

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

# Annual Report

## 2001

平成13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

<b>I</b>	<b>プロジェクト別 2001 年度 研究活動報告</b>	<b>iv</b>
<b>1</b>	<b>初期宇宙進化論</b>	<b>1</b>
1.1	初期宇宙論・相対論	1
1.2	観測的宇宙論	4
1.3	超新星・高密度天体	7
1.4	高エネルギー現象論	8
1.5	その他	9
<b>2</b>	<b>銀河進化理論</b>	<b>16</b>
2.1	銀河初期における重元素合成サイクル	16
2.2	銀河初期における星形成・超新星爆発サイクルと銀河の構造形成	17
2.3	極超新星	17
<b>3</b>	<b>可視光近赤外観測</b>	<b>20</b>
3.1	近赤外多波長撮像による活動銀河核の変光の研究	20
3.2	MAGNUM 望遠鏡による超新星 SN2002ap の観測	20
3.3	MAGNUM 広視野 CCD カメラによる重力レンズ効果を用いた深宇宙探査	21
3.4	すばるディープフィールドにおける遠方赤外の解析	21
3.5	ハローの非一様の化学進化モデルと奇数元素の起源	21
3.6	高赤方偏移クエーサーの近赤外分光	22
3.7	階層的銀河形成モデルを用いたすばるディープフィールドでの銀河計数の解析	22
3.8	AMR を用いた $N$ 体計算コードの並列化	22
3.9	数値銀河カタログの作成	23
<b>4</b>	<b>サブミリ波観測</b>	<b>25</b>
4.1	観測装置の開発・改良	25
4.2	星間物質の観測的研究	27
4.3	実験室分子分光	29
<b>5</b>	<b>暗黒物質観測</b>	<b>31</b>
5.1	ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験	31
5.2	有機単結晶シンチレーターを用いた暗黒物質検出器の開発	31
5.3	アクシオンヘリオスコープ実験	33
<b>6</b>	<b>銀河と宇宙構造の研究</b>	<b>35</b>
6.1	銀河・銀河団の観測的研究	35
<b>7</b>	<b>気球観測による反物質探査, 衛生による X 線・<math>\gamma</math> 線観測</b>	<b>42</b>
7.1	反物質探査 (BESS 実験)	42
7.1.1	(1)BESS-TeV 実験	42
7.1.2	(2) 宇宙線反陽子流束の精密測定	42
7.2	X 線、 $\gamma$ 線観測	43
7.2.1	太陽と星のフレアの研究	43
7.2.2	コンパクト天体の観測的研究	44
7.2.3	星間空間および銀河間空間における高エネルギー現象	45
7.2.4	ASTRO-E2 衛星に向けた硬 X 線検出器 (HXD-II) の製作	46
7.2.5	将来に向けての技術開発	46

II	2001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	50
1	教官, 職員, および研究員	52
2	プレプリント・リスト	53

I

# プロジェクト別 2001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—— (川崎・佐藤・須藤・柳田・白水・樽家・井澤)

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。当教室の宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤助教授、樽家助手、および十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「天体核素粒子物理」の3つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から150億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの3次元の空間と1次元の時間を持った宇宙がいつ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、素粒子の宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当研究室では、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やAdS/CFT対応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成像を明ら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点として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子の宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎの

スペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。このテーマに関して現在我々が具体的に取り組んでいる課題として、大規模数値シミュレーションを用いた銀河・銀河団の形成とその空間分布、銀河団のX線光度関数とその進化、重力レンズ現象と高赤方偏移天体、赤方偏移空間での銀河分布2体相関関数、銀河のハッブル系列の起源、などがあげられる。さらに最近は、太陽系外惑星探査の研究も開始しつつある。

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合体しながら核子物質へ移行するのか、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。1987年、大マゼラン星雲中に起こった超新星1987Aからのニュートリノバーストが神岡の観測装置で観測された。これはニュートリノ天文学の始まりを告げる歴史的出来事であった。我々の研究室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 $r$ -プロセス元素合成の研究なども進めている。又、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開始している。

## 1.1 初期宇宙論・相対論

### カオティックインフレーションモデル

超重力理論におけるインフレーションのなかでそのモデル構築がもっとも困難であるカオティックインフレーション・モデルの研究を行った。カオティックインフレーションはインフレーションモデルの中でももっとも単純でインフラトン場の初期値に関する調整が全く必要がない、つまり、他のインフレーションモデルが多少なりとも持っている初期値問題が無いという非常に魅力的なモデルである。しかし、超重力理論においては、一般に、スカラー場のポテンシャルがプランクスケールを越えると急激に立ち上がり、インフレーションを起こすのに必要とされる平坦なポテンシャルが実現できない。そこで、理論に新たな対称性を導入し、プランクスケールを越えてインフラトン場のポテンシャルが平坦になるようにし、カオティックインフレーションを実現するモデルの構築に成功した。さらに、このモデルに関してインフレーション後の再加熱過程を調べ、再加熱

温度を十分に低くすることができ、宇宙論にとって有害なグラビティーノ（重力を媒介する粒子グラビトンの超対称性のもとで対をなす粒子）の生成が抑制されること、インフラトンが右巻きニュートリノに崩壊することによって宇宙の物質・反物質の非対称性の生成（バリオン数生成）が可能であることを示した [1]。

## 量子異常による超対称性の破れるモデルにおける真空の不安定性

量子異常を通じて超対称性が破れるモデルにおいて、ニュートリノの質量がシーソー機構で説明できるとすると、ニュートリノの質量項に対応するスーパーポテンシャルによって真の真空が大きな負の宇宙項を持ってしまおうという問題が生じる。そのため、我々はほとんど宇宙項がゼロの偽真空に住んでいなければならない。この偽真空はトンネル効果によって真の真空へと遷移する。その遷移確率は温度ゼロでは極めて小さいが初期宇宙の高温状態では有限温度の効果で遷移が速く起きてしまう恐れがある。そこで、遷移確率を定量的に評価し、偽真空の寿命が宇宙年齢より十分長く、したがって、このモデルが宇宙論的に安全であることを示した [2]。

## 初期宇宙における非熱的 ${}^6\text{Li}$ 生成

観測される  ${}^6\text{Li}$  の存在量は標準ビッグバン元素合成で予言される生成量より 2 桁も大きいものであり、その起源の理論モデルの構築はホットな研究課題となっている。我々はビッグバン元素合成直後の時代に超重力理論で予言されるグラヴィティーノ等の重い粒子の崩壊によって引き起こされる効果について調べた。崩壊で作られた高エネルギー光子が  ${}^4\text{He}$  に衝突して壊し、 ${}^3\text{He}$  もしくは三重水素を生成する。それらが  ${}^4\text{He}$  に衝突すると  ${}^6\text{Li}$  を生成する。我々は  ${}^6\text{Li}$  の観測量は初期宇宙のこうした非熱的生成が起源である可能性を示した。同時に  ${}^6\text{Li}$  の観測量が初期宇宙のインフレーション後の再加熱温度の制限を与える可能性についても議論した [3]。

## D-項インフレーションでのアフレック・ダインの揺らぎ

超対称性理論においてはスカラー場のポテンシャルで平坦な方向が存在することが知られていて、インフレーション中に平坦な方向に対応したスカラー場（アフレック・ダイン場）の期待値が大きくなり、これと粒子・反粒子の対称性を破るような反応が組合わさって宇宙にバリオン数が作られる。これがアフレック・ダイン機構と呼ばれるバリオン生成のモデルでインフレーション宇宙において非常に効率よくバリオン数を作ることができる。インフレーション

モデルとして D-項インフレーションを考えた場合、インフレーション中にアフレック・ダイン場が大きな揺らぎを持つ可能性がある。そこで、詳細な計算を行い断熱揺らぎに対する影響は小さいが、バリオンがもつ等曲率揺らぎの影響を考えることによってモデルに制限が付けられることを示した [4]。

## クインテッセンスモデルにおける宇宙背景輻射の非等方性

現在の宇宙の宇宙密度の大部分担っていると考えられるダークエネルギーを説明することができるアイデアの 1 つはゆっくり変動するスカラー場のポテンシャルエネルギーが宇宙の密度に大きく寄与しているというものである。このアイデアを実現するスカラー場（クインテッセンス）のモデルのうちポテンシャルが三角関数型のものについてそれが作る宇宙背景輻射の非等方性を調べ観測からモデルに対して厳しい制限が得られることを示した [5]。

## ブラックホール無毛仮説と時空の漸近構造 [6, 10]

ブラックホールはその形成過程でほとんどの情報を失ってしまい、最終的に定常状態に落ち着くと、質量、角運動量、電荷の 3 つの物理量で特徴づけられると考えられている。これをブラックホール無毛仮説とよぶ。この仮説は物質として高々電磁場しか存在しない場合、漸近的に平坦でかつ定常時空を仮定すると無毛定理として証明される。しかし、これらの仮定をはずした場合には無毛仮説が成立するのかが自明ではなかった。そこで、漸近的平坦性の仮定を置かずブラックホール無毛仮説を調べてみた。特に弦理論の分野で登場し、さらに最近の観測からもその存在が確かめられつつある宇宙項を導入し、漸近的に de Sitter、および反 de Sitter 時空になる場合を考察してみた。

まず、第一段階として物質はスカラー場と電磁場を扱った。正の宇宙項が存在する系では、質量を持たないスカラー場や、凸型ポテンシャルを持つ場合では無毛定理の証明に成功した。一方、二重井戸型ポテンシャルのような場合では実際に数値計算を用いて非自明なブラックホール解を構築してみせた。しかし、カタストロフィー理論や線形摂動を用いた安定性の解析の結果、それらは不安定で物理的に意味のない解であることがわかった。このように de Sitter 時空に漸近する時空では安定性まで考慮して初めて無毛定理が証明できることを示した [6]。

また、漸近的に反 de Sitter 時空になる時空では、スカラー場が二重井戸型ポテンシャルを持つ場合には安定かつ非自明なブラックホール解が存在することがわかった。これは反 de Sitter 時空では無毛仮説が成立しないことを意味している。そこで、超重力理論や最近注目されているブレイン宇宙論ではブラックホールはより多彩な構造を持ち得ると考え

られる [10]。

## 超弦理論におけるブラックホールと特異点 [7, 8, 9, 11, 12]

すべての相互作用や粒子を統一して記述することが超弦理論の目標であるが、また、時空特異点の問題を解決することも期待されている。一般相対性理論では、特異点定理によってある物理的な状況で時空特異点の出現が予言されており、そして、我々は宇宙検閲仮説によってそのような特異点から守られている。しかし、Kerr 解の時間的特異点のように強い意味でのこの仮説は破れていることが分かっている。そこで、超弦理論の立場からブラックホール内部存在する時空特異点や特異点の形成、その定義まで含めて議論した。

まず、超弦理論の低エネルギー有効理論を用いてブラックホール解を構成しその内部構造を探った。考察したのは Skyrme 場の系と、 $D_p$ -ブレーンの作用である Born-Infeld モデルである。その結果、Skyrme 場の系では質量インフレーションが生じ、中心に特異点が存在した [11]。Born-Infeld モデルでも、その特異性は弱められながらも曲率特異点があることが分かった [9]。また定常なブラックホール解が存在しない有効理論では裸の特異点が形成されるか、時空の漸近構造が壊れることを数学的に示した [9]。

次に超弦理論では重力崩壊する際にはそもそも特異点が形成されない可能性を調べた。実際に  $D_p$ -ブレーンの多体系では、エンハンソン半径という対称性が高くなる特別な半径が存在し、そこに  $D_p$ -ブレーンが球殻状に降着していくと考えられている。そこで、実際にその解が安定かどうかを重力の反作用も取り込んで調べた。その結果、エンハンソン半径の内側にまで落ち込んでいった  $D_p$ -ブレーンはその半径まで押し返されることを示した。つまり、最終的には時空特異点のない、球殻状の構造物ができあがると考えられる [8]。

また、一般相対性理論では時空特異点は粒子が到達できる時空の最終点として定義されるが、弦理論の立場に立ち、試験弦を用いて特異点を考察した。具体的には質量と電荷を持つ粒子が作る衝撃波面を横切る際に、弦がどれだけ量子的に励起されるのかを調べた。結果は、大きな電荷を持つ弦に対しては揺らぎが極めて大きくなって弦は衝撃波面を通過できないが、電荷が小さい場合には重力とクーロン力がお互いに打ち消し合って励起は小さいままだった。したがって弦は曲率特異点を通過できることになり、その後の時間発展の一意性など物理の根本に関わる問題に一石を投じることになった [7]。

## カオティックな初期条件から始まるニューインフレーション

ニューインフレーションは再加熱温度が、一般に低くなるという利点を持っている一方、初期条件に

微調整が必要であるという問題点がある。カオティックな初期条件から始まることによって、初期条件の微調整の問題が回避されるニューインフレーションモデルを提案した。[13]

## 超重力理論におけるダブルインフレーション

超重力理論におけるダブルインフレーションモデルを提案した。初期条件問題のないカオティックインフレーションから始まり、再加熱温度が低くなるニューインフレーションで終わるモデルである。[14] また、ニューインフレーションが始まる際に揺らぎが非常に大きくなり、原始ブラックホールが形成される可能性を議論した。[16]

## グローバルモノポールの宇宙論的進化

グローバルモノポールの宇宙論的進化を調べ、ホライズンあたりの個数が一定になるというスケールリング則に従うことを示した。ホライズンあたりの個数は、約 3 個（輻射優勢）、約 1 個（物質優勢）である。また、これらを解析的に説明するモデルを作った。[15]

## インフレーション後の前加熱期についての研究

インフレーション直後の前加熱期には、パラメータ共鳴により粒子が効率的にできることが知られている。我々は、前加熱期における密度揺らぎの進化について調べ、モデルによっては原始ブラックホールが過剰に生成されることを示した [18]。またブレーン宇宙モデルにおける前加熱期のダイナミックスの考察も行った [18]。

## 超紐理論に基づく宇宙理論での粒子生成

超紐理論において、宇宙初期の特異点を回避できる可能性が示唆されており、我々はそのように特異点のないような超紐理論のモデルで、粒子が効率的に生成されることを示した [19]。

## インフレーション宇宙論における密度揺らぎの進化

インフレーション理論において、2つのスカラー場が存在する系での密度揺らぎについて考察した [20]。特に、一般化されたアインシュタイン理論において、時空の曲率とスカラー場が非最小結合した場合について、場が 1 つの時には保存すると考えられている

曲率ゆらぎが、インフレーション中に成長し得ることを示した。また超重力理論に基づくダブルインフレーションモデルにおいても、一般に断熱揺らぎと等曲率ゆらぎの相関が大きくなることを見出した。

## ブレンワールド

最近の素粒子論の進展により我々の宇宙は高次元に漂う膜のようなものである新しい描像ブレンワールドが台頭してきた。我々は、2000年に白水・前田・佐々木によって導出したブレン上のアインシュタイン方程式のホログラフィ的な解釈について議論した [25, 26]。更に、背景時空の安定性等について調べ、一般には時空は不安定であることを示した [21, 23, 24, 88, 94]。

## TeV 重力と高次元ブラックホール

ブレンワールドに代表されるように、量子重力効果は今やプランクスケールのような手の届かないものではなく TeV スケールといった手の届くものになっている (TeV 重力)。特筆すべきは、この TeV 重力では加速器での粒子衝突でブラックホールが生成され得るのである。小さなブラックホールは近似的に高次元ブラックホールとみなしてよい。そこで、我々は漸近的平坦かつ静的なブラックホール解は高次元シュバルツシルト解に限られることを証明した [27]。

## 宇宙項と dS/CFT

最近の観測によってダークエネルギーや宇宙項の起源の問題はますます重要になってきた。そこで、簡単のために宇宙項をもつ時空において、時空の重力エネルギーが無限遠方上の場のエネルギーとの関係について理解を深めた [22]。これは、時空の古典論と無限遠方上の場との等価性 (dS/CFT 対応) をサポートするものである。また、エネルギーのスライス/ブレン依存性についても調べた [26]。

## 1.2 観測的宇宙論

### Stable clustering ansatz の検証

自己重力系はその非線型スケールの極限で、宇宙が膨張している効果を受けるのかどうかというのは、極めて基本的な宇宙論の問題であり、特に宇宙膨張が確認された 1930 年代からしばらくいろいろな研究がなされている。実はこの古い問題は、非線型領域でのダークマターの空間相関の漸近的振る舞いと密接な関係がある。良く知られている仮説は Stable clustering ansatz と呼ばれ、非線型領域の極限ではすべての粒子ペアは宇宙膨張の影響を全く受けず

に、実距離が平均的に一定値を保つというものである。この仮説を重力専用計算機 GRAPE を用いた粒子シミュレーションによって詳細に調べた結果、通常観測される程度の領域サイズ ( $100h^{-1}\text{Mpc}$ ) で平均しただけでは分散が大きく、この Stable clustering ansatz はあまり良い近似ではないことがわかった。 [28]

### 宇宙論的流体シミュレーションを用いた銀河、銀河団のバイアスモデルの検証

Press - Schechter 理論は解析的な近似理論として、銀河団に関する宇宙論的予言を行う際にひろく使われている。我々は、 $N = 128^3$  のガス粒子および同数のダークマター粒子を用いた、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションを 6 モデル行うことによって、銀河・銀河団を同定した。これらを、ダークマターハローに対する非線型確率的バイアスの解析的モデルと比較することで、このバイアスモデルの正当性と限界について議論した。 [29]

### 光円錐上でのダークハローの空間相関の半解析モデルとシミュレーションとの比較

ここ数年行ってきた、宇宙論的観測における光円錐効果の理論モデルの一つのゴールとして、スケール依存性を考慮したダークハローのバイアスモデルを構築した。これを、ハッブルボリュームシミュレーションと呼ばれる世界最大の N 体数値計算 (一辺  $3000h^{-1}\text{Mpc}$  の立方体中に 10 億個のダークマター粒子を分布させて計算) の光円錐効果を考慮した出力データと比較して、我々の半解析モデル予言の妥当性を実際に確認した。 [30]

## 2 点相関関数の準自己相似的成長

宇宙における密度場の非線形段階での成長に関し、最もよく使われているモデルは、Davis & Peebles (1977) による self-similar evolution + stable clustering ansatz である。しかし、このモデルは  $\Omega_0 = 1$  の宇宙にしか適用できない。そこで本研究では、このモデルを拡張し、 $\Omega_0 \neq 1$  の宇宙に適用できるように quasi-self-similar evolution という考え方を導入した。これは、2 点相関関数の成長を短い時間ごとに区切り、それぞれの時間内での成長は近似的に self-similar になっているという仮定に基づく。さらに、物理的な動機に基づいた「ピリアル化条件」を導入し、この条件が満たされているスケールでは stable clustering が成り立つと仮定した。これらの仮定から、強非線形領域における 2 点相関関数のふるまいを予言することができる。この予言は、 $\Omega_0 < 1$  の宇宙において N 体シミュレーションの結果とよく一致することがわかった。 [32]

## 宇宙論的 N 体数値実験における粒子の離散の効果

宇宙の大構造の形成の数値実験では粒子法が広く用いられている。しかし、一般に粒子法における粒子一つ一つは物理的な天体に対応するものではなく、例えば流体のつくる密度場をサンプリングして表現する代表点のようなものであると考えられる。このような考え方は Smoothed Particle Hydrodynamics の場合に明白であるが、無衝突系の N 体シミュレーションの場合も同様の近似に基づいている。この場合、粒子の離散性を特徴づける物理量としては粒子の個数密度  $\bar{n}$  と粒子自身のサイズの 2 つがあげられる。無衝突系の粒子のサイズとは少し奇妙な言い方も知れないが、近距離における重力のソフトニングスケール  $\epsilon$  であると考えてよい。問題とするのは粒子の平均距離  $\bar{l} \equiv \bar{n}^{-1/3}$  と  $\epsilon$  の大小関係である。Particle-Mesh 法では  $\epsilon \approx \bar{l}$  と考えられるが、さらに近距離での分解能向上を目的とする Particle-Particle - Particle-Mesh 法や Tree 法では  $\epsilon \approx \bar{l}/10$  を採用するのが普通である。これを言い換えると質量の分解能はそのまま、長さの分解能だけを 10 倍にした事になる。このような方法論がはたして正当化できるのかどうかは決して自明ではないが、そのようなスケールで非線型重力系の「正しい」振る舞いを記述する理論が存在しないため、あまり批判的な研究はされていなかった。今回、我々はダークハローの普遍的密度分布によってダークマターの空間相関を記述するという理論モデルを応用することで、この粒子の離散的效果を定量的に評価することに成功した。その結果、 $\epsilon$  以上のスケールでのシミュレーション結果が信頼できるために必要となる条件を導き出すとともに、既存のシミュレーションデータを我々の予言と比較することで、これが十分正確な条件となっていることを示した。[33]

## 非加法的熱・統計と自己重力系の熱的不安定性

自己重力多体系の問題において、恒星衝突系の長時間力学進化は、球状星団の長時間進化と密接に結び付いた問題として、これまで非常に多くの研究がなされている。とりわけこの問題では、熱・統計力学的な観点から見た安定・不安定性が、系の進化に大きく影響するため、長距離相互作用系における熱・統計物理の具体的応用例として、熱・統計物理学の分野からも注目を集めている。ところが、近年、熱・統計物理の分野では、加法的エントロピーを用いた従来の理論形式を非加法的に拡張することで、準平衡系、非平衡定常状態といった、より幅広い物理現象の記述を狙った試みが進みつつある(非加法統計と呼ぶ)。ただ、現時点においては、非加法統計の理論体系がどこまで適用可能なのか、どういう意味を持つのか、明らかになっていない。非加法統計は、その名の通り、加法性を破る長距離相互作用系の記述に適しているとされ、重力系に対する応用は、非加法統計の本質、問題の核心をつくものとして、とりわけ関心

が高い。そこで我々は、非加法統計のフレームワークを用いて、自己重力平衡系の熱的安定性を問い直す作業をはじめて行った。その結果、通常よく知られる等温分布とは異なる形状、stellar polytrope が平衡分布として記述され、熱的不安定性も違った構造を持つことがわかった。今回の解析を通して、非加法熱・統計の理論形式の無矛盾性は示されたものの、熱平衡状態に対する物理的意味については、引き続き洞察が必要である。[34, 133, 151, 153, 154, 172]

## 弱い重力レンズ統計に現れる対数正規的性質

本来、遠方銀河から届く光は、宇宙に広がる暗黒物質分布のせいで、弱いながらも重力レンズ効果を受け、歪んだイメージをつくる。そのため、銀河一つ一つに現れるこの歪みを統計的に扱うことで、直接光で見えない暗黒物質分布のクラスタリングを調べることが可能となる。近年、欧米グループで弱い重力レンズ効果を実際に検出したという報告があり、宇宙の密度パラメータを決定する新たな手段として注目されている。弱い重力レンズ効果のシグナルは、統計的には、shear、convergence と呼ばれる重力レンズ場の非ガウス性として現れ、特に、小角度スケール ( $\theta \sim 1' - 4'$ ) では強いシグナルが期待できる。しかるに、小角度では重力進化の非線形性が強く、摂動論的な取り扱いによる非ガウス性の予言は破綻してしまう。本研究では、半経験的ながら、3次元質量分布の統計性が対数正規分布になるという事実に着目、質量分布を反映する2次元重力レンズ場にも対数正規的性質が現れるのではないかと考え、convergence field に対して、種々の統計量の解析的表式を導いた。与えた解析表式を ray-tracing simulation の結果と比べ、対数正規モデルが、定量的にも高い精度で、重力レンズ場の非ガウス性を記述できることを示した。[35, 80, 81, 122, 130, 139, 150, 152, 170, 171]

## 準解析的銀河形成モデルにおけるダークハロー形成史モデルの影響

Kauffmann et al.(1993) などによって考案された準解析的銀河形成モデルは、様々なスケールでの銀河形成の諸問題へのアプローチを可能にした。しかし、このモデルは、ダークハローの形成史モデルに大きく依存する。そこで、Somerville and Kolatt(1999) のダークハロー形成史モデルを用い、様々な条件(特に様々な時間間隔)の元で、ダークハロー形成史を構築し、その平均的振舞いを理論予言と比較した。その結果、理論予言を実現するためには、従来用いられてきた時間間隔の 10 分の 1 程度の値を用いる必要があることが分かった。また、この値を用いて、ガスの冷却量を調べると、銀河団スケールでは従来より 2 倍ほど大きくなるということが分かった [111].

## 質量密度非線形ゆらぎ、およびダークハロー数密度非線形ゆらぎの確率分布関数

質量密度ゆらぎの確率分布関数は、重力多体系を特徴づける極めて基本的な統計量でありながら、その詳細はわかっていない。我々は、高分解能  $N$  体シミュレーションを用いて、1 点の確率分布関数および 2 点の確率分布関数を調べた。その結果、1 点確率分布関数、2 点確率分布関数ともに、初期密度ゆらぎパワースペクトルにあまりよらずに、対数正規分布関数が統一的な近似式になっていることを見出した [36, 112, 173]。

また、銀河や銀河団の天体形成サイトとして重要な役割を演じると考えられているダークハローの数密度ゆらぎについて、その確率分布関数を通じて現存するバイアスモデルの検証を行った。高分解能  $N$  体シミュレーションを用いて比較した結果、バイアスの確率的性質が確率分布関数に影響を及ぼし、物理的考察に基づいた現存のモデルでは完全には説明できないことを見出した [140]。これはさらに現実的なモデルの構築への足掛かりとなる。

## スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) 銀河の二体相関関数の形態依存性とバイアス

我々も計画の一員である SDSS は世界最大の銀河赤方偏移カタログを生み出しつつある。我々はこの計画の初期カタログを銀河形態に分け、二体相関関数の形態依存性を調べた。さらに、質量密度ゆらぎの二点相関関数の詳細な理論モデルとの比較から、銀河のバイアスについても調べた。その結果、いわゆる早期型銀河は晩期型銀河に比べ強くクラスタリングしており、しかもバイアスは小スケールにおいても形態毎にほぼ定数であることを見出した [146, 155]。冷たいダークマター模型の支持、および、銀河形成モデルへの強い制限となりうると考えている。序々に大きくなりつつあるカタログを用いてさらに詳細な解析を行っているところである。

## 冷たい暗黒物質宇宙における非線形重力多体系の速度分布関数

赤方偏移で観測する天体の位置は、その天体の固有速度のために実の位置からずれて見える (赤方偏移歪み)。強非線形領域において、赤方偏移歪みを取り込んだ 2 点相関関数の理論予言を行うためには、精度の良い相対特異速度統計が必要であり、相対特異速度分布関数は宇宙の大構造における重要な統計量である。過去にアインシュタイン-ドジッター宇宙の仮定と暗黒ハローの密度プロファイルが等温球であるという仮定をする簡単な場合について解析がなされていたが、我々はいろいろな宇宙モデルにおいて、シミュレーションなどから示されている現実的な密度プロファイルのみを仮定して暗黒物質の準指数関

数型速度分布関数を導出し、宇宙モデル依存性やスケール依存性を調べた。また、適当な密度バイアスを仮定することで銀河の速度分散を導出し、観測との比較を行うことで未知の速度バイアスの存在の可能性を示した。[113, 141]

## ハッブル体積シミュレーションを用いた、ダークマターハローに関するジーナス統計と非線型確率的バイアス

銀河、銀河団などの天体とその背後にあるダークマターとの間の密度分布の対応関係を表すバイアスは、観測データに基づく宇宙論研究において、理解すべき問題のひとつである。一般にバイアスは非線型で、確率的な性質をもつことが知られている。われわれは、特にバイアスが銀河団分布の位相構造へ及ぼす影響に着目し、ジーナス統計とよばれる位相的な統計指標を使って、 $N$  体シミュレーションによる銀河団スケールの質量の塊 (ダークマターハロー) 分布の位相構造を定量的に評価した。特に、今回ハッブルスケールの  $N$  体シミュレーションを使うことで、従来の有限体積にともなう統計的制限を抑えられたことは宇宙大構造のジーナスの研究において大きな進展である。結果、バイアスの確率的性質のジーナスへの影響は無視できること、また、ランダムガウス統計からのずれを摂動的に取り扱ったジーナス表式との比較から、バイアスの高次の情報が取り出せることを示した。[37, 142, 147]

## アーク統計による銀河団質量密度分布への制限

銀河団はその強い重力によって背景銀河を著しく歪める。我々は、そのような歪められた銀河 (アーク) の予想される頻度を様々な銀河団質量分布について解析的に計算し、アークの数が質量分布に対し極めて強い依存性を示すことを示した。特に、銀河団に対して接方向に歪められたアークと動径方向に歪められたアークを別々に計測することにより質量分布の情報を効果的に引き出せることを指摘した [38, 143]。また、銀河団の非球対称性や背景銀河固有の大きさと歪みがこの統計に対しどのような影響を持つかを調べた [40]。

## 重力レンズ複数像間の時間の遅れの統計

非常に遠方にある QSO はある確率で重力レンズ効果を受けて複数個の像を作る。これらの複数像間には相対的な時間の遅れ (time delay) が一般に生じる。今までの研究では、時間の遅れの効果は主にハッブル定数を求めるのに使われてきた。我々は時間の遅れの条件付確率分布を初めて解析的に定式化し、時間の遅れがレンズ天体の密度分布に強く依存し従っ

てそれらに強い制限を課すことが可能であることを指摘した [39, 115, 148, 156, 174]。

## 1.3 超新星・高密度天体

### r-process 元素合成と重力崩壊型超新星

質量数にして 200 を超えるような超重元素、特に中性子過剰の超重元素が宇宙の如何なる場所で作られているのかという問題は未だ明確な答えが出されていない。しかしながら、重力崩壊型超新星はその爆発時に於いて高エントロピー、short dynamical timescale、中性子過剰の環境を実現すると考えられており、中性子過剰の超重元素の生成場所として有望視されている。今回、更に超新星爆発時に於ける磁場の効果を考察し、磁気圧によって dynamical timescale が短くなる可能性を指摘し、中性子過剰核の生成にとって有利に働く可能性を示した。[41, 87]

### 超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の到来方向が一様分布しているように見える事実を、ボトムアップシナリオによって説明出来るか否かを、Monte Carlo 計算を用いて検証した。結論として、10nG 程度の銀河間磁場を仮定すれば deflection angle が 10 度角のオーダーにまで大きくなることを示した。現在の 100EeV 以上の宇宙線の観測数の少なさ (25 events) を考慮すれば、宇宙線の起源がたとえ超銀河平面付近に多数分布していても、観測と統計的に無矛盾であることも示された。超銀河平面との相関は、1000events 位の観測数が必要で、将来計画の TA、Auger、EUSO 計画により解明されるであろうという展望も示された。[42, 121, 135, 144]

### ガンマ線バースト背景ニュートリノ

ガンマ線バーストは、fire ball モデルを仮定すれば観測される多くの現象をうまく説明することが知られているが、どのような天体が fire ball を実現しているのかということについては、明確な答えは得られていない。又、fire ball のエネルギーについては光学的な観測から推定が出来るとしても、fire ball となる部分以外の爆発エネルギー、特に baryon にどの程度のエネルギーが分配されているのかということについては観測的な手掛かりがなく、それが候補天体ならびに爆発メカニズムをあいまいなままにしている一因となっている。今回、ガンマ線バーストに付随して放出されるニュートリノに着目し、それが現在の宇宙をどの程度満たしているのかということを観測することによって、ガンマ線バーストの平均的な爆発エネルギーが推定出来ることを示し、TITAND などでの観測可能性について議論を行った。[162]

### 「パスタ相」の形成過程

中性子星は、様々な天体現象のサイトとして極めて重要な天体であるが、それと同時に、内部は地上の実験室よりも遥かに高密度かつ中性子過剰な状況にあるため、地球上の物質とは全く異なった相を示す可能性がある。特に興味深いことに、中性子星内殻底部では、球状の原子核から一様核物質に融解していく中間の密度領域において、円柱状や板状の原子核がクーロン結晶を組んだ相、及び一様核物質に円柱状や板状の孔が空いたようなバブル状の相の存在が、各相の自由エネルギー密度の比較等から示唆されている。

これらの相は、「パスタ相」と呼ばれているが、我々は、その形成並びに崩壊過程に注目しこれを議論した。本研究においては、特に柱状と板状の核から成る相に注目し、その形成並びに崩壊のチャンネルとなり得る fission と陽子クラスタリングの摂動に対する安定性の解析を、温度ゼロの中性子星内殻物質について行った。その結果、柱状および板状核は、どちらのプロセスに対しても安定であると結論づけられ、中性子星の進化によって、パスタ相が存在する領域は、平衡状態から予想される範囲よりも広がるという示唆を得た。[43, 82, 125, 138]

### 量子分子動力学法による「パスタ相」の微視的研究

標準核密度以下の高密度天体内部物質においては、非常にエキゾチックな構造を持った核 (パスタ相) の存在が巨視的なモデル等から予言されている。我々は、上記のような核の形成プロセス並びに、これらの相の有限温度での性質の理解を将来的な目標に据えて、QMD という核の形状を仮定しない動的かつ核子レベルのミクロスコピックなモデルによる研究を着手した。第一ステップとして、実際に動的なプロセスでパスタ相が形成され得るかを調べた結果、マクروسコピックなモデルが予言するところの板状や棒状等の核から成る物質を再現することに成功すると共に、温度ゼロにおける相図を得た。我々の結果は、以前から知られていた単純な対称性を持った相のみならずそれらの相が現れる密度の間では、複雑な構造をした中間的な相の存在も示唆しており、この様な相は負のオイラー数を持った構造として特徴づけられることを見出した。また、我々のシミュレーションの結果は実際の中性子星等においてもパスタ相が存在することを示唆するものである。[44, 83, 118, 124, 126, 163, 178]

### X 線 Afterglow 中の鉄輝線と親星の質量放出

$\gamma$  線バーストの残光中に鉄輝線が観測された。この観測を説明するために、我々は、中心天体の放つ X 線残光が、親星の質量放出によって生成される SN1987A のような星周物質を照らすことにより、輝

線を説明する Mass-loss model を提唱した。中心天体の質量放出は観測的にも報告されており、Supranova model (Vietri et al. 1998) のように二段階爆発をあえて必要としないのが重要な指摘であると、我々は考えている。更に、鉄輝線と jet の opening angle の相関を観測できれば、Collapser model (Woosley 1993) と Mass-loss model の峻別ができることを示唆した。[45, 117, 132, 136, 145, 161, 177]

## 大質量自転星の重力崩壊

回転が、重力崩壊に及ぼす影響について二次元 simulation で調べた。従来は、現象論的な状態方程式を用いた計算がなされてきたが、本研究では、Shen et al (1998) らによる現実的なものにした、更に、星の初期回転は、初めて数値的に回転を伴う星の進化を計算した Heger et al. (2001) らの値に従った。得られた結果は、従来計算と定性的には consistent であった (Müller et al. 1981)。この研究は、回転により歪んだコアから放射される非対称ニュートリノが爆発のメカニズムの鍵を握っていることを示唆する研究 (Shimizu et al. 2001) の根幹を成すものである。[93]

## 超新星ニュートリノにおけるニュートリノ振動

ニュートリノ振動が超新星ニュートリノに与える影響を系統的に研究している。研究の枠組みとしては、現実的な数値モデルに基づいた初期条件 (ニュートリノスペクトル・星の構造) を用い、3世代のニュートリノ振動の数値的な解析である。また、地球の物質効果も考慮している。まず、超新星が銀河中心程度の近さで起こったならば、SuperKamiokande と SNO での観測により、太陽ニュートリノ問題の解と  $\theta_{13}$  のだいたいの大きさを決めることができることがわかった。さらに、地球効果を詳細に解析することにより、 $\Delta m_{12}^2$  を現在よりも一桁程度よい精度で決めることもわかった。[46, 47, 95, 108, 119, 137, 164]

## ニュートリノによる超新星方向の決定精度

超新星爆発が起こった場合、ニュートリノは光よりも数時間早く地球に到達する。このため、ニュートリノの情報だけから超新星爆発の方向を決定することは、光による初期相の観測を可能にするため、大変重要である。超新星爆発が、我々の銀河内で起こった場合、SuperKamiokande による観測からどの程度の精度で方向を決定できるかを Monte Carlo simulation を用いて見積もった。その結果、9 度程度で決定できることがわかった。[48, 120]

## 超新星背景ニュートリノの検出可能性

過去の全ての超新星爆発から放出されたニュートリノは、diffuse な background を形成していると考えられている。この超新星背景ニュートリノの検出可能性を、現実的なニュートリノ振動モデル、超新星モデルを仮定して考察した。更に過去の超新星の rate としては、HST などの観測に基づいたモデルを用い、検出の background となる event についても十分な考察を行なった。その結果、現在の検出器では、10 年程度の時間をかけないと検出が困難であることがわかった。[49, 127]

## 1.4 高エネルギー現象論

### 超対称性 (の破れ) に基づく統一的な素粒子模型の研究

素粒子の標準模型を越える統一的な理論の構造として期待されている超対称性とその破れに基づく素粒子模型について研究した成果について列記する。

超対称性のもとでは、重力子の超対称パートナーとして重力微子の存在が要請される。質量が  $100\text{GeV} - 1\text{TeV}$  の不安定な重力微子に主に崩壊する一般的なスカラー粒子 (モジュライ) に対して、ビッグバン元素合成の予言を壊さないためには、その質量に厳しい制限  $100\text{TeV} \leq m \leq 10^9\text{TeV}$  がつくことを示した。

単純な超対称標準模型は、実験的には小さな割合でしか起こらない過程である FCNC (Flavor-Changing Neutral Current) が非常に大きな割合で起こると予想してしまう。これを避ける模型として、一つは、真の真空において超対称性の動力学的な破れが起きるゲージ伝達模型を構成し、重力微子の質量が極めて広い範囲を実現し得ることを示した。もう一つは、超対称性を破る場と標準模型の場が高次元で異なる 4 次元部分空間に局在化している模型で、Higgs 粒子の超対称質量が現象論的に望ましい値をとるものを構築した。

現在、Greisen-Zatsepin-Kuzmin カットオフエネルギー ( $5 \times 10^{19}\text{eV}$ ) を超える超高エネルギーの宇宙線が世界の数ヶ所で独立に観測されている。これらの宇宙線は、我々の銀河内で非常に長寿命の ( $10^{10} - 10^{22}$  年) 重い粒子 (質量  $10^{13} - 10^{14}\text{GeV}$ ) が崩壊していると考えれば自然に説明出来る。そこで、超対称性の動力学的な破れの実現が可能な超対称ゲージ理論に基づいた模型を構築し、現れる複合粒子が望ましい質量と寿命をもつことを示した。

超対称大統一理論は、標準模型を越える理論として有望な候補であると考えられている。超対称な理論に特有の R 対称性をもつ大統一模型で、そのスケールが超弦理論に存在するアノーマラス U (1) ゲージ対称性の破れのスケールにより自然に導かれるとともに、クォーク・レプトンの質量や世代間の混合の構造を再現するものを構築した。

## 宇宙のインフレーションと真空の選択に関する研究

素粒子の標準模型を越える統一的な理論の構造として真空の選択の考察が必要になってくる。これは、基礎的な統一理論として、色々な場の理論をその配位として含み、その中から「真空」として特定の有効場の理論を選び出す構造が想定されうるからである。実際、統一理論の候補である超弦理論はそのような構造になっていると考えられており、その配位空間の中から現実的な標準模型の真空を選択する機構を知る必要に迫られる。

素粒子の相互作用の強さを規定するディラトン場の真空期待値に関して、R対称性不変な物質凝縮によって、宇宙定数が零のままディラトン固定を実現するモデルを構成することができた。更に、R対称性不変な位相的インフレーションモデルを構成し、再加熱温度や密度揺らぎなどの特徴を調べた。この二つのモデルを組み合わせて得られるような、インフレーションのもとでディラトンなどのモジュライが存在する状況において、そのインフレーションのスケールがゲージ理論の動力学的な起源によるものであるとする。すると、相互作用の強さや時空間の次元などについて、インフレーションによる真空の選択機構を通して理解が得られることを指摘した。

## 変形理論の観点による位相的な場の理論に関する研究

位相的な場の理論は一般共変性をもつ場の理論の一種であり、同じ一般共変性をもつ重力理論の単純なモデルとしての研究がなされている。位相的な場の理論の例として、非線形な Lie 代数に基づく非線形ゲージ理論が構成してあった。その理論と、ゲージ理論としての相互作用の変形理論との関連を明らかにすることで、その高次元への拡張を含め、位相的な場の理論の一群について一般的な構成法を明らかにすることができた。

## 宇宙定数問題に関して高次元の時空間を用いる研究

近年の天体物理的観測は、非常に小さいが零ではない宇宙定数が存在することを示唆している。そのような状況を帰結させる機構の可能性として、時間方向に進展する通常の空間のインフレーションが平らな空間を実現するように、高次元方向に進展する時空間の「インフレーション」が平らな背景時空を選択することによる微小な宇宙定数の自然な実現を考案した。そのようなモデルの構築のためには、4次元の宇宙定数を理論中の変数(積分定数)として導き出す必要がある。そのような試みとして、6次元時空間を4次元にコンパクト化して、その部分空間に物質を導入し、背景場であるゲージ場を導入することで全時空間が正則であるモデルを得ることができた。

## 1.5 その他

白水徹也助手が2002年4月1日付で、東京工業大学物理学教室助教教授に転出した。

### < 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Kawasaki, M. Yamaguchi, T. Yanagida: Natural chaotic inflation in supergravity and leptogenesis, *Physical Review D* **63** (2001) 103514-1-8.
- [2] M. Kawasaki, T. Watari and T. Yanagida: Vacuum Instability in Anomaly Mediation Models with Massive Neutrinos, *Physical Review D* **63**(2001) 083510-1-6.
- [3] M. Kawasaki, K. Kohri and T. Moroi: Radiative decay of a massive particle and the non-thermal process in primordial nucleosynthesis, *Physical Review D* **63** (2001) 103502-1-7.
- [4] M. Kawasaki and F. Takahashi: Adiabatic and isocurvature fluctuations of Affleck-Dine field in D-term inflation model, *Physics Letters B* **516** (2001) 388-394.
- [5] M. Kawasaki, T. Moroi and T. Takahashi: Cosmic Microwave Background Anisotropy with Cosine-Type Quintessence *Physical Review D* **64**(2001) 083009-1-11.
- [6] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Black hole no hair conjecture in the Einstein-Maxwell-scalar system in asymptotically de Sitter spacetime, *Physical Review D* **63** (2001) 047502-1-4.
- [7] S. K. Maeda, T. Torii and M. Narita: The excitation of a charged string passing through a shock Wave in a charged Aichelburg-Sexl spacetime, *Nuclear Physics B* **598** (2001) 115-133.
- [8] K. Maeda, M. Narita, S. Suzuki and T. Torii: Is the cosmic no hair conjecture true in the Einstein-Maxwell-dilaton system?, *International Journal of Modern Physics A* **16** (2001) 1501-1530.
- [9] T. Tamaki and T. Torii: Dyonic BIon black hole in string inspired model, *Physical Review D* **64** (2001) 024027-1-11.
- [10] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: The scalar hair on the black hole in asymptotically anti-de Sitter spacetime, *Physical Review D* **64** (2001) 044007-1-9.
- [11] T. Tamaki, K. Maeda and T. Torii: Internal structure of the Skyrme black holes, *Physical Review D* **64** (2001) 084019-1-5.
- [12] K. Maeda, T. Torii and M. Narita: The stability of the shell of D2-D6 branes in a  $N = 2$  supergravity solution, *Physical Review D* **65** (2001) 024030-1-5.
- [13] M. Yamaguchi, and J. Yokoyama: New inflation in supergravity with a chaotic initial condition, *Physical Review D* **63** (2001) 043506, 1-5.

- [14] M. Yamaguchi: Natural double inflation in supergravity; *Physical Review D* **64** (2001) 063502, 1-6.
- [15] M. Yamaguchi: Cosmological evolution of global monopoles, *Physical Review D* **64** (2001) 081301(R), 1-5.
- [16] Masahide Yamaguchi: Density fluctuations and primordial black holes formation in natural double inflation in supergravity, *Physical Review D* **64** (2001) 063503, 1-10.
- [17] S.Kasuya: Difficulty of a spinning complex scalar field to be dark energy, *Physics Letters* **B515** (2001) 121-124.
- [18] S. Tsujikawa, K. Maeda, S. Mizuno: Brane pre-heating, *Physical Review D* **63** (2001) 123511
- [19] S. Tsujikawa, H. Yajima: Massive fermion production in nonsingular superstring cosmology, *Physical Review D* **64** (2001) 023519
- [20] A. A. Starobinsky, S. Tsujikawa, J. Yokoyama: Cosmological perturbations from multi-field inflation in generalized Einstein theories, *Nuclear Physics B* **610** (2001) 383-410
- [21] T. Shiromizu, D. Ida, H. Ochiai and T. Torii, "Stability of  $AdS_p \times S^n \times S^{q-n}$  Compactifications" *Physical Review D* **64**, 084025(2001)
- [22] T. Shiromizu, D. Ida and T.Torii, "Gravitational Energy, dS/CFT Correspondence and Cosmic No-hair" *JHEP* 0111, 010(2001)
- [23] D. Ida, T. Shiromizu and H. Ochiai, "Semiclassical Instability of Brane-World:Randall-Sundrum Bubble" *Physical Review D* **65**, 023504(2002)
- [24] H.Ochiai, D.Ida and T. Shiromizu, "Quantum Creation of the Randall-Sundrum Bubble " accepted for *Progress of Theoretical Physics*(2002)[hep-th/0111070]
- [25] T. Shiromizu, T. Torii and D. Ida, "Brane World and Holography" *JHEP*03,007(2002)
- [26] A.M. Ghezelbash, D. Ida, R.B. Mann and T. Shiromizu, "Slicing and brane dependence of the (A)dS/CFT correspondence" accepted for *Physics Letters B*(2002)[hep-th/0201004]
- [27] G. W. Gibbons, D. Ida and T. Shiromizu, "Uniqueness and non-uniqueness of the static vacuum black holes in higher dimensions" accepted for *Physical Review Letters*(2002)[gr-qc/0203004]
- [28] Toshiyuki Fukushima & Yasushi Suto: The mean pairwise peculiar velocity in cosmological N-body simulation: time variation, scale dependence and stable condition; *The Astrophysical Journal (Letters)* **557**(2001) L11-L14 (astro-ph/0107011).
- [29] Kohji Yoshikawa, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, & Yasushi Suto: Nonlinear Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos in Cosmological Hydrodynamic Simulations; *The Astrophysical Journal* **558**(2001)520-534 (astro-ph/0104361).
- [30] Takashi Hamana, Naoki Yoshida, Yasushi Suto, & August E. Evrard: Clustering of dark matter halos on the light-cone: scale, time, and mass dependence of the halo biasing in the Hubble volume simulations; *The Astrophysical Journal (Letters)* **561**(2001)L143-L146 (astro-ph/0110061).
- [31] Y.P. Jing, Gerhard Börner & Yasushi Suto: Spatial correlation functions and the pairwise peculiar velocity dispersion of galaxies in the PSCz survey: implications for the galaxy biasing in cold dark matter models; *The Astrophysical Journal* **564**(2002) 15-22(astro-ph/0104023).
- [32] Tatsushi Sugino, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: Quasi-Self-Similar Evolution of the Two-Point Correlation Function: Strongly Nonlinear Regime in  $\Omega_0 < 1$  Universes; *The Astrophysical Journal* **566**1-8 (astro-ph/0110239).
- [33] Takashi Hamana, Naoki Yoshida, & Yasushi Suto: Reliability of the dark matter clustering in cosmological N-body simulation on scales below the mean separation length of particles; *The Astrophysical Journal* **568**(2002) 455-462 (astro-ph/0111158).
- [34] Atsushi Taruya & Masa-aki Sakagami: Gravitational Catastrophe and Tsallis' Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems; *Physica A* **307**(2002) 185-206 (cond-mat/0107494).
- [35] Atsushi Taruya, Masahiro Takada, Takashi Hamana, Issha Kayo & Toshifumi Futamase: Log-normal Property of Weak Lensing Fields; *The Astrophysical Journal* **571** (2002)June 1 issue, in press (astro-ph/0202090).
- [36] Issha Kayo, Atsushi Taruya, and Yasushi Suto: Probability Distribution Function of Cosmological Density Fluctuations from Gaussian Initial Condition: Comparison of One- and Two-point Log-normal Model Predictions with N-body Simulations; *The Astrophysical Journal* **561** (2001) 22-34 (astro-ph/0105218)
- [37] Chiaki Hikage, Atsushi Taruya & Yasushi Suto: Genus statistics for galaxy clusters and nonlinear biasing of dark matter halos; *The Astrophysical Journal* **556**(2001)641-652 (astro-ph/0104013)
- [38] Masamune Oguri, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: Probing the Core Structure of Dark Halos with Tangential and Radial Arc Statistics; *The Astrophysical Journal* **559** (2002) 572-583 (astro-ph/0105248).
- [39] Masamune Oguri, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, & Edwin L. Turner: Strong Gravitational Lensing Time Delay Statistics and the Density Profile of Dark Halos; *The Astrophysical Journal* **568** (2002) 488-499 (astro-ph/0112119).
- [40] Masamune Oguri: Systematic Effects on Tangential and Radial Arc Statistics: The Finite Source Size and Ellipticities of the Lens and

- Source; The Astrophysical Journal, in press (astro-ph/0203142).
- [41] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Rapid-Process Nucleosynthesis in Neutrino-Magneto-Centrifugally Driven Winds; Publications of the Astronomical Society of Japan, **53** (2001) 547.
- [42] Yoshinori Ide, Shigehiro Nagataki, Shinya Tsubaki, Hiroyuki Yoshiguchi and Katsuhiko Sato: Propagation of UHECRs from the Sources in the Super-Galactic Plane Publications of the Astronomical Society of Japan, **53** (2001) 1153.
- [43] Kei Iida, Gentaro Watanabe and Katsuhiko Sato: Formation of Nuclear “Pasta” in Cold Neutron Star Matter, Prog. Theor. Phys. 106, 551-559 (2001).
- [44] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear “Pasta”: Quantum Molecular Dynamics Approach, submitted to Phys. Rev. C Rapid Communication.
- [45] Kei Kotake and Shigehiro Nagataki: Specifying the Environments around GRB, Explaining the Fe line in the X-Ray Afterglow of GRB 000214, PASJ, 53, 579, (2001)
- [46] Keitaro Takahashi, Mariko Watanabe and Katsuhiko Sato: The Earth Effects on the supernova neutrino spectra; Phys. Lett. B **510** (2001) 189.
- [47] Keitaro Takahashi, Mariko Watanabe, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Effects of Neutrino Oscillation on the Supernova Neutrino Spectrum; Phys. Rev. D **64** (2001) 093004.
- [48] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Determining the Supernova Direction by its Neutrinos, hep-ph/0110187, Prog. Theor. Phys., in press.
- [49] Shin’ichiro Ando, Katsuhiko Sato, and Tomonori Totani: Detectability of the Supernova Relic Neutrinos and Neutrino Oscillation, astro-ph/0202450, to be published in Astropart. Phys.
- [50] K.-I. Izawa, Quintessential Brane and the Cosmological Constant, *Progress of Theoretical Physics* **105** (2001) 185-186.
- [51] S. Hayakawa and K.-I. Izawa, Warped Compactification with a Four-Brane, *Progress of Theoretical Physics* **106** (2001) 641-644.
- (会議抄録)
- [52] T. Torii, S. Tsujikawa and K. Maeda: Preheating in Higher-Curvature Inflation; The 4th RESCEU International Symposium on The Birth and Evolution of the Universe, eds. K. Sato and M. Kawasaki. (Universal Academy Press, 2001)
- [53] M. Narita, T. Torii and K. Maeda: Analytic description of singularities in non-vacuum Gowdy spacetime; The 4th RESCEU International Symposium on The Birth and Evolution of the Universe, eds. K. Sato and M. Kawasaki. (Universal Academy Press, 2001)
- [54] S. Tsujikawa, T. Torii and K. Maeda: Preheating of non-minimally coupled inflaton field; The 4th RESCEU International Symposium on The Birth and Evolution of the Universe, eds. K. Sato and M. Kawasaki. (Universal Academy Press, 2001)
- [55] M. Kawasaki: Moduli Problem and Q-balls in Gauge-Mediated SUSY Breaking Models; Proceedings of COSMO-01 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe (2001)
- [56] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Baldness of the scalar hair in asymptotically de Sitter spacetime; Proceedings of 9th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (World Scientific, to be published)
- [57] T. Tamaki and T. Torii: Black hole solutions in the Einstein-Born-Infeld-dilaton system; Proceedings of 9th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (World Scientific, to be published)
- [58] T. Tamaki, T. Torii and K. Maeda: Non-Abelian black holes in Brans-Dicke theory; Proceedings of 9th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (World Scientific, to be published)
- [59] K. Maeda, T. Torii and M. Narita: Can we avoid a strong focusing singularity by acceleration in string theory?; Proceedings of 9th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (World Scientific, to be published)
- [60] M. Narita, T. Torii and K. Maeda: Analytic description of singularities in non-vacuum Gowdy spacetime Proceedings of 9th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, (World Scientific, to be published)
- [61] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Black hole hair in asymptotically AdS spacetime; Proceedings of 16th International Conference on General Relativity and Gravitation, (World Scientific, to be published)
- [62] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Scalar hair on the black holes in the presence of cosmological constant; Proceedings of Frontier of Cosmology and Gravitation,, eds. M. Sasaki et al. (2001)
- [63] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Cosmis Censorship in String Theory; Proceedings of Frontier of Cosmology and Gravitation,, eds. Sakagami et al. (2001)
- [64] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Can we construct the enhancon configuration with D2-D6 branes shell?; Proceedings of Frontier of Cosmology and Gravitation, eds. Sakagami et al. (2001)
- [65] T. Torii, K. Maeda and M. Narita: Cosmis Censorship in String Theory; Proceedings of 10th Towa International Symposium on String Theory, eds. T. Tada. (to be published)

- [66] T. Tamaki, T. Torii, T. Harada, and U. Miyamoto: Have we already detected astrophysical symptoms of space-time noncommutativity?; The 5th RESCEU International Symposium on New Trend of Theoretical and Observational Cosmology, eds. K. Sato and M. Kawasaki. (Universal Academy Press, to be published)
- [67] M. Yamaguchi, M. Kawasaki, T. Yanagida: Natural chaotic inflation in supergravity and leptogenesis; Proceedings of the 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, eds. J. C. Wheeler and H. Martel (AIP, 2001)
- [68] M. Yamaguchi: Double Inflation in Supergravity and Primordial Black Holes Formation; Proceedings of COSMO-01 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe (Rovaniemi, Sep, 2001), in press.
- [69] S. Kasuya: A new type of a stable Q-ball in gauge mediated SUSY breaking and its cosmology; Proceedings of the EuroConference on Frontiers in Particle Astrophysics and Cosmology, eds M. Hirsch, G. Raffelt, J.W.F. Valle. Sep.30-Oct.5, 2000, San Feliu de Guixols, Spain, *Nuclear Physics B, Proceedings Supplement*, **95** (2001) 55-58.
- [70] S. Kasuya: Affleck-Dine baryogenesis and the Q-ball dark matter in the gauge-mediated SUSY breaking, in: Proceedings of the 5th International Workshop on Particle Physics and the Early Universe (COSMO-01), Aug.29-Sep.5, 2001, Rovaniemi, Finland.
- [71] S. Kasuya: Cosmological aspects of Affleck-Dine mechanism and Q-ball formation in the gauge-mediated SUSY breaking models; in: Proceedings of the 5th RESCEU International Symposium on New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, Nov. 13-16, 2001, Tokyo, Japan.
- [72] M. Yamaguchi: Primordial black hole formation in natural double inflation in supergravity; Proceedings of the 5th RESCEU International Symposium on New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, (Tokyo, Nov, 2001), in press.
- [73] Yasushi Suto: Clustering statistics on a light-cone in the cosmological redshift space; Proceedings of the 4th RESCEU symposium: "The Birth and Evolution of the Universe", eds. K.Sato and M.Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo) pp.155-164.
- [74] Kazuhiro Yamamoto, Hiroaki Nishioka and Yasushi Suto: The light-cone effect on the power spectrum of the distribution of cosmological objects; Proceedings of the 4th RESCEU symposium: "The Birth and Evolution of the Universe", eds. K.Sato and M.Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo) pp.165-168.
- [75] Kohji Yoshikawa, Yipeng Jing and Yasushi Suto: Statistical properties of X-ray clusters using cosmological SPH simulations; Proceedings of the 4th RESCEU symposium: "The Birth and Evolution of the Universe", eds. K.Sato and M.Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo) pp.449-450.
- [76] Yasushi Suto: THE UNIVERSE TRACED BY CLUSTERS; IAP 2000 meeting on "Constructing the universe with clusters of galaxies", eds. F.Durret and D.Gerbal (IAP,Paris) on CD-ROM and at <http://www.iap.fr/Conferences/Colloque/coll2000/> contributions Reference: 5.1.1.
- [77] Kohji Yoshikawa, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, & Yasushi Suto: Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos in Cosmological Hydrodynamic Simulations; Proceedings of the 4th China-Germany workshop "Cosmology in the New Millennium", *Progress in Astronomy (Supplement)* **19**(2001)63-66.
- [78] Yasushi Suto, Atsushi Taruya, & Tatsushi Sugihara: Quasi-Self-Similar Stable Clustering Solution of the Two-Point Correlation Function; Proceedings of the 4th China-Germany workshop "Cosmology in the New Millennium", *Progress in Astronomy (Supplement)* **19**(2001)67-71.
- [79] Yasushi Suto: Beyond Precision Cosmology: Proceedings of the international workshop "Frontiers of Cosmology and Gravitation", edited by M.Sakagami, pp.115-120.
- [80] Atsushi Taruya: Stochastic Biasing and Weakly Non-linear Evolution of Power Spectrum; Proceedings of the 4th RESCEU symposium: "The Birth and Evolution of the Universe", eds. K.Sato and M.Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo) pp.425-427.
- [81] Atsushi Taruya: Nonlinear Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos: Proceedings of the international workshop "Frontiers of Cosmology and Gravitation", edited by M.Sakagami, pp.111-114.
- [82] Kei Iida, Gentaro Watanabe and Katsuhiko Sato: Formation of Nuclear "Pasta" in Cold Neutron Star Matter, to appear in Proceedings of YKIS01 "Physics of Unstable Nuclei", supplement volume of *Prog. Theor. Phys.*
- [83] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics, to appear in Proceedings of YKIS01 "Physics of Unstable Nuclei", supplement volume of *Prog. Theor. Phys.*
- (国内雑誌)
- [84] 須藤 靖: 精密宇宙論から有朋自遠方来不亦乐乎の宇宙論へ、*岩波 科学* **71**(2001)8月号, pp.1036-1046.
- [85] 佐藤 勝彦: 宇宙はいかに膨張しているか、*科学 (岩波書店)*71巻 2001年8月号 1026頁
- [86] 佐藤 勝彦: 星と宇宙と人間と、*理科授業 (明治図書)*、2001年8月号 16頁

[87] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果、天文月報、**94** (2001) 390.

(学位論文)

[88] 落合 洋敬: The Universe with Extra Dimensions – From Kaluza-Klein Perspective to Brane World(博士論文)

[89] 高橋 史宜: Inflationary Universe and Affleck-Dine Baryogenesis(修士論文)

[90] 大野 博司: 宇宙背景輻射の偏光と銀河磁場 (修士論文)

[91] 市川 和秀: Time Variation of the Coupling Constants and Big Bang Nucleosynthesis(修士論文)

[92] 大栗 真宗: Resolving the Central Density Profile of Dark Matter Halos with Gravitational Lensing Statistics (修士論文)

[93] 固武 慶: Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars(修士論文)

[94] 清水 康弘: 高次元時空の安定性 (修士論文)

[95] 高橋 慶太郎: 超新星ニュートリノにおけるニュートリノ振動 (修士論文)

(著書)

[96] 須藤 靖: 天文学への招待、10章 宇宙論、(岡村定矩編) 朝倉書店 (2001年11月)。

[97] 佐藤 勝彦: 「宇宙論の新展開」、編著 日経サイエンス別冊 (2001年12月)

[98] 佐藤 勝彦: 「宇宙は我々の宇宙ではなかった」PHP文庫 (2001年11月)

[99] 佐藤 勝彦: 宇宙の未来論、東大公開講座「未来」、東大出版、分担執筆 (2002年2月)

[100] 佐藤 勝彦: 宇宙における人間、東大公開講座「ヒト、人、人間、われらはどこから来てどこにいくのか」、東大出版、分担執筆、2002年印刷中

[101] 佐藤 勝彦: 宇宙の誕生と暗黒エネルギーの謎、「宇宙未知への大紀行 4巻」日本放送協会出版、分担執筆 (2001年11月)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

[102] Yasushi Suto: Clustering of Dark Matter Halos on the Light-cone, The international workshop on cosmology, “Galaxies: formation and evolution”, 上海天文台 (2001年5月24日)

[103] Yasushi Suto: Clustering of Dark Matter Halos on the Light-cone, the 8th Taipei Astrophysics Workshop “AMiBA2001: high-z clusters, missing baryons and CMB polarization”, 台湾大学 (2001年6月13日)

[104] Yasushi Suto: Density profiles and clustering of dark matter halos, The 5th RESCEU symposium “New Trends in theoretical and observational cosmology”, 東京大学山上会館 (2001年11月15日)

[105] Katsuhiko Sato: Explosion Mechanism of Supernova and neutrino Burst, Saharov Symposium on, “Particle Cosmology”, Moscow, (2001年5月23–28日)

[106] Katsuhiko Sato: Neutrino Burst From Supernova and Neutrino OSC, Max-Planck Institute Symposium on High Energy Astrophysics, Muenchen, July 15-20, 2001

[107] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion, Neutrino OSC and the Neutrino Signal from Supernovae, YKIS on Unstable Nuclei, Kyoto, 5-12, Dec.2001

[108] Keitaro Takahashi, Mariko Watanabe, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Effects of neutrino oscillation on supernova neutrino; First Sendai International Conference on Neutrino Science, March 14-16, 2002, Sendai, Japan.

一般講演

• The 5th RESCEU international symposium “New Trends in Theoretical and Observational Cosmology”, Tokyo (2001, November)

[109] Hirotaka Ochiai: Creation of the Randall-Sundrum Bubble

[110] Yasuhiro Shimizu: Numerical solution of  $AdS \times S \times S$  and its stability

[111] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, & Yasushi Suto: Influence of Resolution of Timesteps on Making Merging Trees

[112] Issha Kayo: Log-normal Property of Cosmological Density Fluctuations

[113] Takeshi Kuwabara: The pairwise peculiar velocity distribution function from the halo density profile

[114] Chiaki Hikage, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: Nonlinear stochastic biasing effect on genus statistics for dark halo distributions

[115] Masamune Oguri, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, & Edwin L. Turner: Time Delay Statistics of Strong Gravitational Lensing and the Density Profile of Dark Halos

[116] Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi, Mariko Watanabe, Tomonori Totani: Neutrino Burst From Supernova and Neutrino OSC

[117] Shigehiro Nagasaki and Kei Kotake: Iron line Emission in the Afterglow of GRB000214 and Environment around the GRB

[118] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear “Pasta” by Quantum Molecular Dynamics

[119] Keitaro Takahashi and Katsuhiko Sato: Earth effects on supernova neutrino spectra and their implication for neutrino parameters

- [120] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Determining the Supernova Direction by its Neutrinos
- [121] Yoshinori Ide, Shigehiro Nagataki, Shinya Tsubaki, Hiroyuki Yoshiguchi and Katsuhiko Sato: Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays from Sources in the Super-Galactic Plane
- ・その他
- [122] Atsushi Taruya: Probability Distribution Function and Isodensity Statistics, The international workshop on cosmology, "Galaxies: formation and evolution", 上海天文台 (2001年5月23日)
- [123] Katsuhiko Sato: Explosion Mechanism of Supernova and neutrino Oscillation, Workshop on Neutron Stars, Univ. Washington, Seattle, 9, August, 2001
- [124] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics, First Joint Meeting of the Nuclear Physicists of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, (Hawaii, Oct. 2001).
- [125] Kei Iida, Gentaro Watanabe and Katsuhiko Sato: Formation of Nuclear "Pasta" in Cold Neutron Star Matter, Yukawa International Seminar 2001 (YKIS01) "Physics of Unstable Nuclei", (Kyoto, Nov. 2001).
- [126] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics, Yukawa International Seminar 2001 (YKIS01) "Physics of Unstable Nuclei", (Kyoto, Nov. 2001).
- [127] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato, and Tomonori Totani: Detectability of the Supernova Relic Neutrinos, First Sendai International Conference on Neutrino Science (Sendai, March 14-16, 2002)

(国内会議)

招待講演

- [128] 須藤 靖: "有朋自遠方来不亦乐乎の宇宙論" 京都大学基礎物理学研究所研究会「宇宙論・重力理論の最前線」(2001年4月26日)
- [129] 須藤 靖: "冷たい暗黒物質モデルの危機? 暗黒物質ハローの密度プロファイル" 京都大学基礎物理学研究所短期研究会「場の理論の基礎的諸問題と応用」(2001年12月21日)
- [130] 樽家 篤史: "宇宙の質量分布の統計" 統計数理研究所研究会「乱流の統計理論とその応用」(2001年11月26日)
- [131] 佐藤 勝彦: 超高エネルギー宇宙線シンポジウム、まとめと今後の展望、日本物理学会、立命館大学、草津(2002年3月)
- [132] 長滝 重博: Supernova ジェットと GRB ジェット、及び鉄輝線の解釈について、京都大学基礎物理学研究所、研究会 "ガンマ線バースト" (2001年8月23日)

一般講演

- ・日本物理学会 2001 年秋期大会 (沖縄国際大学、2001年9月)
- [133] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: "Gravothermal Catastrophe and Generalized Entropy"
- [134] 佐藤 勝彦, 高橋 慶太郎, 渡辺 万里子, 戸谷 友則: 超新星ニュートリノとニュートリノ振動
- [135] 井出 喜徳, 長滝 重博, 椿 信也, 吉口 寛之, 佐藤 勝彦: Super-galactic plane 起源の超高エネルギー宇宙線の伝播
- [136] 固武 慶, 長滝 重博: GRB000214 の残光中の鉄輝線と GRB 周辺の環境
- [137] 高橋 慶太郎, 佐藤 勝彦: 超新星ニュートリノを用いたニュートリノパラメータの決定
- ・日本物理学会第 57 回年次大会 (立命館大学、2002 年 3 月)
- [138] 渡辺 元太郎, 飯田 圭, 佐藤 勝彦: 中性子星クラスト中の原子核: パスタ相の形成過程
- ・日本天文学会 2001 年秋季年会 (イーグレひめじ・姫路市市民会館、2001 年 10 月)
- [139] 樽家 篤史, 高田 昌広, 浜名 崇, 加用 一者, 二間瀬 敏史: "Cosmic Shear and Lognormal Property of Dark Matter Distribution"
- [140] 加用 一者, 樽家 篤史, 須藤 靖: ダークハロー数密度ゆらぎの確率分布関数
- [141] 桑原 健, 樽家 篤史, 須藤 靖: 銀河の特異速度統計とハローの密度プロファイル II
- [142] 日影 千秋, 樽家 篤史, 須藤 靖: Nonlinearity and Stochasticity in Halo Biasing from Hubble Volume simulations
- [143] 大栗 真宗, 樽家 篤史, 須藤 靖: アーク統計による銀河団質量密度プロファイルへの制限
- [144] 井出 喜徳, 長滝 重博, 椿 信也, 吉口 寛之, 佐藤 勝彦: Super-galactic plane からの超高エネルギー宇宙線
- [145] 固武 慶, 長滝 重博: X 線 Afterglow 中の鉄輝線と親星の質量放出
- ・日本天文学会 2002 年春季年会 (茨城大、2002 年 3 月)
- [146] 加用 一者, 須藤 靖, 中村 理, 福来 正孝: SDSS 銀河二体相関関数
- [147] 日影 千秋, 樽家 篤史, 須藤 靖: Sloan Digital Sky Survey による宇宙大構造のジーナス統計とバイアスについての初期報告
- [148] 大栗 真宗, 樽家 篤史, 須藤 靖, Edwin L. Turner: 重力レンズ time delay の統計
- ・その他
- [149] 須藤 靖: "宇宙論的密度揺らぎの普遍プロファイルと確率密度分布関数" 国立天文台理論解析計算センター ユーザーズミーティング (2001 年 12 月 13 日)

- [150] 樽家 篤史, 加用 一者: “ガウスの初期条件にもとづく宇宙論的密度ゆらぎの確率分布関数” 日本流体力学会年会@工学院大学新宿校舎 (2001年7月31日)
- [151] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: “Gravothermal Catastrophe and Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems” 京都大学基礎物理学研究所研究会 「熱場の量子論とその応用」 (2001年8月6日)
- [152] 樽家 篤史, 高田 昌広, 浜名 崇, 加用 一者, 二間瀬 敏史: “Lognormal Property of Weak Lensing Fields” 理論天文学懇談会@大阪大学 (2001年12月20日)
- [153] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: “重力熱的不安定性と Tsallis エントロピー” 第10回「非平衡系の統計物理シンポジウム」 (2002年1月9日)
- [154] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: “Gravothermal Catastrophe and Tsallis Entropy” 天体力学 N 天体力学研究会@箱根 (2002年3月13日)
- [155] 加用 一者: SDSS 銀河分布二体相関関数, 第14回理論天文学懇談会シンポジウム (大阪大学, 2001年12月)
- [156] 大栗 真宗, 樽家 篤史, 須藤 靖, Edwin L. Turner: Strong Gravitational Lensing Time Delay Statistics and the Density Profile of Dark Halos, 第14回理論天文学懇談会シンポジウム (大阪大学, 2001年12月)
- [157] 佐藤 勝彦: 宇宙の未来論, 東大公開講座「未来」 (2001年4月)
- [158] 佐藤 勝彦: 宇宙における人間, 東大公開講座「ヒト、人、人間、我らは何処から来て何処に行くのか」 (2001年10月)
- [159] 佐藤 勝彦: 宇宙の誕生、大学と科学「重力波」、福岡、(2001年12月8-9日)
- [160] 佐藤 勝彦: 宇宙の誕生と未来、駿台学園天文講座、(2002年3月16日)
- [161] 長滝 重博: GRB000214 の X 線残光中の鉄輝線と GRB 周囲の環境について、理研シンポジウム「HETE-2 衛星を用いたガンマ線バースト/バースト残光天体の研究」研究会 (理化学研究所, 2001年12月4日)
- [162] Shigehiro Nagataki: GRB Neutrino Background and Explosive Nucleosynthesis, Mini-Workshop with Prof. Narayan “Black Holes, Gravitational Lens, and Gamma-Ray Bursts”, Kyoto University (2002年3月19日)
- [163] 渡辺 元太郎, 佐藤 勝彦, 泰岡 顕治, 戎崎俊一: Microscopic Study of Nuclear “Pasta” by Quantum Molecular Dynamics, 日本原子力研究所 第235回基礎科学セミナー: 第4回「極限条件におけるハドロン科学」(日本原子力研究所, 2002年3月)
- [164] 高橋 慶太郎, 佐藤 勝彦: Earth effects on supernova neutrino spectra and their implication for neutrino parameters; 第14回理論天文学懇談会シンポジウム (大阪大学, 2001年12月)
- [165] 佐藤 勝彦: 神戸大学大学院「宇宙の誕生と進化」(2002年1月10-11日)  
(セミナー)
- [166] 須藤 靖: “太陽系外惑星探査” 立教大学理学部物理学教室談話会 (2001年5月19日)
- [167] 須藤 靖: “Cosmological Implications of Density Profiles of Dark Matter Halos” 北京国家天文台談話会 (2001年5月27日)
- [168] 須藤 靖: “Search for Extrasolar Planets” 北京大学天文学教室談話会 (2001年5月29日)
- [169] 須藤 靖: “太陽系外惑星探査” 甲南大学理工学部物理学教室談話会 (2001年6月29日)
- [170] 樽家 篤史: “Nonlinear Stochastic Biasing of Dark Halos and Galaxies” 東京大学 天文学教室談話会 (2001年5月8日)
- [171] 樽家 篤史: “ダークマター分布の非線形重力進化” 立教大学 理論物理学研究室コロキウム (2001年7月21日)
- [172] 樽家 篤史: “Tsallis エントロピーと重力熱的不安定性” お茶の水大学 宇宙物理研究室セミナー (2001年10月19日)
- [173] 加用 一者: Log-normal Property of Cosmological Density Fluctuations, 早稲田大学宇宙物理学研究室セミナー
- [174] 大栗 真宗: 重力レンズ time delay の確率分布、国立天文台理論天文学研究系 宇宙論セミナー (2002年3月)
- [175] 佐藤 勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation, Adelaide University, Feb., 2002.
- [176] 佐藤 勝彦: 宇宙論の新展開: 宇宙は第2のインフレーションを始めたのか? 秋田大学地学教室談話会、(2001年12月)
- [177] 長滝 重博: Specifying the Environments around GRB, Explaining the Fe line in the X-Ray Afterglow of GRB 000214, 京都大学基礎物理学研究所、基研談話会 (2001年5月28日)
- [178] 渡辺 元太郎: 高密度天体内部物質における中性子過剰核の構造と融解の研究 理化学研究所 計算科学技術推進室セミナー (2000年9月)

(集中講義)

## 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・梅田・Deng)

「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、「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重元素組成比と赤方偏移の関係を理論的に解釈することによって、宇宙初期における重元素の創成史を探ることができる。最近では、遠方の超新星が数多く見つかっている。超新星を標準光源として仮定することによって宇宙の幾何学的な性質を導こうという試みもある。この研究には遠方の超新星と近傍の超新星の性質の差異を知ることが重要である。遠方の天体として着目されている $\gamma$ 線バーストについても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 $\gamma$ 線バーストと同時期に空のほぼ同じ方角で起こったので、これら2つの現象の関連についても研究を進める。

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10000分の1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しうる理論的なモデルの構築を目指している。そのた

めに、宇宙初期に形成されたと考えられるほとんど重元素を含まないガスから形成された星の進化モデルを構築し、現在超新星爆発を起している星との違いを研究する。さらに、これらの星がどのように形成されるのか、超新星爆発を起した後に、重元素がどのように星間ガスにばらまかれ、次の世代の星に受け継がれて行くのかを3次元数値流体計算によって調べ、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議論する。

### 2.1 銀河初期における重元素合成サイクル

重元素を含まない第0世代から始まって星の進化・爆発・元素合成が重元素含有量にどのように依存し、どのような特徴を持つかの理論的予測を行う。クエーサー吸収線によって測られた重元素量は銀河のどの部分のものか、ハローの星はどのように重元素を取り込んだかを、観測されている元素組成比との比較によって推理する。また、理論的に予測した様々な元素量の進化の検証を行う。その一環として、主系列星から重力崩壊直前までの大質量星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た。銀河初期には超大質量星が主に形成されると言う星形成理論からの視差があるので、質量  $100-300M_{\odot}$  の星が超新星に到るまでの進化を調べた。これらの大質量星は、酸素燃焼直前の段階で大量の電子・陽電子対生成による力学的不安定性のために星全体が崩壊を起し、さらに崩壊中の酸素燃焼によって崩壊が爆発に転じて超新星爆発を起す (Pair-Instability Supernovae)。この過程の数値流体計算を行ない、詳細な核反応ネットワークを用いて爆発時の元素合成を計算した。また、この天体の銀河の化学進化への寄与についても調べている。[25], [27], [28], [29], [36], [46], [47]

また、ハローにある個々の星の元素組成が示す傾向は個々の超新星が数百万年かけて掃き集めた星間ガスの中で平均した元素組成が示す傾向とよく似ていることを示した。これは、個々の超新星が掃き集めた星間ガスから次の世代の星が生まれたことを強く示唆している。次に、星形成が超新星によって駆動されると仮定して銀河初期の化学進化モデルを構築し観測と比較し、このモデルが観測された星形成の歴史をよく再現できることを示した。このモデルを用いると、Ba, Eu など中性子捕獲過程によってできる元素のほとんどは銀河初期には質量  $20M_{\odot}$  の星が超新星爆発した時に合成され、しかも他の質量の星からはほとんど合成されないとすれば、ハローの星に観測されたこれら元素の組成比の傾向を再現できることがわかった。実は、超新星 SN 1987A は質量  $20M_{\odot}$  の星が爆発したもので、Ba の超過が観

測されていた。また、他の重力崩壊型超新星では Ba の超過は観測されていないことも知られていた。SN 1987A について観測された Ba の表面組成から爆発モデルを用いて Ba の質量を評価し、その量がハローの星から評価した  $20 M_{\odot}$  の星から供給される Ba の量に良く一致することを見だし、 $r$ -過程元素の主要な供給源が質量  $20 M_{\odot}$  の星であるという結論を得た。[1], [12], [48]

## 2.2 銀河初期における星形成・超新星爆発サイクルと銀河の構造形成

銀河の初期進化における星や超新星の化学的熱的役割を探り入れた、星・ダークマター・ガス系の力学的な進化の計算を行い、銀河の諸タイプの起源を明らかにする。最初に、この手法で渦巻き銀河の構成要素であるバルジ、ハロー、ディスクがどのように形成されたのかを計算し、これら 3 つの部分に含まれる星の特徴を観測と比較した。

## 2.3 極超新星

近年、従来の超新星よりもはるかに大きな (10 倍以上) の爆発エネルギーをもつ超新星が次々と発見され、これらの天体は超新星を超えるという意味で“極超新星 (Hypernova)”と呼ばれるようになった。この極超新星における元素合成の詳しい計算を行ない、普通の超新星における元素合成との比較を行なって、銀河の化学進化に与える影響を調べた。[4], [6], [8], [9], [10], [13], [14], [17], [18], [21], [22], [24], [35]

M74 に出現した超新星 SN2002ap は先に見つかった極超新星 SN1998bw、SN1997ef と同様、そのスペクトル中の幅の広い輝線、吸収線によって特徴づけられる。また、距離が比較的近く (約 10 メガパーセク)、SUBARU、MAGNUM 等によって質の良い多くの観測データが得られた。我々はこれらの観測データ (スペクトル、光度曲線) を説明するような理論モデルを構築し、その結果として、爆発エネルギー  $4 - 10 \times 10^{51}$  ergs、放出質量  $2.5 - 5 M_{\odot}$ 、及びもとの星の主系列質量  $20 - 25 M_{\odot}$  と制限をつけた。これにより、SN2002ap は確かにエネルギーの大きな極超新星であることが明らかになった。[7], [33]

特異な可視光スペクトルを示す Ic 型超新星 1997ef のスペクトルの解析を行ない、 $10^{52}$  erg 程度の大きな爆発エネルギーをもつ極超新星で、非球対称爆発の特徴を示すことを見出した。[9], [13]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tsujimoto, T., Shigeyama, T. 2001, “SN 1987A Revisited as a Major Production Site for  $r$ -

Process Elements,” *The Astrophysical Journal*, 561, L97-L100.

- [2] Branch, D., Benetti, S., Kasen, D., Baron, E., Jeffery, D. J., Hatano, K., Stathakis, R. A., Filippenko, A. V., Matheson, T., Pastorello, A., Altavilla, G., Cappellaro, E., Rizzi, L., Turatto, M., Li, W., Leonard, D. C., & Shields, J. C. 2002, “Direct Analysis of Spectra of Type Ib Supernovae”, *The Astrophysical Journal*, 566, 1005–1017
- [3] Gerardy, C.L., Fesen, R.A., Nomoto, K., Garnavich, P.M., Jha, S., Challis, P.M., Kirshner, R.P., Hoeflich, P., Wheeler, J.C. 2002 “Extraordinary Late-Time Infrared Emission of Type II-n Supernovae”, *The Astrophysical Journal*, 575, 1007–1017
- [4] Maeda, K., Nakamura, T., Nomoto, K., Mazzali, P.A., Patat, F., Hachisu, I. 2002, “Explosive Nucleosynthesis in Aspherical Hypernova Explosions and Late Time Spectra of SN1998bw”, *The Astrophysical Journal*, 565, 405–412
- [5] Mazzali, P.A., Nomoto, K., Cappellaro, E., Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K. 2001, “Can Differences in the Nickel Abundance in Chandrasekhar Mass Models Explain the Relation between Brightness and Decline Rate of Normal Type Ia Supernovae?,” *The Astrophysical Journal*, 547, 988–994
- [6] Mazzali, P. A., Nomoto, K., Patat, F., Maeda, K. 2001, “The Nebular Spectra of the Hypernova SN1998bw and Evidence for Asymmetry”, *The Astrophysical Journal*, 559, 1047–1053
- [7] Mazzali, P.A., Deng, J., Maeda, K., Nomoto, K., Umeda, H., Hatano, K., Iwamoto, K., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Doi, M., Enya, K., Tomita, H., Smartt, S.J., Kinugasa, K., Kawakita, H., Ayani, K., Kawabata, T., Yamaoka, H., Qiu, Y.L., Motohara, K., Gerardy, C.L., Fesen, R., Kawabata, K.S., Iye, M., Kashikawa, N., Kosugi, G., Ohyama, Y., Takada-Hidai, M., Zhao, G., Chornock, R., Filippenko, A.V., Benetti, S., Turatto, M. 2002, “The Type Ic Hypernova SN 2002ap”, *The Astrophysical Journal*, 572, L61–L65
- [8] Nakamura, T., Mazzali, P.A., Nomoto, K., Iwamoto, K. 2001, “Light Curve and Spectral Models for the Hypernova SN1998bw Associated with GRB980425”, *The Astrophysical Journal*, 550, 991–999
- [9] Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K., Nomoto, K., Hashimoto, M., Hix, W.R., Thielemann, F.-K. 2001, “Explosive Nucleosynthesis in Hypernovae”, *The Astrophysical Journal*, 555, 880–899
- [10] Patat, F., Cappellaro, E., Danziger, I.J., Mazzali, P.A., Leibundgut, B., Nomoto, K., Nakamura, T., et al. 2001, “The Metamorphosis of SN1998bw”, *The Astrophysical Journal*, 555, 900–917

- [11] Podsiadlowski, Ph., Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T., Mazzali, P., Schmidt, B. 2002, "Formation of the Black Hole in Nova Scorpii", *The Astrophysical Journal*, 567, 491–502  
(會議抄録)
- [12] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y., "Theoretical interpretation of abundance trends seen in extremely metal-poor stars," 2001, in *Cosmic evolution*, 219.
- [13] Deng, J.S., Hatano, K., Nakamura, T., Maeda, K., Nomoto, K., Nugent, P., Aldering, G., Branch, D. 2001, "Luminous SN 1999as: Hypernova with  $4M_{\odot}$   $^{56}\text{Ni}$  Ejected?", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 238–239
- [14] Hatano, K., Maeda, K., Deng, J.S., Nomoto, K., Branch, D., Nugent, P., Aldering, G. 2001, "Spectroscopic Analysis of Type Ic Hypernova 1999as", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 244–245
- [15] Kobayashi, C., Nomoto, K., Tsujimoto, T. 2001, "Cosmic Supernova Rate History and Type Ia Supernova Progenitors", in *Cosmic Evolution*, eds. A. Burkert et al. (World Scientific), 313–316 (astro-ph/0102247)
- [16] Maeda, K., Nakasato, N., Suzuki, T., Nomoto, K. 2001, "SN1987A: Collision between the Ejecta and the CSM", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 260–261
- [17] Mazzali, P.A., Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T. 2001, "Hypernovae and Gamma Ray Bursts", in *The 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, ed. C. J. Wheeler (New York Academy of Science), 478–483
- [18] Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K., Nomoto, K., Hashimoto, M., Hix, W. R., Thielemann, F.-K. 2001, "Hypernova Nucleosynthesis and Implications for Cosmic Chemical Evolution", in *Proc. of Cosmic Evolution*, eds. A. Burkert et al. (World Scientific), 171–173 (astro-ph/0101469)
- [19] Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K., Nomoto, K., Hashimoto, M., Hix, W.R., Thielemann, F.-K. 2001, "Hypernova Nucleosynthesis and Abundances of the Companion Star of the X-ray Nova Sco", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 262–263
- [20] Nomoto, K., Maeda, K., Mochizuki, Y., Kumagai, S., Umeda, H., Nakamura, T., Tanihata, I. 2001, "Gamma-Ray Signatures of Supernovae and Hypernovae", in *Gamma-Ray Astronomy 2001*, eds. S. Ritz, et al. (American Institute of Physics), 487–497 (astro-ph/0110079)
- [21] Nomoto, K., Maeda, K., Umeda, H., Nakamura, T. 2001, "Hypernova Nucleosynthesis and Galactic Chemical Evolution", in *The Influence of Binaries on Stellar Population Studies*, ed. D. Vanbeveren (Kluwer), 507–533 (astro-ph/0105127)
- [22] Nomoto, K., Mazzali, P. A., Nakamura, T., Iwamoto, K., Maeda, K., Suzuki, T., Turatto, M., Danziger, I. J., Patat, F. 2001, "The Properties of Hypernovae: SNe Ic 1998bw, 1997ef, and SNIIn 1997cy", in *Supernovae and Gamma Ray Bursts*, ed. Livio, M. et al. (Cambridge: Cambridge University Press), 144–170 (astro-ph/0003077)
- [23] Nomoto, K., Umeda, H., Kobayashi, C. 2001, "The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae and Evolution with Redshift", in *Proc. of Birth and Evolution of the Universe*, eds. K. Sato & M. Kawasaki (Tokyo: University Academy Press), 235–256
- [24] Nomoto, K., Umeda, H., Tsuru, T., Nakamura, T. 2001, "Abundances in M82 and Hypernova Nucleosynthesis", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 288–289
- [25] Shirouzu, M., Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K. 2001, "Explosive Nucleosynthesis in Massive Pop III Stars and Abundances in Metal-Poor Stars and M87", in *ASP Conference Series, New Century of X-ray Astronomy*, eds. H. Inoue & H. Kunieda (Astronomical Society of Pacific), 274–275
- [26] Thielemann, F.-K., Argast, D., Brachwitz, F., Gerhard, O. E., Martinez-Pinedo, G., Samland, M., Hix, W. R., Liebendörfer, M., Mezzacappa, A., Nomoto, K., Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K. 2001, "Supernovae and galactic evolution indicators of their nucleosynthesis", in *The Cosmic Evolution*, eds. A. Burkert et al. (New Jersey: World Scientific), 161–169
- [27] Umeda, H., Nomoto, K. 2001, "Nucleosynthesis in Massive Pop III Stars: Mass Dependence and Implications for the IMF", in *Proc. of The Physics of Galaxy Formation*, eds. M. Umemura & H. Susa (San Francisco: Astronomical Society of Pacific), ASP conference Series 222, 45–53
- [28] Umeda, H., Nomoto, K. 2001, "The Evolution and Nucleosynthesis of Massive Pop III Stars", in *Proc. of Birth and Evolution of the Universe*, eds. K. Sato & M. Kawasaki (Tokyo: University Academy Press), 257–261
- [29] Umeda, H., Nomoto, K. 2002, "Pop III Hypernova Nucleosynthesis and Abundances in Very Metal-Poor Halo Stars", in *the 11th Workshop on Nuclear Astrophysics*, eds. W. Hillebrandt & E. Muller (Garching: MPA), 164–168
- [30] Umeda, H., Nomoto, K., Tsuruta, S., Mineshige, S. 2001, "Is the Cas A Point Source Discovered by Chandra a Black Hole or a Neutron Star?", in

AIP Conference Proc. 556, The First KIAS Astrophysics Workshop in Seoul, Explosive Phenomena in Astrophysical Compact Objects, ed. H.-Y. Chang, et al. (New York: American Institute of Physics) 359-367

(国内雑誌)

- [31] 梅田秀之, 野本憲一 2001, “最も遠い超新星, 暗黒エネルギーの存在を強く示唆”, 科学ニュース, 科学 (岩波書店), 6月号, 673-674
- [32] 梅田秀之, 野本憲一 2001, “超新星を使って宇宙をはかる”, 科学 (岩波書店), 8月号, 1065-1075
- [33] 前田啓一, 野本憲一 2002, “SN2002ap と極超新星”, 月刊天文ガイド (誠文堂新光社), 5月号, 232-235
- [34] 野本憲一, 野本陽代 2001, “生命の素・元素はいかに創られたか”, NHK スペシャル「宇宙」第3巻, 百億個の太陽 (日本放送出版協会), 100-109

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [35] Deng, J., Hatano, K., Umeda, H., Nomoto, K.: “Light Curve Models for the Hypernova SN 1999as”, The 5th RESCEU International Symposium, New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, Tokyo, Japan, 2001/11/13-16
- [36] Umeda, H.: “Nucleosynthesis of zinc and iron-peak elements in Pop III SNe II”, in 11th Workshop on Nuclear Astrophysics at Ringberg Castle, Germany, 2002/2/11-16

招待講演

- [37] Nomoto, K.: “Gamma-Ray Signatures of Supernovae and Hypernovae”, Gamma-Ray Astronomy 2001, Baltimore, 2001/4/6
- [38] Nomoto, K.: “Hypernova Nucleosynthesis and Early Chemical Evolution”, Vulcano Workshop on Chemical Enrichment of Intracluster and Intergalactic Medium, Vulcano, Italy, 2001/5/15
- [39] Nomoto, K.: “Black Holes in M82 and Hypernova Nucleosynthesis”, Aspen Workshop on Star Clusters, Aspen, Colorado, 2001/6/12
- [40] Nomoto, K.: “Hypernovae and Gamma-Ray Bursts”, Aspen Workshop on Gamma-Ray Bursts, Aspen, Colorado, 2001/6/20
- [41] Nomoto, K.: “SN1987A: 3D Simulations of Collision with the Ring”, Neutron Stars in Supernova Remnants, Boston, 2001/8/14-17
- [42] Nomoto, K.: “Core Collapse Hypernovae”, INT Workshop on Neutron Stars, Seattle, 2001/8/21
- [43] Nomoto, K.: “Explosive Nucleosynthesis in The First Stars”, The 5th RESCUE International Symposium: New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, Tokyo, 2001/11/16

[44] Nomoto, K.: “Hypernovae and Pop III Stars”, Minnesota Workshop on Low Z at low z and high z, Minneapolis, 2002/3/23

[45] Nomoto, K.: “Hypernova Nucleosynthesis and Iron-Peak Elements in Metal-Poor Halo Stars”, INT Conference on Stellar Abundances, Seattle, 2002/3/27

(国内会議)

一般講演

- [46] 梅田秀之: “大質量星の進化, 元素合成と低金属天体の組成”, 理論天文学懇談会シンポジウム, 大阪大学, 2001/12/19-21
- [47] 梅田秀之: “種族 III 星の超新星爆発と核種合成”, 恒星研究会, 北海道大学, 2002/3/18-20
- [48] 茂山俊和: “超新星と銀河の化学進化”, 恒星研究会, 北海道大学, 2002/3/18-20

招待講演

(セミナー)

[49] Nomoto, K.: “Rotation of White Dwarfs and the Diversity of Type Ia Supernovae”, Seminar, LBL, Berkeley, 2001/9/12

### 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)

クエーサやセイファート銀河など活動銀河核の光度の時間変動を多波長(可視、近赤外)でモニター観測し、可視変動から赤外変動の遅れ時間を測定することでこれらの天体までの距離を測定するという距離決定の新技术を試みている。この目的のため観測条件の良いアメリカ合衆国ハワイ州マウイ島ハレアカラ山頂に可搬型口径2mの望遠鏡を設置して観測を行う計画を推進している。この計画の特徴は活動銀河核を短時間間隔で密にモニター観測しそれを数年間続けることである。したがって観測適地の望遠鏡を占有して観測することが必要であり、望遠鏡、観測装置の開発と遠隔自動観測システムの開発が重要となる。本プロジェクトは昨年度冬にファーストライトを果たした。引き続き望遠鏡や観測装置のさまざまな改善を押し進めるとともに近傍活動銀河核を中心に本格的な多波長モニター観測を開始した。望遠鏡の光学系について調整を進めさらに昼間の日射によりドームが暖まらないようにエアコンを導入しドームシーリングの悪影響を抑え、安定して1秒角以下の星像サイズが得られるようになるとともに最良で0.5秒角の星像サイズを達成した。遠隔自動観測に向けてのシステム開発も進めている。望遠鏡、ドームおよび多波長カメラの制御ソフトウェアの整備に加え雲量モニターおよび気象モニターを総合して観測可能性を判断するシステムを構築し、観測開始の自動判断から天体観測後のキャリブレーション観測まで1晩程度の完全自動観測を実現した。さらに天体選択を含めた完全自動化を実現するためにスケジューラを製作し試験的な運用を開始した。これらの観測装置・観測システムの開発と並行して2000年度より少数の近傍活動銀河核を中心に試験的な多波長モニター観測を開始した。今年度は観測システム開発による観測効率の向上にしたがって観測天体数を増やし本格的な観測に移行しつつある。試験観測として観測を開始した天体についてはモニター期間が数ヵ月から1年程度に達した。これらについて当初の目標のとおり活動銀河核の可視、近赤外モニターとしては観測頻度、測光精度ともにこれまでにない質の高いデータを得ることができた。これらの大半の天体について変光を確実に検出し、さらにいくつかの活動銀河核について可視変動から赤外変動の遅延をとらえ、質の高いデータにより遅延時間を精密に測定することができた。しかもこれらの遅延時間の測定値は過去の観測データを使って確認した距離測定法の原理から予想される大きさに合っており、我々が提案した距離測定法が有望であることを示した。

### 3.1 近赤外多波長撮像による活動銀河核の変光の研究

活動銀河核の変光について、可視域に比べて既存の観測が乏しい赤外域において変光天体の割合、変光の大きさなどの基本的な特徴を明らかにするため、200個以上の天体を対象とした系統的な撮像測光観測を行い結果を提示した。観測は宇宙科学研究所の1.3m望遠鏡および国立天文台の近赤外カメラPICNICを用いて、近赤外域の $J(1.25\mu\text{m})$ 帯、 $H(1.65\mu\text{m})$ 帯、 $K'(2.2\mu\text{m})$ 帯バンドで行った。変光を調べるため、各活動銀河核を1~2年の間隔をおいて2回観測した。観測天体は主に赤方偏移が0~1.0までのセイファート1型活動銀河核からなり、強電波天体と弱電波天体の両方を含んでいる。

視野内相対測光による変光検出の手法を追求し、活動銀河核の変光およびその誤差を高精度で評価することによって、これまで可視域に比べて変光の有無がわかりにくかった近赤外域においても、大半の活動銀河核が変光することを示した。

観測天体をグループ分けして正味の変光のアンサンブルを求めることによって、弱電波天体の典型的な変光の大きさが0.18等であるのに対して強電波天体では0.26等と有意に大きく、この違いは赤方偏移、絶対等級などの偏りによる見かけのものではないことを結論した。また強電波天体に限って変光の大きさと赤方変移、絶対等級との間にそれぞれ正、負の相関があることを示した。そのほか変光のtime scale、異なる波長帯の変光の相関、電波域でのスペクトルの平坦さと近赤外域での変光の関係について評価、議論し、弱電波天体の変光はダストからの熱的放射の変動を反映しており、いっぽう本研究における強電波天体の変光は非熱的放射を反映しているとの解釈を導いた。

本研究によって得られた近赤外域における226個の活動銀河核の変光データは、精度、サンプル数においてこれまでにない質のものであり、副産物である331個の活動銀河核の $J$ 、 $H$ 、 $K'$ バンドにおけるマルチアパーチャによる測光データも従来ない規模のものとなっている。本研究は活動銀河核の変光、放射機構についての独立した研究であると同時に、MAGNUM計画の予備観測としての意義も備えている。本研究を通じて得られた解析の手法や活動銀河核の変光についての認識は、MAGNUM計画における観測天体、モニター計画の決定および変光の高精度測定に活用されている。

### 3.2 MAGNUM望遠鏡による超新星SN2002apの観測

SN2002apは、2002年1月29日に発見され(IAUC7810)、31日にHypernovaである可能性が高いと報告された。(IAUC7811)MAGNUMではこの非常に特異で珍しい突発天体を、のべ14晩にわたってUBVRI-JHKの多波長で観測した。SN2002apの増光段階か

ら、最大光度に達し減光していく過程のすべてを高い精度で捉えることに成功した。観測された最大光度、光度曲線は、SN2002ap は以前観測された SN1998bw より暗い hypernova であることを示している。

### 3.3 MAGNUM 広視野 CCD カメラによる重力レンズ効果を用いた深宇宙探査

マウイ島に建設中の、マグナム望遠鏡用の広視野カメラの開発を進めてきている。重力レンズ解析を行うためには、星の楕円率が数%以下でなければならない、これを実現するためには自動ガイダー機構をカメラ側に持たなければならないことが、研究を進めていく中で分かった。このためこの機能を追加すべく、現在準備を行っている。

これと平行して進めてきたすばる望遠鏡用の広視野カメラ (Suprime-Cam) が立ちあがり、2 平方度という広い領域で  $R=25.5$  等級まで complete な観測データを得ることができた。銀河の角度相関解析をまず先行して進め、宇宙の大規模構造の起源について考察を開始した。

### 3.4 すばるディープフィールドにおける遠方赤外の解析

すばる望遠鏡による近赤外線による深宇宙のイメージ「すばるディープフィールド」から、以下のように興味深い科学的成果が得られた。宇宙背景放射とは、我々が観測可能な天体や宇宙に存在する光の総量であり、可視光や赤外線の波長域では、系外銀河からの光の重ね合わせと考えられている。銀河の光は星の集合体であり、これは結局、宇宙に存在する星の光の総量ともいえる。従って、十分に遠い銀河まで観測すれば、背景放射はひとつひとつの銀河に分解することができる。背景放射の何割を銀河に分解したかは、我々がどれだけ深く宇宙を観測しているか、という問いに対する一つの指標である。

「すばるディープフィールド」で撮影された宇宙最遠方の銀河データから、宇宙に存在する銀河からの光の何割が実際に銀河に分解されているかを詳細に調べた。その結果、観測装置の検出限界による「銀河の数え落とし」を考慮にいれても、通常の銀河からの光による背景放射の 90% 以上はすでに分解されているという結論が得られた。これは、ハッブル望遠鏡によりすでに得られている、可視光領域における「ハッブルディープフィールド」をも凌ぐ世界最高のものである。そしてこれは、「我々が原理的に観測できる宇宙における星の光の総量」の実に 90% 以上を銀河に分解してしまったということであり、現代天文学の一つの大きな到達点と言える。

そして、さらに興味深い謎が提起された。「すばる」の観測とは独立に、アメリカの COBE 衛星や、日本の宇宙科学研究所のプロジェクトとして、銀河以外のものも含めた「宇宙に存在する全ての光の量」を「広がった背景放射」として測定することが行われている。奇妙なことに、すばると同じ波長域での測定値は、「すばる」によって得られた通常銀河の光の総量の、実に 2 倍から 3 倍にのぼるのである。これは、我々の宇宙が、通常の銀河では説明できない謎の光で満ちている可能性を示唆するものであり、宇宙論的に極めて重大な問題となる。今後のより高精度な観測や研究により、本当に謎の光がなくてはならないのか、そして、だとするとその起源は何なのか、解明していく必要がある。

我々は「すばるディープフィールド」(以下 SDF) の銀河の中で、J-K カラーで非常に赤い銀河の割合を調べたところ、 $K > 22$  の領域で  $J-K > 3-4$  という非常に赤い銀河の割合が 1-10% と、 $K < 20$  の明るい領域に比べ急激に増えているのを見いだした。非常に赤い銀河の種族としては、extremely red objects (EROs) がすでに知られている。EROs は高赤方変移で passive evolution をしている楕円銀河の色を想定して定義されており、例えば  $R - K > 5$  のような色を持っている。実際、最近の研究から、多くの EROs は passive evolution の楕円銀河と考えられている。しかし、J-K では passive evolution の楕円銀河でも一般にそうは赤くならない。どの  $z$  に置いても、 $J-K < 2-3$  であり、今回我々が見いだした種族は passive evolution の楕円銀河ではない、さらに異常に赤い別の種族として考えるべきである。

そこで我々は、この種族、hyper-extremely red objects (HEROs) が、dusty starburst phase にある原始楕円銀河であるという仮説をたて、検証を行った。標準的な楕円銀河の銀河風モデルに、金属量から期待されるダストの量と、簡単な screen type の分布を仮定すると、標準的な楕円銀河では、 $z > 2$  で実際に  $K > 22$  で  $J-K > 4$  という HEROs の特徴に符合する。さらに、そのような種族の全銀河数に対する割合及びその等級への依存性のモデル予言が、SDF のデータに非常によく一致することがわかった。さらに、HEROs のカウントは、SCUBA によるサブミリ波観測で検出されている遠方のスターバースト銀河のカウントにほぼ一致する。また、上記のモデルに基づき、ダスト吸収された放射が典型的な赤外 SED で放射されるとすると、実際に HEROs がちょうど SCUBA で検出される程度のフラックスを出すことが分かった。これら全ての結果は、HEROs が SCUBA ソースと同一起源で、それは現在の楕円銀河が初期にスターバーストを行っているとする考えを強くサポートするものである。

### 3.5 ハローの非一様の化学進化モデルと奇数元素の起源

超新星爆発後その超新星残骸で掃き集められた密度の高いガス塊から星が生まれる、つまり超新星爆

発で星形成が誘発されるというシナリオに基づき銀河系ハローの化学進化モデルを構築し、このモデルに基づき金属量超欠乏星の  $[Al/Mg]$  及び  $[Na/Mg]$  の化学組成パターンに初めて理論的解釈を与えた。これより、Na, Al といった奇数元素について、合成放出される重元素量を、星の質量と金属量の関数として評価し、さらに、種族 III 星の初期質量関数に対し、新たな知見を与えた。

### 3.6 高赤方偏移クエーサーの近赤外分光

重元素のない初期宇宙の星間ガスから超新星爆発により重元素が生成されるが、鉄は主として Type Ia 超新星でしか生成されないため、より早く発生する Type II 超新星により生成されるマグネシウムよりも生成に時間がかかる。そのため、高赤方偏移天体のマグネシウムと鉄の存在比を調べることで、鉄の存在比が減少している事を見出すことができれば、宇宙年齢に制限をかける事が可能である。FeII 輝線 (波長 2200~3000 Å) は MgII 輝線 (波長 2800 Å) の近傍及び短波長側に幅広くつながって存在するため、continuum と分離して強度を調べるためには、広い波長範囲のスペクトルを高い S/N 比で取得する必要がある。我々は、平成 13 年度よりすばる望遠鏡の OH 夜光除去分光器 (OHS) を用いて、高赤方偏移クエーサーの FeII 輝線強度の調査を行なっている。

今年度は、以下の観測及び研究を進めた。

1. 昨年度 OHS で観測された  $z \sim 5$  クエーサー 13 天体の解析
2. SDSS archive data を用いた  $0.75z < 2.29$  クエーサー 2243 天体の解析
3. その他、過去に論文として出版されているクエーサースペクトルの再解析
4. AAT/2dF archive data を用いた  $0.5 < z < 1.9$  クエーサー 5789 天体の解析
5. 現在発見されている最も遠い  $z=6.3$  クエーサーの OHS での観測及び解析
6. 銀河の化学進化モデルと輝線強度計算コードを結合させた、新しいモデルの開発

これらの研究により、広い赤方偏移範囲に於て FeII/MgII の輝線比が調べられ、ほとんどのクエーサーの星生成は  $z \sim 3$  で終了している事や、 $z \sim 6$  での宇宙年齢が 1Gyr 程度である可能性がある事などがわかってきた。上記 1~3 の部分は今年度前半にまとめ、平成 14 年 1 月に論文誌に発表された。5 は 3 月に観測を行なったばかりのもので、春の学会でこの天体の FeII は非常に弱いという結果を報告した。今後は上記 4, 5 の論文文化及び 6 の研究開発と、更なる  $z > 6$  クエーサーの観測を進め、FeII/MgII 輝線比を通して初期宇宙の年齢を明らかにしていく。

### 3.7 階層的銀河形成モデルを用いたすばるディープフィールドでの銀河計数の解析

近年の宇宙論的構造形成過程の理解においては、先に小さい天体が形成され、それらの合体によって大きい天体が形成されてきたという hierarchical clustering シナリオが標準となりつつある。昨年度は、このシナリオに基づいて、我々が独自に開発した準解析的手法による銀河形成モデルを用い、ハップルディープフィールド (HDF) における銀河計数を再現するためには低密度宇宙 ( $\Omega_0 < 1$ )、特に宇宙項入り平坦な宇宙モデルが望ましいことを見出した。

今回は、同様のモデルを用いてすばるディープフィールド (SDF) における銀河計数の解析を行った。HDF が可視光の波長域であるのに対し、SDF は近赤外での観測であるため、HDF と SDF の銀河計数を同時に再現できるかどうかは重要な問題である。若干モデルに改良を加え (ダストの光学的厚みのモデル等) 計算した結果、HDF と同様に SDF でも低密度宇宙で観測を再現できることがわかった。また宇宙項無しの平坦な宇宙 ( $\Omega_0 = 1, \Lambda = 0$ ) では観測値に比べ銀河の数が少なすぎ、観測を再現できないことも確認した。近赤外での観測はダストにあまり依存しないため、ダストモデルの不定性にも殆ど依らず、理論との比較に際して有利であることも確認した。

### 3.8 AMR を用いた $N$ 体計算コードの並列化

昨年度までに、我々は空間分解能を局所的に高める適合格子分割 (AMR) と時間分解能を局所的に高める階層時間幅 (HTS) を実装した  $N$  体及び流体シミュレーションコードの開発を行ってきた。一方、平成 13 年 1 月よりスーパーコンピュータ VPP5000 を中心とした国立天文台の新計算機システムが稼動し始めた。この VPP5000 はベクトル並列型のスーパーコンピュータであり、その性能を發揮させるためには計算コードのベクトル化及び並列化が不可欠である。そこで、我々は AMR+HTS コードのうち、 $N$  体計算のベクトル化及び並列化を行うことにした。ところで、PM 法にはベクトル化が決してできないと従来考えられていた個所があったのだが、我々はそのような個所も含めコードをベクトル化することに成功し、ベクトル化率の極めて高いコードを開発することができた。このコードは Linpack ベンチマークで規格化された一秒あたりに重力計算ができる粒子数を基準に考えると、従来の高分解能  $N$  体シミュレーションコードと比較して十倍以上高速に計算できることが分かった。また、さらにベクトル並列型計算機の性能を引き出すために、我々は AMR+HTS コードの並列化に取り掛かった。この並列化は各階層の格子をモートン法で整列し、それらをプロセッサ数

で分割するというものである。その際、隣の格子が別のプロセッサに分配されるという場合が生じるが、そのような隣の格子のデータはそのデータを必要とするプロセッサ全てにそのコピーを転送させる。このコピーの格納場所を無矛盾に構築するのが実は容易ではない。他にも幾つもの困難があったのだが、そういった困難を一つ一つ解決し、我々はAMRを用いた $N$ 体コードの分散並列化に世界で初めて成功した。この並列コードは従来ではできなかった銀河ハローの統計的性質を調べるのに適している100Mpc立方領域での $512^3$ 体計算を、空間と時間双方において高い分解能で計算することができた。

### 3.9 数値銀河カタログの作成

宇宙論的 $N$ 体シミュレーションの結果は宇宙の質量分布を与えるものなので、そのままでは一般的な観測量と結びつけることができない。そこで、まず $N$ 体シミュレーションの結果からマージャーツリーを構成し、それから準解析的銀河モデルを使ってダークハローに観測量を持った数値的銀河を導入することによって数値銀河カタログを作成した。マージャーツリーは各時刻のシミュレーション結果からダークハローをFriends-of-friends法で抽出した後、前後の時刻のハローデータから異なる時刻でのハローの同定を行うことによって作成される。我々は数値銀河カタログを用いて銀河の分布を調べ、CDMではダークマターの二体相関関数が冪関数で表せないのに対し銀河の二体相関関数は観測されているように冪関数によく合うことと、ダークマターの二体相関関数が過去に遡るにつれ急速に弱くなっていくのに対し、銀河の二体相関関数は変化しないことを確認した。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Iwamuro, F., Motohara, K., Maihara, T., Kimura, M., Yoshii, Y., and Doi, M.: Fe II/Mg II Emission-Line Ratios of QSOs within  $0 < z < 5.3$ ; *The Astrophysical Journal*, **565**, 63-77, (2002).
  - [2] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Chemical Evolution of Odd Elements in an Inhomogeneous Early Galaxy; *The Astrophysical Journal*, **565**, 1011-1016, (2002).
  - [3] Enya, K., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Suganuma, M., Tomita, H. and Peterson, B., A.: *JHK'* Imaging Photometry of Seyfert 1 AGNs and Quasars I: Multi-Aperture Photometry; *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **141**, 23-29, (2002).
  - [4] Enya, K., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Suganuma, M., Tomita, H. and Peterson, B., A.: *JHK'* Imaging Photometry of Seyfert 1 AGNs and Quasars II: Observation of Long-Term Variability; *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **141**, 31-44, (2002).
  - [5] Enya, K., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Minezaki, T., Suganuma, M., Tomita, H. and Peterson, B., A.: *JHK'* Imaging Photometry of Seyfert 1 AGNs and Quasars III: Variability of Radio Quiet and Radio Loud AGNs; *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **141**, 45-59, (2002).
  - [6] Yoshii Y., Minezaki T., Aoki T., Enya K., Doi M., and Motohara K. Kobayashi Y., Suganuma M. and Tomita H., B. A. Peterson: "Supernova 2002ap in M74"; *IAU Circular #7826*, (2002).
- (会議抄録)
- [7] Tsujimoto, T. Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Theoretical Interpretation of Abundance Trends Seen in Extremely Metal-poor Stars; in *Cosmic Evolution*, ed. E. Vangioni-Flam, R. Ferlet and M. Lemoine (New Jersey: World Scientific), 219-220, (2001).
  - [8] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Cosmological Hydrodynamics Code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement; *Proc. of the 4th RESCEU Symp. "Birth and Evolution of the Universe"*, eds. K. Sato, and M. Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), 445-446, (2001).
  - [9] Yoshii, Y.: The MAGNUM Project: AGN Variability as a New Technique for Distance Determination; *Proc. of the 6th RESCEU Symp. "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology"*, eds. K. Sato, and T. Shiromizu (Tokyo: Universal Academy Press), 235-244, (2002)
  - [10] Nagashima, M., Yoshii, Y., Totani, T., and Gouda, N.: Galaxy Number Counts in the Subaru Deep Field: A Constraint on a Hierarchical Galaxy Formation Model; *Proc. of the 6th RESCEU Symp. "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology"*, eds. K. Sato, and T. Shiromizu (Tokyo: Universal Academy Press), 323-324, (2002).
  - [11] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Parallelization and Vectorization of the AMR N-body Code; *Proc. of the 6th RESCEU Symp. "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology"*, eds. K. Sato, and T. Shiromizu (Tokyo: Universal Academy Press), 377-378, (2002).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: The site for r-process nucleosynthesis; Euroconference The Evolution of Galaxies, (France, Oct. 2001).
  - [13] Yoshii, Y.: The MAGNUM Project: AGN variability as a new technique for distance determination; the RESCEU International Symposium on New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, (Japan, Nov. 2001).

- [14] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Parallelization and vectorization of the AMR N-body code; New Trends in Theoretical and Observational Cosmology (Japan, Nov. 2001).

(国内会議)

一般講演

- [15] 川良 公明, 吉井 讓, TAOグループ:「東京大学タカマ天文台計画」、木曾シュミットシンポジウム、(塩尻、2001年6月)
- [16] 小林 行泰 (国立天文台), 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 塩谷 圭吾, 青木 勉, 土居 守, 菅沼 正洋, 富田 浩行, Bruce A. Peterson(MSSSO):「MAGNUM プロジェクト」、日本天文学会 2001年秋季年会、(イーグレ姫路、2001年10月).
- [17] 矢作 日出樹, 吉井 讓:「AMR を用いた N 体コード: 階層時間幅の実装」、日本天文学会 2001年秋季年会、(イーグレ姫路、2001年10月).
- [18] 小林 行泰 (国立天文台), 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 塩谷 圭吾, 菅沼正洋, 富田浩行, 土居守, 本原顕太郎, Bruce A. Peterson (MSSSO):「MAGNUM プロジェクト 1. 試験観測の概要」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [19] 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 塩谷 圭吾, 小林 行泰 (国立天文台), 菅沼 正洋, 富田 浩行, Bruce A. Peterson(MSSSO), 土居 守, 本原 顕太郎:「MAGNUM プロジェクト 2. dust reverberation による AGN 変光曲線モデル」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [20] 峰崎 岳夫, 吉井讓, 青木 勉, 塩谷 圭吾, 小林 行泰 (国立天文台), 菅沼 正洋, 富田 浩行, Bruce A. Peterson(MSSSO), 土居 守, 本原 顕太郎:「MAGNUM プロジェクト 3. NGC 4151 の変光と dust reverberation」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [21] 菅沼 正洋, 吉井 讓, 青木 勉, 峰崎 岳夫, 塩谷 圭吾, 小林 行泰 (国立天文台), 富田浩行, Bruce A. Peterson(MSSSO), 土居 守, 本原 顕太郎:「MAGNUM プロジェクト 4. NGC5548 の可視-近赤外線モニター結果」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [22] 富田 浩行, 吉井 讓, 青木 勉, 峰崎 岳夫, 塩谷 圭吾, 小林 行泰 (国立天文台), 菅沼 正洋, Bruce A. Peterson(MSSSO), 土居 守, 本原 顕太郎:「MAGNUM プロジェクト 5. MCG+08-11-011 の可視-近赤外線モニター結果」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [23] 塩谷 圭吾, 吉井讓, 峰崎 岳夫, 小林 行泰 (国立天文台), 菅沼 正洋, 富田浩行, 青木 勉, Bruce A. Peterson(MSSSO), 土居 守, 本原 顕太郎:「MAGNUM プロジェクト 6. 可視近赤外域におけるクエーサーの変光観測」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).
- [24] 岩室 史英 (京大理), 本原 顕太郎, 舞原 俊憲 (京大理), 木村 仁彦 (京大理), 吉井 讓, 土居 守:「クエーサーの Fe/Mg 輝線比の進化」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).

- [25] 矢作 日出樹, 吉井 讓:「並列適合格子分割多体計算法」、日本天文学会 2002年春季年会、(茨城大学、2002年3月).

- [26] 吉井 讓:「銀河観測の光と闇」、新世紀における銀河宇宙観測の方向: その2、(ホテル箱根パウエル、2002年3月).

(招待講演)

(セミナー)

## 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・岡)

星と星の間には希薄なガスとチリの雲（星間雲）が漂っている。星間雲の中でも比較的密度が高い星間分子雲は、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、サブミリ波望遠鏡による観測的研究と、実験室における分子分光実験を行なっている。星間分子雲の構造、形成、進化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、天文学における未開拓の波長域である。本研究室では、わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）を富士山頂に設置して観測を行なっている。中性炭素原子の放つ 492 GHz（波長 0.6 mm）と 809 GHz（波長 0.4 mm）のスペクトル線について、星間分子雲スケールでの広域観測を展開しており、その分布を一酸化炭素の分布などと比較することで、星間分子雲の形成過程を解明しつつある。また、このような研究を銀河系スケールで展開するために、口径 18 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発し、チリでの運用を始めている。さらに、国立天文台が中心となって推進する ASTE 計画、ALMA 計画にも参加している。

一方、テラヘルツ帯への展開を図るために、本年度より超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ・ミキサ素子の開発を国立天文台野辺山観測所のグループと共同してスタートした。1.47 THz の窒素イオンのスペクトル線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相の分布と運動を明らかにし、プラズマ相から原子相、分子相に至る星間雲の「相変化」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。

#### 4.1 観測装置の開発・改良

##### 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、サブミリ波を観測するわが国で初めての望遠鏡である。富士山頂は冬季に気温が低く、観測するので、サブミリ波天体観測を妨げる水蒸気が少なく、観測には絶好の場所である。その優れた観測条件を生かして中性炭素原子のスペクトル線（ $^3P_1 - ^3P_0$ ; 492 GHz,  $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809 GHz）の観測を行い、星間分子雲の構造、形成、およびそこでの星形成過程を研究して

いる。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を開始し、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、衛星通信回線を利用した遠隔制御によって観測を行なっている。4 回の観測シーズンで、492 GHz のスペクトル線については 40 平方度を上回る領域のサーベイを行なうことができた。これはこれまでの中性炭素原子スペクトル線の観測規模を 1 桁以上も上回るものであり、近傍星間分子雲における分布の全貌を描き出しつつある。また、809GHz のスペクトル線についても、代表的星間分子雲でのマッピング観測をはじめて実現した。2001 年から 2002 年の観測シーズンにおいては、492 GHz/809 GHz の 2 バンド受信機を搭載し観測を行なった。

本研究は初期宇宙研究センター、ビッグバン宇宙国際研究センターの研究プロジェクトの一つとして推進しており、国立天文台の立松健一氏、関本裕太郎氏、野口卓氏、前澤裕之氏、大石雅壽氏、福井大学の斎藤修二氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、理研の池田正史氏、東大工学部の藤原英夫氏らとの共同研究である。

**受信機システムの改良** 昨年度、富士山頂サブミリ波望遠鏡に組み込んだ distributed junction (DJ) タイプの 492GHz 帯用 SIS 素子は観測シーズン中に接触不良のため使用不能となった。このため、今年度は 492GHz 帯用として新たに国立天文台野辺山宇宙電波観測所より供給を受けた parallel connected twin junction (PCTJ) タイプの SIS 素子を組み込み、492GHz / 809GHz の 2 バンド同時受信機を構成した。実験室で計測した受信機雑音温度は 492GHz : 130 K, 809GHz : 840 K であった。また、山頂で用いている GM2 段式冷凍機の到達温度を下げるため、今年度はじめて冷凍機冷媒の高圧 He ガスを富士山頂で充填した。これにより実験室では 5K 台であったミキサー温度を 3.9K に下げることができた。これらの工夫により望遠鏡に組み込んだ際の 492GHz 帯のシステム雑音温度を従来約 3 分の 2 に減少させることができた。

**Hot Electron Bolometer (HEB) 素子の開発** 富士山頂サブミリ波望遠鏡ならびに可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡で NII 輝線 (1.47THz) などのテラヘルツ波帯域の観測を行う目的で、Nb 拡散型 Hot Electron Bolometer (HEB) ミキサーを用いた超伝導受信機の開発に着手した。HEB ミキサーの製作においては、高純度の Nb 薄膜によるサブミクロンサイズの細線の描画が必要となる。そこで国立天文台野辺山のクリーンルームに電子ビーム描画装置を導入し、必要な性能の Nb 薄膜・細線を得るための条件を調べる実験を行った。その結果、薄膜についてはスパッタ装置を用いて 10~20nm 厚の比較的均質な薄膜を再現性良く作ることが可能となり、細線については 0.15 $\mu$ m 幅の細線の描画が実現できた。

**チョッピング副鏡の開発** チョッピング副鏡は、副鏡の駆動によって高速のビームスイッチングを行い、大気の状態の時間変動などによって生ずる受信機出力

の低周波ノイズに影響されない高感度検出を行う装置である。前年度までにステッピングモータを応用した電磁石駆動の方式みを開発し、ビーム振幅 $\pm 4'.8$ 、チョッピング周波数 $1 \sim 10$  Hzのチョッピング副鏡を製作している。01年度には、チョッピング副鏡の最終調整と、連続波観測のための位相検波器の製作を行い、9月に富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載した。搭載されたチョッピング副鏡を用いて、492 GHz帯において木星・土星の連続波の受信に成功した。この観測から、492 GHz帯での典型的な等価雑音フラックス密度は、 $4 \times 10^5$  mJy $\cdot$ Hz $^{-1}$ と測定されている。木星の連続波観測によって、望遠鏡アンテナのポインティング観測を行い、その結果 $5''$ (rms)のアンテナ指向精度を実現した[23]。

**望遠鏡駆動システムの改良** 望遠鏡の追尾精度を向上させる目的で、富士山頂サブミリ波望遠鏡のアンテナ駆動系の改良に取り組んだ。特に、アジマス軸モーターをより高分解能・高トルクのダイレクト・ドライブモーターに新たに交換することにより、指向精度 $10''$ という正確で、かつ安定した天体追尾を実現することが可能となった。このモーターの搭載に際して、ハード面では、モーター稼働範囲全周における温度依存性、繰り返し再現性の確認、及びリミットスイッチ回路の取り付け、ソフト面ではモータードライバへの命令部分のプログラム変更等を行なった。このように新装備されたアジマス軸モーターは昨シーズンから順調に稼働している。

## 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

本研究室では、小型(口径18cm)で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発している。この望遠鏡は、中性炭素原子が放射する二本のサブミリ波スペクトル線(CI  $^3P_1$ - $^3P_0$ : 492GHz,  $^3P_2$ - $^3P_1$ : 809GHz)による広域サーベイ観測を行うことによって、銀河系スケールにおける原子ガスの分布・運動・物理状態を調べることを目的としている。この望遠鏡の特長は、可搬型のため世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことができ、しかも主鏡口径が18cmと小さい(HPBW =  $13' @ 492$ GHz)ので広い領域をサーベイするのに適しているところにある[17]。

我々はこの可搬型18cmサブミリ波望遠鏡を、2001年3月、南米チリのアタカマ砂漠パンパラボラ(標高4800m)に移設し、望遠鏡の立上げ作業を行った。しかしこの時は、初期のAz駆動ギアの破損により立上げ作業はごく一部の機器に限られてしまった。それを受け、不具合のあった機器の修理・改良、制御ソフトウェアの整備などを経て、今年度9月に第2次サイト移設を行い、望遠鏡の立上げ作業およびテスト観測を行った。

**高速積分器の運用・改良** 音響光学型分光器(AOS)から出力される分光データに対して高速な積分処理を行い、on the fly(OTF)方式のマッピング観測に対応可能な積分器の開発を行ってきた。この積分器の特徴は、現行の富士山望遠鏡の積分器に比べて約4倍

の処理速度のZ80CPUと、データ入出力ポートを2系統備えたメモリIC(32bit Dual-Port SRAM)を搭載することにより、データ転送時のデッドタイムを32msまで抑え、連続的に高速なデータ積分を可能にした点である。ホスト計算機へのデータ転送はGPIBインターフェースを用いる。積分処理を行なう機能のうちCPU以外の論理回路は全て自作し、現行の富士山望遠鏡の積分器と比べて半分以下の容積を実現した。2001年9月に、この積分器を可搬型18cmサブミリ波望遠鏡に搭載して南米チリのPampa la Bolaにて観測を行ない、大気中のオゾン(O<sub>3</sub>)の輝線を検出することに成功した。その一方で、スパイク状のノイズや、チリの観測サイトの低温環境下における音響光学型分光計(AOS)との同期障害等の不具合が見つかったため、帰国後、その原因究明と改良を行なった[17]。

**望遠鏡制御ソフトウェアの改良** 昨年度3月のチリにおけるテスト観測において現れた問題点の解決にあたった。第一に、原点リセット時におけるモーターの不安定性が見られた。その解消のため、モーターの特性を解明し、それに沿ってプログラムを改良した。また、バックアップとして原点リセットを単独で行えるプログラムを整えた。第二に、電波ポインティングプログラムは開発途中であった。その開発を継続し、モーターの動作、擬似データを用いたパラメータfittingの整合性を確認し観測プログラムに組み込んだ。第三に、積分機とのコミュニケーションにおいて不具合があり、時々正常にデータが取得できない状況が生じていた。それを解決するため、データの読み出しを確実にし、かつ積分機特有のノイズを軽減するアルゴリズムの開発を行った。以上のような改良を行い、本郷において繰り返し試験を行った後、第2次サイト移設およびテスト観測に挑んだ。

**サイト移設・テスト観測** 可搬型18cmサブミリ波望遠鏡を、2001年9月に再度南米チリのアタカマ砂漠パンパラボラ(標高4800m)に移設し、望遠鏡の立上げ作業およびテスト観測を行った。今回は、重大なシステム障害も無く、順調に立上げ作業を進めることができた。2001年9月末までの作業進捗状況は以下の通りである。[1] 光学望遠鏡を使用した望遠鏡指向器差パラメータの決定。[2] 9月晴天時のパンパラボラにおける500GHz大気透過度の測定( $\tau = 500 = 0.5-0.9$ )。[3] 500GHz帯大気込みシステム雑音の評価( $T_{\text{sys}} = 650-1000$  K)。[4] 太陽および月の500GHz連続波検出、および電波軸指向器差パラメータの決定。[5] 太陽によるビームサイズ(HPBW =  $15.3' \pm 0.2'$ )、および月によるビーム能率( $\eta_{\text{moon}} = 0.56$ )の測定。[6] 周波数スイッチによる大気オゾン輝線(491.95 GHz, 496.25 GHz)の検出。

**望遠鏡駆動系の改良** 昨年9月にチリで行った試験観測においては、計二回光学ポインティングを行った。各回約150個の恒星を使用し、ポインティング誤差(RMS)は $2'.5 \sim 3'$ であった。また、その後、野辺山においてエレベーションモーター(ELモーター)

に簡易ヒーターを取り付け、計三回光学ポインティングを行った。各回約80個の恒星を使用し、誤差は1.5程度であった。しかし、これらの実験から、天体のトラッキングの際にELモーターで不具合が生じていることを発見し、現在モーターの交換作業を行っている。また、これまで制御にはOSにWindowsNTを使用した旧型のPCを用いていたが、現在OSにWindows2000を使用した新型のPCを用いたシステムに移行中である。

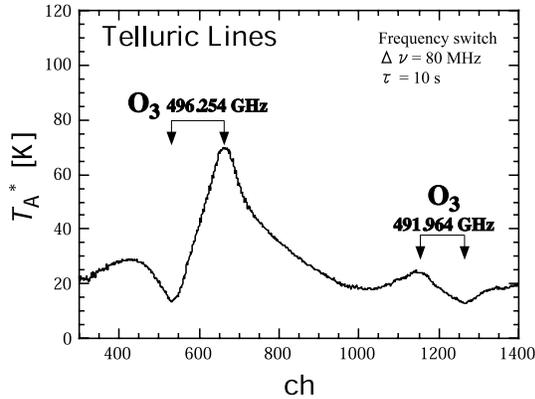


図 4.1 a: チリ・アタカマ高地において、可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡によって観測された大気オゾン輝線スペクトル。

## Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

ASTE は、チリ・アタカマ砂漠パンパラボラに口径 10 m のサブミリ波望遠鏡を設置する計画である。この望遠鏡は、南半球における初めての大口徑サブミリ波望遠鏡である。望遠鏡は 2002 年 3 月までにパンパ・ラ・ボラへの移設を完了し、現地における初期立ち上げ作業が進行している。本研究室では昨年度に引続き、国立天文台、東京大学天文学科、名古屋大学、大阪府立大などのグループと共同で、この計画を推進してきた。

**ASTE 350 GHz 帯受信機の開発** 本研究室では、野辺山のグループと共同で、ASTE に搭載するサブミリ波 350 GHz 帯超伝導受信機の開発を行ってきた。本年度は、昨年度に行われた野辺山での試験観測によって明らかになった、真空のリーク等の問題を改善するために、受信機デューアおよび LO 光学系の改良・最終調整を行った。またチューニング・モニタの計算機によるリモート化を進め、デューア内の温度・真空度モニタの他、SIS ミクサのバイアスコントローラ、LO の GPIB 制御化を行った。これをもって日本での受信機の開発・調整を終了し、2002 年 4 月にパンパ・ラ・ボラへ移動、望遠鏡に搭載し、現地での試験運用段階に移行している。

## 4.2 星間物質の観測的研究

**Rosette 分子雲の  $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$  輝線観測** Rosette nebula (ばら星雲) は、太陽系から約 1.6 kpc の距離にある OB 星団 NGC2244 に付随する HII 領域である。この HII 領域には、こちらから見てほぼ edge-on の配置で分子雲 (Rosette 分子雲) が付随している。この配置により Rosette 分子雲は、OB 型星からの強烈な紫外線放射場にさらされた分子雲表面の物理・化学状態を探る上で理想的な環境を提供している。

今冬我々は、Rosette 分子雲の  $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$  輝線 (492 GHz) による広域マッピング観測を行い、分子雲本体に付随した [CI] 輝線放射に加え、ばら星雲を取り囲む細い (幅約 2.3 pc) 円弧状の [CI] 放射を検出した。この円弧状成分の厚みは標準的光解離領域 (PDR) モデルにおける中性炭素原子 ( $\text{C}^0$ ) 層のそれと同程度 (密度  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  を仮定) であり、後方には拡散 CO 放射が付随している。つまり、これは光解離過程を起源とする  $\text{C}^0$  層の存在を観測的に示した初めての例と言える。一方で分子雲に付随する  $\text{C}^0$  成分では、ここでもまた  $\text{C}^0$  柱密度ピークが紫外線源から遠い方、CO コア後方の分子雲深層部に位置している。このことは、星間空間の中性炭素原子には、光解離起源以外のメカニズムに起因する成分が支配的である事を強く示唆している。

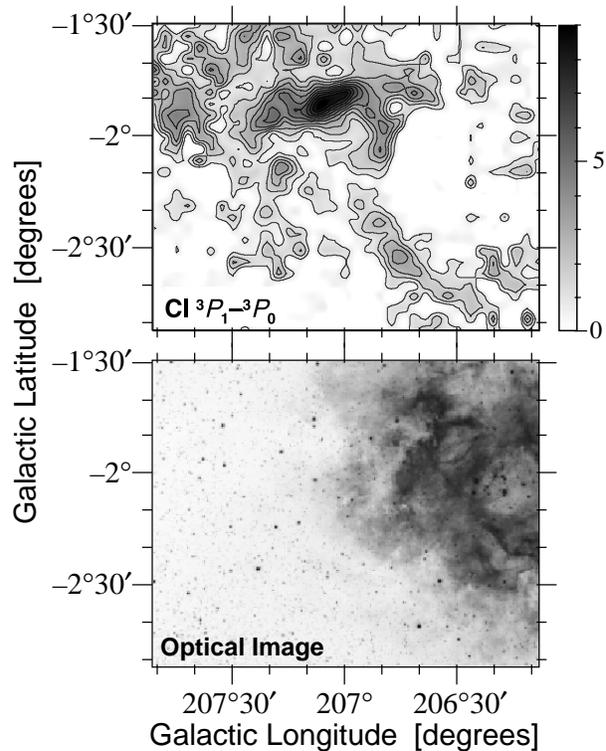


図 4.2 b: Rosette nebula (ばら星雲) 周辺の  $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$  輝線積分強度図 (上) と同領域の光学写真 (下)

**オリオン B 分子雲における中性炭素原子雲の詳細観測** 富士山頂サブミリ波望遠鏡の観測から同定した、オリオン巨大分子雲における中性炭素原子雲 (CI Cloud) において、その CI/CO 存在量比と、ピリアル質量/LTE 質量比に正の相関があることがわかった。そこでオリオン B 分子雲に存在する、CI/CO 比が異なる (0.05 から 1.2) 7 個の CI Cloud に対して野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて CO,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) の詳細観測を行った。その結果、6 個の CI Cloud に  $^{13}\text{CO}$  または  $\text{C}^{18}\text{O}$  のコアが付随していて、そのピリアル質量/LTE 質量比は CI Cloud から求めた値とほぼ一致した。CI/CO 比が低い Cloud においては、CI と  $^{13}\text{CO}$  の空間、速度方向の相関はよく、CI/CO 比が大きい Cloud ほどその相関が悪くなっている様子が観測された。特に、CI/CO 比が 1.2 と高い Cloud においては、CI 強度のピークと  $^{13}\text{CO}$  強度のピークが 0.8 pc 離れており、CI ピークから  $^{13}\text{CO}$  ピークの方向に対して、両輝線ともに線幅が小さくなっている様子がみられた。このような場所は、分子雲形成の初期段階である可能性が示唆される [9]。

**富士山頂サブミリ波望遠鏡による暗黒星雲 L134 CI 輝線ピーク部詳細観測と L1780 全体の観測** L134, L1780 はともに L183 分子雲複合体に含まれる、星形成の進んでいない暗黒星雲である。L134 に関しては 1999 年度に富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて、炭素原子輝線 (492GHz) による 3 分角グリッドの観測で分子雲全体の中性炭素原子 ( $\text{C}^0$ ) の分布を調べた。この CI 輝線のピーク位置は過去の  $^{13}\text{CO}$  輝線観測 (Laureijs et al. 1995) によるピークの位置とは数分角ずれていた。今回、このずれが有意である事を確かめるため、1.5 分角グリッドでピーク位置周辺部の 61 点に対して高い S/N 比の観測を行った。この結果、確かに CI 輝線ピーク位置は  $^{13}\text{CO}$  輝線ピーク位置に対して約 6 分角南東にずれており、 $^{13}\text{CO}$  の分布の急激に減少する部分に位置していた。

また今回、L1780 に関しても 3 分角グリッドで分子雲全体の  $\text{C}^0$  分布を明らかにした。L1780 は広がりから見て L134 の半分程度と小規模な分子雲である。CI 輝線の積分強度も L134 の半分以下であったが、 $\text{C}^0$  と  $^{13}\text{CO}$  の分布は大局的には一致していることが分かった。

これまで CI 輝線の観測を行った L183 分子雲複合体内の L183, L169, L134, L1780 の 4 つの分子雲について、CI 輝線積分強度と  $^{13}\text{CO}$  輝線積分強度の関係を定常状態の光解離領域 (PDR) モデル (Warin et al. 1996) と比較すると L134 の CI 輝線積分強度のみがモデルと比較して倍以上の強度で観測されている。この原因としては、 $\text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$  の変換がまだ完了していない比較的若い領域であることが考えられる [18]。

**$\rho$  Oph 領域の  $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$  輝線のマッピング観測** 昨年度まで観測を行ってきたへびつかい座領域 ( $\rho$  Oph) の暗黒星雲 L1688 に付随するフィラメント状の暗黒星雲 L1709 の一部および L1688 の南に位置する暗黒星雲 L1689 の全域に対して、 $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$  輝線

を富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いてマッピング観測した。観測は 3' グリッドで行ない、L1689, L1709 に対してそれぞれ 577 点 (約 1.4 平方度)、150 点 (約 0.4 平方度) のスペクトルデータを取得した。 $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$  輝線の分布は、全体的には  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  の分布とよく似ており、L1688 で発見されたような  $\text{C}^0$  が豊富な領域は見られなかった。L1689 における  $[\text{CI}]$  輝線強度が最も強い位置は、高密度分子雲コア L1689N の約 5' 東の位置であった。また、L1689N において、局所熱力学平衡 (LTE) を仮定し、CO と  $[\text{CI}]$  の励起温度は等しい ( $T_{\text{ex}}=25\text{K}$ ) として、L1689N での  $\text{C}^0/\text{CO}$  柱密度比を計算したところ、0.12 となった。これは L1688 における典型的な値とほぼ等しい値である。

**DR21 領域の  $[\text{CI}(^3P_2-^3P_1)]$  輝線の観測** DR21 は、コンパクト HII 領域 DR21 と OH メーザ源 DR21(OH) の周囲に分布する分子雲複合体である。2000 年に行った  $[\text{CI}(^3P_2-^3P_1)]$  輝線の観測に引き続き、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて  $[\text{CI}(^3P_1-^3P_0)]$  輝線の 1'.5 グリッドでのマッピング観測を行った。CI ( $^3P_1-^3P_0$ )、CI ( $^3P_2-^3P_1$ ) 輝線の強度は空間的、速度的に高い相関を示しており、これは CI 輝線の励起温度が領域全体を通じて略ぼ一定であり、 $\text{C}^0$  の空間分布が紫外線源に大きく影響されないことを裏付けている。3 月には野辺山 45m 望遠鏡により、DR21 領域の  $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$  輝線のマッピングを行った。この結果、CI ( $^3P_1-^3P_0$ ) 輝線と  $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$  輝線との積分強度比は  $A_v \sim 30$  の領域まで比例することがわかった。このことは、DR21 領域の  $\text{C}^0$  の空間分布が単純な PDR モデルでは説明されないことを強く示唆している。

**おうし座暗黒星雲 L1495 における  $[\text{CI}(^3P_1-^3P_0):492\text{GHz}]$  輝線観測** この領域ではこれまで、CO 輝線の観測は活発に行われているが、CI (492 GHz) 輝線の観測は皆無であった。そこで、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いてこの領域の広域観測を行なった。観測の結果、CI 分布は  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  及び IRAS (60 $\mu\text{m}$ ) の分布と大局的な一致を示した。励起温度、LTE の仮定のもとに求められた柱密度  $N(\text{C}^0)$  は  $\sim 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  と、同じおうし座領域である HCL2 での値と同程度であった。 $N(\text{C}^0)/N(\text{CO})$  は 0.1-0.5 を示し、特に、南北に伸びるフィラメント構造を挟んで東西方向に沿って、この比の有意な増加傾向がみられた。また、東側領域に原始星や T-tauri 型星が集中して存在し、CI 分布と反相関を示していた。これらの結果と、時間依存性 PDR モデルの数値計算とから、西側領域の方がより化学進化の早い段階にあると考えられる。この領域においても、いわゆる”標準 PDR モデル”では  $\text{C}^0$  の柱密度は説明できないことが明らかとなり、時間依存性の重要性が示唆される [22]。

**おうし座 B211-B213-B216 領域での  $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$  輝線観測** おうし座暗黒星雲 (距離 140pc) は低質量星形成領域として最も有名なものの一つである。その中で分子雲がフィラメント状に連なって分布している B211-B213-B216 領域に対して  $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$  輝線による広域観測を行った。CI 積分強度の大局的

な分布傾向は  $^{13}\text{CO}$  のそれとよく相関していたが、同領域において  $^{18}\text{CO}$  輝線観測によって同定されているピークと今回 CI 輝線の観測で見出されたピークの位置はいずれも完全には一致していない。CI・ $^{13}\text{CO}$  とともに際だって強く、 $\text{CI}/\text{CO} \geq 0.3$  と高い値を示す領域 (B211)、CI・ $^{13}\text{CO}$  のピークが一致している領域 (B213)、両ピークに明確なずれが見られる領域 (B216)、とフィラメント上においてそれぞれ異なる特徴を持つ領域を見出した [24]。

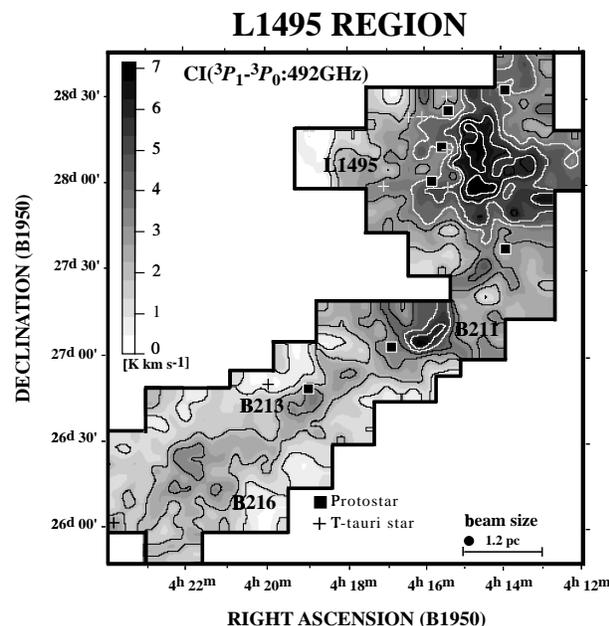


図 4.2 c: おうし座暗黒星雲 L1495-B213 領域における CI 積分強度図: 四角印は原始星、十字印は T-tauri 型星

### 4.3 実験室分子分光

星間分子雲には微量ではあるが様々な分子が存在している。それらの中には、実験室の環境では寿命が短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が半数近くを占める。そのような分子の回転スペクトルは実験室での測定が容易でないため、星間分子雲に存在することが予想されていても、スペクトル線の周波数が知られておらず、探査できていないものが少なくない。また、フリーラジカルの構造と分子内運動の理解は、分子科学の観点からも重要な課題である。そこで、本研究室では「短寿命分子」の回転スペクトルを、フーリエ変換ミリ波分光を用いて調べている。この分光器は、世界で唯一、85 GHz までの周波数で「短寿命分子」のスペクトルを測定できる感度を持っており、それを生かして基本的な炭化水素ラジカルの回転スペクトルを研究している。

**エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光** エチルラジカルは基本的なアルキルラジカルであり、メチ

ル基の内部回転運動やメチレン基の反転運動を伴うため、分子構造や分子内運動に興味を持たれている。我々は以前  $\text{C}_2\text{H}_5$  の  $1_{01}-0_{00}$  純回転遷移をフーリエ変換ミリ波分光によってはじめて検出した。今回は  $\text{C}_2\text{H}_5$  の  $1_{01}-0_{00}$  遷移の微細、超微細構造の強度パターンを遷移間の強度の混ざり効果を厳密に考慮し解析を行った。その結果、測定したスペクトルパターンを説明でき、数本の帰属できないスペクトル線を拾い出すことができた。残りの帰属出来なかった遷移については、内部回転励起状態での遷移であると考えられた。そのメチル基の内部回転運動による内部回転励起状態を詳しく調べるため、 $\text{C}_2\text{D}_5$  の  $1_{01}-0_{00}$  の回転遷移を探し、30.8 GHz 領域で検出した [11]。今回得られたスペクトルの微細、超微細構造パターンの解析にはメチル基の内部回転を考慮した取り扱いが必要である。現在そのような解析が進行している。

**ビニルラジカル ( $\text{C}_2\text{D}_3$ ) のフーリエ変換ミリ波分光** ビニルラジカルは化学反応の重要な中間体として知られており、大振幅  $\text{CC-H}_\alpha$  変角振動を持つ。我々はビニルラジカルのトンネル効果を詳しく調べるため、フーリエ変換ミリ波分光計を用い、 $\text{C}_2\text{D}_3$  の  $1_{01}-0_{00}$  遷移の回転スペクトルを 44.4 GHz 領域ではじめて検出した。ビニルラジカル ( $\text{C}_2\text{D}_3$ ) の  $1_{01}-0_{00}$  回転遷移は電子スピンや重水素核スピンにより、複雑な微細や超微細構造分裂を示す。それらを帰属したところ、基底状態  $v=0$  ( $I_\beta=2, 0, I_\alpha=1$ ) のスペクトルのみならず、トンネル分裂した上の状態  $v=1$  ( $I_\beta=1, I_\alpha=1$ ) のスペクトルも測定されていることがわかった。予想されたスペクトルパターンに基づいた最小二乗解析の結果、回転定数および微細、超微細構造作用定数を決定した。さらに、今回決定された超微細構造作用定数に基づき、 $\text{CC-D}_\alpha$  変角振動によるトンネル分裂エネルギー幅を推定した [12]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Habara & S. Yamamoto, "Microwave Spectrum of the  $\text{CH}_3\text{CCS}$  Radical in the  $^2E_{3/2}$  Electronic Ground State", *Journal of Chemical Physics*, **115**, 4502 (2001)
- [2] S. Yamamoto, H. Habara, E. Kim, & H. Nagasaka, "Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy of Chlorocarbene ( $\text{HCCl}$ )", *Journal of Chemical Physics*, **115**, 6007 (2001)
- [3] H. Habara & S. Yamamoto, "Microwave Spectrum of the  $\text{FCO}$  Radical in the  $^2A'$  Electronic Ground State", *Journal of Molecular Spectroscopy*, **207**, 238 (2001)
- [4] T. Hirota, T. Ito & S. Yamamoto, "L1521E: A Starless Core in the Early Evolutionary Stage?", *The Astrophysical Journal*, **565**, 359 (2002)
- [5] T. Oka, S. Yamamoto, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, K. Kamegai, T. Sakai, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S.

- C. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, & J. Inatani, "Atomic Carbon and CO Isotope Emission in the Vicinity of DR15", *The Astrophysical Journal*, **558**, 176 (2001)
- [6] T. Oka, T. Hasegawa, F. Sato, M. Tsuboi, & A. Miyazaki, "A Molecular Cloud and an Expanding Cavity Adjacent to the Nonthermal Filaments of the Galactic Center Radio Arc", *Publicaion of the Astronomical Society of Japan*, **53**, 779 (2001)
- [7] T. Oka, T. Hasegawa, F. Sato, M. Tsuboi, & A. Miyazaki, "A Hyperenergetic CO shell in the Galactic Center Molecular Cloud Complex", *Publicaion of the Astronomical Society of Japan*, **53**, 787 (2001)
- [8] T. Oka, T. Hasegawa, F. Sato, M. Tsuboi, & A. Miyazaki, "Statistical Properties of Molecular Clouds in the Galactic Center", *The Astrophysical Journal*, **562**, 348 (2001)
- [9] M. Ikeda, T. Oka, K. Tatematsu, Y. Sekimoto, & S. Yamamoto, "The Distribution of Atomic Carbon in the Orion Giant Molecular Cloud" *The Astrophysical Journal Supplement*, **139**, 467 (2002)
- [10] K. Kamegai, M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, M. Iwata, T. Sakai, T. Oka, S. Yamamoto, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, T. Noguchi, S. Saito, H. Fujiwara, H. Ozeki, J. Inatani, & M. Ohishi, "Distribution of the [CI] Emission in the  $\rho$  Ophiuchi Dark Cloud", *The Astrophysical Journal*, submitted
- [11] E. Kim, H. Habara, & S. Yamamoto, "Hyperfine Interaction Constants of the HCCS and DCCS Radicals Studied by Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy", *J. Mol. Spectrosc.*, in press.
- [12] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of the deuterated vinyl radical,  $C_2D_3$ ", *J. Chem. Phys.*, in press.
- (学位論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] 山本智 他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ：星間分子雲における中性炭素原子分布の意味、日本天文学会 (イーグレ姫路、2001年10月)
- [14] E. Kim, H. Habara, & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of the ethyl radical in the electronic ground state", "56th Ohio State University in International Symposium on Molecular Spectroscopy", Columbus, Ohio, USA (June 11-15, 2001)
- 招待講演
- [15] S. Yamamoto: Interstellar Atomic Carbon, ALMA Science Day (Santiago, Chile, Sept. 2001)
- [16] S. Yamamoto: Observational Approach to Molecular Cloud Formation, The 5th International Conference of RESCEU (Tokyo, Nov. 2001)
- (国内会議)
- 一般講演
- [17] 岡 朋治、山本智、亀谷和久、松尾公大、林田将明、池田正史、関本裕太郎、立松健一、神庭利彰：可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡の開発 - II. チリ・パンパラボラ移設、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [18] 伊藤哲也、山本智 (東大理)、他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ：富士山頂サブミリ波望遠鏡による暗黒星雲 L134/L1780 の CI マッピング観測、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [19] 亀谷和久、岡朋治、山本智、他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ： $\rho$  Oph 領域の暗黒星雲に対する中性炭素原子輝線の観測日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [20] 金銀淑、山本智：エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光 II、分子構造総合討論会 (北海道大学、2001年9月)
- [21] 金銀淑、山本智：ビニルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光、分子分光研究会 (東京大学、2001年11月)
- [22] 久保井信行、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ：おうし座暗黒星雲 L1495 における  $CI(^3P_1 - ^3P_0)$  輝線のマッピング観測、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [23] 田中 邦彦、岡 朋治、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ：富士山頂サブミリ波望遠鏡のチョッピング副鏡の開発、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [24] 新保 謙、岡 朋治、山本 智、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ： $CI(^3P_1 - ^3P_0)$  輝線によるおうし座 L1495 領域のフィラメント構造の観測、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)
- [25] 林田将明、岡朋治、山本智 他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ：富士山頂サブミリ波望遠鏡による、銀河面分子雲  $CI^3P_1 - ^3P_0$  輝線の観測、日本天文学会 (茨城大学、2002年3月)

## 5 暗黒物質観測

——神岡鉱山における暗黒物質探査——  
(箕輪・井上)

箕輪 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実験的研究を行なっている。

### 5.1 ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験

暗黒物質の検出は、素粒子、宇宙物理にまたがる大きな課題であり、直接、間接を合わせて、数多くの実験が現在までに行われている。我々は、ボロメーターを用いた暗黒物質検出器を開発、超対称性理論によって予言されている粒子、ニュートラリーノの直接検出を目指して実験を行っている。ニュートラリーノによって予想されるイベントレートは極めて低いため、我々は宇宙線の影響のない大地下深度の実験室である宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設で測定を行なっている。本研究は筑波大学大塚洋一教授との共同研究である。

現在世界で行われている暗黒物質直接探索実験は、いずれも暗黒物質と原子核の弾性散乱を利用、原子核に与えられた反跳エネルギーを何らかの方法で捉える、という手法が用いられている。

ニュートラリーノと原子核の弾性散乱は、スピンの依存しない項とスピンの依存した項の和であらわれ、どちらの項がどの程度優勢であるのかは、超対称性理論のパラメータ依存となるため予言できない。

我々は、スピンの依存した相互作用による検出を目指して、フッ化リチウム (LiF) ボロメーターを開発した。

神岡における測定でニュートラリーノと陽子のスピンの依存した散乱断面積のニュートラリーノの質量に対する制限曲線を得た。得られた制限曲線を図 5.1 a に示す。各制限曲線の上側が 90% の信頼度で排除されている。我々の実験は  $28\text{GeVc}^{-2}$  のニュートラリーノに対して  $21\text{pb}$  の制限をつけた。

1998 年頃からイタリアのミラノ大を中心とする DAMA グループが、スピンの依存しない相互作用をする暗黒物質の直接検出に成功したと報告している。彼等は NaI シンチレーターによって得られたスペクトルの季節変動を検出の証拠としている。しかし、その後 2000 年になってアメリカの CDMS グループが、DAMA グループの主張するパラメータ領域にニュートラリーノがある可能性は極めて小さい、という報告をしている。また、英国のグループ UKDMC が同

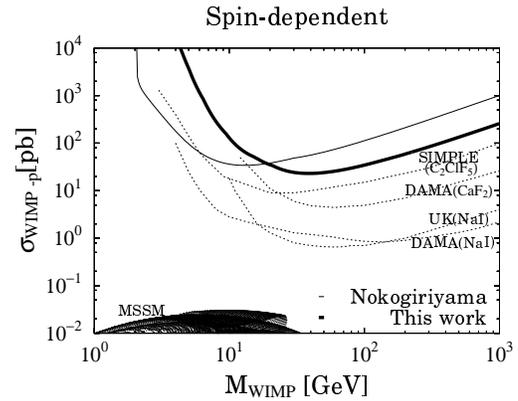


図 5.1 a: ニュートラリーノと陽子のスピンの依存した散乱断面積の制限曲線。各曲線の上側が 90% の信頼度で排除されている。

様に NaI を使用して DAMA グループと同程度のスピンの依存した散乱断面積の制限を得ている。図 5.1 a に示された断面積のみを見る限り、われわれの現在の制限はこれら二つのグループのつけた制限にまだ及ばない。しかし、ニュートラリーノと陽子、およびニュートラリーノと中性子の間の断面積に分解して比較すると、LiF は NaI では排除できないパラメータ領域に感度をもつ。

我々はニュートラリーノと陽子および中性子とのスピンの依存したカップリングに関する制限を計算、UKDMC の結果と比較した。その結果を図 5.1 b に示す。縦軸はニュートラリーノと中性子とのカップリング、横軸はニュートラリーノと陽子とのカップリングである。太い実線の内側が我々の実験で許される範囲である。10, 50, 100  $\text{GeVc}^{-2}$  のニュートラリーノに関して、UKDMC 実験の付けた制限をさらに狭めているのが示されている。

### 5.2 有機単結晶シンチレーターを用いた暗黒物質検出器の開発

暗黒物質ニュートラリーノの検出には、通常原子核との弾性散乱を利用するが、バックグラウンド事象との区別をするためには、検出器でのカウントレートに暗黒物質が存在した場合生じる、何らかの変化をとらえる必要がある。これまでに他グループにより行われてきた方法は、地球の公転に起因したエネルギースペクトルの季節変動をとらえることに主眼をおいていた。

ところで、暗黒物質は銀河ハローに付随していると考えられているが、地球は銀河の回転運動として  $220\text{km/s}$  で動いている。したがって地球上では暗黒物質の風を感じることはできるはずである。原子核の反跳方向に感度をもった検出器によりこの“風向

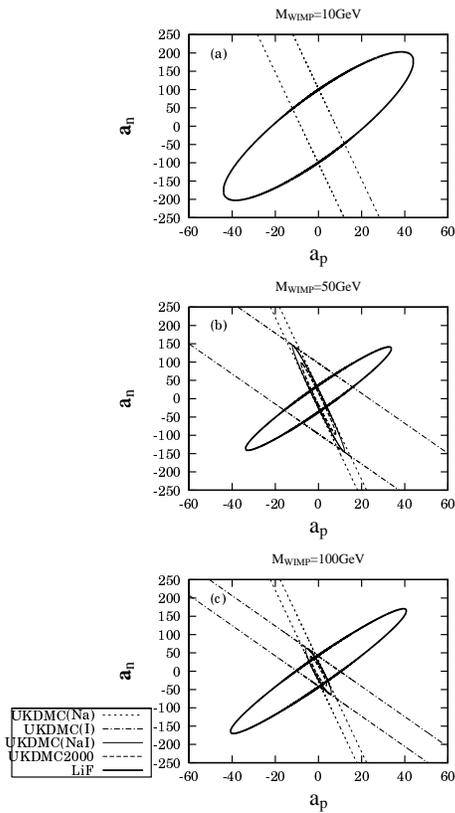


図 5.1 b: ニュートラリーノと核子のカップリングに関する制限図。縦軸はニュートラリーノと中性子とのカップリング、横軸はニュートラリーノと陽子とのカップリングである。それぞれの曲線の内側が各実験によって許される範囲である。

き”をとらえられれば、季節変動より確実な暗黒物質の証拠が得られる。

そこでわれわれは方向感度検出器として、有機単結晶シンチレーターを用いた暗黒物質検出器の開発を始めた。アントラセンやスチルベンなどの有機単結晶はその結晶構造の非対称性から、重荷電粒子の入射方向により発光効率が異なることが 1960 年頃より知られていた。この性質を利用することで、暗黒物質の検出器への入射方向に関する情報が得られるはずである。

#### 有機単結晶シンチレーター

現在ではほとんど用いられていないため国内では製造されておらず、ウクライナのクロスベーター社からアントラセンとスチルベンを購入した。放射線不純物について当研究室の低バックグラウンド Ge 検出器で検出限界以下であることを確認した。

#### クエンチングファクターの測定

一般にシンチレーション検出器では、荷電重粒子が入射した場合、エネルギー損失当りの発光量は電子の場合に比べて少なくなる。この減光の割合をク

エンチングファクターという。有機単結晶シンチレーターはクエンチングファクターが入射方向によって変化すると考えられている。

そこで、結晶中の反跳原子核 C, H によるクエンチングファクターを測定する必要がある。通常、加速器を用いた単色中性子ビームによって測定されるが、我々は、中性子源  $^{252}\text{Cf}$  を用いた方法を考案した。 $^{252}\text{Cf}$  が自発核分裂する際に中性子とともに放出される即発ガンマ線を用い入射中性子の TOF を測定する。さらに散乱後の中性子の TOF と散乱角を測定することで、kinematics から反跳原子核と、反跳エネルギーが求まる。実際の発光量と反跳エネルギーの比からクエンチングファクターが求まる。

この方法でスチルベンシンチレーターの H 反跳によるクエンチングファクターを測定した。

#### 角度依存性

(図 5.2 c) にスチルベン中の H の反跳エネルギー 200keV-3MeV でのクエンチングファクターを示す。反跳方向が結晶軸  $c'$  に対し  $0^\circ$  のときが最大、 $90^\circ$  のときが最小、変化の割合は 25% ほどであることを確認した。また低エネルギーではクエンチングファクターが増加する傾向があることが確認できた。

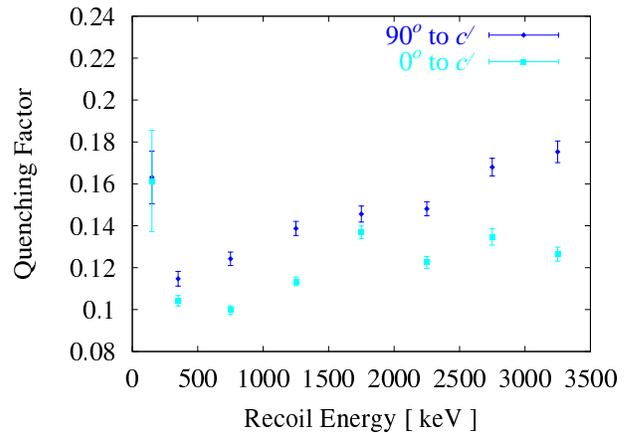


図 5.2 c: スチルベン H 反跳によるクエンチングファクター

#### 計画

実際に有機単結晶シンチレーターを暗黒物質探索にどのように利用するかを考察した。

- 地球の自転により、暗黒物質の風向きは常に変化する。そこでシンチレーターを駆動系にのせ、常に風向きに発光量最大の結晶軸をあわせるようにした場合と、発光量最小の軸をあわせるようにした場合で反跳エネルギースペクトルの変化をみる。

アントラセンとスチルベンについて、シミュレーションにより生じる変化を見積もった。

- シンチレーターとしてだけでなく、ボロメー

ターとして動作させ反跳エネルギーを測定することで、暗黒物質の入射方向の情報を得る。デバイ温度等物性的にはボロメーターとして動作しうると考えられる。

これらは、アクシオンヘリオスコープ実験やボロメーター実験で当研究室で培った技術を活用できるものである。

## 5.3 アクシオンヘリオスコープ実験

Axion は QCD の強い CP 問題と呼ばれる矛盾を解決するために導入された粒子である。素の QCD から強い相互作用が CP 対称性を破るという結論が得られてしまう。実際この効果は中性子の電気双極子能率として観測されると予想されるが、観測値は零と無矛盾であり CP が破れているとした場合の予測値より 9 桁以上小さいことが知られている。Axion 模型では自発的に破れる大局 chiral U(1) 対称性を導入することで、強い相互作用が CP を破らないことを保証し、同時にその南部-Goldstone boson である axion の存在を予言している。

本研究では太陽から放出される axion を地上で光子 (X 線) に変換し直接検出しようという実験をおこなっている。我々の axion helioscope では 4 T、2.3 m の racetrack 形超伝導磁石により axion に進行方向と垂直な磁場をかけ、光子に変換する。それを太陽と反対側に置かれた X 線検出器によって捕らえる仕掛けになっている。また、太陽を追尾するため helioscope 全体は自動制御の経緯儀となっており上下  $\pm 28^\circ$ 、東西南北ほぼ  $360^\circ$  という広い範囲を追尾可能である。さらに、axion-光子変換を行う磁場のかかった領域には He ガスを導入できるようになっており、質量のある axion に対して光子の位相を合わせ変換効率を維持できるようになっている。

これまでの観測では axion によると考えられる有意な事象は捕らえられていないが、この事実から axion と光子の結合定数に強い制限がつけられて  $m_a < 0.03$  eV の axion に対して、 $g_{a\gamma\gamma} < 6.0 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ 、また、He ガスを導入した観測から  $0.05 < m_a < 0.27$  eV の axion に対して、 $g_{a\gamma\gamma} < 6.8-10.9 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$  ( $m_a$  によって値が異なる、図 5.3 d 参照。) という上限値を得た。Axion 模型自体は axion の質量  $m_a$  を予言しないため色々な可能性がありうるが、この領域では上記の値が観測的にえられたもつとも厳しい制限であり、世界最高の感度を有している。

現在はさらに重い axion を探索できるよう、さらに密度の高い He ガスを安全に導入するための開発を行っている。

また、太陽以外の天体を axion helioscope で観測する実験も引き続き行っており、高磁場天体である magnetar の観測を検討し作業を進めている。

本研究は高エネルギー加速器機構の山本明教授と共同で行っている。

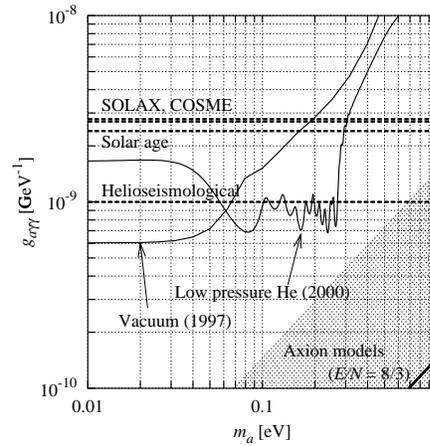


図 5.3 d: Axion と光子の結合定数に対する制限。Vacuum と Low pressure He と記されているのが我々の axion helioscope による観測値である。

### <報文>

(原著論文)

- [1] T. Namba, Y. Inoue, S. Moriyama, M. Minowa: An x-ray detector using PIN photodiodes for the axion helioscope, astro-ph/0109041 to be published in Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. A.
- [2] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, A. Yamamoto: Search for sub-electronvolt solar axions using coherent conversion of axions into photons in magnetic field and gas helium, astro-ph/0204388.
- [3] K. Miuchi, M. Minowa, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, and Y. Ootuka: First results from dark matter search experiment with LiF bolometer at Kamioka Underground Laboratory, astro-ph/0204411.

(国内雑誌)

- [4] 蓑輪 眞: 「暗黒物質は発見されたか?」, パリティ, Vol.16, 2001 年 9 月号.

(会議抄録)

- [5] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto: Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment, Proceedings of the Third International Workshop on the Identification of Dark Matter, Eds: N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific, 2001) pp.493-498.
- [6] K. Miuchi, M. Minowa, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, and Y. Ootuka: Dark Matter Search with Lithium Fluoride at Kamioka, Proceeding of the Third International Workshop

on the Identification of Dark Matter, Eds: N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific, 2001) pp.391-396.

- [7] M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, and Y. Ootuka: The LiF dark matter experiment at Kamioka mine, Proceeding of the International Conference DARK2000, Ed: H. V. Klapdor-Kleingrothaus (Springer, 2001) pp.610-614.
- [8] M. Minowa: Dark Matter, Proceeding of the 2nd International Workshop on Low Energy Solar Neutrino Detection, Eds: Y. Suzuki, M. Nakahata and S. Moriyama (World Scientific, 2001) supplement.
- [9] 蓑輪 眞: 宇宙由来新粒子の探索、宇宙科学研究所 宇宙圏研究会 21 世紀の宇宙観測 (高宇連シンポジウム) 会議抄録 (2001) pp.38-40.

(学位論文)

- [10] 身内賢太郎: フッ化リチウムボロメータを用いた大深度地下実験室における暗黒物質探索実験、Dark Matter Search Experiment in a Deep Underground Laboratory with LiF Bolometer、平成 14 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。
- [11] 清水雄輝: シンチレーターの原子核反跳に対する Quenching Factor の測定と異方性を考慮した暗黒物質検出実験への利用、平成 14 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。

(著書)

- [12] 手嶋政廣, ピエール ソコルスキー, 蓑輪 眞: Proceedings of the International Workshop on Extremely High Energy Cosmic Rays — Experiments, Theories and Future Direction —, 最高エネルギー宇宙線 — 実験、理論、将来へ向けて —, Supplement B to J. Phys. Soc. Jpn. Vol.70 (2001).

< 学術講演 >

(国際会議)

- [13] M. Minowa: Dark Matter, the 2nd International Workshop on Low Energy Solar Neutrino Detection, Tokyo, Japan, 4-5 December 2000.
- [14] M. Minowa: Axion Telescope Experiment, The 5th RESCEU International Symposium, New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, Tokyo, Japan, 13-16 November 2001.

(国内会議)

一般講演

- [15] 井上慶純: 太陽アクシオン検出実験、日本物理学会秋の分科会、沖縄国際大学 2001 年 9 月 23 日。
- [16] 竹田敦: ボロメータを用いた暗黒物質探索実験における低バックグラウンド化への試み、日本物理学会秋の分科会、沖縄国際大学 2001 年 9 月 23 日。

[17] 竹田敦: LiF ボロメータの高感度化及び LiF 以外の吸収体を用いた暗黒物質探索実験計画、日本物理学会第 57 回年次大会、立命館大学びわこ草津キャンパス 2002 年 3 月 27 日。

[18] 身内賢太郎: LiF Bolometer を用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験—LiF 結晶の低バックグラウンド化及び振動対策を行なった 2001 年の測定経過—、日本物理学会秋の分科会、沖縄国際大学 2001 年 9 月 23 日。

[19] 身内賢太郎: LiF ボロメータを用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験 —2001 年の測定結果報告—、日本物理学会第 57 回年次大会、立命館大学びわこ草津キャンパス 2002 年 3 月 27 日。

[20] 身内賢太郎: LiF ボロメータを用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験、第 8 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村、2002 年 2 月 19 日。

[21] 身内賢太郎: Dark Matter Search Experiment with LiF Bolometer at Kamioka(英語発表)、NDM02 地下実験に関するワークショップ、国際高等研究所、2002 年 2 月 23 日。

[22] 難波俊雄: 天体からのアクシオン探索実験、日本物理学会 2001 年秋の分科会、沖縄国際大学 2001 年 9 月 23 日。

[23] 関谷洋之: スピンにカップリングする暗黒物質の探索、日本物理学会 2001 年秋の分科会、沖縄国際大学 2001 年 9 月 23 日。

[24] 関谷洋之: 暗黒物質検出のための方向感度を持った検出器の開発、第 8 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2002 年 2 月 19 日。

[25] 蓑輪 眞: 宇宙の暗黒物質の探索、岐阜県神岡町 宇宙まるかじり講座、岐阜県神岡町中央公民館ホール 2001 年 8 月 12 日。

[26] 蓑輪 眞: 宇宙由来新粒子の探索、宇宙科学研究所 宇宙圏研究会 21 世紀の宇宙観測 (高宇連シンポジウム)、立教大学 太刀川記念会館 2001 年 8 月 20-21 日。

[27] 蓑輪 眞: 暗黒物質の直接探索、宇宙線研究所研究会 新技術で切り開く宇宙線物理、宇宙線研究所 2002 年 3 月 8 日。

(セミナー)

[28] 身内賢太郎: フッ化リチウムボロメータを用いた大深度地下実験室における暗黒物質探索実験、宇宙線研究所セミナー、東京大学宇宙線研究所 (柏キャンパス)、2002 年 2 月 15 日。

[29] 蓑輪 眞: Axion 望遠鏡 東京大学物理学教室談話会、2001 年 10 月 5 日。

得られた遠方銀河の性質を近傍銀河のものと比べ、銀河形成および宇宙の構造形成シナリオを明らかにしつつある。

## 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)

### 6.1 銀河・銀河団の観測的研究

測光的赤方偏移 (photo- $z$ ) に基づく SDF 銀河の光度関数の進化 (古澤, 岡村, 嶋作, 大内, 宮崎)

宮崎聡 (国立天文台) 他 の Suprime-Cam チームとの共同研究. すばるディープフィールド (SDF) の Suprime-Cam による多色撮像データ ( $B, V, R, i', z'$ ) に対して photo- $z$  を求め, 約 20,000 個の銀河サンプルに基づいて中間赤方偏移帯域 ( $z=0.2-1.25$ ) のフィールド銀河の光度関数 (LF) の進化を調べた. 今回の解析では,  $B$  バンド (トータル, 色別) 及び UV2000Å (トータル) における色ごとの LF の進化を調べ, 主に次のような結果を得た. (1)  $B$  バンド LF は, トータル・色別共に  $z=0.2-0.5$  では概ね近傍 (SDSS) の LF と一致し,  $z > 0.5$  でもこれまでの赤方偏移サーベイをサポートする. (2)  $z=0.2-1.25$  での銀河進化は, 純粋光度進化や典型的な階層的クラスタリングモデルのみでは説明できず, 両者の中間と考えられる. (3)  $z=0.2-1.25$  の星形成率は過去ほど高く, 過去ほど明るい銀河内での星形成率が活発である. (4) 多数の青い矮小銀河に加え, 赤い矮小銀河をフィールドでは初めて有意に検出した.

すばるディープフィールドにおける  $z > 3$  銀河の統計的性質 (大内, 岡村, 嶋作, 古澤, 宮崎)

宮崎聡 (国立天文台) 他 の Suprime-Cam チーム, Subaru Deep Field プロジェクトチームとの共同研究. すばる主焦点カメラの完成により, これまで不可能だった広領域にわたる遠方銀河観測ができるようになった. 我々は, 星間減光が極めて少ないすばるディープフィールドに対して, 広領域ディープイメージングを行った. このデータを元に遠方 ( $z > 3$ ) 銀河を 2800 個程度検出し, これまで観測的に知られていなかった遠方銀河の (1) 光度関数, (2) 角度相関関数, (3) ダスト吸収, (4) 有効半径, を明らかにした.

Extremely Red Objects (EROs) を用いた楕円銀河の進化の研究 (宮崎, 岡村, 嶋作, 大内, 古澤)

宮崎聡 (国立天文台) 他 の Suprime-Cam チーム, 田村元秀 (国立天文台) 他 の SIRIUS チームとの共同研究. EROs は  $R-K \geq 5$  (Vega) など で定義される近赤外で非常に明るい天体であり, 主に  $z > 1$  の楕円銀河とダスト吸収の強い星形成銀河であるとされる. 本研究では, 可視撮像装置の Suprime-Cam と近赤外撮像装置の SIRIUS を使って Subaru/XMM Deep Field の 100 arcmin<sup>2</sup> の領域を  $B, V, R, i, z, J, H, K_s$  バンドで撮像し, 約 250 個の EROs を見つけるとともに, 多色データを利用してそれらの赤方偏移を見積もり, 且つ楕円銀河と星形成銀河の区別を行なった. このデータから主に以下のことがわかった. (1) 楕円銀河的な EROs の銀河計数から, 遠方で楕円銀河の数が減少していることが示唆された. (2)  $z = 1-1.5$  と  $1-5.2-5$  での楕円銀河の光度関数を求めた結果, 前者は近傍の光度関数とおおまかに一致したが, 後者は近傍に比べて規格化定数がずっと小さいことがわかった. 楕円銀河は  $z > 1.5$  で急激に減少するらしい. (3) 楕円銀河的な EROs の色は, 無視できない星形成活動の存在を示唆する. (4) 星形成銀河と分類された EROs は強いダスト吸収を受けていることがわかった.

$z \sim 0.5-1$  の銀河のクラスタリング (嶋作, 岡村, 古澤, 大内, 宮崎)

宮崎聡 (国立天文台) 他 の Suprime-Cam チームとの共同研究. すばる/XMM ディープフィールド (SXDF) の Suprime-Cam による銀河のカタログを用いて  $z \sim 0.5-1$  の銀河の角度相関をもとめた. 多色のデータから赤方偏移を推定し, 色別, 光度別にクラスタリングの強度を見積もったところ, 赤い銀河および明るい銀河はクラスタリング強度が有意に強いことがわかった.

やまねこ座超銀河団領域における銀河特性の環境依存性 (仲田, 児玉, 嶋作, 岡村)

$z \sim 1.27$  に存在するやまねこ座超銀河団領域を, すばる望遠鏡の Suprime-Cam で, 銀河団中心から周辺フィールドまで覆う領域を観測した. この領域には,  $z = 1.27, z = 1.26$  に 2 つの銀河団が  $4.2 (3h_{50}^{-1} \text{Mpc})$  の角度距離で存在していることが知られており, 現在分光観測により確認されている最

遠方の超銀河団である。どの銀河が  $z \sim 1.27$  にあるかについては photometric redshift により推定した。その結果、既知の 2 つの銀河団の他に、新たに 7 つの銀河団もしくは銀河群候補を発見した。また、各銀河の星形成率などを求め、銀河特性の環境依存性を調べたところ、 $z \sim 1.27$  でも銀河の性質は環境に依存し、特に小質量銀河の方が、大質量銀河に比べて環境依存性が大きいこと、などがわかった。

## おとめ座銀河団中の銀河に属さない惑星状星雲の探査 (岡村, 嶋作)

Freeman(オーストラリア国立大学), Arnaboldi(ナポリ天文台), Suprime-Cam チーム他との共同研究。銀河に属さない惑星状星雲を検出して、銀河間空間に広がって分布する星がどのくらいあるかを調べる研究を進めている。おとめ座銀河団の中心近くの 1 視野を、すばる望遠鏡に Suprime-Cam をつけて観測を行った。広帯域は V バンド (15 分露出) と R バンド (12 分露出) で、また惑星状星雲検出の鍵となる狭帯域は酸素輝線 (O[III]5007Å) を含むバンド (60 分露出) と水素輝線 (H $\alpha$ 6563Å) を含むバンド (145 分露出) で撮像した。従来の惑星状星雲の検出には広帯域バンドと O[III] バンドのみが用いられていたが、H $\alpha$  を加えることによって、遠方の輝線銀河が混入することを避けることができるという点が我々の研究の特長である。共同研究者を招聘してデータ解析を行い、どのような基準で選択すれば惑星状星雲が間違いなく検出できるかを検討し、その基準を確定した。この新たな基準によって、観測視野 (約 27 分四方) 内に、100 個を超える惑星状星雲が検出された。銀河に付随しているものが多いが、期待通り銀河に付随しないものもかなりの数が検出された。また、従来銀河に付随する惑星状星雲としてカタログされていた天体のうち、2 割以上は誤認の可能性があるという興味深いことが判った。これは、惑星状星雲の光度関数法によって求められたおとめ座銀河団の距離の信頼性にいくばくかの疑念を生じさせるものである。現在これらの結果を整理して、成果を論文にまとめる作業を進めている。今回撮影した H $\alpha$  画像は、世界で類を見ないほど深いものであり、偶然に視野の中にあつたセイファート銀河 NGC4388 の周りに巨大な電離ガスのフィラメントが広がっている事を発見するという副産物も生み出した。これこれについてはすでに論文を出版した。

## スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の推進 (岡村, 嶋作)

土居 (天セ), 福来, 関口 (宇宙線研), 須藤 (物理), 佐藤 (物理), 池内 (阪大理), 市川, 安田 (国天), 渡辺 (宇研), 濱部 (日女大), 市川 (東北大); SDSS collaboration との共同研究。この研究は、平成 7 年度からスタートした、「中核的研究拠点 (COE) 形成基礎研究「初期宇宙の探求」(代表者 佐藤勝彦) の研究課題

の一つである。

SDSS は専用望遠鏡と大型モザイク CCD カメラを用いた超広天域天体サーベイプロジェクトである。その目標は、全天の 1/4 の領域を可視の 5 つのバンドで撮像して 1 億個以上の天体 (星と銀河が約半数ずつ) の位置と明るさを測定するとともに、その中の約 100 万個の銀河と約 10 万個のクエーサーを分光観測してその距離を測ることである。専用望遠鏡は米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台に建設されている。

SDSS が目標とするサーベイを既存の望遠鏡と検出器で行なおうとすればおそらく何十年もかかる。そこで SDSS グループでは、サーベイ効率を飛躍的に高めるために、望遠鏡・検出器・データ整約ソフトのすべてを現在の最新の技術に基づいて自前で用意した。そのために立案から観測開始までに長い年月を要したが、平成 10(1998) 年 5 月に撮像観測に成功し、平成 11(1999) 年 5 月には分光観測に成功した。平成 12(2000) 年 10 月に現地で完成記念式典が行われ、平成 13(2001) 年 4 月から、本観測が始まった。平成 13(2001) 年 6 月には、試験観測で得たデータを「早期データ公開」として全世界に公開した。サーベイの進行に合わせて段階的に公開を進め、最終的には全データを公開する。

SDSS の初期成果は、赤方偏移  $z > 5$  のクエーサーの発見 (現在の最遠記録は 2001 年 4 月に発見された  $z=6.3$ )、極めて低温度の多数の褐色矮星 (T/L 型星) の発見、一つの銀河による重力レンズ効果の統計的な検出、フィールド銀河の計数値の改定、銀河の光度関数の高精度の導出、楕円銀河の統計的な性質の研究、大規模な銀河団カタログの作成、宇宙の大規模構造の性質など多岐にわたっている。最終目標の 10% 以下というごく僅かな量の初期観測データから多数の大きな成果が挙げられていることから、SDSS のインパクトは広く世界的に認められている。

## SDSS の早期データ公開 (岡村, 嶋作)

安田 (国天); SDSS collaboration との共同研究。2001 年 6 月 4 日に、試験観測期間中に取得したデータを、「早期データ公開 (Early Data Release)」として全世界 (研究者+一般) に公開した。公開されたデータの内容は以下のものである。

- 撮像データ (5 色) 460 平方度 (天の赤道帯と赤外線衛星 SIRTf で最初に見る予定の First Look Survey の天域)
- 撮像データに含まれる約 1000 万個の天体の位置、明るさ、種別などを記したカタログ
- 撮像天域にある約 50,000 天体 (約 100 天体/平方度; 91 プレート) のスペクトル

この早期データ公開によって公開されたデータは、最終目標の 10% 以下であるにもかかわらず、これまで公開された天文データのうちの最大規模のものである。全天の約 10% に相当する 460 平方度という広

い天域の CCD 画像は、SDSS グループ以外では、天文学者でさえ見たことがなかったものである。データは、カタログアーカイブサーバー (CAS)、データアーカイブサーバー (DAS)、およびスカイサーバー (Skyserver) により公開される。上記サーバーのうちとくに、スカイサーバーは、専門の研究者ではなく一般の人々向けに SDSS のデータを公開する目的で作られているところに特徴がある。アパッチポイント天文台で、口径 2.5m の望遠鏡に取り付けられた CCD カメラに記録された夜空の画像や天体のスペクトルがインターネットを通じて世界中のパソコンで見られる。日周運動によって夜空がゆっくりと流れて行く様子も実感できる。さらにスカイサーバーには、中学、高校、大学などの学校で授業に利用できるプログラムも順次組み込まれている。日本語版の載った日本のミラーサーバー (<http://skyserver.nao.ac.jp>) も用意されている。

## SDSS による遠方のクエーサー探査と宇宙の再電離 (岡村, 嶋作)

SDSS collaboration との共同研究。SDSS のような広域サーベイの重要な意義の 1 つは、極めて希な天体を検出する事である。SDSS では高赤方偏移のクエーサーをたくさん見つけている。2001 年 10 月時点で SDSS が検出したクエーサーは 14,500 個で、そのうち赤方偏移  $z > 4$  のものが 228 個ある。特に赤方偏移  $z > 5$  のクエーサーの発見は SDSS の独壇場で、最遠記録を更新し続けている。現在の最遠記録は 2001 年 4 月に発見された  $z=6.3$  のものである。

これら  $z > 5$  のクエーサーから、「宇宙の再電離」について画期的な発見がなされた。ビッグバンから約 30 万年後に、それまで高温状態で電離していた物質 (大部分が水素とヘリウム) は中性原子となった。いわゆる「宇宙の晴れ上がり」である。当時はまだ天体は全く存在せず、宇宙は中性水素を主成分とするガスで満ちていた。一方、現在では、銀河間の空間には中性水素はほとんどない。宇宙の中で最初に誕生した何らかの天体が再び中性水素を電離させたのである。この「宇宙の再電離」がいつどのようにして起こったのかは、宇宙の進化と天体の形成を調べる上で極めて重要な情報である。

銀河間空間に中性水素があると、天体から我々に届く光が吸収される。特に顕著なのはライマン  $\alpha$  線である。宇宙は膨張しているため、我々と天体の間にある水素ガスのライマン  $\alpha$  線は、静止波長である  $1216 \text{ \AA}$  から  $(1+z) \times 1216 \text{ \AA}$  まで異なった波長に引き延ばされる。クエーサーを、遠くへ遠くへと探して行けば、いつかは宇宙が再電離した時期にたどり着くはずである。そのクエーサーのスペクトルでは、クエーサー自身のライマン  $\alpha$  輝線の短波長側の連続光が、銀河間空間の中性水素ガスで完全に吸収されているはずである。SDSS が発見した  $z = 5.80 - 6.28$  の 4 つのクエーサーのスペクトルから、 $z = 6.28$  のクエーサーでは連続光がほぼ完全に吸収されていることがわかった。「宇宙の再電離」が  $z \sim 6.3$  のあたりで起こった事を示す証拠である。

## SDSS 銀河のバルジ・ディスク成分の分離 (大濱, 岡村, 嶋作)

安田 (国立天文台) との共同研究。SDSS で得られた近傍の明るい銀河を、Growth Curve Fitting 法を用いてバルジ成分とディスク成分に分離した。それをもとにバルジやディスクの光度と半径の関係等を調べている。

## 近傍銀河団の光度関数の研究 (岡村, 嶋作)

八木 (国立天文台), 関口 (宇宙線研), 土居 (天セ) 他との共同研究。我々の開発したモザイク CCD カメラをチリのラスカンパナス天文台の口径 1m のスウォープ望遠鏡につけて取得したデータを解析して、銀河団銀河の光度関数を調べた。銀河団銀河とフィールド銀河の光度関数が異なることを従来にない高い統計精度で確認した。また、速度分散の大きい (規模の大きい) 銀河団と小さい銀河団では、巨大銀河と矮小銀河の境目で、光度関数の振る舞いが異なる。すなわち環境によって銀河の性質が変わることを見いだした。

## かみのけ座銀河団銀河の測光と分光による研究 (岡村, 嶋作)

小宮山 (国立天文台), 関口 (宇宙線研), 土居 (天セ), Pogginati (パドバ天文台), Mobasher (スペーステレスコープ研究所) 他との共同研究。我々の開発したモザイク CCD カメラをカナリー諸島ラパルマにある英国のウィリアムハーシェル望遠鏡 (WHT: 口径 4.2m) に搭載し 1996, 1998 年に得た測光データと、それを元に選んだ約 450 個の早期型銀河を同じく WHT で分光したデータをまとめ、一連の論文を出版した。(1) S0 銀河の中には最近まで星生成活動をしていたものがあるが、楕円銀河にはない。またそのような徴候を示す S0 銀河の割合は暗いものほど多い。(2) 早期型銀河の明るさと年齢および明るさと金属量の間に相関がある。(3) さらに早期型銀河は年齢の若いものほど金属量が多い。(4) 銀河団の中心から外側に向かって銀河の金属量が減少する。など、銀河の形成と進化過程の解明に重要な手がかりを与える知見を得た。

## 未同定 $\gamma$ 線源と銀河団の相関関係 (川崎)

戸谷 (国立天文台, Princeton 大) との共同研究。3EG カタログの 271 個の  $\gamma$  線天体の 6 割以上を占める未同定天体のうち、4 割に相当する 60 個あまりが銀河系外起源だと考えられている。そこで、高銀緯 ( $45^\circ$  以上) で且つ変光しない (blazar の可能性の低い) 未同定 3EG 天体 7 個について、同じ領域で matched-filter によって見つげられた銀河団サン

プルとの相関を調べた。その結果、全銀河団サンプルと 3EG ソースとの間には有意な相関は全く認められなかった一方、3 次元的に近接していると思われる (衝突中の可能性のある) 銀河団のみを考えると、 $3.7\sigma$  レベルの非常に強い相関が見いだされた。これは、形成 (衝突) 直後の銀河団内部で発生するショック領域で加速された電子が背景放射の光子を逆コンプトン散乱で  $\gamma$  線領域まで叩き上げたものが 3EG ソースとして見えているという戸谷 & 北山 (2000) の仮説を間接的ながら支持しており、銀河団と未同定  $\gamma$  線天体との間に初めて有意な関係を見出したことになった。

#### <報文>

(原著論文)

- [] Blanton, M. R. et al. (the SDSS Collaboration; 69 authors including Okamura, S., Doi, M., Shimasaku, K.), “The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data”, *AJ*, **121**, 2358-2380 (2001).
- [1] Castander, F. J. et al. (the SDSS Collaboration; 53 authors including Okamura, S.), “The First Hour of Extragalactic Data of the Sloan Digital Sky Survey Spectroscopic Commissioning: The Coma Cluster”, *AJ*, **121**, 2331-2357 (2001).
- [2] Fan, X. et al. (the SDSS Collaboration; 34 authors including Okamura, S., Doi, M.), “A Survey of  $z > 5.8$  Quasars in the Sloan Digital Sky Survey I: Discovery of Three New Quasars and the Spatial Density of Luminous Quasars at  $z \sim 6$ ”, *AJ*, **122**, 2833-2849 (2001).
- [3] Kodama, T., Smail, I., Nakata, F., Okamura, S., and Bower, R.G., “The Transformation of the Photometric Properties of Galaxies within the Large Scale Structure around a  $z=0.41$  Cluster”, *ApJ*, **562**, L9-L13 (2001).
- [4] Komiyama, Y., Sekiguchi, M., Kashikawa, N., Yagi, M., Doi, M., Iye, M., Okamura, S., Shimasaku, K., Yasuda, N., Mobasher, B., Carter, D., Bridges, T. J., and Poggianti, B. M., “A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. I. Wide-Area Photometric Survey: Observation and Data Analysis”, *ApJS*, **138**, 265-278 (2002).
- [5] Maihara, T. et al. (33 authors including Okamura, S., Shimasaku, K.), “Subaru Deep Survey I. Near-Infrared Observations”, *PASJ*, **53**, 25-36 (2001).
- [6] Mobasher, B., Bridges, T. J., Carter, D., Poggianti, B. M., Komiyama, Y., Kashikawa, N., Doi, M., Iye, M., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., and Yasuda, N., “A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. II. Spectroscopic Observations”, *ApJS*, **137**, 279-296 (2001).
- [7] Nakata, F., Kajisawa, M., Yamada, T., Kodama T., Shimasaku, K., Tanaka, I., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Iye, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Okamura, S., Ouchi, M., Sasaki, T., Sekiguchi, M., Yagi, M., and Yasuda, N., “Galaxy Population in a Cluster of Galaxies around the Radio Galaxy 3C 324 at  $z = 1.2$ ”, *PASJ*, **53**, 1139-1152 (2001).
- [8] Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, M., Miyazaki, S., Nakata, F., Sekiguchi, M., Yagi, M., and Yasuda, N., “Clustering Properties of Galaxies at  $z \sim 4$  in the Subaru/XMM Deep Survey Field”, *ApJ*, **558**, L83-L86 (2001).
- [9] Poggianti, B. M., Bridges, T. J., Carter, D., Mobasher, B., Doi, M., Iye, M., Kashikawa, N., Komiyama, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., and Yasuda, N., “Ages of S0 and Elliptical Galaxies in the Coma Cluster”, *ApJ*, **563**, 118-123 (2001).
- [10] Poggianti, B. M., Bridges, T. J., Mobasher, B., Carter, D., Doi, M., Iye, M., Kashikawa, N., Komiyama, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., and Yasuda, N., “A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. III. Spectral Ages and Metallicities”, *ApJ*, **562**, 689-712 (2001).
- [11] Shimasaku, K., Fukugita, M., Doi, M., Hamabe, M., Ichikawa, T., Okamura, S., Sekiguchi, M., Yasuda, N., Brinkmann, J., Csabai, I., Ichikawa, S., Ivezić, Z., Kunszt, P. Z., Schneider, D. P., Szokoly, G. P., Watanabe, M., York, D. G., “Statistical Properties of Bright Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System”, *AJ*, **122**, 1238-1250 (2001).
- [12] Yasuda, N. et al. (the SDSS collaboration; 36 authors including Okamura, S., Doi, M., Shimasaku, K.), “Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data”, *AJ*, **122**, 1104-1124 (2001).
- [13] Yoshida, F., Nakamura, T., Fuse, T., Komiyama, Y., Yagi, M., Miyazaki, S., Okamura, S., Ouchi, M., and Miyazaki, M., “First Subaru Observations of Sub-km Main Belt Asteroids”, *PASJ*, **53**, L13-L16 (2001).
- [14] Caretta, C. A., Maia, M. A. G., Kawasaki, W., and Willmer, C. N. A., “The Aquarius Superclusters I. Photometry and Identification of Clusters”, *AJ*, **123**, 1200-1215 (2002).
- [15] Carter, D., Mobasher, B., Bridges, T. J., Poggianti, B. M., Komiyama, Y., Kashikawa, N., Doi, M., Iye, M., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., and Yasuda, N., “A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. V.

- Dependence of the Spectroscopic Properties on Location in the Cluster”, *ApJ*, **567**, 772-780 (2002).
- [16] Stoughton, C. et al. (the SDSS collaboration; 192 authors including Okamura, S., Doi, M., Shimasaku, K.), “Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release”, *AJ*, **123**, 485-548 (2002).
- [17] Strateva, I. et al. (the SDSS collaboration; 29 authors including Okamura, S., Doi, M., Shimasaku, K.), “Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data”, *AJ*, **122**, 1861-1874 (2001).
- [18] Yagi, M., Kashikawa, N., Sekiguchi, M., Doi, M., Yasuda, N., Shimasaku, K., and Okamura, S., “Luminosity Functions of 10 Nearby Clusters of Galaxies. I. Data”, *AJ*, **123**, 66-86 (2002).
- [19] Yagi, M., Kashikawa, N., Sekiguchi, M., Doi, M., Yasuda, N., Shimasaku, K., and Okamura, S., “Luminosity Functions of 10 Nearby Clusters of Galaxies. II. Analysis of the Luminosity Function”, *AJ*, **123**, 87-99 (2002).
- [20] Yoshida, M. et al. (20 authors including Okamura, S., Shimasaku, K., Furusawa, H., Miyazaki, M., Nakata, F., Ouchi, M.), “Discovery of a Very Extended Emission-Line Region around the Seyfert 2 Galaxy NGC 4388”, *ApJ*, **567**, 118-129 (2002).
- (会議抄録)
- [21] Shimasaku, K., “Evolution of the Blue Luminosity-to-Baryon Mass Ratio of Clusters of Galaxies”, in *The Birth and Evolution of the Universe*, eds. K.Sato and M.Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), pp.181-184 (2001).
- [22] Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, M., Miyazaki, S., Nakata, F., Sekiguchi, M., Yagi, M., Yasuda, N., and Subaru NB Collaboration, “Clustering of Galaxies at Redshift 4 and 5 in the Subaru Deep Fields”, in *New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*, eds. K.Sato and M.Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), 193-196 (2001).
- [23] Okamura, S., Komiyama, Y., Doi, M., Shimasaku, K., Sekiguchi, M., Yagi, M., Kashikawa, N., Yasuda, N., Iye, M., Mobasher, B., Carter, D., Poggianti, B., and Bridges, T., “Dwarf Galaxy Population in the Coma Cluster from a Large Spectroscopic Sample”, in *The Birth and Evolution of the Universe*, eds. K.Sato and M.Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), pp.207-216 (2001).
- [24] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., and Okamura, S., “New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF”, in *The Birth and Evolution of the Universe*, eds. K.Sato and M.Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), pp.351-352 (2001).
- [25] Nakata, F., Shimasaku, K., Doi, M., Kawasaki, W., Komiyama, Y., Okamura, S., Kashikawa, K., Yagi, M., Yasuda, Y., and Sekiguchi, M., “Probing the Evolution of Early-Type Galaxies using Multicolor Number Counts and Redshift Distributions”, in *The Birth and Evolution of the Universe*, eds. K.Sato and M.Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), pp.391-392 (2001).
- [26] Okamura, S., Yagi, M., Kashikawa, N., Yasuda, N., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., and Doi, M., “Luminosity Functions of  $R^{1/4}$ -like and Exponential-like Galaxies in Nearby Clusters of Galaxies”, in *The New Era of Wide-Field Astronomy*, eds. Clowes, R., Adamson, A., Bromage, G., ASP Conf. Series, **232**, 158-160 (2001).
- [27] Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, M., Miyazaki, S., Nakata, F., Sekiguchi, M., Yagi, M., and Yasuda, N., “Statistical Properties of Lyman Break Galaxies at  $z \sim 4$ ”, in *Where is the Matter? Tracing Dark and Bright Matter with the New Generation of Large-Scale Surveys*, eds. Laurence Tresse and Marie Treyer, in press (astro-ph/0109252)(2001).
- [28] Okamura, S. 2001, “Quasars, Black Holes, and Galaxies”, Proc. 29th International Symposium of the National Academy of Sciences, Republic of Korea, *The Universe, Its Origin, Evolution and Future*, pp. 55-78.
- (国内雑誌)
- [29] 岡村定矩: “宇宙論の転換期を迎えて”, 巻頭言, 「科学」(岩波書店), 8月号(2001).
- [30] 岡村定矩: “宇宙の地図と銀河の進化”, 東京大学広報誌「淡青」10月号, p.26(2001).
- [31] 岡村定矩: “宇宙をあなたの手に一動き出したスローン・デジタルスカイサーベイ”, パリティ, 2002年1月号, p.40(2002).
- [32] 岡村定矩: “ついに宇宙の再電離期に”, 東京大学大学院理学系研究科・理学部広報, 平成14年2月, p.2(2002).
- (学位論文)
- [33] 仲田史明: Environmental Dependence of the Galaxy Population in the Lynx Supercluster Region at  $z \sim 1.27$
- [34] 古澤久徳: Evolution of the Galaxy Luminosity Function Based on Photometric Redshifts in the Subaru Deep Field
- (著書)

[35] 岡村定矩編著:天文学への招待, 2001, (17名分担執筆), 朝倉書店(2001)

[36] 岡村定矩, 柴橋博資:理科年表 2002, (天文部, 分担執筆)(2001)

#### <学術講演>

(国際会議)

一般講演

[37] Kawasaki, W.: “Strong Correlation between the High-latitude Steady Unidentified EGRET Sources and Possible Merging Clusters of Galaxies”, *New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*, Tokyo, Japan, 2001/11/13-16.

[38] Nakata, F.: “Probing Distant Clusters of Galaxies at  $z > 1$ ”, *Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes*, Sendai, Japan, 2001/7/24-28.

[39] Okamura, S.: “Is the luminosity function of galaxies universal?”, *New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*, Tokyo, Japan, 2001/11/13-16.

[40] Okamura, S.: “Bulge/Disk Parameters from the Growth Curve Method”, *SDSS Collaboration Meeting*, Heidelberg, Germany, 2002/3/21-23.

[41] Ouchi, M.: “Statistical Properties of Lyman Break Galaxies at  $z = 4$  in the Subaru/XMM Deep Field”, *Where is the Matter? Tracing Dark and Bright Matter with the New Generation of Large-Scale Surveys*, Marseille, France, 2001/6/25-29.

[42] Ouchi, M.: “Clustering of Galaxies at  $z=4$  & 5 in the Subaru Deep Fields”, *Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes*, Sendai, Japan, 2001/7/24-28.

[43] Ouchi, M.: “Clustering of Galaxies at redshift 4 and 5 in the Subaru Deep Fields”, *New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*, Tokyo, Japan, 2001/11/13-16.

[44] Shimasaku, K.: “Lyman break galaxies at  $z = 4$  and 5 in wide field imaging data taken with Subaru Suprim-Cam”, *Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes*, Sendai, Japan, 2001/7/24-28.

[45] Shimasaku, K.: “Photometric properties of galaxies at  $z = 4-5$  in the Subaru Deep Fields”, *New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*, Tokyo, Japan, 2001/11/13-16.

招待講演

[46] Okamura, S. 2001, “Quasars, Black Holes, and Galaxies”, Proc. 29th International Symposium of the National Academy of Sciences, Republic of Korea, *The Universe, Its Origin, Evolution and Future*, Seoul, Korea, 2001/10/19.

(学会発表)

日本天文学会 2001 年秋季年会, イーグレひめじ, (2001/10/4-10/6)

[47] 大内正己, 嶋作一大, 古澤久徳, 仲田史明, 宮崎真行, 土居守, 岡村定矩:  $z = 5$  における銀河の光度関数と星形成史, R44b

[48] 大内正己, 嶋作一大, 古澤久徳, 仲田史明, 宮崎真行, 土居守, 岡村定矩:  $z = 4$  における銀河の統計的性質, R53a

[49] 仲田史明, 児玉忠恭, 嶋作 一大:  $z \sim 1.3$  の超銀河団 Lynx 領域の大規模構造, T26c

[50] 古澤久徳, 嶋作 一大, 土居守, 岡村定矩, 仲田史明, 大内正己, 宮崎真行: すばる望遠鏡多色撮像サーベイ観測に基づくフィールド銀河の光度進化の研究, R48c

[51] 川崎渉: 未同定 EGRET ソースは衝突銀河団か?, T21a

[52] 安田直樹 (国立天文台), 土居守, 古澤久徳: すばる望遠鏡による遠方超新星の発見, A04a

[53] 家正則 (国立天文台), 嶋作 一大, 児玉忠恭: ERO R1 behind CL0939+4713 - 赤方偏移 1.5 の時代の巨大 S0 銀河 -, R50a

[54] 山田亨 (国立天文台), 岡村定矩, 仲田史明: すばる望遠鏡による高赤方偏移銀河団中心部の近赤外深撮像観測, R42b

日本天文学会 2002 年春季年会, 茨城大学, (2002/3/28-3/30)

[55] 大内正己, 嶋作一大, 古澤久徳, 宮崎真行, 岡村定矩, 土居守: すばるディープフィールドにおける  $z = 4.86$  Ly $\alpha$  輝線銀河の性質, R33a

[56] 大内正己, 嶋作一大, 古澤久徳, 宮崎真行, 岡村定矩, 土居守: すばるディープフィールドにおける銀河の星形成史, R39b

[57] 宮崎真行, 岡村定矩, 嶋作一大, 古澤久徳, 大内正己, 仲田史明, 土居守: Suprime-Cam, SIRIUS, CISCO を用いた多色 ERO 探索, R36a

[58] 仲田史明, 児玉忠恭, 嶋作一大, 岡村定矩:  $z \sim 1.27$  のやまねこ座超銀河団領域における銀河特製の環境依存性, T01a

[59] 小宮山裕 (国立天文台), 岡村定矩, 土居守, 嶋作一大, 仲田史明, 古澤久徳, 大内正己: Suprime-Cam Moderate Redshift Cluster Survey, T02c

[60] 古澤久徳, 嶋作一大, 大内正己, 宮崎真行, 仲田史明, 土居守, 岡村定矩: 測光的赤方偏移に基づくすばるディープフィールドにおける銀河の光度関数の進化, R31a

[61] 林野友紀 (東北大), 岡村定矩, 土居守, 嶋作一大, 大内正己: すばる主焦点狭帯域・中間帯域フィルターシステム整備の現状, V06a

[62] 吉田道利 (国立天文台), 岡村定矩: セイファート銀河 NGC4388 周りに広がる巨大電離ガス領域の発見, R53a

(国内会議)

## 一般講演

- [63] 岡村定矩、大内正己: “宇宙大規模構造の形成と進化”, ワークショップ「深宇宙探査のサイエンスを考える」, 筑波大学, 2001/9/24-25.
- [64] 嶋作一大: “銀河の形成と進化”, ワークショップ「深宇宙探査のサイエンスを考える」, 筑波大学, 2001/9/24-25.
- [65] 古澤久徳: “Suprime-Cam による撮像データの解析”, 第 46 回天文情報処理研究会「すばる観測データの解析」, 国立科学博物館新宿分館, 2001/10/11-12.
- [66] 大内正己: “すばるディープフィールドのフォローアップ観測”, 第 1 回 ASTRO-F (IRIS) ミッションプログラム研究会名古屋大学, 2001/10/30-31.
- [67] 岡村定矩: 「天文学は宇宙の考古学」, 文京区教育センター, 2002/2/9

## 招待講演

- [68] 岡村定矩: 「宇宙の過去はどこまで見えたか」, 茨城県立図書館 (日本天文学会春期年会公開講演会) 2002/3/31

# 7 気球観測による反物質探査, 衛生による X線・ $\gamma$ 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・国分・佐貫)

## 7.1 反物質探査 (BESS 実験)

### 7.1.1 (1) BESS-TeV 実験

1998年にスーパーカミオカンデ実験において、ニュートリノ振動の確実な証拠が世界で初めて発表されたが、この解析をより詳細に行うためには大気ニュートリノの精密な絶対流束が不可欠である。この大気ニュートリノの流束を計算するためには親となる陽子、ヘリウムなどの一次宇宙線流束と、大気ニュートリノの生成過程である一次宇宙線と大気との相互作用の正確な理解のために各大気高度における $\mu$ 粒子等、大気中で生成される二次宇宙線の流束が必要である。

BESS 実験では、これまでに一次宇宙線については約 100 GeV までの精密な流束を測定している。しかしニュートリノ振動の解析にはより高い TeV 付近のエネルギー領域までの一次宇宙線の流束が必要とされる。より高いエネルギーまでの一次宇宙線と $\mu$ 粒子等の二次宇宙線の精密な流束を測定するために、BESS 測定器に改良を行い、最外層に新しい飛跡検出器を搭載し測定可能エネルギー領域を 1 TeV までのばし、さらに鉛を用いたシャワーカウンターに改良を加えて $\mu$ 粒子の識別能力を強化した。

今年度の飛翔実験は9月にアメリカ、ニューメキシコ州において行われた。観測実験中、気球の高度が大気圧で $5\text{g}/\text{cm}^2$ から $30\text{g}/\text{cm}^2$ まで、ゆっくりと低下し続けたため、精密な一次宇宙線流束を求めるのに使うことのできる系統誤差の小さい大気圧 $5\text{g}/\text{cm}^2$ 付近のデータが少なく、流束の小さい TeV 領域の一次宇宙線強度を求めることは難しい。

しかし、 $\mu$ 粒子、大気中で生成された陽子、ヘリウムなどの二次宇宙線については、各大気高度において、これまでの実験で得られたことのない大量のデータを収集することに成功した。これから求められる精密な二次宇宙線流束は一次宇宙線と、大気との相互作用を知るうえで非常に貴重な情報であり、現在流束を求めるために解析を進めている。図 7.1 a と図 7.1 b に $\mu^-$ 粒子、 $\mu^+$ 粒子のプレリミナリーな結果を示した。

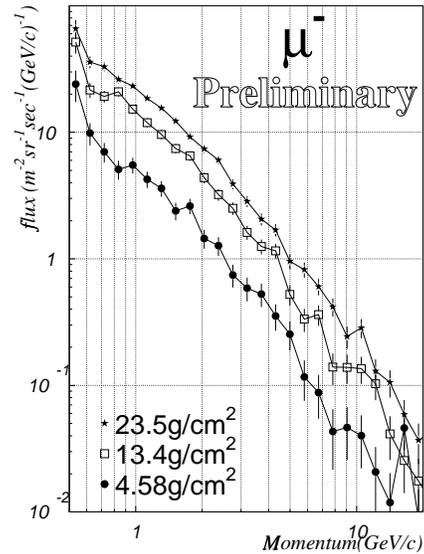


図 7.1 a: 各高度における $\mu^-$ 粒子スペクトラム

2002年度の BESS-TeV 飛翔実験に向けて、さらに測定可能エネルギー領域を 1.4 TeV にまで拡大するための新しい中央飛跡検出器の開発と、飛跡検出システムが新しくなることによって増加するデータに対応するためのデータ収集系エレクトロニクスを開発を行った。これらの BESS 測定器への組み込みも完了し、2002年度に行われる予定の飛翔実験では図 7.1 c に示したような陽子スペクトラムが得られると期待している。

### 7.1.2 (2) 宇宙線反陽子流束の精密測定

宇宙線中の反陽子はその大部分が一次宇宙線と星間物質との衝突で生成される二次起源成分で、これは運動学的要因により 2 GeV 付近にピークを持ち、その両側で急激に減少するという特徴的な形を持っている。一方、原始ブラックホール (PBH) の蒸発や、銀河ハローを構成する超対称性粒子暗黒物質の対消滅によって生成される一次起源成分が存在する可能性も指摘されており、こちらは二次起源成分とは対照的に低エネルギーまで平坦に延びるスペクトラムが予測されている。このようなスペクトラムの形の違いを利用して、素粒子・宇宙物理学的に非常に興味深い一次起源成分を抽出できる可能性がある。

宇宙線反陽子の起源の探求を主な目的として行われてきた BESS 実験は、太陽活動極小期における測定によって、二次起源成分のピーク (2 GeV) を捉え、宇宙線反陽子の大部分が二次起源成分であることを示した。低エネルギー領域においては二次成分の理論計算に比べ若干の過剰が観測されており、流束の経年変化などを通して、さらに精密な探求を行っている。

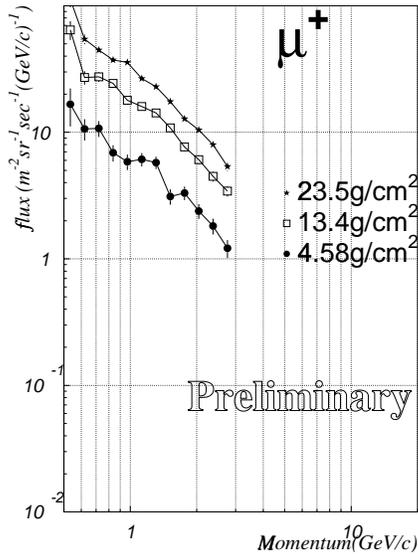


図 7.1 b: 各高度における  $\mu^+$  粒子スペクトラム

一般に太陽系に入射した宇宙線は、太陽風などの影響を受けるが(太陽変調, solar modulation), その影響は低エネルギーの宇宙線ほど大きい。従って、低エネルギー宇宙線を通して「宇宙における素粒子現象」を探求するためには、この太陽変調の詳細な理解が不可欠である。

BESS 実験は太陽活動極小期から 99 年、2000 年と極大期までの連続して観測を行い、極小期から極大期まで反陽子流束の経年変化を追うことに成功した。特に 99 年から 2000 年にかけては太陽磁極の反転が起きており、ここでのデータは太陽変調での電荷依存性を調べる上で非常に重要なプローブとなるものである。これまで、電荷依存性は質量の大きく異なる電子と陽子やヘリウムの核子の比の時間変化として調べられてきたが、BESS 実験では質量の等しい陽子、反陽子の同時測定が可能であり、より純粋に電荷依存性を研究することが可能である。

図 7.1 d に太陽活動極小期である 97 年の結果と共に 99 年、2000 年に測定された反陽子・陽子比を示してある。図中には電荷依存を取り込んだモデルにより計算された 97 年(破線)、99 年(一点鎖線)、2000 年(実線)にほぼ対応する値と、電荷依存を含まないモデルによる 99 年と 2000 年に対応する計算値が点線で示してある。得られた結果は 99 年から 2000 年にかけての急激な上昇を示しており、電荷依存を取り込んだモデルにより合致している。

BESS 実験で得られた太陽磁場の極性反転を含む太陽活動の極小期から極大期までの経年観測により得られた反陽子および陽子の広いエネルギー領域における流束の変動は今後太陽変調について理解を深めモデルを改良していく上で非常に重要なデータを与えたといえる。

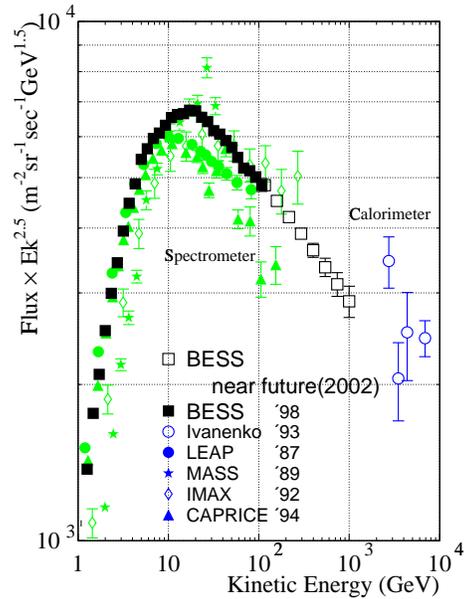


図 7.1 c: BESS-TeV 実験の結果から期待される陽子スペクトラム

## 7.2 X線、 $\gamma$ 線観測

4 月より、国分紀秀が助手に着任した。牧島は理化学研究所・宇宙放射線研究室の主任研究員を兼務し、ビッグバン宇宙国際研究センターのセンター長を併任することとなった。今年度は、3 名の博士と 2 名の修士が誕生した。

### 7.2.1 太陽と星のフレアの研究

#### ○ 太陽観測衛星「ようこう」

1991 年 8 月 30 日に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」には、我々が宇宙研や国立天文台と協力して製作した、太陽硬 X 線望遠鏡 (HXT) が搭載されている [15]。HXT はフーリエ合成手法により、15–95 keV の硬 X 線領域で、太陽フレアの画像を 5 秒角の解像度で撮像できる。「ようこう」は太陽活動の 1 周期をフルにカバーして大量のデータを蓄積してきたが、2001 年 12 月 15 日の日食のさいに姿勢を崩し、現在は観測を中止している。

#### ○ フレアの放射を記述する 4 つのパラメータ

「ようこう」が 11 年間に受けた 2359 個の太陽フレアの中から、松本らは強くガンマ線を放射する 38 例のフレアを選んで解析した。その結果、軟 X 線から 10 MeV のガンマ線に至るフレアの放射スペクトルは、(1) フレアの規模、(2) 熱的放射の強さ、(3) 硬 X 線のスペクトル指数、(4) 硬 X 線と比べたガンマ線の強さ、という 4 つのパラメータで記述できることがわかった [66]。次項の結果と合わせて、松本の博士論文となった [19]。

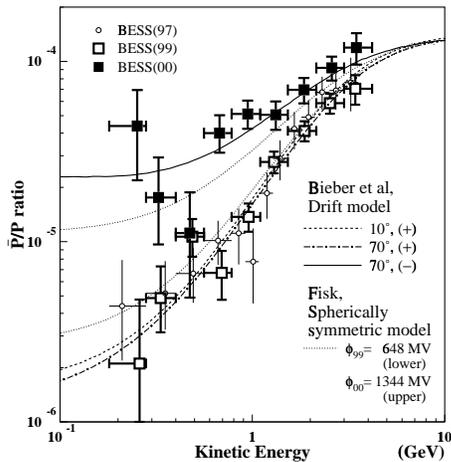


図 7.1 d: 97 年、99 年、2000 年に観測された反陽子、陽子比

### ○ 太陽フレアにおける粒子加速

さらに松本らは HXT のデータを、「ようこう」広帯域スペクトル計 (WBS; 立教大学などが製作) のデータと突き合わせることで、1998 年 8 月 18 日に太陽の西縁でおきた強いガンマ線フレアを解析した [46]。その結果、加速された電子からの制動放射は、図 7.2 a に模式的に示すように、3 成分から成ることを世界で初めて明らかにした。(1) コロナ上空で発生した磁気リコネクション流が、太陽表面に突入して生じる、steep なスペクトルの硬 X 線。(2) (1) の一部が磁気ループの頂上に衝突して強い 2 次加速を受け、そこから放射される、硬いスペクトルのパルス状ガンマ線。(3) (2) の粒子が太陽表面に突入するさいのガンマ線で、コンプトン散乱のためスペクトルが柔らかくなる [19] [65] [58]。

今後は、加速された電子と太陽大気との相互作用や、発生したガンマ線の放射輸送を、モンテカルロシミュレーションを用いて定量化する必要がある。

### ○ 原始星からの X 線放射

江副らは「あすか」などのデータを用いて、Cep A など、巨大分子雲からの X 線放射を研究している。分子雲の奥深くで生まれた原始星が X 線を放射すると考えられるが、全貌はまだ未知の部分が多い。Chandra 衛星でも観測提案が採択されている。

## 7.2.2 コンパクト天体の観測的研究

### ○ ライン X 線の共鳴散乱効果の研究

昨年度に続き寺田らは、白色わい星の磁極のプラズマ中でライン光子が共鳴散乱され、縦方向にコリメートされるという効果を、モンテカルロ計算と観

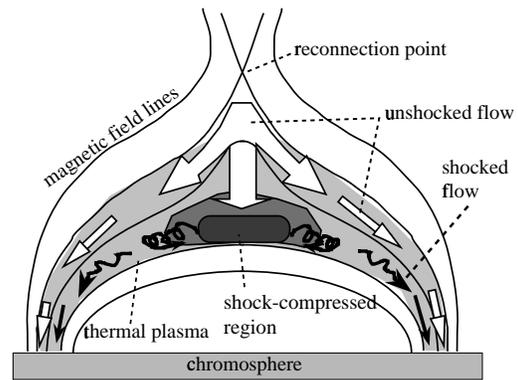


図 7.2 a: A schematic model of the particle acceleration in a solar flare [19].

測から検証した [64]。結果は、投稿論文 [11] および寺田の博士論文として集大成された [20]。

### ○ ブラックホールへの質量降着

ブラックホールまわりの降着円盤の統一的な描像を、久保田 (宇宙研 PD) らと協力して発展させた。質量降着率が高まるにつれ、《標準降着円盤》、《標準円盤が逆コンプトン雲に被われた過渡状態》、そして《光学的に厚いアドベクション優勢な円盤》へと進むことが明らかになった [1] [7] [32] [50] [38]。

笠間らは、RXTE 衛星による、X 線トランジェント 4U 1630-47 のデータを解析した。その結果この天体が、標準状態と、逆コンプトン散乱の効いた状態という、2 つの状態を示すことが発見された [49] [63]。逆コンプトン状態が確認されたのは、GRO J1655-40、XTE J1550-564 に次いで 3 例目である。

### ○ 超大光度コンパクト X 線源 (ULX)

渦巻銀河の腕には、ULX (Ultra-Luminous Compact X-ray Source) と呼ばれる、一群の強い謎の X 線源が存在する。我々は「あすか」の観測にもとづき、それらが  $\sim 100 M_{\odot}$  の質量をもつブラックホール連星であるという描像を提案している [6] [8] [24] [26] [17] [37] [44] [45]。我々が提唱した ULX という呼称も国際的に定着しつつあるが、ヨーロッパでは、強くビーミングした天体であるという説が主流であり、新たな論争が展開しつつある。

杉保らは Chandra 衛星の観測時間を獲得し、数個の ULX の位置を、X 線で 1 秒角を切る精度で決定することに成功した。それをもとに、ビッグバンセンターのハワイ MAGNUM 望遠鏡やイギリスの WHT 望遠鏡などで、ULX の光学同定の試みを始めている。

### ○ 狭線 1 型セイファート銀河

代表的な狭線 1 型セイファート銀河である Ton S180 は、「あすか」で長期の観測がなされた。村島らは理研と協力し、そのデータを解析した結果、スペクトルの形が保たれる変動と、スペクトルの形が変わる変動と、2 種類の変動があることを突き止め

た [42] [43]。こうした挙動は、前々項で述べた逆コンプトン状態で解釈できる可能性があり、注目される。

### ○ ブラックホールの変動のタイムスケール

昨年に引き続き江副らは、まばらな時系列データを《構造関数》を用いて解析し、変動の特徴的な時間を推定する方法を発展させた。これにより活動銀河核などのブラックホール質量が推定できる [28]。

## 7.2.3 星間空間および銀河間空間における高エネルギー現象

### ○ 銀河系、M31、M33の熱い星間ガス

我々の銀河面に沿って、熱的成分と非熱的成分から成る、正体不明のディフューズな X線・ガンマ線放射（銀河リッジ放射）が広がる。国分らは昨年度に続き、同様な放射を銀河バルジからも検出することで、放射を出すプラズマが超新星に起源をもつ可能性が低いことを示した [33]。

高橋（弘）らは「あすか」、*Chandra*、*XMM-Newton* による、M31（アンドロメダ星雲）の中心部のデータから、点源の寄与を慎重に差し引いた結果、温度 0.9 keV、0.3 keV、0.1 keV の、3成分の熱的なディフューズ X線放射を発見した。それぞれ、銀河リッジ放射の低温成分に類したもの、星のコロナからの放射、星間空間の熱い泡からの放射、と解釈できる。リッジ放射に対応する現象が、系外天体で確認されたのは初めてである [5] [34] [68]。

岡田らは、M33の明るい X線源 X-4 を「あすか」で観測したデータから、これが熱的放射と非熱的放射の混在した超新星残骸であるとの結論を得た [4]。

### ○ 電波銀河ローブからの逆コンプトン X線

電波銀河のローブを充たす相対論的電子は、シンクロトロン電波に加え、逆コンプトン X線を放射する。磯部らは埼玉大学と協力し [53] [62] [69]、我々が「あすか」で先鞭をつけた逆コンプトン X線の研究を集大成し、また *Chandra* 衛星の観測時間を獲得して、新たな検出例を増やした。その結果、ローブの相対論的電子のエネルギー密度は、いっばんに磁気エネルギー密度を大きく上回ることが判明した。さらに逆コンプトン放射を維持するために、ジェットがローブへ注入するエネルギーを推定したところ、エネルギー供給率は図 7.2 b に示すように、中心核の X線光度とみごとに相関することが発見された。これらの結果は、磯部の博士論文となった [18] [52]。

### ○ 暗黒銀河群の候補の発見

「あすか」で観測した楕円銀河 NGC 1550 のデータを解析した川原田らは、この天体は可視光で見ると 1 個の銀河だが、X線で見ると、銀河群の様相を示すことを発見した。質量光度比は、銀河団なみの 400 にも達し、周囲に巨大な暗黒物質のハローを

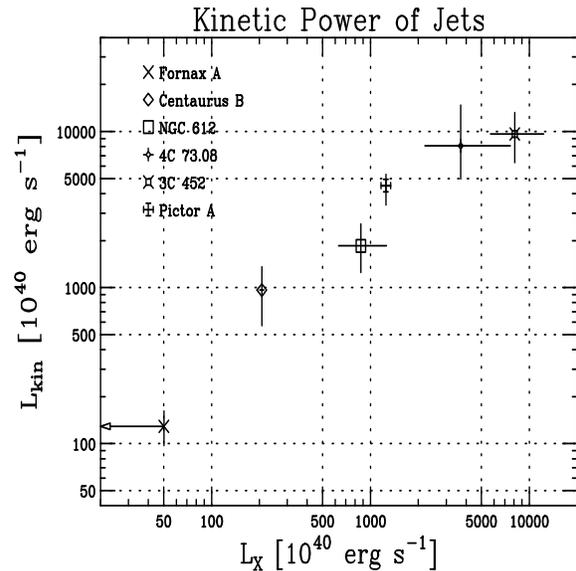


図 7.2 b: The nuclear X-ray luminosity of radio galaxies, compared with the estimated kinetic input luminosity to their synchrotron lobes [18].

もつらしい [54] [61]。これが暗黒銀河群であることを確立すべく、「すばる」による観測を提案している。

### ○ 銀河団プラズマの新パラダイム

これまで銀河団プラズマは放射冷却で冷え、そこに大規模な冷却流 (cooling flow) が発生すると広く信じられてきた。牧島らは「あすか」の観測にもとづき、この定説の誤りを指摘し、かわって磁気プラズマ効果による加熱の重要性を示した [2] [25] [27]。この主張は、*Chandra* および *XMM-Newton* 衛星により追認されつつあり、銀河団プラズマの新たなパラダイムが成立しつつある [30] [70] [78]。

### ○ XMM-Newton 衛星のバックグラウンドの研究

1999年12月に打ち上げられたヨーロッパの *XMM-Newton* 衛星は、「あすか」を大きく凌ぐ有効面積をもつ新鋭機だが、地球磁気圏の外に出る長楕円軌道をもつため、荷電粒子の変動が激しく、バックグラウンド差し引きの困難から、搭載された高性能の X線 CCD カメラも、広がった天体には威力を発揮できないでいた。そこで高橋（勲）はドイツを訪れ、研究室の卒業生（池辺靖、松下恭子）や阪大と協力して CCD カメラのバックグラウンドを詳しく調べ、その特性を明らかにした。これにより、*XMM-Newton* による銀河団の観測が本格的に行えるようになり、ヨーロッパからも高く評価されている [31] [36] [71]。

## 7.2.4 ASTRO-E2 衛星に向けた硬 X 線検出器 (HXD-II) の製作

### ○ ASTRO-E2 衛星と硬 X 線検出器 HXD-II

2000 年 2 月 10 日に打ち上げ失敗した ASTRO-E 衛星の回復を目指し、ASTRO-E2 衛星計画が今年度から正式にスタートした。ASTRO-E2 は ASTRO-E と同じ 4 つの装置を搭載し、2005 年の 1 月に打ち上げ予定である。装置の 1 つが硬 X 線検出器 (HXD-II) で、その 1 号機は釜江研、牧島研、宇宙研、阪大核物理センターなどの共同で開発された。今回はこれを、東大、宇宙研、広島大、埼玉大、理研などの協力により、HXD-II として再製作する。装置の検出器部 (HXD-S) は重量 200 kg をもち、結晶とシリコン PIN ダイオードを組み合わせて、10–600 keV のエネルギー域で、きわめて低いバックグラウンドを実現する [13] [35] [39] [55]。

### ○ 結晶シンチレータの開発

HXD-S では、BGO 結晶でできた井戸の底に、5 mm 厚の GSO 結晶を埋め込み、2 種類の結晶シンチレータをフォススイッチ構成で用いる。高橋 (勲) らは、結晶シンチレータ自身、その製造環境、それらの周辺材料などについて、微量放射能の混入を徹底的に下げる努力を続けている [35]。

フォススイッチ機能を実現するには、GSO と BGO の発光を波形弁別する必要がある。そこで高橋 (弘) らは遅延同時計数法を用いて、新たに製造された 2 種類の結晶の発光の時間特性を測定し、1 号機で用いた結晶の特性と大差ないことを確認した。これは高橋 (弘) の修士論文となった [22] [74]。

### ○ HXD-II 検出器部の製作

国分を中心に研究室一丸となって、広島大学などと協力し、HXD-II の主検出器である、16 本の Well 検出器の製作を進めている。作業は、GOS と BGO 下部の接着、BGO 上部と下部の接着、防振・補強構造の装着、アラインメント、温度サイクル試験、要素所での特性評価などから成る。16 本の Well 検出器のうち約 2 本の製作を完了した。

ファインコリメータの製造、PIN ダイオードやフォトチューブの試作なども進めた。古徳は理研において、シールド部の Anti 検出器の製作に参加し、20 本のうち約 3 本を完成させた [40]。理研や宇宙研と協力し、Well 検出器、Anti-S 検出器、Anti-C 検出器それぞれ 1 本の振動試験も、無事にクリアした。

### ○ HXD-II 電子回路部開発

我々は HXD-II のアナログ電子回路部 (HXD-AE) を、宇宙研、広島大、理研、明星電気 (株)、クリアパルス (株) などと共同して開発している。今年度は 1 号機の AE からの必要な改修をすべて洗い出し、新しい搭載回路の設計を固めた。その中で岡田らは、シールド検出器からの信号の処理部分 (TPU) を担当した。

我々はまた HXD-II のデジタル電子回路部 (HXD-DE) も、埼玉大、宇宙研、三菱重工 (株) などと共同

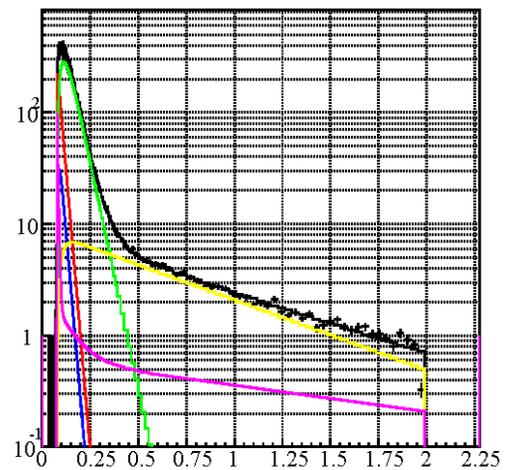


図 7.2 c: The scintillation decay time profile (in units of  $\mu\text{sec}$ ) of a GSO scintillator, measured with the delayed coincidence method [22].

して開発中である。江副、高橋 (弘)、寺田、国分らは、DE の搭載ソフトウェアを整備するとともに、時刻づけ試験、高レート入力試験、衛星データプロセッサとの噛み合わせ試験などを遂行した。

## 7.2.5 将来に向けての技術開発

### ○ テルル化カドミウムの開発

テルル化カドミウム (CdTe) は、常温で動作し、高い阻止能をもつ半導体素子である。宇宙ガンマ線の検出器として注目されており、宇宙研 (高橋研) を中心として、優れた開発の成果が得られつつある。岡田は宇宙研グループと緊密に協力し、デバイスの開発、信号処理回路の設計、三陸観測所からの気球実験などを行った。彼らはまた、いくつかの新しい技法を用いて、CdTe 素子の時間応答を測定し、0.5 mm 厚の素子に 1000V のバイアスを印可した状態で、6 nsec という優れた時間分解能をえた。さらに 100  $\mu\text{m}$  ピッチの CdTe ストリップ素子を開発し、その特性を調べた。これらの結果は、投稿論文 [12] [29] および岡田の修士論文となった [21] [57]。

### ○ 加速器ビーム実験

宇宙における CdTe 半導体の放射線損傷および放射化を調べるため、宇宙研や埼玉大と共同で 10 月 5 ~ 6 日、CdTe 素子 (22 × 22 × 0.5 mm<sup>3</sup> など数点) に、放射線医学研究所で 155 MeV の陽子ビームを照射した。軌道上で約 10 年分に相当する照射に対し、素子の損傷や特性の劣化は見られず、宇宙用として十分な放射線耐性をもつことが確認された [60]。

村島は、照射で CdTe 内部に生じた放射性同位体からのガンマ線を、照射の数時間後から数十日後まで Ge 検出器で追跡した。2 MeV までの範囲で、検出されたラインのエネルギーと半減期から、約 40 の

不安定同位体を同定した。それにもとづき、(p,xn)反応の断面積の半経験的公式を校正し、宇宙空間におけるCdTeバックグラウンドのモデル化の基礎を固めつつある[59]。

#### ○ キャピラリープレートの内面反射の基礎実験

ガラス毛细管の内面でX線の全反射を起こさせると、X線のライトガイドとして用いることができる。江副らは今年度は、X-ray Optics社から拝借したX線ライトガイドを試験し、ひじょうに優れた特性をもつことを確認した。江副はまた英国レスター大学に滞在し、この研究の権威であるG. Frazer教授と共同研究を行った[41][72]。

#### ○ フーリエ合成型の硬X線望遠鏡・顕微鏡の開発

「ようこう」HXT装置で実証されたフーリエ合成法を改良し、宇宙用および医療用の、硬X線望遠鏡・顕微鏡の開発を続けた。古徳は理研と協力し、3次元イメージングのシミュレーションを行った[56]。

#### <受賞>

- [1] 久保田あや(現・宇宙研学振PD); 井上研究奨励賞(2001年3月付博士論文“X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes”に対し); 井上科学振興財団、2002年2月4日。

#### <報文>

##### (原著論文)

- [2] Makishima, K., Ezawa, H., Fukazawa, Y., Honda, H., Yasushi, F., Tsuneyoshi, K., Kikuchi, K., Matsushita, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Takahashi, T., Tamura, T. & Xu, H.: X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 401 (2001)
- [3] Matsumoto, Y., Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Iyomoto, N. & Makishima, K.: The FR-I radio galaxies NGC 315 and NGC 4261 observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 475 (2001)
- [4] Okada, Y., Takahashi, H. & Makishima, K.: An X-Ray Emitting Supernova Remnant Candidate, M 33 X-4, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 663 (2001)
- [5] Takahashi, H., Okada, Y., Kokubun, M. & Makishima, K.: ASCA Observations of the Central Regions of M 31, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 875 (2001)
- [6] Mizuno, T., Kubota, A., & Makishima, K.: X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes, *Astrophys. J.* **554**, 1282 (2001)
- [7] Kubota, A., Makishima, K. & Ebisawa, K.: Observational Evidence for Strong Disk Comptonization in GRO J1655-40, *Astrophys. J. Lett.* **560**, L147 (2001)
- [8] Sugiho, M., Kotoku, J., Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Fukazawa, Y. & Tashiro, M.: A Possible X-Ray Periodicity at Several Tens of Hours of an Ultraluminous Compact X-Ray Source in IC 342, *Astrophys. J. Lett.* **561**, L73 (2001)

- [9] Uno, S., Mitsuda, K., Inoue, H., Takahashi, T., Makino, F., Makishima, K., Ishisaki, Y., Kohmura, Y., Itoh, M. & Lewin, W.H.G.: X-Ray Spectrum of Supernova 1993J Observed with ASCA and Its Evolution 8–572 Days after the Explosion, *Astrophys. J.* **565**, 419 (2002)
- [10] Fukazawa, Y., Iyomoto, N., Kubota, A., Matsumoto, A. & Makishima, K.: Excess Hard X-ray Emission from the Obscured Low Luminosity AGN in the Nearby Galaxy M 51 (NGC 5194), *Astron. Astrophys.* **374**, 73 (2001)
- [11] Terada, Y., Ishida, M., Makishima, K., Imanari, T., Fujimoto, R., Matsuzaki, K. & Kaneda, H.: X-ray Beaming Caused by Resonance Scattering in the Accretion Column of Magnetic Cataclysmic Variables, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **328**, 112 (2001)
- [12] Okada, Y., Takahashi, T., Sato, G., Watanabe, S., Nakazawa, K., Mori, K. & Makishima, K.: CdTe and CdZnTe Detectors for Timing Measurements, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2002)
- [13] Tashiro, M., Makishima, K., Kokubun, M., Ezoe, Y., Isobe, N., Kotoku, J., Matsumoto, Y., Okada, Y., Sugiho, M., Takahashi, I., Takahashi, H., Tamura, T., Terada, Y. *et al.*: Achievement of the ASTRO-E Hard X-Ray Detector Development, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2002)

##### (解説)

- [14] 牧島一夫、寺田幸功、須藤靖、坪野公夫、小谷隆行、山田亨、大石奈緒子、E.L. Turner, D.N. Spergel: 「中型衛星による太陽系外惑星の探査計画」、ISAS ニュース(宇宙科学研究所) 4月号
- [15] 牧島一夫: 「小田先生と『すだれ』」、ISAS ニュース(宇宙科学研究所) 5月号
- [16] 牧島一夫: 「小田稔先生のご逝去を悼む」、日本物理学会誌 7月号
- [17] 牧島一夫、戎崎俊一: 「巨大質量ブラックホールを作る」、理研ニュース 10月号

##### (学位論文)

- [18] Isobe, N.: “X-ray Probing into Energetics Associated with Astrophysical Jets from Active Galactic Nuclei”, 博士論文
- [19] Matsumoto, Y.: “X-ray and Gamma-ray Study of Solar Flares”, 博士論文
- [20] Terada, Y.: “Anisotropic Transfer of Resonance Photons in Hot Plasmas on Magnetized White Dwarfs”, 博士論文
- [21] 岡田 祐, 「テルル化カドミウム半導体を用いた高速ガンマ線検出器とそのイメージングへの応用」、修士論文
- [22] 高橋弘充, 「宇宙硬X線用結晶シンチレータの蛍光時間特性」、修士論文

##### (著書)

- [23] 吉岡一夫、家正則、川辺良平、牧島一夫、松井孝典：「宇宙の観測」、放送大学教材（放送大学教育振興会）

< 学術講演 >

(国際会議)

● 招待講演

- [24] Makishima, K., Kubota, A., Sugih, M., Kotoku, J. & Mizuno, T.: ASCA Results on ULXs, *The 198th Meeting of the American Astronomical Society* (June 3-7, Pasadena), 56.04
- [25] Makishima, K.: Hot Plasmas in Galaxies and Galaxy Clusters, *The 6th International Workshop on Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space* (July 2-6, Niseko/Hokkaido)
- [26] Makishima, K.: Ultra-luminous compact X-ray sources, *MPA/ESO/MPE/USM Joint Astronomy Conference: Lighthouses of the Universe*, (August 6-10, Garching/Germany)
- [27] Makishima, K.: Implications from Recent X-ray Studies of Clusters of Galaxies, *The 5th RESCEU International Symposium: New Trends in Theoretical and Observational Cosmology* (November 13-16, University of Tokyo)

● 一般講演

- [28] Ezoe, Y.: Long Term X-ray Observations of Quasars and a Candidate of Intermediate Mass BH, Seminar at Departments of Physics and Astronomy, Leicester University (October 16, Leicester/The United Kingdom)
- [29] Okada, Y., Takahashi, T., Sato, G., Watanabe, S., Nakazawa, K., Mori, K. & Makishima, K.: CdTe and CdZnTe Detectors for Timing Measurements, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (November 4-10, San Diego)
- [30] Kahn, S., Xu, H., Peterson, J., Behar, E., Paerels, E., Frits, B., Mushotzky, R., Jernigan, G. & Makishima, K.: XMM-Newton RGS Observations of the Elliptical Galaxy NGC 4636, *New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra era* (November 26-30, Noordwijk/The Netherlands), E3-2
- [31] Takahashi, I., Katayama, H., Ikebe, Y., & Matsushita, K.: Background Properties of EPIC-PN onboard XMM-Newton, Seminar at the Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik (December 12, Garching/Germany)

● ポスター発表

- [32] Kubota, A., Makishima, K. & Ebisawa, K.: X-ray Study of Optically Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes, *The 198th Meeting of the American Astronomical Society* (June 3-7, Pasadena), 56.04

- [33] Kokubun, M., Makishima, K., Yamauchi, S., Sakano, M. & Ebisawa, K.: Hard X-ray Nature of the Galactic Bulge Emission, *New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra era* (November 26-30, Noordwijk/The Netherlands), E1-5

- [34] Takahashi, H., Okada, Y., Kokubun, M. & Makishima, K.: Detailed Spectral Analyses of ASCA, XMM-Newton and Chandra data for the Central Region of M31. *ibid*, E3-3

- [35] Takahashi, I., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kokubun, M., Murakami, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Tashiro, M., Yamaoka, K. & the HXD team: Rechallenge of HXD-II onboard ASTRO-E-II, *ibid*, G-11

- [36] Katayama, H., Takahashi, I., Ikebe, Y., Matsushita, K., Tanaka, Y. & Freyberg, M.: Properties of the Background of EPIC Onboard XMM-Newton, *ibid*, WA3-7

(国内会議)

- 日本物理学会・秋の分科会（9月22～25日、沖縄国際大学）

- [37] 杉保昌彦、古徳純一、牧島一夫、久保田あや、水野恒史：太陽質量の100倍をもつブラックホールの観測的証拠、25aSG3

- [38] 小林謙仁、久保田あや、牧島一夫、高橋忠幸：RXTE衛星HEXTEで見たブラックホール降着円盤からの逆コンプトン成分、25aSG4

- [39] 国分紀秀、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫、中澤知洋、田代信、深沢泰司、釜江常好 他 HXD チーム：ASTRO-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状報告 (1)、25aSG11

- [40] 山岡和貴、牧島一夫、釜江常好、国分紀秀、高橋忠幸、田代信、中澤知洋、村上敏夫、深沢泰司 他 HXD チーム：Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の BGO アンチカウンタのこれまでと現状、25aSG12

- [41] 江副祐一郎、杉保昌彦、笠間太介、村島未生、牧島一夫、D.M. Gibson：キャピラリプレート内面反射をもちいた X 線集光系の開発 (2)、25pSG6

- 日本天文学会・秋の年会（10月4～6日、姫路市）

- [42] 村島未生、久保田あや、江副祐一郎、牧島一夫、洪秀徴、根来均：Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy, Ton S180 の「あすか」による長期観測 (1) X 線スペクトルの時間変動、B07a

- [43] 洪秀徴、根来均、野上杏子、村島未生、江副祐一郎、牧島一夫、久保田あや：Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy, Ton S180 の「あすか」による長期観測 (2) フレア中のスペクトル変化、B08a

- [44] 牧島一夫、杉保昌彦、古徳純一、久保田あや、水野恒史：太陽の100倍の質量をもつブラックホールは実在するか？ B09a

- [45] 杉保昌彦、古徳純一、江副祐一郎、牧島一夫、久保田あや、水野恒史：太陽の100倍の質量をもつブラックホール候補天体の光学同定の試み、B12a

- [46] 松本縁、牧島一夫、須賀一治、吉森正人、森本幸司：「ようこう」衛星ガンマ線スペクトル計 GRS を用いた、太陽フレアに伴うガンマ線の観測、M20a
- [47] 長瀬文昭、迫昌男、S. Kahn、F. Paerels、D.A. Liedahl、P.Wojdowski、N. Schulz、B. Paul、牧島一夫、石田学：Chandraによる Vela X-1 の観測：I. 概要及びコンプトン反跳鉄輝線、N17a
- [48] 中島基樹、三原建弘、桜井郁也、鳥居研一、山岡和貴、牧島一夫：RXTEを用いた、パルサー LMC X-4 のサイクロトロン共鳴吸収線の探査、N18a
- [49] 笠間太介、高橋弘充、牧島一夫、久保田あや：ブラックホール候補天体 4U1630-47 の「あすか」および RXTE による観測の解析、N20a
- [50] 久保田あや、牧島一夫：X線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証 2-光学的に厚い ADAF の可能性、N34a
- [51] 石川輝、石田学、石崎欣尚、大橋隆哉、牧島一夫、根来均：球状星団 M4 の「あすか」による観測、N43b
- [52] 磯部直樹、牧島一夫、田代信、鈴木雅也、伊予本直子、金田英宏：電波銀河のローブにおける磁場と粒子のエネルギーと中心核強度の関係、S06a
- [53] 鈴木雅也、磯部直樹、田代信：電波銀河 3C123 のホットスポットからの逆コンプトン X 線の観測、S08a
- [54] 川原田円、高橋勲、中澤知洋、深沢泰司、牧島一夫：「あすか」による RXJ0419.6+0225 の観測、T14a
- [55] 中澤知洋、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫、田代信、深沢泰司、国分紀秀、能町正治、釜江常好、他：ASTRO-E2 衛星に搭載される硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状、W30a
- [56] 古徳純一、寺田幸功、牧島一夫：フリーエ・ベッセル合成を用いた宇宙硬 X 線撮像光学系の基礎研究、W31a
- 日本物理学会・春の年会（3月24～27日、立命館大学）
- [57] 岡田祐、高橋忠幸、佐藤悟朗、渡辺伸、森国城、牧島一夫：テルル化カドミウム半導体 (CdTe, CdZnTe) を用いた高速ガンマ線検出器とイメージングへの応用、24pWF2
- [58] 古徳純一、松本縁、牧島一夫、小杉健郎、吉森正人：「ようこう」衛星ガンマ線スペクトル計 GRS と硬 X 線望遠鏡 HXT を用いた、太陽フレア 98 年 8 月 18 日 X4.9 に伴うガンマ線の観測、24pXA3
- [59] 村島未生、小林謙仁、高橋勲、国分紀秀、川原田円、中澤知洋、古宇田学、三谷烈史、佐藤悟朗、岡田祐、渡辺伸、米徳大輔、高橋忠幸、鈴木雅也、田代信、牧島一夫 他 HXD チーム：プロトンビームを用いた CdTe ダイオードの宇宙線に対する耐性の評価試験 1、26pZA11
- [60] 小林謙仁、村島未生、三谷烈史、古宇田学、佐藤悟朗、渡辺伸、米徳大輔、中澤知洋、高橋忠幸、川原田円、岡田祐、高橋勲、国分紀秀、牧島一夫、鈴木雅也、田代信 他 HXD チーム：プロトンビームを用いた CdTe ダイオードの宇宙線に対する耐性の評価試験 2、26pZA12
- [61] 川原田円、高橋勲、中澤知洋、深沢泰司、松下恭子、牧島一夫：「あすか」で見た暗黒銀河群候補天体 NGC 1550、27aXD2
- [62] 鈴木雅也、田代信、磯部直樹、牧島一夫、深沢泰司：XMM-Newton 衛星による電波銀河 Centaurus B の観測、27aXD3
- [63] 笠間太介、高橋弘充、牧島一夫、久保田あや：ブラックホール降着円盤における逆コンプトン散乱の検証、27aXD5
- [64] 寺田幸功、牧島一夫、石田学：強磁場白色矮星の降着プラズマにおける共鳴光子の非等方的な伝搬過程 (II)、27aXD7
- 日本天文学会・春の年会（3月25～28日、茨城大学）
- [65] 松本縁、古徳純一、牧島一夫 他：ループトップからのガンマ線の検出 - 1998 年 8 月 18 日フレア、M21a
- [66] 松本縁、古徳純一、牧島一夫、小杉健郎、吉森正人 他：1991-2001 年において「ようこう」衛星 GRS が観測した全ガンマ線フレアの統計的解析、M27b
- [67] 石川輝、篠崎慶亮、石田学、山崎典子、石崎欣尚、大橋隆哉、牧島一夫、根来均：球状星団 M4 と NGC 6397 のあすかによる観測、N68a
- [68] 高橋弘充、岡田祐、牧島一夫：XMM-Newton および Chandra 衛星による M31 の観測、R07a
- [69] 田代信、鈴木雅也、磯部直樹、牧島一夫、深沢泰司：XMM-Newton 衛星による電波銀河 Centaurus B の観測、S05a
- [70] 牧島一夫、高橋勲、川原田円、池辺靖、松下恭子、田村隆幸：新しい X 線観測による銀河団クーリングフロー仮説の終焉、T07a
- [71] 高橋勲、片山晴善、林田清、池辺靖、松下恭子、M.J. Freyberg、H. Boehringer、牧島一夫：XMM-Newton 衛星搭載の EPIC-PN 検出器のバックグラウンド特性、W27a
- [72] 江副祐一郎、杉保昌彦、笠間大介、村島未生、牧島一夫、A.N. Brunton、G.W. Fraser：キャピラリプレートを用いた宇宙 X 線集光系の開発と評価、W43a
- その他
- [73] 牧島一夫：「小田稔氏の足跡～ブラックホールの観測的研究」、科研費研究会《高エネルギー宇宙物理学の理論的研究》（9月19～21日、大阪大学）
- [74] Takahashi, H., Takahashi, I., Kokubun, M. & Makishima, K.: Scintillation Time Profile of GSO, BGO, and YAP, 日米物理学会・合同核物理分科会（10月17～20日、ハワイ）、SG01
- [75] 国分紀秀：「硬 X 線・ $\gamma$ 線検出器関連の最新事情」、名大物理 U 研研究会《天文観測用検出器—基礎から最新の動向まで—》（10月24-25日、名古屋大学）
- [76] 牧島一夫：「大気圏外から宇宙を見る」、埼玉大学物理学教室学術講演会（2月28日）
- [77] 牧島一夫：「宇宙を見たい」、進学情報センター主催シンポジウム《私が学問に目覚めたとき》（2002年4月26日、駒場）
- [78] 牧島一夫：「銀河団クーリングフロー仮説の終焉」、立教大学物理教室コロキウム（2002年4月27日）

## II

# 2001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

牧島 一夫（センター長／教授）

川崎 雅裕（教授）

茂山 俊和（助教授）

白水 徹也（助手）

樽家 篤史（助手）

F. ボルツマティ（外国人客員教授）

鳥居 隆（機関研究員）

井田 大輔（機関研究員）

梅田 秀之（教務補佐員）

西城 千夏（時間雇用職員）

永野 早百合（時間雇用職員）

山上 京実（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	白水 徹也
	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	
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	土居 守
		嶋作 一大
7. 気球観測による反物質 探査，衛星による X 線・ $\gamma$ 線観測	牧島 一夫	国分 紀秀
		佐貫 智行

(1) 学振外国人招聘受託研究員も含む。

## 2 プレプリント・リスト

1. RESCEU-1/01  
Radiative decay of a massive particle and the non-thermal process in primordial nucleosynthesis,  
M. Kawasaki, K. Kohri and T. Moroi,  
Phys.Rev. D63 (2001) 103502
2. RESCEU-2/01  
Probability Distribution Function of Cosmological Density Fluctuations from Gaussian Initial Condition: Comparison of One- and Two-point Log-normal Model Predictions with N-body Simulations,  
Issha Kayo, Atsushi Taruya, and Yasushi Suto,  
submitted to ApJ
3. RESCEU-3/01  
Lightest-Neutralino Decays in R<sub>p</sub>-violating Models with Dominant  $\lambda$  and  $\lambda$  Couplings,  
F. Borzumati, R. Godbole, J.L. Kneur, and F. Takayama,  
Phys.Rev.D.
4. RESCEU-4/01  
Cosmic Microwave Background Anisotropy with Cosine-Type Quintessence,  
Masahiro Kawasaki, Takeo Moroi and Tomo Takahashi,
5. RESCEU-5/01  
Adiabatic and isocurvature fluctuations of AD field in D-term inflation model,  
Masahiro Kawasaki and Fuminobu Takahashi
6. RESCEU-6/01  
Probing the Core Structure of Dark Halos with Tangential and Radial Arc Statistics  
Masamune Oguri, Atsushi Taruya and Yasushi Suto,  
ApJ, 559, 572
7. RESCEU-7/01  
Effects of Neutrino Oscillation on the Supernova Neutrino Spectrum,  
K.Takahashi, M.Watanabe, K.Sato and T.Totani,  
PRD, submitted
8. RESCEU-8/01  
Brane-World and Holography,  
Tetsuya Shiromizu, Takashi Torii and Daisuke Ida
9. RESCEU-9/01  
Q-ball formation: Obstacle to Affleck-Dine baryogenesis in the gauge-mediated SUSY breaking?  
S. Kasuya and M. Kawasaki
- RESCEU-10/01  
Stability of  $\text{AdS}_p \times S^n \times S^{q-n}$  Compactifications,  
Tetsuya Shiromizu, Daisuke Ida, Hirotaka Ochiai and Takashi Torii
10. RESCEU-11/01  
Natural Double Inflation in Supergravity,  
Masahide Yamaguchi,  
Phys. Rev. D, in press

11. RESCEU-12/01  
Cosmological Evolution of Global Monopoles,  
Masahide Yamaguchi,  
Phys, Rev. D, in press
12. RESCEU-13/01  
Density Fluctuations and Primordial Black Holes Formation in Natural Double Inflation in Supergravity,  
Masahide Yamaguchi,  
Phys, Rev. D, in press
13. RESCEU-14/01  
Gravothermal Catastrophe and Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems,  
Atsushi Taruya and Masa-aki Sakagami,  
Physica A, submitted
14. RESCEU-15/01  
Formation of Nuclear "Pasta" in Cold Neutron Star Matter,  
Kei Iida, Gentaro Watanabe and Katsuhiko Sato,  
Prog. Theor. Phys. (accepted)
15. RESCEU-16/01  
Clustering Properties of Galaxies at  $z \sim 4$  in the Subaru/XMM Deep Survey Field,  
Masami Ouchi, Kazuhiro Shimasaku, Sadanori Okamura, Mamoru Doi, Hisanori Furusawa, Masaru Hamabe, Masahiko Kimura, Yutaka Komiyama, Masayuki Miyazaki, Satoshi Miyazaki, Fumiaki Nakata, Maki Sekiguchi, Masafumi Yagi and Naoki Yasuda,  
to be published in ApJ Letters, astro-ph/0108008
16. RESCEU-17/01  
Isocurvature Fluctuations in Tracker Quintessence Models,  
M. Kawasaki, T. Moroi and T. Takahashi
17. RESCEU-18/01  
Semiclassical Instability of the Brane-World,  
Daisuke Ida, Tetsuya Shiromizu and Hirotaka Ochiai
18. RESCEU-19/01  
Gravitational energy, dS/CFT correspondence and cosmic no-hair,  
Tetsuya Shiromizu, Daisuke Ida and Takashi Torii
- RESCEU-20/01  
A Possible X-Ray Periodicity at Several Tens Hours of a Ultra-Luminous Compact X-Ray Source in IC 342,  
M. Sugihō, J. Kotoku, K. Makishima, A. Kubota, T. Mizuno, Y. Fukazawa, and M. Tashiro,  
Astrophysical Journal Letters
19. RESCEU-21/01  
Lognormal Property of Weak Lensing Fields,  
A. Taruya, M. Takada, T. Hamana, I. Kayo and T. Futamase,  
ApJ, submitted
20. RESCEU-22/01  
Earth effects on supernova neutrinos and their implications for neutrino parameters,  
Keitaro Takahashi and Katsuhiko Sato,  
PRD, submitted
21. RESCEU-23/01  
Time Delay Statistics of Strong Gravitational Lensing and the Density Profile of Dark Halos,

Masamune Oguri, Atsushi Taruya, Yasushi Suto and Edwin L. Turner

22. RESCEU-24/01  
Determining the Supernova Direction by its Neutrinos,  
Shinichiro Ando and Katsuhiko Sato,  
Prog. Theor. Phys. 107 (2002) 957
23. RESCEU-25/01  
Quantum Creation of the Randall-Sundrum Bubble,  
Hirotaka Ochiai, Daisuke Ida and Tetsuya Shiromizu
24. RESCEU-26/01  
A supersymmetric topological inflation model,  
M. Kawasaki and Masahide Yamaguchi
25. RESCEU-27/01  
Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics,  
Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki,  
Proceedings of YKIS01 "Physics of Unstable Nuclei", Kyoto, December, 2001
26. RESCEU-28/01  
Scaling property and peculiar velocity of global monopoles,  
Masahide Yamaguchi,  
Phys. Rev. D, in press