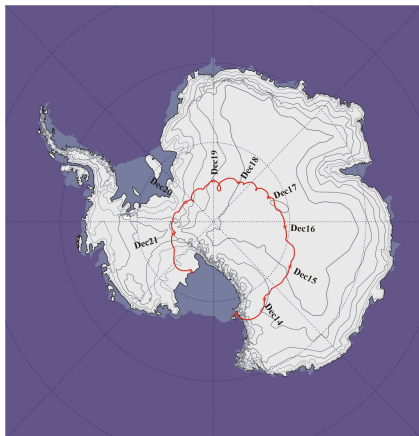


図 7.7 j: BESS-Polar 飛行軌跡

宇宙初期における素粒子現象の探索を目的として進められている日米共同宇宙線観測実験 (BESS-Polar) では、平成16年12月13日 (ニュージーランド夏時間、18:56) に南極マクマード基地近くのウィリアムズフィールドより、大型観測気球による気球搭載型超伝導スペクトロメータの南極周回軌道への打ち上げに成功した。打上げ直後より宇宙線観測を開始したところ、飛行時間検出器の光電子増倍管の一部にトラブルが発生したが、低エネルギー反陽子観測感

度を最大限保つようデータ収集システムを調整することにより観測を続けることができた。測定器は高度37~39kmを安定して西方に浮遊し、ロス棚氷上まで周回した12月22日まで8日間17時間にわたる観測を実施できた。無線コマンドにより気球から切り離された測定器はパラシュートにより緩降下し、マクマード基地より約870km南東のロス棚氷上に着地した。宇宙線観測は約9億イベントに達した。

宇宙線反陽子流束の精密観測

BESS-Polar 実験では、1 GeV 以下の宇宙線反陽子スペクトルに重点を絞り精密観測を行った。図7.7 k に実験中に観測された反陽子事象例を示す。図7.7 l にエネルギースペクトルを示す。0.2 GeV 以下では、JET チェンバー (粒子飛跡検出器) 下に組み込んだ中間 TOF(MTOF) カウンターによって下部トリガーがかけられ、最小測定器物質厚 (5 g/cm²) での宇宙線観測が可能となり、0.1 GeV までの観測が実現された。実線は、二次粒子スペクトルの予想曲線をしめしており、太陽活動極小期直前の二次粒子データとして妥当性のある実験結果となった。

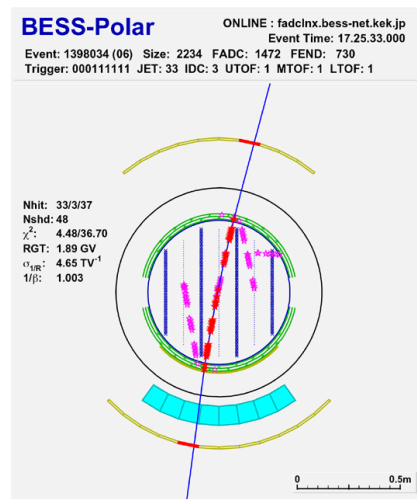


図 7.7 k: 実験中に観測された反陽子事象例

反物質探索

BESS-Polar 実験では、フライト時間長さを活用し、ヘリウム流束の高統計観測を行った。この結果、1.14 GeV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値 2.7×10^{-7} を得た。これは、BESS 実験以前のデータに対して、約100倍の感度向上を実現した。

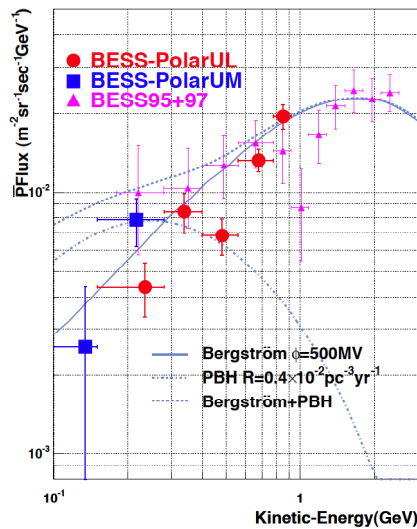


図 7.7 l: BESS-Polar 反陽子流束の測定 (Preliminary)

まとめ

2001 年より準備が進められてきた BESS-Polar 実験は、2004 年 12 月に第一回の長時間気球実験を実現し、約 8.5 日にわたる観測から 9 億イベントの宇宙線を観測し、反陽子スペクトルの精密観測（実質 4 日分の観測量）、および、反ヘリウムの探索に大きな進展をみた。2007 年度には、第二回の BESS-Polar 実験を目指し、準備が進められている。

< 報 文 >

(原著論文 (査読つき))

- [1] Progress of the BESS Superconducting Spectrometer S.Haino, K.Abe, K.Anraku, H.Fuke, T.Hams, N.Ikeda, A.Itasaki, K.Izumi, T.Kumazawa, M.H.Lee, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, N.Matsui, H.Matsumoto, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, H.Omiya, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, S.Takeuchi, K.Tanaka, T.Taniguchi, K.Tanizaki, T.Yamagami, A.Yamamoto, Y.Yamamoto, K.Yamato, T.Yoshida and K.Yoshimura Nucl. Instr. and Methods A 518 (2004) 167-171.
- [2] BESS-Polar Experiment T.Yoshida, A.Yamamoto, J.Mitchell, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, N.Ikeda, A.Itasaki, K.Izumi, M.H.Lee, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, H.Omiya, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, A.Stephens, R.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, K.Tanaka, K.Tanizaki, T.Yamagami, Y.Yamamoto,

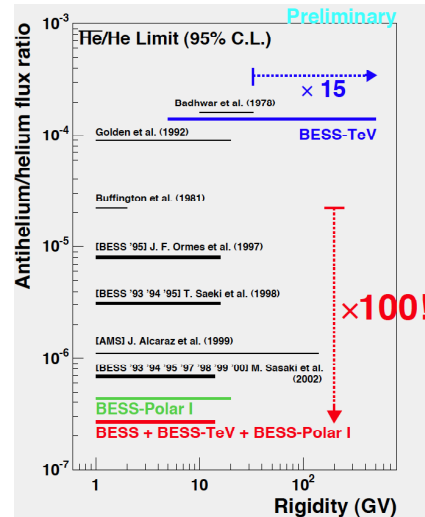


図 7.7 m: 反ヘリウム探索成果の歴史および BESS-Polar での観測結果。

K.Yamato and K.Yoshimura Adv. Space Res. 33 (2004) (10)1755-(10)1762.

- [3] BESS-Polar M.Nozaiki for the BESS Collaboration Nucl. Instr. and Methods B 214 (2004) 110-115.
- [4] Measurements of Primary and Atmospheric Cosmic-Ray Spectra with the BESS-TeV Spectrometer S.Haino, T.Sanuki, K.Abe, K.Anraku, Y.Asaoka, H.Fuke, M.Imori, A.Itasaki, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, N.Matsui, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, K.Tanaka, K.Tanizaki, T.Yamagami, A.Yamamoto, Y.Yamamoto, K.Yamato, T.Yoshida, K.Yoshimura Phys. Lett. B 594 (2004) 35-46.
- [5] The BESS Program J.W.Mitchell, K.Abe, K.Anraku, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, M.Imori, A.Itasaki, K.Izumi, T.Kumazawa, M.H.Lee, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, K.Matsumoto, A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, H.Omiya, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, K.Tanaka, K.Tanizaki, T.Yamagami, A.Yamamoto, Y.Yamamoto, K.Yamato, T.Yoshida, K.Yoshimura Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 134 (2004) 31-38.
- [6] Precise Measurements of the Cosmic Ray Antiproton Spectrum with BESS Including the Effects of Solar Modulation J.W.Mitchell, S.Orito, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Abe, K.Anraku, Y.Asaoka, M.Fujikawa, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, N.Ikeda, M.Imori, A.Itasaki, K.Izumi, M.H.Lee,

- T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, N.Matsui, T.Matsukawa, H.Matsumoto, H.Matsunaga, T.Mitsui, A.Moiseev, M.Motoki, J.Nishimura, M.Nozaiki, H.Omiya, J.F.Ormes, T.Saeki, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, T.Sonoda, A.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, K.Tanaka, K.Tanizaki, I.Ueda, J.Z.Wang, Y.Yajima, T.Yamagami, Y.Yamamoto, K.Yamato and K.Yoshimura Adv. Space Res. 35 (2005) (1)135-(1)141.
- [7] Cosmic Ray 1H and 2H Spectra from BESS 98 Z.D.Myers, E.S.Seo, J.Z.Wang, R.W.Alford, K.Abe, K.Anraku, Y.Asaoka, M.Fujikawa, M.Imori, T.Maeno, Y.Makida, H.Matsumoto, H.Matsunaga, J.Mitchell, T.Mitsui, A.Moiseev, M.Motoki, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.Ormes, T.Saeki, T.Sanuki, M.Sasaki, Y.Shikaze, T.Sonoda, R.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, I.Ueda, N.Yajima, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida and K.Yoshimura Adv. Space Res. 35 (2005) (1)151-(1)155.
- [8] Performance of an Ultra-Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics Y. Makida, T. Kumazawa, K. Tanaka, A. Yamamoto, T. Yoshida, S. Mizumaki, S. Kurita IEEE Trans. Applied Superconductivity 15 (2005) 1248-1251.
- [9] Search for Cosmic-Ray Antideuterons H.Fuke, T.Maeno, K.Abe, S.Haino, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, K.Tanizaki, T.Yamagami, A.Yamamoto, Y.Yamamoto, K.Yamato, T.Yoshida and K.Yoshimura Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 081101.
- [10] Measurements of atmospheric antiprotons K.Yamato, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida and K.Yoshimura Phys. Lett. B 632 (2006) 475-479.
- (会議抄録)
- [11] BESS-Polar 2003 Technical Flight 報告熊澤 輝之 他 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2004) 113-116.
- [12] BESS-Polar 実験のための Flash ADC の開発, 竹内 一真 他 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2004) 117-120.
- [13] Search for Primordial Antiparticles in Cosmic Rays A.Yamamoto for the BESS Collaboration Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology”, Universal Adademy Press Inc. Tokyo, Japan (2004) 249-259.
- [14] Latest Results from BESS and Future Prospects A.Yamamoto for the BESS Collaboration “Frontiers of Cosmic Ray Science”, Vol. 8 of the Proceedings of the 28th Intl. Cosmic Ray Conf., Universal Adademy Press Inc. Tokyo, Japan (2004) 347-360.
- [15] 南極における BESS-Polar 宇宙線観測実験の実施経過吉田 哲也、山本 明、福家 英之高エネルギーニュース 23 (2005) 210-214.
- [16] BESS-Polar 実験 一南極周回気球観測に向けて一、横田 康博 他宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2005) 170-173.
- [17] BESS-Polar 第 1 回実験経過吉田 哲也 他宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 162-165.
- [18] BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定松田 晋弥 他宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 166-169.
- [19] BESS-Polar 実験の今後の展開山本 明 他宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球シンポジウム (2006) 170-173.
- [20] Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum with BESS 2002 S.Haino, K.Abe, H.Fuke, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 13-16.
- [21] Observation of low energy antiprotons at the 2004 BESS-Polar flight in Antarctica S.Matsuda, S.Haino, K.Abe, H.Fuke, T.Hams, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, H.Matsumoto, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata, M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 25-28.
- [22] The 2004 BESS-Polar scientific flight in Antarctica T.Yoshida, J.W.Mitchell, A.Yamamoto, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, K.Matsumoto, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata, M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Taniguchi, T.Yamagami, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 33-36.
- [23] Flight Performance of the BESS-Polar Aerogel Cherenkov Counter T.Hams, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata,

- M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Taniguchi, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 69-72.
- [24] Isotope Measurements of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium during the 2000 Solar Maximum K.C.Kim, E.S.Seo, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 77-80.
- [25] Low Power Front-End Electronics for the BESS-Polar Time-of-Flight Counter and Aerogel Cherenkov Counter M.Sasaki, P.A.Goodwin, S.Haino, T.Hams, N.Ikeda, S.Matsuda, J.W.Mitchell, M.Nozaiki, L.F.Ryan, S.Singh, R.E.Streitmatter, Y.Takasugi, K.Takeuchi, K.Tanizaki, K.Yamato, T.Yoshida Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 421-424.
- [26] 南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の精密探査松田 晋弥 他宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙科学シンポジウム (2006) 印刷中
- (国内雑誌)
- [27] 反陽子観測のための南極周回気球飛翔の成功吉田 哲也、山本 明日本物理学会誌 60 (2005) 653-654.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [28] Search for Primordial Antiparticles in Cosmic Rays A.Yamamoto for the BESS Collaboration Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on "Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology", Universal Adademy Press Inc. Tokyo, Japan (2004) 249-259.
- [29] Latest Results from BESS and Future Prospects A.Yamamoto for the BESS Collaboration "Frontiers of Cosmic Ray Science", Vol. 8 of the Proceedings of the 28th Intl. Cosmic Ray Conf., Universal Adademy Press Inc. Tokyo, Japan (2004) 347-360.
- [30] A.Yamamoto: Precise Measurement of Low Energy (< TeV) Cosmic-Rays with BESS Intl. Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, (Feb. 2006) Kashiwa
- 一般講演 (含ポスター)
- [31] S.Haino: Recent Topics on BESS BELLE Monday Meeting (Oct. 2004) KEK
- [32] Y.Makida: Performance of an ultra-thin superconducting solenoid for particle astrophysics Applied Superconductivity Conference (ASC 2004) (Oct. 2004) Jacksonville, Florida
- [33] Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum with BESS-2002 S.Haino, K.Abe, H.Fuke, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 13-16.
- [34] Observation of low energy antiprotons at the 2004 BESS-Polar flight in Antarctica S.Matsuda, S.Haino, K.Abe, H.Fuke, T.Hams, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, H.Matsumoto, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata, M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 25-28.
- [35] The 2004 BESS-Polar scientific flight in Antarctica T.Yoshida, J.W.Mitchell, A.Yamamoto, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, K.Matsumoto, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata, M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Taniguchi, T.Yamagami, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 33-36.
- [36] Flight Performance of the BESS-Polar Aerogel Cherenkov Counter T.Hams, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, Z.D.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, A.Ogata, M.Oikawa, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Taniguchi, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 69-72.
- [37] Isotope Measurements of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium during the 2000 Solar Maximum K.C.Kim, E.S.Seo, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Maeno, Y.Makida, S.Matsuda, H.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, M.Sasaki, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 77-80.

- [38] Low Power Front-End Electronics for the BESS-Polar Time-of-Flight Counter and Aerogel Cherenkov Counter M.Sasaki, P.A.Goodwin, S.Haino, T.Hams, N.Ikeda, S.Matsuda, J.W.Mitchell, M.Nozaiki, L.F.Ryan, S.Singh, R.E.Streitmatter, Y.Takasugi, K.Takeuchi, K.Tanizaki, K.Yamato, T.Yoshida Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 421-424.
- [39] A.Yamamoto: Precise Measurement of Low Energy ($< \text{TeV}$) Cosmic-Rays with BESS Intl. Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, (Feb. 2006) Kashiwa
- [40] T.Yoshida: The first BESS-Polar flight over Antarctica 25th Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (Jun. 2006) Kanazawa
- [41] A. Yamamoto: The BESS Program The 3rd international conference on Particle and Fundamental Physics in Space, (April, 2006) Beijing
(国内会議)
- [42] S.Matsuda: BESS-Polar Flight Report 10th Accelerator and Particle Physics Institute (Mar. 2005) Appi
- [43] 福家 英之: BESS-Polar2004 フライト報告 (I)、日本物理学会 (2005 年 3 月) 東京理科大学
- [44] 松田 晋弥: BESS-Polar2004 フライト報告 (II)、日本物理学会 (2005 年 3 月) 東京理科大学
- [45] 槇田 康博: 飛翔体による宇宙線観測用超伝導マグネットの開発 (9) 一南極気球飛翔の実施報告低温工学・超伝導学会 (2005 年 6 月) 東京大学
- [46] 野崎 光昭: 宇宙の反陽子探索シンポジウム物質の創生と発展 (2004 年 11 月) 日光霧降高原
- [47] 槇田 康博: BESS-Polar 実験 一南極周回気球観測に向けて一大気球シンポジウム (2004 年 12 月) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- [48] 山本 明: BESS-Polar 気球実験第 3 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会 (2005 年 2 月) 館山市
- [49] S.Matsuda: BESS-Polar Flight Report 10th Accelerator and Particle Physics Institute (Mar. 2005) Appi
- [50] 福家 英之: BESS-Polar2004 フライト報告 (I) 日本物理学会 (2005 年 3 月) 東京理科大学
- [51] 松田 晋弥: BESS-Polar2004 フライト報告 (II) 日本物理学会 (2005 年 3 月) 東京理科大学
- [52] 槇田 康博: 飛翔体による宇宙線観測用超伝導マグネットの開発 (9) 一南極気球飛翔の実施報告低温工学・超伝導学会 (2005 年 6 月) 東京大学
- [53] 松田 晋弥: BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定第 4 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会 (2005 年 8 月) 嬬恋村鹿沢温泉
- [54] 松田 晋弥: BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束測定日本物理学会 (2005 年 9 月) 大阪市立大学
- [55] 灰野 禎一: BESS 実験から日本物理学会 宇宙線宇宙物理シンポジウム「宇宙線のエネルギースペクトル再訪」(2005 年 9 月) 大阪市立大学
- [56] 松田 晋弥: 南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の精密探査宇宙科学シンポジウム (2006 年 1 月) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- [57] 吉田 哲也: BESS-Polar 第 1 回実験経過大気球シンポジウム (2006 年 1 月) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- [58] 松田 晋弥: BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定大気球シンポジウム (2006 年 1 月) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- [59] 山本 明: BESS-Polar 実験の今後の展開大気球シンポジウム (2006 年 1 月) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- [60] K.Yoshimura: Present and future prospect of BESS-Polar KEK Theory Meeting 2006 "Particle Physics Phenomenology" (Mar 2006) KEK Tsukuba
- [61] 折戸 玲子: BESS-Polar I フライトデータ検証のためのビームテスト報告日本物理学会 (2006 年 3 月) 愛媛大学・松山大学
- [62] 松田 晋弥: BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定日本物理学会 (2006 年 3 月) 愛媛大学・松山大学
- [63] 坂井 賢一: BESS-Polar 実験用エアロジェルチェレンコフカウンターの特性評価および改良に向けた研究開発日本物理学会 (2006 年 3 月) 愛媛大学・

II

2005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 教官，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

佐藤 勝彦（センター長／教授）

横山 順一（教授）

茂山 俊和（助教授）

樽家 篤史（助手）

向山 信治（助手）

B. Carr（外国人客員教授）

小林 晋平（機関研究員）

和南城 伸也（教務補佐員）

永野 早百合（時間雇用職員）

岡田 志帆（時間雇用職員）

研究プロジェクト及び協力研究者

プロジェクト	研究室	助手
1. 初期宇宙進化論	佐藤 勝彦	向山信治
	須藤 靖	樽家 篤史
	柳田 勉	井澤 健一
2. 銀河進化理論	野本 憲一	鈴木 知治
3. 可視光近赤外観測	吉井 譲	峰崎 岳夫
4. サブミリ波観測	山本 智	岡 朋治
5. 暗黒物質観測	蓑輪 眞	井上 慶純
6. 銀河と宇宙構造の研究	岡村 定矩	嶋作 一大
7. 気球観測による反物質 探査，衛星による X 線・ γ 線観測	牧島一夫	国分 紀秀
	山本 明	佐貫 智行

(1) 学振外国人招聘受託研究員も含む。

2 シンポジウム・研究会

2.1 第4回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会

日時：8月22日(月)(午後)－8月24日(水)(午前)

場所：国民休暇村 鹿沢高原 (群馬県吾妻郡嬭恋村鹿沢温泉) <http://www.qkamura.or.jp/kazawa/>

プログラム

8月22日(月)

16:15 - 18:00 afternoon session I (座長 茂山)

佐藤勝彦 Opening (5分)

藤田 裕 ワイベル不安定性による銀河、銀河団磁場の形成 (40分)

田中 賢幸 Spiderman was there - the spectroscopically confirmed cosmic web at $z=0.83$ (20分)

矢幡 和浩 SDSS 測光銀河データを用いた銀河系内ダスト吸収量の推定 (20分)

米原 厚憲 Detectability of a supermassive black hole (20分)

18:30 - 20:00 夕食

8月23日(火)

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

松田 晋弥 BESS-Polar 実験による宇宙線反陽子流束の精密測定 (40分)

清水 雄輝 暗黒物質探索の現状 (40分)

10:20 - 10:40 休憩 10:40 - 12:40 morning session II (座長 向山)

戸谷 友則 暗黒物質ニュートラリーノの対消滅と宇宙論・宇宙物理への示唆 (40分)

安藤 真一郎 宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与 (20分)

11:40-11:50

休憩

横山 順一 モジュライ問題 (30分)

工藤 秀明 背景重力波探査 (20分)

12:40 - 13:40 lunch 13:40 - 14:40 afternoon session (座長：姫本)

吉野 裕高 Colliding black holes in higher dimensions : The close limit (20分)

向山 信治 Cosmology with Warped String Compactification (20分)

14:40 - 14:50 休憩

小林 晋平 "Strings 2005" 報告 (20分)

14:50 - 16:20 自由討論

16:20 - 16:30 休憩
16:30 - 18:00 自由討論
18:30 - 20:00 夕食

8月24日(水)

9:00 - 10:40 morning session I (座長：米原)

尾崎 仁	ティコの超新星における伴星同定の可能性 (20 分)
茂山 俊和	星の表面を光速に近い速さで通過する衝撃波の自己相似解 (20 分)
和南城 伸也	超新星爆発における r 過程元素合成 (20 分)
諏訪 雄大	巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成 (20 分)
滝脇 知也	大質量星を伝搬する磁気優勢ジェットのシミュレーション (20 分)

10:40 - 11:00 休憩

11:00 - 12:40 morning session II (座長：小林)

木下 俊一郎	ブレーンワールドにおける孤立系からの Kaluza-Klein モードとその 2 次摂動 (20 分)
平松 尚志	Numerical study of brane inflation perturbations (20 分)
仙洞田 雄一	DGP ブレーンモデルでのブラックホール解 (20 分)
中尾 憲一	裸の特異点形成過程における重力波放出 (40 分)

3 プレプリント・リスト

RESCEU-108/05

Performance of an Ultra-Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics *Y. Makida, T. Kumazawa, K. Tanaka, A. Yamamoto, T. Yoshida, S. Mizumaki, S. Kurita* IEEE Trans. Applied Superconductivity 15 (2005) 1248-1251.

RESCEU-107/05

Cosmic Ray 1H and 2H Spectra from BESS 98 *Z.D.Myers, E.S.Seo, J.Z.Wang, R.W.Alford, K.Abe, K.Anraku, Y.Asaoka, M.Fujikawa, M.Imori, T.Maeno, Y.Makida, H.Matsumoto, H.Matsunaga, J.Mitchell, T.Mitsui, A.Moiseev, M.Motoki, J.Nishimura, M.Nozaki, S.Orito, J.Ormes, T.Saeki, T.Sanuki, M.Sasaki, Y.Shikaze, T.Sonoda, R.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, I.Ueda, N.Yajima, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida and K.Yoshimura* Adv. Space Res. 35 (2005) (1)151-(1)155.

RESCEU-106/05

Performance of GRB Monitor with Astro-E2 Hard X-ray Detector (HXD-II) *Hong, S., Yamaoka, K., Terada, Y., Ohno, M., Tsutsui, A., Endo, Y., Kotoku, J., Okada, Y., Mori, M., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kokubun, M., Makishima, K. et al.* Nuovo Cim. 28C, (2005) 821-824

RESCEU-105/05

Development of the HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor onboard Astro-E2 *Yamaoka, K., Ohno, M., Terada, Y., Hong, S., Kotoku, J., Okada, Y., Tsutsui, A., Endo, Y., Abe, K., Fukazawa, Y., Hirakuri, S., Hiruta, T., Itoh, K., Itoh, T., Kamae, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kawashima, K., Kishishita, T., Kitaguchi, T., Kokubun, M., et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2765-2772

RESCEU-104/05

Preflight Calibration and Performance of the Astro-E2/HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor *Ohno, M., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., Kokubun, M., Terada, Y., et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2758-2764

RESCEU-103/05

Design and Performance of the Soft Gamma-Ray Detector for the NeXT Mission *Tajima, H., Kamae, T., Madejski, G., Mitani, T., Nakazawa, K., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Ikagawa, T., Kataoka, J., Kokubun, M., Makishima, K., Terada et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2749-2757

RESCEU-102/05

High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors *Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Negoro, H., Kotoku, J., Terada, Y. et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2052-2057

RESCEU-101/05

Evaluation of Properties of YAG (Ce) Ceramic Ccintillators *Yanagida, T., Takahashi, H., Itoh, T., Kasama, D., Enoto, T., Sato, M., Hirakuri, S., Kokubun, M., Makishima, et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 1836-1841

RESCEU-100/05

Development of a Monte Carlo Simulator for the Astro-E2 Hard X-ray Detector (HXD-II) *Terada Y., Watanabe, S., Ohno, M., Suzuki, M., Itoh, T., Takahashi, I., Sato, G., Murashima, M., Kawano, N., Uchiyama, Y., Kubo, S., Takahashi, T., Tashiro, M., Kokubun, M., Makishima, K. et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 902-909

RESCEU-99/05

Three Spectral States of the Disk X-Ray Emission of the Black-Hole Candidate 4U 1630-47 Abe, Y., Fukazawa, Y., Kubota, A., Kasama, D., & Makishima, K. Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 629-641

RESCEU-98/05

Spectral Evolution of a Luminous Compact X-Ray Source in NGC 253 with Chandra and XMM-Newton Observatories Tanaka, T., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., & Takahashi, T. Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 507-511

RESCEU-97/05

The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Ohashi, T., & Makishima, K. Astrophys. J. Suppl. 161 (2005) 185-223

RESCEU-96/05

The XMM-Newton Detection of Diffuse Inverse Compton X-Rays from Lobes of the FR II Radio Galaxy 3C 98 Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., & Hong, S. Astrophys. J. 632 (2005) 781-787

RESCEU-95/05

On the Temperature Profile of Radiatively Efficient Geometrically Thin Disks in Black Hole Binaries with the ASCA GIS Kubota, A., Ebisawa, K., Makishima, K., & Nakazawa, K. Astrophys. J. 631 (2005) 1062-1071

RESCEU-94/05

Canonical Particle Acceleration in FRI Radio Galaxies Young, A., Rudnick, L., Katz, D., DeLaney, T., Kassim, N.E., & Makishima, K. Astrophys. J. 626 (2005) 748-766

RESCEU-93/05

Morphological Classification of Galaxies Using Photometric Parameters: The Concentration Index versus the Coarseness Parameter Yamauchi, C., Ichikawa, S., Doi, M., Yasuda, N., Yagi, M., Fukugita, M., Okamura, S., Nakamura, O., Sekiguchi, M., Goto, T. Astronomical. J. 130 (2005) 1545-1557

RESCEU-92/05

The Number Density of Old Passively Evolving Galaxies at $z = 1$ in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field Yamada, T., Kodama, T., Akiyama, M., Furusawa, H., Iwata, I., Kajisawa, M., Iye, M., Ouchi, M., Sekiguchi, K., Shimasaku, K., Simpson, C., Tanaka, I., and Yoshida, M. Astrophys. J. 634 (2005) 861-878

RESCEU-91/05

The build-up of the colour-magnitude relation as a function of environment Tanaka, M., Kodama, T., Arimoto, N., Okamura, S., Umetsu, K., Shimasaku, K., Tanaka, I., and Yamada, T. M.N.R.A.S., 362, (2005) 268-288

RESCEU-90/05

Number Density of Bright Lyman-Break Galaxies at $z \sim 6$ Shimasaku, K., Ouchi, M., Furusawa, H., Yoshida, M., Kashikawa, N., and Okamura, S. Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 447-458

RESCEU-89/05

Definitive Identification of the Transition between Small- and Large-Scale Clustering for Lyman Break Galaxies Ouchi, M., Hamana, T., Shimasaku, K., Yamada, T., Akiyama, M., Kashikawa, N., Yoshida, M., Aoki, K., Iye, M., Saito, T., Sasaki, T., Simpson, C., and Yoshida, M. Astrophys. J. 635 (2005) L117-L120

RESCEU-88/05

Spectroscopy of i -Dropout Galaxies with an NB921-Band Depression in the Subaru Deep Field Nagao, T., Kashikawa, N., Malkan, M. A., Murayama, T., Taniguchi, Y., Shimasaku, K., Motohara, K., Ajiki, M., Shioya, Y., Ohta, K., Okamura, S., and Iye, M. Astrophys. J. 634 (2005) 142-148

RESCEU-87/05

Large-Scale Filamentary Structure around the Protocluster at Redshift $z = 3.1$ *Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Tamura, H., Yamauchi, R., Murayama, T., Nagao, T., Ohta, K., Okamura, S., Ouchi, M., and 3 coauthors including K. Shimasaku* *Astrophys. J.* 634 (2005) L125-L128

RESCEU-86/05

Detection of Intracuster Planetary Nebulae in the Coma Cluster *Gerhard, O., Arnaboldi, M., Freeman, K. C., Kashikawa, N., Okamura, S., and Yasuda, N.* *Astrophys. J.* 621 (2005) L93-L96

RESCEU-85/05

Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies *Eisenstein, D. J. et al. (48 authors including K. Shimasaku)* *Astrophys. J.* 633 (2005) 560-574

RESCEU-84/05

Rotational Spectra of the Deuterated Carbon Chain Molecules: C_3D , C_4D , C_3HD , and C_4HD *E. Kim and S. Yamamoto* *J. Mol. Spectrosc.*, 233, 93-97 (2005)

RESCEU-83/05

Atomic Carbon in the Southern Milky Way *T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, and S. Yamamoto* *Astrophys. J.* 623 (2005) 889-896

RESCEU-82/05

GRB 050421: NIR observations. *Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L., and Yoshii, Y.* GRB Coordinates Network, Circular Service 3313 (2005)

RESCEU-81/05

GRB 050416: Optical/NIR observations. *Price, P. A., Minezaki, T., Cowie, L., and Yoshii, Y.* GRB Coordinates Network, Circular Service 3312 (2005)

RESCEU-80/05

Numerical Galaxy Catalog. I. A Semianalytic Model of Galaxy Formation with N-Body Simulations *Nagashima, M., Yahagi, H., Enoki, M., Yoshii, Y., and Gouda, N.* *Astrophys. J.* 634 (2005) 26-50

RESCEU-79/05

Subaru Super Deep Field with Adaptive Optics. I. Observations and First Implications *Minowa, Y., Kobayashi, N., Yoshii, Y., Totani, T., Maihara, T., Iwamuro, F., Takami, H., Takato, N., Hayano, Y., Terada, H., Oya, S., Iye, M., and Tokunaga, A. T.* *Astrophys. J.* 629 (2005) 29-44

RESCEU-78/05

O I Line Emission in the Quasar PG 1116+215 *Matsuoka, Y., Oyabu, S., Tsuzuki, Y., Kawara, K., and Yoshii, Y.* *Publ. Astr. Soc. Japan* 57 (2005) 563-568

RESCEU-77/05

Afterglows, Redshifts, and Properties of Swift Gamma-Ray Bursts *Berger, E. et al.* *Astrophys. J.* 634 (2005) 501-508

RESCEU-76/05

First Enrichment of r-Process Elements in Our Galaxy *Ishimaru, Y., Wanajo, S., Aoki, W., Ryan, S. G., and Prantzos, N.* *Nuclear Physics A* 758 (2005) 603

RESCEU-75/05

The r-Process in Prompt Explosions from Collapsing O-Ne-Mg Cores *Wanajo, S., Itoh, N., Nomoto, K., Ishimaru, Y., and Beers, T. C.* *Nuclear Physics A* 758 (2005) 615

RESCEU-74/05

Production of the Light r-Process Nuclei in Neutrino-driven Winds *Tomizawa, N., Wanajo, S., Asahara, R., Itoh, N., and Nozawa, S.* *Nuclear Physics A* 758 (2005) 667

RESCEU-73/05

The r-Process in Supernovae with New Microscopic Mass Formulae *Wanajo, S., Itoh, N., Goriely, S., Samyn, M., and Ishimaru, Y.* *Nuclear Physics A* 758 (2005) 671

RESCEU-72/05

Si Isotopic Ratios in Supernovae for Presolar Grains *Yoshida, T., Umeda, H., and Nomoto, K.* *Astrophys. J.* 631 (2005) 1039-1050

RESCEU-71/05

Precursors and Main Bursts of Gamma-Ray Bursts in a Hypernova Scenario *Umeda, H., Tominaga, N., Maeda, K., and Nomoto, K.* *Astrophys. J.* 633 (2005) L17-L20

RESCEU-70/05

Variations in the Abundance Pattern of Extremely Metal-Poor Stars and Nucleosynthesis in Population III Supernovae *Umeda, H., and Nomoto, K.* *Astrophys. J.* 619 (2005) 427-445

RESCEU-69/05

The Unique Type Ib Supernova 2005bf: A WN Star Explosion Model for Peculiar Light Curves and Spectra *Tominaga, N., Tanaka, M., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Deng, J., Maeda, K., Umeda, H., Modjaz, M., Hicken, M., Challis, P., Kirshner, R. P., Wood-Vasey, W. M., Blake, C. H., Bloom, J. S., Skrutskie, M. F., Szentgyorgyi, A., Falco, E. E., Inada, N., Minezaki, T., Yoshii, Y., Kawabata, K., Iye, M., Anupama, G. C., Sahu, D. K., and Prabhu, T. P.* *Astrophys. J.* 633 (2005) L97-L100

RESCEU-68/05

Repeated injections of energy in the first 600ms of the giant flare of SGR1806 - 20 *Terasawa, T., Tanaka, Y. T., Takei, Y., Kawai, N., Yoshida, A., Nomoto, K., Yoshikawa, I., Saito, Y., Kasaba, Y., Takashima, T., Mukai, T., Noda, H., Murakami, T., Watanabe, K., Muraki, Y., Yokoyama, T., and Hoshino, M.* *Nature* 434 (2005) 1110-1111

RESCEU-67/05

Nucleosynthesis in Hypernovae and Population III Supernovae *Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., Ohkubo, T., and Deng, J.* *Nuclear Physics A* 758 (2005) 263-271

RESCEU-66/05

Progenitors of Type Ia Supernovae: Circumstellar Interaction, Rotation, and Steady Hydrogen Burning *Nomoto, K., Suzuki, T., Deng, J., Uenishi, T., and Hachisu, I.* in ASP Conf. Ser. 342: 1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses, ed. M. Turatto, et al. (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific) (2005) 105-114

RESCEU-65/05

Nucleosynthesis in Black-Hole-Forming Supernovae *Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H., Tominaga, N., Ohkubo, T., Deng, J., and Mazzali, P. A.* *IAU Colloquium 192: Cosmic Explosions: On the 10th Anniversary of SN1993J*, ed. J. M. Marcaide and K. W. Weiler (Berlin: Springer) (2005) 287-296

RESCEU-64/05

Hypernovae and Gamma-Ray Bursts *Nomoto, K., Maeda, K., Tominaga, N., Ohkubo, T., Deng, J., and Mazzali, P. A.* *ApSS* 298 (2005) 81-86

RESCEU-63/05

An Asymmetric Energetic Type Ic Supernova Viewed Off-Axis, and a Link to Gamma Ray Bursts *Mazzali, P. A., Kawabata, K. S., Maeda, K., Nomoto, K., Filippenko, A. V., Ramirez-Ruiz, E., Benetti, S., Pian, E., Deng, J., Tominaga, N., Ohyama, Y., Iye, M., Foley, R. J., Matheson, T., Wang, L., and Gal-Yam, A.* *Science* 308 (2005) 1284-1287

RESCEU-62/05

High-velocity features in the spectra of the Type Ia supernova SN 1999ee: a property of the explosion or evidence of circumstellar interaction? *Mazzali, P. A., Benetti, S., Stehle, M., Branch, D., Deng, J., Maeda, K., Nomoto, K., and Hamuy, M.* *MNRAS* 357 (2005) 200-206

RESCEU-61/05

Early and late time VLT spectroscopy of SN 2001el - progenitor constraints for a type Ia supernova *Mattila, S., Lundqvist, P., Sollerman, J., Kozma, C., Baron, E., Fransson, C., Leibundgut, B., and Nomoto, K.* *Astronomy and Astrophysics* 443 (2005) 649-662

RESCEU-60/05

p-Process Nucleosynthesis in the Carbon Deflagration Model for Type Ia Supernovae *Kusakabe, M., Iwamoto, N., and Nomoto, K.* Nuclear Physics A 758 (2005) 459-462

RESCEU-59/05

The First Chemical Enrichment in the Universe and the Formation of Hyper Metal-Poor Stars *Iwamoto, N., Umeda, H., Tominaga, N., Nomoto, K., and Maeda, K.* Science 309 (2005) 451-453

RESCEU-58/05

3D Signatures of off-center Delayed-Detonation Models *Hoeflich, P., Baade, D., Fesen, R., Gerardy, C., Kawabata, K., Khokhlov, A., Maeda, K., Motohara, K., Nomoto, K., Patat, F., Tominaga, N., Wang, L., and Wheeler, J. C.* American Astronomical Society Meeting 206 27 (2005) 07

RESCEU-57/05

Nucleosynthetic signatures of the first stars *Frebel, A., Aoki, W., Christlieb, N., Ando, H., Asplund, M., Barklem, P. S., Beers, T. C., Eriksson, K., Fechner, C., Fujimoto, M. Y., Honda, S., Kajino, T., Minezaki, T., Nomoto, K., Norris, J. E., Ryan, S. G., Takada-Hidai, M., Tsangarides, S., and Yoshii, Y.* Nature 434 (2005) 871-873

RESCEU-56/05

On the Light Curve and Spectrum of SN 2003dh Separated from the Optical Afterglow of GRB 030329 *Deng, J., Tominaga, N., Mazzali, P. A., Maeda, K., and Nomoto, K.* Astrophys. J. 624 (2005) 898-905

RESCEU-55/05

Supernova 2005lz in UGC 1666 *Deng, J., Kawabata, K. S., Pian, E., Mazzali, P. A., and Nomoto, K.* Central Bureau Electronic Telegrams, ed. D. W. E. Green, 337 (2005) 1

RESCEU-54/05

Supernovae 2005ma and 2005mc *Deng, J., Kawabata, K. S., Hattori, T., Pian, E., Mazzali, P. A., and Nomoto, K.* Central Bureau Electronic Telegrams, ed. D. W. E. Green, 334 (2005) 1

RESCEU-53/05

The Peculiar Type Ib Supernova SN 2005bf: Explosion of a Massive He Star with a Thin Hydrogen Envelope? *Anupama, G. C., Sahu, D. K., Deng, J., Nomoto, K., Tominaga, N., Tanaka, M., Mazzali, P. A., and Prabhu, T. P.* Astrophys. J. 631 (2005) L125-L128

RESCEU-52/05

Topology Analysis of the Sloan Digital Sky Survey: I. Scale and Luminosity Dependences *Changbom Park, Yun-Young Choi, Michael Vogeley, J. Richard Gott III, Juhan Kim, Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Myeong-Gu Park, Yasushi Suto, and David H. Weinberg* Astrophys. J. 633 (2005) 11-22

RESCEU-51/05

Discovery of multiply imaged galaxies behind the cluster and lensed quasar SDSS J1004+4112 *Keren Sharon et al.* Astrophys. J. 629 (2005) L73-L76

RESCEU-50/05

Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses *Ando et al. (the TAMA collaboration)* Phys Rev. D 71 (2005) 082002

RESCEU-49/05

On non-uniform smeared black branes *Hideaki Kudoh and Umpei Miyamoto* Class.Quant.Grav. (2005) 3853-3874

RESCEU-48/05

PPPM and TreePM Methods on GRAPE Systems for Cosmological N-Body Simulations *Kohji Yoshikawa and Toshiyuki Fukushima* Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 849-860

RESCEU-47/05

Heavy Element Production in Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis *S. Matsuura, S. Fujimoto, S. Nishimura, M. Hashimoto, K. Sato:* Phys Rev. D 72 (2005) 123505

RESCEU-46/05

R-Process Nucleosynthesis in MHD Explosions of Core-Collapse Supernovae *Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato* astro-ph/0504100

RESCEU-45/05

North-South Neutrino Asymmetry in Strongly Magnetized and Rotating Stellar Cores *Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato* Astrophys. J. 618 (2005) 474

RESCEU-44/05

Kaluza-Klein bubble and celestial sphere in inflationary universe *T. Shiromizu, S. Tomizawa, Y. Uchida and S. Mukohyama* Gen. Rel. Grav. 37 (2005) 1823

RESCEU-43/05

anti-D-brane as dark matter in warped string compactification *S. Mukohyama* Phys Rev. D 72 (2005) 061901

RESCEU-42/05

511-keV gamma ray from moduli decay in the galactic bulge *M. Kawasaki and T. Yanagida* Phys Rev. Lett. B624 (2005) 162

RESCEU-41/05

Search for Cosmic-Ray Antideuterons *H. Fuke et al.,* Phys Rev. Lett. 95 (2005) 081101

RESCEU-40/05

Precise Measurements of the Cosmic Ray Antiproton Spectrum with BESS including the Effect of Solar Modulation. *J. W. Mitchell et al.,* Adv. Space Res. 35 (2005) (1) 135 - (1) 141

RESCEU-39/05

Density fluctuations of an effectively single field inflation in a multi-field configuration *Masahide Yamaguchi and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-38/05

Detecting dark energy in long baseline neutrino oscillations *Pei-Hong Gu, Xiao-Jun Bi, Bo Feng, Bing-Lin Young and Xinmin Zhang*

RESCEU-37/05

Detecting a gravitational-wave background with next-generation space interferometers *Hideaki Kudoh, Atsushi Taruya, Yoshiaki Himemoto and Takashi Hiramatsu*

RESCEU-36/05

Observing Dark Energy Dynamics with Supernova, Microwave Background and Galaxy Clustering *Jun-Qing Xia, Gong-Bo Zhao, Bo Feng, Hong Li, Xinmin Zhang*

RESCEU-35/05

Hiding cosmic strings in supergravity D-term inflation *Osamu Seto and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-34/05

Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer II: Perturbative reconstruction of a low-frequency skymap *Atsushi Taruya and Hideaki Kudoh* Phys.Rev.D 72 (2005) 104015

RESCEU-33/05

The SUBARU Deep Field Project: Lymanalpha Emitters at a Redshift of 6.6 *Taniguchi, Y., Ajiki, M., Nagao, T., Shioya, Y., Murayama, T., Kashikawa, N., Kodaira, K., Kaifu, N., Ando, H., Karoji, H., and 30 coauthors* Publ. Astr. Soc. Japan, 57, (2005) 165-182

RESCEU-32/05

The Third Data Release of the Sloan Digital Sky Survey *Abazajian, K., Adelman-McCarthy, J. K., Agueros, M. A., Allam, Sahar S., Anderson, Kurt S. J., Anderson, Scott F., Annis, J., Bahcall, Neta A., Baldry, Ivan K., Bastian, S., and 144 coauthors* A.J., 129, 1755-1759.

RESCEU-31/05

Detection of Intracuster Planetary Nebulae in the Coma Cluster *Gerhard, O., Arnaboldi, M., Freeman, K. C., Kashikawa, N., Okamura, S., Yasuda, N.* Ap.J., 621, L93-L96.

RESCEU-30/05

Discovery of a large-scale clumpy structure around the Lynx supercluster at $z = 1.27$ *Nakata, F., Kodama, T., Shimasaku, K., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Okamura, S., and 5 coauthors* M.N.R.A.S., 357, (2005) 1357-1362

RESCEU-29/05

Detection of Neutrinos from Supernovae in Nearby Galaxies *Shin'ichiro Ando, John F. Beacom, and Hasan Yüksel*

RESCEU-28/05

Revealing the Supernova–Gamma-Ray Burst Connection with TeV Neutrinos *Shin'ichiro Ando and John F. Beacom* Phys. Rev. Lett. 95, 061103 (2005)

RESCEU-27/05

Can Dark Matter Annihilation Dominate the Extragalactic Gamma-Ray Background? *Shin'ichiro Ando* Phys. Rev. Lett. 94, 171303 (2005)

RESCEU-26/05

Fourier phase analysis of SDSS galaxies *Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Yasushi Suto, Changbom Park, Alexander S. Szalay, and Jon Brinkmann*

RESCEU-25/05

An Analytic Model for the Axis-Ratio Distribution of Dark Matter Halos from the Primordial Gaussian Density Field *Jounghun Lee, Yipeng Jing and Yasushi Suto*

RESCEU-24/05

Soft X-ray Transmission Spectroscopy of Warm/Hot Intergalactic Medium: Mock Observation of Gamma-Ray Burst X-ray Afterglow *Hajime Kawahara, Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Nobuyuki Kawai, Kazuhisa Mitsuda, Takaya Ohashi, and Noriko Y. Yamasaki*

RESCEU-23/05

The luminosity and color dependence of the galaxy correlation function; *Idit Zehavi, Zheng Zheng, David H. Weinberg, Joshu A. Frieman, Andreas A. Berlind, Michael R. Blanton, Roman Soccimarro, Ravi K. Sheth, Michael A. Strauss, Issha Kayo, Yasushi Suto, M. Fukugita, O. Nakamura, N.A. Bahcall, J. Brinkmann, J.E. Gunn, G.S. Hennessy, Z. Ivezić, G.R. Knapp, J. Loveday, A. Meiksin, D.J. Schlegel, D.P. Schneider, I. Szapudi, M. Tegmark, M.S. Vogeley, D.G. York (SDSS Collaboration)*

RESCEU-22/05

Panoramic Views of Cluster-Scale Assembly Provided by Subaru Wide-Field Imaging *Tadayuki Kodama, Masayuki Tanaka, Hideki Yahagi, Masahiro Nagashima, Ichi Tanaka, Nobuo Arimoto, Toshifumi Futamase, Masanori Iye, Yoshikazu Karasawa, Nobunari Kashikawa, Wataru Kawasaki, Tetsu Kitayama, Hideo Matsuhara, Fumiaki Nakata, Takaya Ohashi, Kouji Ohta, Takashi Okamoto, Sadanori Okamura, Kazuhiro Shimasaku, Yasushi Suto, Naoyuki Tamura, Keiichi Umetsu and Toru Yamada* Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 309-323

RESCEU-21/05

Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales *Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida and Yasushi Suto* PRD 71 064030

RESCEU-20/05

Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b *Norio Narita, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Christopher J. Leigh, Bun'ei Sato, Motohide Tamura, and Toru Yamada* Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) 471-480

RESCEU-19/05

Discovery of a Fifth Image of the Large Separation Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1004+4112 *Naohisa Inada, Masamune Oguri, et al.* Publ. Astr. Soc. Japan 57 (2005) L7-L10

RESCEU-18/05

Discovery of Two Gravitationally Lensed Quasars with Image Separations of 3'' from the Sloan Digital Sky Survey *Masamune Oguri, et al.* ApJ, 622, 106-115 (2005)

RESCEU-17/05

Large Scale Clustering of Sloan Digital Sky Survey Quasars: Impact of the Baryon Density and the Cosmological Constant *Kazuhiro Yahata, et al.*

RESCEU-16/05

Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System *Joshua N. Winn, Robert W. Noyes, Matthew J. Holman, David Charbonneau, Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, Norio Narita, Edwin L. Turner, John A. Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, Steven S. Vogt* Astrophysical. J. 631 (2005) 1215-1226

RESCEU-15/05

Can oscillating scalar fields decay into particles with a large thermal mass? *Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-14/05

Probing the Era of Galaxy Formation by Subaru Telescope *Okamura, S.* Proc. 19th Nishinomiya-Yukawa Memorial Symp. on Origins

RESCEU-13/05

The Discovery of Primeval Large-Scale Structures with Forming Clusters at Redshift 6 *Ouchi, M., Shimasaku, Kazuhiro., Akiyama, M., Sekiguchi, K., Furusawa, H., Okamura, S., Kashikawa, N., Iye, M., Kodama, T., Saito, T., and 7 coauthors* ApJ, 620, L1-L4.

RESCEU-12/05

Self-Similar Evolution of Relativistic Shock Waves Emerging from Plane-Parallel Atmospheres *Kazunori Nakayama and Toshikazu Shigeyama* The Astrophysical Journal 627, 310

RESCEU-11/05

Excited D-branes and Supergravity Solutions *Tsuguhiko Asakawa, Shinpei Kobayashi and So Matsura*

RESCEU-10/05

Dynamics of Gravity in a Higgs Phase *Nima Arkani-Hamed, Hsin-Chia Cheng, Markus A. Luty, Shinji Mukohyama, Toby Wiseman*

RESCEU-9/05

Warped Flux Compactification and Brane Gravity *Shinji Mukohyama, Yuuiti Sendouda, Hiroyuki Yoshiguchi and Shunichiro Kinoshita*

RESCEU-8/05

$\bar{D}$ -brane in Warped Compactification as Dark Matter *Shinji Mukohyama*

RESCEU-7/05

Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld *Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda, and Katsuhiko Sato*

RESCEU-6/05

Gravitational Wave Background from Neutrino-Driven Gamma-Ray Bursts *Takashi Hiramatsu, Kei Kotake, Hideaki Kudoh and Atsushi Taruya* submitted to MNRAS

RESCEU-5/05

Constraining Cosmological Parameters by the Cosmic Inversion Method *Noriyuki Kogo, Misao Sasaki, and Jun'ichi Yokoyama* Progress of Theoretical Physics

RESCEU-4/05

Neutralino dark matter from heavy gravitino decay *Kazunori Kohri, Masahiro Yamaguchi, and Jun'ichi Yokoyama*

RESCEU-3/05

Antonov problem and quasi-equilibrium states in N-body system *Atsushi Taruya and Masa-aki Sakagami* MNRAS, submitted

RESCEU-2/05

Black Holes in the Ghost Condensate *Shinji Mukohyama*

RESCEU-1/05

Dynamical simulation of nuclear "pasta": soft condensed matter in dense stars *Gentaro Watanabe and Hidetaka Sonoda*