

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

## Annual Report

1999

平成11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 1999 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	3
1.3	超新星・高密度天体	6
1.4	超対称性に基づく統一理論の多岐にわたる理論的研究	7
<b>2</b>	<b>銀河進化理論</b>	<b>11</b>
2.1	最初の星の進化	11
2.2	銀河初期における重元素合成サイクル	11
2.3	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	12
2.4	銀河団中や早期型銀河周囲の高温ガスとそこに含まれる重元素の起源	12
2.5	極超新星	12
<b>3</b>	<b>可視光近赤外観測</b>	<b>18</b>
3.1	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	18
3.2	ハッブルディープフィールド (HDF) における銀河計数の解析	19
3.3	銀河系の金属欠乏星の動力学	19
3.4	原始リチウム組成の高精度決定と宇宙の総バリオン量	19
3.5	適合格子分割を用いた宇宙論的数値計算コードの開発	19
3.6	銀河初期の化学進化と $r$ 過程元素の起源の解明	19
<b>4</b>	<b>サブミリ波観測</b>	<b>22</b>
4.1	観測装置の開発・改善	22
4.2	星間分子雲の観測的研究	23
4.3	実験室分子分光	26
<b>5</b>	<b>暗黒物質観測</b>	<b>28</b>
5.1	ポロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験	28
5.2	アクシオンヘリオスコープ実験	29
<b>6</b>	<b>銀河と宇宙構造の研究</b>	<b>31</b>
6.1	スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の推進	31
6.2	銀河	31
6.3	銀河系および星間物質	32
6.4	恒星	33
6.5	機器開発	33
<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>36</b>
7.1	反物質探査	36
7.1.1	高エネルギー電子・陽電子衝突装置 LEP による実験	36
7.1.2	線型電子・陽電子衝突装置 JLC ( Japan Linear Collider) 計画	36
7.1.3	気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙粒子線の観測	36
7.1.4	$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験の検討	39
7.2	X 線, $\gamma$ 線観測	43
7.2.1	「あすか」GIS 装置の運用と較正	43
7.2.2	「あすか」による宇宙 X 線の観測	43
7.2.3	硬 X 線検出器 (HXD) の開発	45

7.2.4	ASTRO-E 衛星の打ち上げ失敗 . . . . .	45
7.2.5	新しい $\gamma$ 線検出器の開発 . . . . .	46
<b>II</b>	<b>1999 年度 ビッグバン宇宙国際研究センター全般に関する報告</b>	<b>49</b>
1	教官, 職員, および研究員	51
2	プレプリント・リスト	52

I

# プロジェクト別 1999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・杉之原・山田・白水・井澤)

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かにか始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当研究室では、インフレーションモデル、宇宙初期における真空の相転移とそれにとともなう位相的欠陥の生成進化、始原的要素合成、一般相対論の原理的課題などの研究を通じてこのテーマに取り組んでいる。

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。1992年に米国の宇宙背景放射探査衛星 COBE が発見した 3K マイクロ波背景放射の温度揺らぎ、1993年に打ち上げられた日本の X 線衛星 ASCA、1993年に修理が成功した米国のハッブル宇宙望遠鏡の成功は言うまでもないが、すばる望遠鏡や、大規模銀河探査である日米共同プロジェクト スローンデジタルスカイサーベイもすでに稼働を開始した。また、2000年11月には COBE 衛星に続くアメリカの宇宙背景放射探査衛星 MAP が打ち上げられる予定であり、現在そして近い将来においてきわめて重要な観測データが大量に提供されることが期待される。これらの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、非線型確率論的バイ

アスの理論、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、宇宙論的光円錐効果などがあげられる。

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。さらに GINGA 衛星による超新星 1987A、ASCA 衛星による超新星 1993J の観測などから超新星、中性子星の形成を解明する重要なデータが得られている。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。

## 1.1 初期宇宙論・相対論

### ○ インフレーション宇宙におけるレプトン数生成

様々なインフレーション・モデルに対してインフレーション場の崩壊によって生成される右巻きニュートリノによるレプトン数生成を考察し、宇宙のバリオン数を説明するのに十分なレプトン数が右巻きニュートリノの崩壊によって生成されることを示した。[1, 2]

### ○ 熱的インフレーションとモジュライ問題

超弦理論で予言されるディラトン・モジュライ粒子は質量が比較的軽く長寿命であるため宇宙論に深刻な問題を引き起こすが、熱的インフレーションがディラトン・モジュライ粒子を十分に薄め、この問題を解決することを示した。[3] また、熱的インフレーションの下では質量  $10^{12} - 10^{14}$  GeV を持つ非常に重い粒子が宇宙の暗黒物質になりえることを指摘した。[4]

### ○ MeV 再加熱と元素合成

熱的インフレーションのようにインフレーション後の再加熱温度が非常に低い場合に宇宙初期の元素合成からの再加熱温度の制限を求めた。その結果、再加熱過程でハドロンを生じなければ再加熱温度は約

0.5MeV まで低くて良く、ハドロンを生じる場合は約 5MeV 以上でなければならないことが示された。[5, 6]

### ○ Q ボールの宇宙論的生成

素粒子の超対称性標準モデルのソリトン解である Q ボールについて、アフレック・ダイン機構に基づいた宇宙論的生成を 3次元数値シミュレーションで調べ、大きな量子数  $Q$  を持った Q ボールが生成されることを示した。[7] [8]

### ○ 超重力理論に於けるニューインフレーションの初期値問題の解決法

インフラトン場が、超重力理論から予言される相互作用項によってハッブルスケールの質量を熱浴からもらい、自然に原点付近に局在化されることによって、初期値問題が解決されることを示した。

[9][80]

### ○ ダブル・インフレーションと宇宙の大規模構造

超重力理論の枠組みでは、再加熱温度を下げるためにニュー・インフレーションが望ましいが、初期値問題を伴う。初期値問題をハイブリッド・インフレーションで解決し、再加熱温度をニュー・インフレーションで解決する、ダブル・インフレーションを考察した。そこから得られるブレイク入りの密度揺らぎが宇宙の大規模構造の観測結果をうまく説明する可能性があることが分かった。[10, 49, 84]

### ○ ダブル・インフレーションと原始ブラックホール

ニュー・インフレーションで終わるようなダブル・インフレーションを考えると、一般に小スケールにおいて赤方に傾いた密度揺らぎを得る。これによって、ダブル・インフレーションの接続スケールに非常に大きなブレイクが作られ、それによって原始ブラックホールが作られる可能性について考察した。[11]

### ○ 試験紐と超紐理論の多重ソリトン解

試験紐の重心についての運動方程式の導出を行い、孤立ソリトン解との力の釣り合いを議論した。この釣り合いは、多重ソリトン厳密解の存在と関係がある [12][13]。これらの力の釣り合いは宇宙論的な場合も成り立っていることが確認でき [14]、特に宇宙論的な回転するソリトンの衝突を記述する新しい厳密解の発見を超紐理論の枠内で促した [15]。この解は回転するブラックホールの衝突を記述していると期待される。

### ○ 漸近的にフリードマン的な時空構造

これまでの一連の時空の時間的無限遠方の解析を応用し、現実の宇宙モデルの漸近構造についての解析を行った。漸近的対称性と保存エネルギーの定義を与えた [16]。

### ○ プレーンワールド

M 理論と超紐理論との関係から、我々の宇宙は高次元時空の中のドメイン壁 (プレーン) として捉えるのが自然のようである。そこでプレーン上のアインシュタイン方程式の導出を行い、種々の宇宙論的な洞察を行った [17]。同時にプレーン上とバルク時空上の重力の性質について詳しい解析を行った [18]。また宇宙論的な厳密解の大域的構造を調べ、我々の 4次元一様等方宇宙が 5次元のシュバルツシルド・反ドジッター時空上を時間的に走るドメイン壁で記述されることを確認した [19]。

一般にはコンパクト化された余次元を持つ時空は任意の負のエネルギーを持つ Kaluza-Klein 泡時空という穴の開いた時空へ突然崩壊するが、崩壊後の時空の古典的な発展を調べ、裸の特異点が発生しそうであることを数値的に示した [20]。

### ○ ダークエネルギー

最近の high redshift での Type Ia 超新星の観測や宇宙背景放射の揺らぎのスペクトラムや銀河の質量分布等の観測から宇宙は平坦であり、またバリオンとダークマターだけでは臨界密度に達し得ない ( $\Omega_M < 1$ )、という強い示唆が得られている。従って残りの密度を担うエネルギー成分 (ダークエネルギー) が必要である、という結論に達する。宇宙初期のインフレーションと同じように、このエネルギーをスカラー場が担っているものとするのがいわゆる quintessence の考えである。ここでは特に、時間変動する宇宙項の役割を担うスカラー場 (quintessence 場) が重力場とあらわに結合すると (1) quintessence 場 (スカラー場) が重力の源になってしまうことによる等価原理の破れや (2) quintessence 場は時間的に変動することによる重力定数の時間変動を引き起こしてしまうことに着目し、重力場との結合定数は小さくなければならないことを示した [22]。また、kinetic term だけからなる Lagrangian から時間変動する宇宙項のモデル (k-quintessence) がつくれることも示した [24]。

### ○ インフレーション

トンネル効果を用いた、インフレーションシナリオの枠内での開いた宇宙の生成の model building について研究を行った。重力と nonminimal に結合するスカラー場を用いることで、多項式からなるポテンシャルだけからでもトンネル効果を記述するインスタントン解 (Coleman-De Luccia 解) が存在し且つインフレーションが実現されるモデルが広いパラメターの範囲で実現されることを示した [23]。

### ○ ブラックホール

ブラックホール形成の判定条件として提案されている Hoop conjecture の妥当性を Apparent horizon の形成を数値的に調べることで議論した。この際、この仮説のなかで使われる hoop(物体の周囲の長さ)の定義に従来曖昧さがあったので、数学的に曖昧さがなく物理的に意味のある定義を以前に提案した。この判定条件は非球対称的な時空を特に念頭においているので、軸対称以外では数値的に解析を行うのも困難であった。しかしながら最近になって非軸対称(ただし離散的対称性は許す)な場合にも軸対称のときと同じように効率よく Apparent horizon を求めるアルゴリズムが開発された。そこで直ちにこの方法を Hoop conjecture に応用して、非軸対称な場合に以前提案した定義にもとづいて hoop(物体の周囲の長さ)をはじめて計算し、非軸対称な時空における Hoop conjecture の妥当性を調べた [21]。

### ○ ブラックホール時空を運動する粒子に対する重力波放射反作用

近年建設がすすむ重力波の観測において、理論的な重力波の予想が重要と考えられている。そうしたなか、粒子に働く重力波放射反作用力の導出が、残された問題とされている。ここではブラックホール摂動を使った反作用力の導出を考えた [74]。

重力波の理論的計算について、粒子の運動を完全に記述する方程式について、これまでの結果から、時空の摂動を行うときのゲージが重要であることが分かった。これについて、当初特殊関数を使った系統的な計算可能性について検討したが、困難があることが分かった。そこで、もっと簡単な多項式による展開を考えたところ、展開の最低次において成功を取めた。この結果は、多項式による系統的な高次の展開が可能であることを示している。

### ○ 重力波観測における、データ解析プログラムの作成

重力波観測は、これまでのどの素粒子実験ともタイプが異なる実験である。とくに長時間の観測データをフィルターしなければいけないところで、膨大な計算を要するものである。

現在ある解析手法において、観測ノイズにおいて非常に単純な仮定をおくが、それを拡張する方法について考察を行い、それに基づいたプログラムの開発を行った。

### ○ グローバルストリングのダイナミクスとアクシオン

複素スカラー場を数値的に解くことによって、グローバルストリングのダイナミクスを調べた。輻射優勢、物質優勢の両時代でスケール則が成り立つことを確かめた。また、ストリングから放出されるアクシオンの典型的なエネルギーがホライズンスケールぐらいであることを示し、現在のアクシオンのエネルギー密度を求めた。[25][26][27][68] [69][81][82][?]

### ○ 多次元宇宙の量子論的創生

ハートル-ホーキングの無境界仮説に基づいて、物質はないが正の宇宙定数のある多次元宇宙モデルの宇宙の波動関数を数値計算した [70, 85]。

### ○ 初期宇宙における重力的粒子生成

カオティックインフレーションシナリオで初期宇宙におけるモジュライ粒子の重力的な生成を考えた。この場合、現在の宇宙の密度パラメーターが1をはるかに超えてしまうことを数値計算で確認した。また、Thermal Inflation を導入すれば、モジュライは十分うすめられ、観測事実と矛盾しないことを解析的に評価した [61]。

## 1.2 観測的宇宙論

### ○ 準解析的銀河進化モデルを用いたクェーサー形成シナリオの考察

クェーサーの個数密度は、赤方偏移の減少とともに増加し、赤方偏移が2の付近でピークを迎え、それ以降、現在まで減少している。高赤方偏移側の増加は構造の進化に伴うクェーサーブラックホールの増加のためであり、ピーク以降の低赤方偏移側の減少はクェーサーブラックホールへ落ち込むコールドガスの量が減少するためであると解釈するのが一般的であるが、定量的には確かめられてはいない。そこで、この解釈にしたがったクェーサー形成シナリオを都立大の研究者と共同で構築し、クェーサーの光度関数の時間進化について調べることにした。(個数密度は光度関数の積分により求められる量なので、光度関数について調べることは、個数密度についても調べることになる。) 構造の進化に関しては、ダークマターハローの形成率の式を用いてクェーサーブラックホールの形成率を記述することにし、クェーサーの燃料となるコールドガスの量に関しては、銀河形成の準解析的モデルによる計算結果を用いることにした。その結果、クェーサーの光度が赤方偏移の高次の中に比例して増加しなければ、上で述べたような観測事実を説明できないことが分かった [86]。

### ○ 遠方天体の2点統計における光円錐効果と赤方偏移歪みの統一的定式化

遠方天体の空間相関を観測する際には、一般相対論的效果により見かけ上の非等方向性が生み出される。さらに、観測者からの距離の違いは同時にそれらの宇宙時刻の違いでもあるために、光円錐効果を正しく取り入れる必要がある。赤方偏移歪みに関しては、従来の我々の理論モデルの信頼性を宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて検証するとともに、非線型効果をモデル化して取り込む方法を議論した [29, 59]。これらの効果は、今まで我々のグループによって初めて指摘され定式化されたものであるが、今回その

双方を統一的に考慮する理論的定式化を完成させた [28, 31, 75]。また、この定式化を用いて、高赤方偏移の X 線銀河団に対する 2 点相関関数の理論予言を行った [32]。

### ○ ダークマターハローの密度分布の普遍性

重力的に形成されるダークマターハローは、銀河や銀河団などの天体に関する第 0 近似である。このダークマターハローの密度プロファイルがある普遍的な関数形に従うことが、数年前提唱され、大きな話題となっている。我々は、従来の計算で用いられている空間メッシュを、さらに階層的に分割することで高密度領域での質量・空間分解能をともに向上させたコードを開発し、系統的なシミュレーションを行った。その結果、内側の密度プロファイルのべき指数は普遍的ではなく、ハローの質量に依存して変化し、銀河団スケールで  $\rho(r) \propto r^{-1.1}$ 、銀河スケールで  $\rho(r) \propto r^{-1.5}$  であることを示した。これは、観測されているスロープよりもかなり急であり、冷たいダークマターモデルの問題点として活発な議論が行われている [30, 92]。

### ○ 宇宙論的流体シミュレーションを用いた X 線銀河団の温度関数における輻射冷却効果の検証

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。それから導かれる質量関数の妥当性は N 体計算の範囲でかなり確認されているが、実際に観測される温度関数あるいは光度関数は、銀河団内ガスの輻射冷却の効果により、単純な予言は困難である。我々は京都大学の共同研究者とともに、 $N = 128^3$  のガス粒子および同数のダークマター粒子を用いた、世界最大の 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、銀河団スケールにおいては、輻射冷却や背景紫外線輻射による加熱を考慮しても、Press – Schechter 理論の予言する温度関数が良い近似であることを明らかにした。一方で、X 線光度はモデル依存性や数値計算の分解能に大きく依存し、現時点では信頼できる結果を与えないことを示した [33]。

### ○ 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

銀河分布と見えないダークマターの対応関係が明らかになれば、大規模銀河サーベイによる大量の観測データを駆使することで、ダークマターの質量分布に対する情報を高い精度で構成することができる。銀河分布とダークマターの質量分布同士の統計的関係を「バイアス」と呼ぶが、このバイアスを理論的に再考しようという研究が、観測の進展を受けて近年特に盛んである。一般に、バイアスは単純な比例関係にならず一対一対応でもない、非線型で確率的なものとして知られている。バイアスが確率的になる 1 つの理由は、ダークマターの質量分布以外に、光る天

体の特徴づける隠れた変数の存在と考えられているが、具体的にそうした証拠を挙げた理論的研究は数値シミュレーションにとどまるものであった。そこで我々は、簡単な解析的モデルを提唱し、隠れた変数を通じてバイアスの諸性質（スケール依存性、時間的進化）がどのように決まるのか、定性的振る舞いを調べた。解析では、拡張 Press – Schechter 理論を軸に、隠れた変数（質量と形成時刻）で特徴づけられたハローとダークマターの対応関係を確立、それらを記述する分布関数を具体的に評価して見せた。その結果、これまで知られている N 体シミュレーション・準解析的銀河形成モデルの結果とよく一致することがわかり、隠れた変数（特に形成時刻）の及ぼす影響の定量的側面も明らかになった。

### ○ 宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた、ダークマターハローと高密度ピークの 2 点相関に対する非線型確率バイアス

バイアスのもつ非線型性・確率的要素は、重力レンズ効果などを使えば、将来、直接観測できるようになるが、こうした観測だけから質量分布の 3 次元データを再構成することは困難である。従って、シミュレーションに基づく解析から、現実の天体がどのようにバイアスされているか、経験的理解を得ることも不可欠となる。ここでは、バイアスに対する重力進化の影響に特に着目し、N 体シミュレーションを用いて、仮想天体に対する非線型確率的バイアスの性質（スケール依存性・時間的進化）を調べた。質量分布の 3 次元データから、重力平衡にある領域（ハロー）と高密度領域（ピーク）を選び出し、カタログデータに反映される非線型確率的バイアスの性質を 2 点相関の評価を通じて、定量化した。その結果、バイアスの非線型性・確率的要素は、重力の非線型性に伴って増大し、天体の特性（サイズ等）に強く依存することが示された。その一方、準非線型・線型領域では、バイアスはスケールに依らない単純な線型関係になり、仮想天体とダークマターの一対一対応が、かなりいい近似として成り立つことが明らかになった。さらに、そうした領域では解析的モデルによる理論予言ともよく一致することも確かめられた。

### ○ ミリ波領域における銀河団のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果の高角度分解能マッピング

我々は、国立天文台、東北大学、京都大学の共同研究者とともに、全天で最も明るい X 線銀河団 RXJ1347-1145 の系統的な多波長観測を行っている。特に、銀河団の高温プラズマと宇宙マイクロ波背景放射の光子との逆コンプトン散乱によって、銀河団の方向の背景放射の温度が低下する現象（スニャーエフ・ゼルドビッチ効果）を、サブミリ波領域において、世界ではじめて検出に成功した [50, 55]。さらに、野辺山 45m 望遠鏡にとりつけられた NOBA と呼ばれるアレキ検出器を用いて、ミリ波領域（波長 2mm）での銀河団 2 次元マップを得た。この検出器のビームサイズは、約 13 秒角であり、センチメートル波で通常用

いられる干渉計に比べて一桁近く小さい。この、高角度分解能によって、従来観測されていなかった銀河団のサブストラクチャーを発見した。このような形態の非一様性が遠方銀河団で珍しくないとするれば、スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いた宇宙論パラメータの決定に対して、重要な問題点を投げかけることになる。

### ○ 測光観測による $z \sim 1.1$ クェーサーグループ周辺の銀河集団大構造の発見

現在の宇宙には、超銀河団と呼ばれる、銀河の空間的な大構造が存在する。高赤方偏移宇宙では、対応するような構造は知られていないが、これは宇宙の構造進化のためであるか、あるいは、暗くなるための観測的限界によるのかは明らかでない。一方、 $z \sim 1.1$  付近で、23 個のクェーサーが密集している領域が存在することが知られている。我々は、東北大学、プリンストン大学の共同研究者とともに、米国アパッチポイント天文台の 3.5m 望遠鏡を用いて、この領域内の銀河の測光観測を行った。その結果、このクェーサー集団の付近で、確かに銀河の面密度が高くなっていることを発見した。この銀河集団は、個々のクェーサーとは相関が強くなく、むしろクェーサー集団とともに全体として宇宙の大構造を形作っているものと解釈される。

### ○ 銀河団高温ガスの進化：超新星爆発に起因する加熱の影響

重力、ガスの圧力、ショック加熱、熱制動輻射による冷却および超新星爆発によるガスの加熱を取り入れた、銀河団高温ガスのシミュレーションを行った。超新星爆発による加熱を取り入れなかった場合に比べて、冷却の効果が抑制され、その結果として、観測されているような、中心部分にコアを持つガスの密度構造が再現できることがわかった。[71]

### ○ 銀河群の X 線光度に対する超新星爆発による加熱の効果

銀河群にも、銀河団と同様に、熱的に X 線を放射する高温ガスが付随している。しかし、銀河群の X 線光度は、質量の大きな銀河団を単純にスケールダウンしたときに予想されるものに比べて、1 桁程度小さいことがわかっている。これに対する説明として、超新星爆発によるガスの加熱の効果が考えられる。一般に、加熱の効果により X 線光度は低下すると考えられるが、ガスの単位質量あたりの加熱を一定とした場合、この効果は重力ポテンシャルの浅いシステムほど強く働くからである。この効果を現実的なモデルに基づいて定量的に調べるためには、シミュレーションを用いるのが最も有効である。本研究では、重力、ガスの圧力、ショック加熱、熱制動輻射による冷却および超新星爆発によるガスの加熱を取り入れたシミュレーションを行った。シミュレーションの結果から、超新星爆発による加熱の効果に

より、銀河群の X 線光度は十分下がることを確認した。また、超新星爆発によるエネルギーの一部のみが加熱に使われ、残りは輻射として逃げたことが、観測されている X 線光度から推測されることを見いだした。[87]

### ○ 銀河分布と質量分布の関係についての一般的定理

我々自身のみならず、銀河を始めとして宇宙の中で我々に観測できる対象は、複雑な物理過程を通して形成され、理論的には不確定な要素が非常に大きく、これまですっきりとした理論と観測との比較が難しい状況であった。ところが近年の大規模な宇宙論的観測の進歩は、格段に広い領域の観測を可能とする新たな段階に突入しつつある。このような場合に観測される、いわゆる線型領域の密度ゆらぎについて、これまで不確定性の元凶と見られていた現象論的な銀河のバイアスおよびその確率分布のモデルについての重要な定理を、一般的な仮定のもとに導いた [35]。

### ○ 赤方偏移空間における 2 点相関関数の一般的解析解

観測的宇宙論における最も重要な対象のひとつ、銀河、クェーサーの相関関数を、非常に一般的な形で求めることに成功した。これまで求められていた形は空間の相対論的ゆがみや時間発展を無視しているか、あるいは観測領域を見込む角度が小さい極限などの、実際には必ずしも満たされるとは限らない近似の下に得られていたが、そのような制限を一切取り去り、一般相対論的ゲージ不変線型理論の枠内でまったく一般的な形を求めた [36]。

### ○ ラスカンパナスサーベイの固有モード解析による宇宙論パラメータ

我々はジョンズホプキンス大学の共同研究者と共に、カーフネンルーベ変換に基づく銀河の赤方偏移データの固有モード解析のプロジェクトを進めているが、最近実際の観測データであるラスカンパナスサーベイを用いてこのプロジェクトの第一結果を得た [37]。比較的データの質が均一でなく、有効体積も小さいこのサーベイにありながら、この解析の有効性を大きく示す結果となった。特に、格段にデータの質の向上する SDSS サーベイへの応用に計り知れない可能性を強く示した。

### ○ マゼラン星雲に於ける化学進化

化学進化モデルを使うことで、我々は具体的にどの程度銀河進化に関する情報を引き出せるのかを、大マゼラン星雲を例に検討した。結果として、化学進化モデルのパラメータを適当に選ぶことで、大マゼラン星雲のガスと星の質量比、化学組成史、星形成率、Ia 型と重力崩壊型の超新星残骸比等の観測値が無理なく説明出来ることが示された。これによって、化学進化モデルを使うことで大マゼラン星雲の

進化の歴史に対してかなりの情報が得られることが示された。又、[Ti/Fe]比は、従来の超新星の元素合成計算の結果を使うと、観測よりも低めに出してしまうことが避けられず、太陽組成再現問題で言われているところの Ti 不足問題が大マゼラン星雲の化学進化問題でも顕著であることが確認された。[38, 52]

### 1.3 超新星・高密度天体

#### ○重力崩壊型超新星でのニュートリノ輸送

重力崩壊型超新星の爆発のシミュレーションではニュートリノによるエネルギー輸送を正確に扱うことが重要である。数値計算法を開発するだけでなく、ニュートリノの反応断面積を正しく評価する事も重要な課題である。土岐 (阪大) らとの協同研究では、超新星コアでの高温高密度下でのニュートリノと核子の吸収、放出、散乱反応率に対する多体効果を乱雑位相近似を用い、状態方程式の相対論的平均場近似とコンシステントに計算した。[39] また、核密度より低い密度で重要となると考えられる核子どうしの散乱による、ニュートリノ反応率への影響を簡単な核力と、Bethe-Salpeter 方程式を用いて評価した。[40] Janka, Keil (共に Max-Planck-Institut) と共同で、この変化から期待されるニュートリノ光度の変化と原始中性子星内での対流に与える影響を調べた。[77, 98]

一方、上記目的で開発した流体コードを用いて、住吉 (理研) 等と共同で、r-過程元素合成の候補地として有望と考えられている原始中性子星からのニュートリノ風の数値シミュレーションに応用し、解析的な取扱での状態方程式の問題点を指摘するとともに、重い中性子星 ( $\sim 2M_{\odot}$ ) での r-過程元素合成の成功例をデモンストレーションした。[41]

超新星コア内でニュートリノ振動が起こる場合、他の吸収、放出、散乱などの反応と同時に振動をボルツマン方程式型の輸送方程式で扱う方法を定式化した。[42]

#### ○ストレンジレットにおけるカラープラズマ振動

最近の CERN や Brookhaven における超相対論的重イオン衝突実験においては、QCD により存在が予言されているものの未だ確認されていないクォークグルーオンプラズマ (QGP) の検出が目標の一つとして掲げられている。ストレンジレットとよばれる up, down, strange という三つのフレーバーからなるクォークのかたまりが最安定な自己束縛系であると仮定すれば、QGP がストレンジレットという形で検出される可能性がある。その場合、オーダー 100 MeV という温度のもと、ストレンジレットは励起状態にあることが予想される。ここでは、異なるカラー自由度間で振動しあうモード、縦カラープラズマ振動に着目し、その長波長・低温・弱結合極限における分散関係と減衰率を評価した。[43]

#### ○重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果

重力崩壊型超新星爆発のダイナミクスを検討していく上では角運動量や磁場の効果を考慮することが重要であり、それらを考慮するとジェットの爆発を起こす可能性がある指摘されて久しいが、このようなジェット状爆発の元素合成や物質混合に対する影響を見積もり、具体的に観測と比較することはされていなかった。今回、我々は SN1987A を対象として、観測値と数値計算の結果の比較を行い、SN1987A は極方向と赤道方向で爆発の強さが約 2:1 である可能性が極めて高いことを結論づけた。又、SN1987A から未だ確認されていない中性子星は、南側に向かって走っている可能性が高いことも併せて議論された。又、最近言われている GRB/SN(HN) 相関については、SN1987A の case よりも強いジェット状爆発が要求されるため、SN1987A からは  $\gamma$  線バースト的な現象は生み出されていないだろうと結論された。[44, 45, 53, 89, ?, 104]

#### ○中性子星内殻における非球状原子核

高密度物質の性質やその中の原子核の状態を調べることは、超新星爆発や高密度天体の現象を理解する上で必要不可欠である。中性子星内殻底部では、もはや球状の原子核ではなく、円柱状や板状の原子核が結晶格子を組んだ相、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がエネルギー的に安定な状態として存在し得るという多くの計算結果が提出されており、このような非球状の原子核は "nuclear pasta" と呼ばれている。これらの相が発現するか否かということは、高密度かつ中性子過剰な状況下にある、極めて不定性の大きな原子核の性質に依存するが、本研究では、これらの性質に応じて "nuclear pasta" の各相の出現状況がどのように変化するかを体系的に調べることによって、温度ゼロの下では、円柱状、板状の原子核から成る相は核モデルによらず普遍的に出現する一方で、バブル状の相の発現は小さい表面エネルギーの核モデルに限られるということを見出した。また、円柱状、板状の原子核から成る相の秩序構造に対する熱揺らぎも併せて議論し、中性子星内殻における典型的な温度では、板状の原子核は熱揺らぎによって破壊され得ることを示した。[46, 62, 72, 73, ?]

#### ○銀河団内での宇宙線の伝播

我々の銀河に、宇宙線と呼ばれる非熱的分布を持った高エネルギー粒子が存在することはよく知られている。宇宙線は大半が陽子であり、銀河系内磁場の乱れにより  $10^7$  年程度閉じ込められているということが知られている。

一方、銀河団にも、銀河系内と同程度の強さ ( $\sim \mu\text{G}$ ) の磁場が存在することが知られており、また、ファラデー回転の観測より、適度に乱れていることも確認されている。よって、この銀河団内磁場により、銀河団に宇宙線が閉じ込められることが考えられる。その効果を、宇宙線のソース、銀河団内のガ

スおよび銀河の分布、そして銀河団内の磁場の乱れについてモデルを作り、それにより、銀河団内にはある程度の期間 ( $\sim 10^8$  年程度) 宇宙線を閉じ込めておく能力があることを示した。

また、直接観測することのできないこれら銀河団内の宇宙線の存在を示す間接的証拠として、銀河団内ガスとの衝突により生じるガンマ線強度を予想し、現行の EGRET 衛星での観測と矛盾しないことを示した。また次期衛星である GLAST の検出限界と比較し、GLAST による検出はあまり期待できないことも示した。

さらに、銀河系内宇宙線起源のガンマ線が銀河系内ガンマ線背景放射に寄与しているのと同様、銀河団内宇宙線起源のガンマ線が宇宙ガンマ線背景放射に寄与している可能性があるため、その寄与の度合いを理論的に予想し、10% 程度の寄与はありうるということを示した [54]。

## 1.4 超対称性に基づく統一理論の多岐にわたる理論的研究

大気中で生成されたニュートリノを観測しているスーパーカミオカンデ実験グループは、1998年、慎重なデータ解析の結果、ニュートリノに極めて小さな ( $0.1$  eV 程度) 質量があるという実験結果を発表した。彼らのデータによれば、地球の裏側から飛来するニュートリノの数が、上空からのものに比べてかなり少なく、その半分程度であることが分かった。これは、地球裏側の大気中で発生したミューオン型のニュートリノが、地球を通過して神岡にある実験装置に到達するまでに他のニュートリノに移り変わったとすることで説明される。このニュートリノ振動現象はニュートリノが質量をもつ場合に起こる。もしニュートリノに僅かでも質量があれば、それは現在の素粒子物理の標準理論では説明できない。

柳田は、1979年に素粒子の大統一理論を研究する中でニュートリノに僅かな質量を与えるメカニズムを発見した。大統一理論ではバリオン数やレプトン数は保存されない。レプトン数が破れると、一般に、左巻きニュートリノは自分自身の反粒子 (右巻き) と共にマヨラナ型の質量を持つ。このとき、ニュートリノの質量は、クォークの質量の2乗を大統一理論のエネルギースケールで割った量で与えられる。ニュートリノの小さな質量は、プランクスケール以外に大きなスケールが自然界に存在していることを示唆する。大統一理論の適当なパラメータ領域で、スーパーカミオカンデ実験グループの発見した  $0.1$  eV 程度の質量が容易に説明できる。

1986年に本研究者は、上記のようにレプトン数が高いエネルギースケールで破れていれば、宇宙のバリオン非対称性が説明できることも指摘した。本研究ではニュートリノの質量についてある程度の情報が得られた本年度に、宇宙のバリオン数の詳細な計算を行った。その結果、スーパーカミオカンデの発見したニュートリノの質量が現在の宇宙のバリオン数を説明するのに非常に都合の良いものである

ことを見出した。

平成11年度は超対称性に基づく統一理論の多岐にわたる理論的研究を行った。これはこれまでの大統一理論の研究の延長上にあり、特に、右巻きニュートリノの崩壊による宇宙のバリオン数生成のメカニズムの正当性を示した。また、超重力理論の枠組のなかで、ケーオテックなインフレーションが可能なことを示した。これは世界でも初めてのモデルであり、そのダイナミクスを詳しく調べることは重要であると思われる。

### <報文>

(原著論文)

- [1] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: Leptogenesis in Inflaton Decay; *Phys. Lett.* **B464**, 12 (1999)
- [2] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: Leptogenesis in Inflationary Universe; *Phys. Rev.* **D61**, 083512 (2000)
- [3] T. Asaka and M. Kawasaki: Cosmological Moduli Problem and Thermal Inflation Models; *Phys. Rev.* **D60**, 123509 (1999)
- [4] Asaka, M. Kawasaki and T. Yanagida: Superheavy Dark Matter and Thermal Inflation; *Phys. Rev.* **D60**, 103518 (1999)
- [5] M. Kawasaki, K. Kohri and N. Sugiyama: Cosmological constraints on late-time entropy production; *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4168 (1999)
- [6] M. Kawasaki, K. Kohri and N. Sugiyama: MeV-scale Reheating Temperature and Thermalization of Neutrino Background; *Phys. Rev.* **D62**, 023506 (2000)
- [7] S. Kasuya, and M. Kawasaki: Q-ball Formation through Affleck-Dine Mechanism; *Phys. Rev.* **D61**, 041301 (2000)
- [8] S. Kasuya, and M. Kawasaki: Q-ball formation in the gravity-mediated SUSY breaking scenario; *Phys. Rev.* **D62**, 023512 (2000)
- [9] T. Asaka, M. Kawasaki, and Masahide Yamaguchi: Initial condition for new inflation in supergravity, *Physical Review D*, *Physical Review* **D61**, 027303, 1-3 (1999).
- [10] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure, *Phys. Rev.* **D61** (2000) 023517.
- [11] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Primordial Black Hole Formation, *Phys. Lett.* **B**, in press.
- [12] T. Shiromizu, *Phys. Lett.* **B460**, 141(1999)
- [13] T. Shiromizu, *Phys. Rev.* **D60**, 64019(1999)
- [14] T. Shiromizu and U. Gen, *Class. Quantum Grav.* **16**, 2955(1999)

- [15] T. Shiromizu, *Prog. Theor. Phys.* **102**, 1207(1999)
- [16] T. Shiromizu and U. Gen, *Class. Quantum Grav.* **16**, 2955 (1999)
- [17] T. Shiromizu, K. Maeda and M. Sasaki, to be published in *Phys. Rev. D*(gr-qc/9910076)
- [18] M. Sasaki, T. Shiromizu and K. Maeda, to be published in *Phys. Rev. D*(hep-th/9912233)
- [19] S. Mukohyama, T. Shiromizu and K. Maeda, to be published in *Phys. Rev. D*(hep-th/9912287)
- [20] H. Shinkai and T. Shiromizu, to be published in *Phys. Rev. D*(hep-th/0003066)
- [21] Takeshi Chiba: Apparent Horizon Formation and Hoop Conjecture in Non-axisymmetric Spaces; *Physical Review D*, **60** 044003 (1999).
- [22] Takeshi Chiba: Quintessence, the Gravitational Constant, and Gravity; *Physical Review D*, **60** 083508 (1999).
- [23] Takeshi Chiba, Masahide Yamaguchi: Extended Open Inflation; *Physical Review D*, **61** 027304 (2000).
- [24] Takeshi Chiba, Takahiro Okabe, and Masahide Yamaguchi: Kinetically Driven Quintessence; *Physical Review D*, in press.
- [25] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Evolution of axionic strings and spectrum of axions radiated from them, *Physical Review Letters*, **82**, 4578-4581 (1999).
- [26] Masahide Yamaguchi: Scaling Property of the global string in the radiation dominated universe, *Physical Review D***60**, 103511, 1-10 (1999).
- [27] Masahide Yamaguchi, J. Yokoyama, and M. Kawasaki: Evolution of a global string network in a matter dominated universe, *Physical Review D***61**, 061301R, 1-5 (2000).
- [28] Kazuhiro Yamamoto, Hiroaki Nishioka and Yasushi Suto: The cosmological light-cone effect on the power spectrum of galaxies and quasars in wide-field redshift surveys; *The Astrophysical Journal* **527**(1999)488-497 (astro-ph/9908006).
- [29] Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Cosmological Redshift-space distortion on clustering of high-redshift objects: correction for non-linear effects in power spectrum and tests with N-body simulations; *The Astrophysical Journal* **528**(2000)30-50 (astro-ph/9907438).
- [30] Y.P. Jing and Yasushi Suto: Density Profiles of Dark Matter Halo are not Universal; *The Astrophysical Journal* **529**(2000)L69-L72 (astro-ph/9909478).
- [31] Yasushi Suto, Hiromitsu Magira, and Kazuhiro Yamamoto: Light-cone Effect on Clustering Statistics in Cosmological Redshift Space; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **52**(2000)249-257 (astro-ph/9912367).
- [32] Yasushi Suto, Kazuhiro Yamamoto, Tetsu Kitayama, and Y.P. Jing: Two-point correlation functions of X-ray selected clusters of galaxies: theoretical predictions for flux-limited surveys; *The Astrophysical Journal* **534**(2000) May 10 issue, in press (astro-ph/9907105).
- [33] Kohji Yoshikawa, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Cosmological SPH simulations with four million particles: statistical properties of X-ray clusters in a low-density universe; *The Astrophysical Journal* **535**(2000) May 20 issue, in press (astro-ph/0001076).
- [34] Atsushi Taruya and Yasushi Suto: Nonlinear stochastic biasing from the formation epoch distribution of dark halos; *The Astrophysical Journal* (2000), in press (astro-ph/0004288).
- [35] Takahiko Matsubara: Stochasticity of Bias and Nonlocality of Galaxy Formation: Linear Scales; *Astrophysical Journal*, **525** (1999), 543-553.
- [36] Takahiko Matsubara: The Correlation Function in Redshift Space: General Formula with Wide-angle Effects and Cosmological Distortions; *Astrophysical Journal*, **535** (2000), in press
- [37] Takahiko Matsubara, Alexander S. Szalay, Stephan A. Landy: Cosmological Parameters from the Eigenmode Analysis of the Las Campanas Redshift Survey; *Astrophysical Journal Letters*, **535** (2000), in press
- [38] Shigehiro Nagataki and Gentaro Watanabe: Chemical evolution in the Large Magellanic Cloud; *Pub. Astron. Soc. Japan* **52** (2000), in press (astro-ph/9907108)
- [39] S. Yamada and H. Toki: Neutrino – nucleon reaction rates in the supernova core in the relativistic random phase approximation; *Phys. Rev. C* **61** (2000) 015803-1 - 015803-16.
- [40] S. Yamada: Reduction of neutrino-nucleon scattering rate by nucleon-nucleon collisions; *Nucl. Phys. A* **662** (2000) 219 - 232.
- [41] S. Yamada: Boltzmann equations for neutrinos with flavor mixings; *Phys. Rev. D* (2000) in press.
- [42] K. Sumiyoshi, H. Suzuki, K. Otsuki, M. Terasawa and S. Yamada: Hydrodynamical study of neutrino-driven wind as an r-process site; *Pub. Astron. Soc. Japan* (2000) in press
- [43] Kei Iida: Color plasma oscillation in strangelets, *Phys. Rev. C* **60**(1999) 024905.
- [44] Shigehiro Nagataki: Effects of Jet-like Explosion in SN 1987A; *Astrophys. J. Suppl.*, in press. (astro-ph/9907109)
- [45] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Pulsar Kick and Asymmetric Iron Velocity Distribution in SN 1987A; *Prog. Theo. Phys.* **103** (2000) 713-721

- [46] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts; Nuclear Physics A, accepted (astro-ph/0001273).  
(会議抄録)
- [47] Masahiro Kawasaki: New Inflation in Supergravity and its Observational Implications; Proceedings of COSMO-99 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe, eds. U Cotti et al. (World Scientific, 1999) 160.
- [48] Takeshi Chiba: Phantom Field, In the Proceedings of the Ninth Workshop on General Relativity and Gravitation, eds. Kojima et al. (Hiroshima University, 1999).
- [49] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure; Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium "The Birth and Evolution of the Universe", in press.
- [50] Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Eiichiro Komatsu, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Hiroshi Matsuo, Sabine Schindler, and Kohji Yoshikawa: Cosmological implications of galaxy clusters in X-ray, millimeter and submillimeter bands; Advances in Space Research **25** (2000)771-780 (astro-ph/9902350).
- [51] Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Cluster Abundances in X-ray and Radio Wavebands; Advances in Space Research **25** (2000) 781
- [52] 長滝 重博: 超新星での元素合成とマゼラン雲の化学進化、第2回「マゼラン星雲大研究」集録(国立天文台) P.289
- [53] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発、第12回理論天文学懇談会シンポジウム集録(国立天文台) P.146
- [54] Shinya Tsubaki: Confinement of cosmic rays by clusters of galaxies; in the Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference (Salt Lake City, 1999).  
(国内雑誌)
- [55] 須藤 靖: サブミリ波で銀河団をみる: 観測的宇宙論の新しい窓、バリティ (1999) 7月号, pp.31-39
- [56] 佐藤勝彦: 宇宙物理と応用物理、応用物理学会誌 68巻 8号 (1999), pp.880-885
- [57] 佐藤勝彦: 宇宙の創生、数理科学 38巻 4号 (2000) pp.33-39
- [58] 川崎雅裕: ダークマター・アクシオンと宇宙背景輻射、バリティ (2000) 1月号, pp.12-18  
(学位論文)
- [59] 間明 宏充: The cosmological redshift-space distortion on two-point statistics of high-z objects (博士論文)
- [60] 郡 和範: Hadron Injection in the Early Universe and Big Bang Nucleosynthesis (博士論文)
- [61] 田中 冬彦: 初期宇宙における重力的粒子生成 (修士論文)
- [62] 渡邊 元太郎: Thermodynamics properties of nuclear "Pasta" in super dense matter. (超高密度物質における核物質パスタの熱力学的性質) (修士論文)  
(著書)
- [63] 金澤敏幸 (共著), 天文学が分かる (アエラムック, 朝日新聞社, 1999)
- [64] 佐藤勝彦: 「アインシュタインとボーア」 11章 量子論と宇宙創生 (分担執筆)、日本物理学会編、裳華房、1999年10月
- [65] 佐藤勝彦: 「宇宙天体論」、1章 インフレーション宇宙 (分担執筆)、学習研究社、1999年5月
- [66] 佐藤勝彦: 「天文学がわかる」 若者が宇宙創世の謎を解く (分担執筆)、朝日新聞社、1999年7月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [67] Takeshi Chiba: Quintessence, the Gravitational Constant, and Gravity, The 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", Tokyo(1999年11月).
- [68] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Scaling of axionic strings and relic axion density, in the 4th RESCEU International Symposium on the Birth and Evolution of the Universe (Tokyo, Nov, 1999).
- [69] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Global string evolution and axion emission, in the 7th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS99) (Lake Tahoe, Dec, 1999).
- [70] H. Ochiai and K. Sato: An Approach to Quantum Creation of the Multidimensional Universe, RESCEU Symposium(Tokyo)
- [71] Tatsushi Suginoara: Density Profile of Intracluster Gas: Effect of Supernova Heating, 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", Tokyo (1999年11月)
- [72] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts, in the 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", (Tokyo, Nov. 1999)
- [73] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts, "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000", (Tokyo, Jan. 2000)

## 招待講演

- [74] Mino Yasushi: Radiation Reaction Force on a Compact Body Spiraling into a Supermassive Black Hole, AMALDI CONFERENCE (1999年7月12日から16日、Caltech、US)
- [75] Yasushi Suto: Clustering statistics on a light-cone in the cosmological redshift space, the 4th RESCEU symposium, 東京大学山上会館 (1999年11月17日)
- [76] K. Sato: Quantum Creation of the Universe with Inner Space, Int. Nat. Symposium on Inner Space Outer Space II, Chicago (1999, June)
- [77] S. Yamada: Physics of Collapse-driven Supernovae, "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000" (Tokyo, Jan., 2000)

## (国内会議)

## 一般講演

- [78] 千葉 剛、杉山 直: Cosmic Microwave Probe of Gravity Theories, 日本物理学会、島根大学、1999年9月.
- [79] 千葉 剛: Phantom field, 第9回「一般相対論と重力」研究会、広島大学、1999年11月.
- [80] 山口昌英、浅賀岳彦、川崎雅裕: 超重力モデルにおけるニューインフレーションの初期値問題、日本物理学会1999年秋の分科会 (島根大学、1999年10月)
- [81] 山口昌英: グローバルストリングのスケーリング則とループ分布、日本天文学会1999年秋季年会 (九州大学、1999年10月)
- [82] 山口昌英、横山順一、川崎雅裕: Scaling of the global string network in the matter dominated universe、第9回「一般相対論と重力」研究会 (広島大学、1999年11月)
- [83] 山口昌英、横山順一、川崎雅裕: 物質優勢時代におけるグローバルストリングの進化、日本物理学会2000年春の分科会 (近畿大学、2000年3月)
- [84] 金澤敏幸、川崎雅裕、杉山直、柳田勉: ダブル・インフレーションにおける密度揺らぎ、日本物理学会1999年秋の分科会 (島根大学、1999年9月)
- [85] 落合洋敬、佐藤勝彦: 多次元宇宙の量子論的創生へのアプローチ、日本物理学会 秋の分科会、島根大学、9月
- [86] 清水 守、北山 哲、佐々木 伸、須藤 靖: QSO 光度関数の時間進化と高赤方偏移での観測可能性、日本天文学会、九州大学、1999年10月.
- [87] 杉之原立史: 銀河群のX線光度に対する超新星爆発による加熱の効果、日本天文学会 2000年春季年会 (東京大、2000年4月)
- [88] 佐藤勝彦: 素粒子物理と宇宙の創成、高エネルギー加速器機構公開講座、筑波、1999年11月
- [89] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の物質混合に対する効果、日本天文学会春季年会 (九州大、1999年10月)

- [90] 渡辺 元太郎、飯田 圭、佐藤 勝彦: 中性子星内殻における核物質 "パスタ" の熱力学的性質、日本物理学会 2000年春の分科会 (近畿大学、2000年3月)

## 招待講演

- [91] 千葉 剛: "Horizons" of General Relativity, 第29回天文天体物理若手の会夏の学校 招待講演 (1999年7月27日)
- [92] 須藤 靖: 多波長での銀河団の統計と宇宙論、第12回 理論天文学懇談会シンポジウム、於 国立天文台 (1999年12月21日)
- [93] 須藤 靖: 宇宙論パラメータとサーベイ観測、第6回 東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、(2000年2月21日)
- [94] 須藤 靖: 観測的宇宙論の問題点、京都大学基礎物理学研究所 短期研究会 "観測的宇宙論における諸問題" (2000年3月15日)
- [95] 須藤 靖: 宇宙論の来し方行く末、日本天文学会 特別講演 於 東京大学理学部 (2000年4月5日)
- [96] 佐藤勝彦: 宇宙論の新展開と核物理、日本物理学会春の分科会、近畿大学、2000年3月
- [97] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と宇宙の未来、日本物理学会、応用物理学会名古屋支部例会、名古屋、2000年1月
- [98] 山田 章一: 重力崩壊型超新星爆発の物理、日本物理学会年会理論核物理、実験核物理合同シンポジウム「天体核物理の成果と展望」 (近畿大学、2000年3月30日)

## (セミナー)

- [99] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Background Neutrinos, Theoretical Astrophysics Center, Copenhagen University, August, 1999.
- [100] 佐藤勝彦: 宇宙は第2のインフレーションを始めたのか? 、東京大学物理学教室談話会、1999年7月
- [101] 佐藤勝彦: 宇宙定数と宇宙論、九州大学物理学教室談話会、2000年3月
- [102] 佐藤勝彦: 宇宙の創生、東京女子大学数理系談話会、2000年1月
- [103] 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、東京大学、天文学教室談話会 (1999年7月13日)
- [104] 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、理化学研究所、原子核セミナー (1999年7月26日)

## 2 銀河進化理論

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

「初期宇宙で形成された天体がどのような化学的力学的進化を遂げてきたのか?」をシミュレーションによって追跡することにより、「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 最初の星の進化

現在、宇宙に存在している炭素より重い元素はそのほとんどが星の中で起こる核融合反応によって合成されたと考えられている。従って、宇宙初期に生まれた星はほとんど重元素を含まないガスからできていたはずである。このような重元素量が非常に少ない物質からできている大質量星の進化モデルを色々な質量の星について計算し、超新星爆発を起すときにどのような元素を放出するのかを系統的に計算した。この結果は古い星の表面の重元素組成が何を物語っているかを解く際の重要な要素になる。[27], [72], [74], [75], [86], [88], [89], [90]

### 2.2 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。

ハローの星については、観測された鉄族の元素組成比には顕著な特徴が見られた。それぞれの元素が星の中のどの層で合成されるかを詳しく調べた結果、観測結果と超新星爆発モデルとの比較から、爆発した後に残る中性子星あるいはブラックホールの質量を推定できることを示した。[20], [23], [55], [56], [71], [72], [73]

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  $25 M_{\odot}$  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。[2], [3], [34], [35], [36], [37], [38]

## 2.3 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採り入れた、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。[21], [57], [58], [59]

## 2.4 銀河団中や早期型銀河周囲の高温ガスとそこに含まれる重元素の起源

銀河内の星で合成・放出された重元素がどのような過程でいつ銀河団中や早期型銀河周囲に存在する高温ガスに取り込まれていくのかを数値シミュレーションによって計算し、その結果を X 線天文衛星の観測による重元素量、化学組成比と比較し、星に取り込まれる重元素量と高温ガスに取り込まれる重元素量の関係を調べる。同時に早期型銀河の星間ガスを高温に保つ物理的過程について、銀河団中のガスからの熱伝導を取り上げ、その安定性について調べている。[1]

## 2.5 極超新星

1998年4月25日に起きた  $\gamma$  線バーストの Afterglow を観測した際に発見された超新星 SN 1998bw は平均的な超新星よりも10倍ほど明るいことがわかった。また、その初期スペクトルにみられた特徴は爆発物質が通常の超新星物質よりも高速で膨張していることを示していた。また、この極超新星のスペクトルには水素やヘリウムの線が見られなかった。これら観測された光度曲線とスペクトルの特徴を再現するモデルを数値計算によって求めたところ、水素とヘリウムの外層を失ったもともと質量が  $40 M_{\odot}$

の星が爆発したものと推測された。爆発エネルギーは球対称を仮定したモデルからはおよそ  $6 \times 10^{51}$  erg と見積もられたが、その後の光度曲線の振る舞いから、この超新星はかなり非球対称であることが示唆され、爆発エネルギーも当初の見積もりより小さい可能性がある。今後も多次元数値流体計算を駆使してこの極超新星の正体を探究する。[19], [49], [52], [53], [54], [62], [63], [64], [65]

他にも、通常の超新星より明るい超新星である SN 1997ef や SN 1997cy について観測されたスペクトルおよび光度曲線を再現する数値モデルを構築した。SN 1997ef は SN 1998bw と似た特徴を示している。一方、SN 1997cy は星周物質と爆発物質の衝突によって明るく輝いていると考えられ、爆発のエネルギーは  $\sim 5 \times 10^{52}$  erg にも上ることを示した。[13], [22], [24], [52], [53], [54], [63], [64], [65], [92], [96]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Saito, R., Shigeyama, T. 1999, "A Possible Model of Persistent X-ray Luminous Gas Around the Giant Elliptical Galaxy M87," *The Astrophysical Journal*, 519, 48-54.
- [2] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y. 1999, "Chemical Evolution of the Galactic Halo through Supernova-induced Star Formation and Its Implication for Population III Stars," *The Astrophysical Journal*, 519, L63-L67.
- [3] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y. 2000, "Probing the Site for r-Process Nucleosynthesis with Abundances of Barium and Magnesium in Extremely Metal-poor Stars," *The Astrophysical Journal*, 531, L33-L36.
- [4] Blinnikov, S., Lundqvist, P., Bartunov, O., Nomoto, K., Iwamoto, K., 2000, "Radiation hydrodynamics of SN1987A: I. Global analysis of the light curve for the first 4 months," *The Astrophysical Journal*, 532, 1132-1149.
- [5] Brachwitz, F., Dean, D.J., Hix, W.R., Iwamoto, K., Langanke, K., Martinez-Pinedo, G., Nomoto, K., Strayer, M.R., Thielemann, F.-K., Umeda, H., 2000, "The Role of Electron Capture in Chandrasekhar Mass Models for Type Ia Supernovae," *The Astrophysical Journal*, 536, in press (astro-ph/0001464).
- [6] Chiappini, C., Matteucci, F., Beers, T. C., Nomoto, K., 1999, "The Earliest Phases of Galaxy Evolution," *The Astrophysical Journal*, 515, 226-238.
- [7] Hachisu, I., Kato, M., Kato, T., Matumoto, T., Nomoto, K., 2000, "A Model for the Quiescent Phase of the Recurrent Nova U Scorpii," *The Astrophysical Journal*, in press (astro-ph/0003322).
- [8] Hachisu, I., Kato, M., Nomoto, K., 1999, "A Wide Symbiotic Channel of Type Ia Supernovae," *The Astrophysical Journal*, 522, 487-503.

- [9] Hachisu, I., Kato, M., Nomoto, K., Umeda, H., 1999, “A New Evolutionary Path to Type Ia Supernovae: Reexamination of Luminous Supersoft X-Ray Sources,” *The Astrophysical Journal*, 519, 314-323.
- [10] Höflich, P., Nomoto, K., Umeda, H., Wheeler, J. C., 2000, “Influence of the Stellar Population on Type Ia Supernovae: Consequence for the Determination of Omega,” *The Astrophysical Journal*, 528, 590-596.
- [11] Itoh, M., Asai, K., Uno, S., Inoue, H., Nomoto, K., Suzuki, T., Masai, K., Marshall, F., Kumagai, S., Tanaka, Y., 1999, “X-ray Light Curve of SN1987A Observed with ASCA,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 333.
- [12] Iwamoto, K., Brachwitz, F., Nomoto, K., Kishimoto, N., Umeda, H., Hix, W. R., Thielemann, F.-K., 1999, “Nucleosynthesis in Chandrasekhar Mass Models for Type Ia Supernovae and Constraints on Progenitor Systems and Burning Front Propagation,” *The Astrophysical Journal Supplement*, 125, 439-462.
- [13] Iwamoto, K., Nakamura, T., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Danziger, I. J., Garnavich, P., Kirshner, R., Jha, A., Balam, D., Thorstensen, J., 2000, “The Peculiar Type Ic Supernova 1997ef: Another Hypernova,” *The Astrophysical Journal*, 534, in press (astro-ph/9807060).
- [14] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 1999, “Cosmic Supernova Rates in Cluster vs. Field Galaxies,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 334.
- [15] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 2000, “The History of the Cosmic Supernova Rate Derived from the Evolution of the Host Galaxies,” *The Astrophysical Journal*, 539, in press (astro-ph/9908005).
- [16] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 1999, “Models of Type Ia Supernovae,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 336.
- [17] Kumagai, S., Nomoto, K., 1999, “Line Gamma-Ray Emissions from Supernovae and Supernova Remnants,” *Astrophysical Letters and Communications*, 38, 429-433.
- [18] Mori, M., Yoshii, Y., Nomoto, K., 1999, “Dissipative Process as a Mechanism of Differentiating Internal Structures between Dwarf and Normal Elliptical Galaxies in a CDM Universe,” *The Astrophysical Journal*, 511, 585-594.
- [19] Nakamura, T., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Iwamoto, K., Umeda, H., 1999, “A ‘Hypernova’ Model for the Supernova 1998bw Possibly Associated with GRB980425,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 363.
- [20] Nakamura, T., Umeda, H., Nomoto, K., Thielemann, F.-K., Burrows, A., 1999, “Nucleosynthesis in Type II Supernovae and the Abundances in Metal-Poor Stars,” *The Astrophysical Journal*, 517, 193-208.
- [21] Nakasato, N., Mori, M., Nomoto, K., 2000, “Numerical Simulations of Globular Cluster Formation,” *The Astrophysical Journal*, 536, in press (astro-ph/0001333).
- [22] Nomoto, K., Iwamoto, K., Mazzali, P. A., Nakamura, T., 1999, “A Hypernova Model for the Peculiar Type Ic Supernova 1997ef,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 265-268.
- [23] Nomoto, K., Nakamura, T., Kobayashi, C., 1999, “Supernova Nucleosynthesis, Chemical Evolution, and Cosmic Supernova Rate,” *Astrophysics and Space Science*, 265, 37-47.
- [24] Turatto, M., Suzuki, T., Mazzali, P. A., Benetti, S., Cappellaro, E., Danziger, I. J., Nomoto, K., Nakamura, T., Young, T. R., Patat, F., 2000, “The Properties of Supernova 1997cy Associated to GRB970514,” *The Astrophysical Journal*, in press (astro-ph/9910324).
- [25] Umeda, H., Nomoto, K., Kobayashi, C., Hachisu, I., Kato, M., 1999, “The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae and Environmental Effects,” *The Astrophysical Journal*, 522, L43-L47.
- [26] Umeda, H., Nomoto, K., Tsuruta, S., Mineshige, S., 2000, “Impacts of the Detection of Cassiopeia A Point Source,” *The Astrophysical Journal*, 534, L193-L196.
- [27] Umeda, H., Nomoto, K., Yamaoka, H., Wanajo, S., 1999, “Evolution of 3-9  $M_{\odot}$  Stars for  $Z=0.001-0.03$  and Metallicity Effects on Type Ia Supernovae,” *The Astrophysical Journal*, 513, 861-868.
- [28] Wanajo, S., Hashimoto, M., Nomoto, K., 1999, “Nucleosynthesis in ONeMg Novae: Models vs. Observations to Constrain the Masses of ONeMg White Dwarfs and Their Envelopes,” *The Astrophysical Journal*, 523, 409-431.
- [29] Young, T. R., Shigeyama, T., Suzuki, T., 1999, “Binary Supernovae: A Theoretical Study of Double Explosions,” *Astronomische Nachrichten*, 320, 345.
- [30] Wanajo, S., Hashimoto, M., Nomoto, K., 1999, “Nucleosynthesis in ONeMg Novae: Models vs. Observations to Constrain the Masses of ONeMg White Dwarfs and Their Envelopes,” *The Astrophysical Journal*, 523, 409-431.
- [31] Ideta, M., Hozumi, S., Tsuchiya, T., & Takizawa M. 2000, “Time Evolution of Galactic Warps in Prolate Haloes,” *MNRAS*, 311, 733.
- [32] Takizawa M. 2000, “Off-Center Mergers of Clusters of Galaxies and Nonequipartition of Electrons and Ions in Intracluster Medium,” *The Astrophysical Journal*, 532, 183-192.
- [33] Takizawa M., & Naito, T. 2000, “Non-Thermal Emission from Relativistic Electrons in Clusters of Galaxies: A Merger Shock Acceleration Model,” *The Astrophysical Journal*, 535, 586-592

(会議抄録)

- [34] Shigeyama, T., Tsujimoto, T., Nakamura, T., “What extremely metal-poor stars tell about nucleosynthesis in supernovae,” 2000, in the 35th Liège International Astrophysics Colloquium, 43–49.
- [35] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y., “A New Model for Chemical Evolution of the Galactic Halo,” 2000, in the 35th Liège International Astrophysics Colloquium, 51–57.
- [36] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., “A New Model for Chemical Evolution of the Galactic Halo: Formulation and Applications,” 2000, in *First Stars*, eds. A. Weiss, T. Abel, V. Hill, (Springer; Berlin), 181–182.
- [37] Shigeyama, T., Tsujimoto, T., “A New Model for Chemical Evolution in the Galactic Halo: First Stars with Heavy Elements,” 2000, in *First Stars*, eds. A. Weiss, T. Abel, V. Hill, (Springer; Berlin), 183–184.
- [38] Shigeyama, T., Tsujimoto, T., “Inhomogeneous chemical evolution in the Galactic halo: Supernova-induced formation of field stars and globular clusters,” 2000, in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, in press.
- [39] Iwamoto, K., Mazzali, P. A., Nomoto, K., 1999, “Supernovae and Gamma-Ray Bursts: SN1998bw and GRB980425” in *Japanese-German Symposium on High Energy Astrophysics*, ed. W. Becker, M. Itoh (Garching: MPE), 123-127.
- [40] Kobayashi, C., Nomoto, K., Tsujimoto, T., Hachisu, I., Kato, M., 2000, “Metallicity Effects on Type Ia Supernovae and Cosmic Supernova Rates in Cluster vs. Field Galaxies,” *Memorie della Società Astronomica Italiana*, in press.
- [41] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 1999, “Galactic and Cosmic Supernova Rates and Metallicity Effects on Type Ia Supernovae” in *Nuclei in the Cosmos V*, ed. N. Prantzos, S. Harrisopulos (Paris: Editions Frontieres), 543-547.
- [42] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 1999, “Galactic and Cosmic Supernova Rates and Metallicity Effects on Type Ia Supernovae” in *Subaru Telescope Conference Series Volume 1, Workshop on Subaru HDS: Decipherment of Cosmic History with Spectroscopy* (Tokyo: NAOJ), 37-43.
- [43] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 2000, “Metallicity Effects on Type Ia Supernovae and Galactic and Cosmic Chemical Evolution” in *The Chemical Evolution of the Milky Way: Stars versus Cluster*, ed. S. Fabrizio, F. Matteucci (Dordrecht: Kluwer), in press.
- [44] Kozasa, T., Nomoto, K., 2000, “Dust Formation in Supernovae” in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [45] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 2000, “Line Gamma-Ray Emissions from Supernovae and Supernova Remnants,” *Advances in Space Research*, 25. 5: 699-702.
- [46] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 2000, “Radioactive Nuclei form Type Ia Supernovae” in *Proceedings of 19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology*, ed. E. Aubourg, T. Montmerle, J. Paul, in press.
- [47] Maeda, K., Nakamura, T., Nomoto, K., Hachisu, I., 2000, “Nucleosynthesis in Gamma-Ray Bursts and Abundances in Black Hole Binaries” in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, ed. Kubono, S., Kajino, T. (Singapore: World Scientific), in press.
- [48] Mazzali, P. A., Cappellaro, E., Turatto, M., Benetti, S., Patat, F., Danziger, I. J., Nomoto, K., Young, T. R., Iwamoto, K., 2000, “Inhomogeneity of SNTypes: Results, Implications, and Future Prospects,” *Memorie della Società Astronomica Italiana*, in press.
- [49] Mazzali, P. A., Nakamura, T., Nomoto, K., Iwamoto, K., Danziger, I. J., Patat, F., 1999, “Evidence for asymmetry in the hypernova SN1998bw associated with GRB980425” in *The New Era of Gamma-Ray Burst Observation Opened by HETE* (Tokyo: RIKEN), in press.
- [50] Mori, M., Yoshii, Y., Nomoto, K., 1999, “Origin of the Structure Difference between Elliptical Galaxies and Dwarf Elliptical Galaxies” in *Numerical Astrophysics*, ed. S. M. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Dordrecht: Kluwer), 69-70.
- [51] Mori, M., Yoshii, Y., Yahagi, H., Nomoto, K., 2000, “The Formation and Evolution of Dwarf Galaxies” in *IAU Symp. 187, Cosmic Chemical Evolution*, ed. J. W. Truran, K. Nomoto (Dordrecht: Kluwer), in press.
- [52] Nakamura, T., Maeda, K., Iwamoto, K., Suzuki, T., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Turatto, M., Danziger, I. J., Patat, F., 2000, “Hypernovae: SNe 1997ef, 1998bw, and 1997cy,” in *IAU Colloq. 195, Highly Energetic Physical Processes and Mechanisms for Emissions from Astrophysical Plasmas*, ed. P. C. H. Martens, S. Tsuruta, M. A. Weber (PASP), 347-357.
- [53] Nakamura, T., Nomoto, K., Iwamoto, K., Umeda, H., Mazzali, P. A., Danziger, I. J., 2000, “Hypernova Models for SN1998bw & SN1997ef: Nucleosynthesis, Light Curves, and Spectra,” *Memorie della Società Astronomica Italiana*, in press.
- [54] Nakamura, T., Nomoto, K., Iwamoto, K., Mazzali, P. A., 1999, “Hypernova models for SN1998bw and SN1997ef” in *Japanese-German Symposium on High Energy Astrophysics*, ed. W. Becker, M. Itoh (Garching: MPE), 165-173.

- [55] Nakamura, T., Umeda, H., Nomoto, K., Thielemann, F.-K., 1999, “Nucleosynthesis in Type II Supernovae and Abundance Trends of Iron-Peak Elements in Metal-Poor Stars” in *Numerical Astrophysics*, ed. S. M. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Dordrecht: Kluwer), 283-284.
- [56] Nakamura, T., Umeda, H., Nomoto, K., Thielemann, F.-K., Burrows, A., 1999, “[Cr,Mn,Co/Fe] in Very Metal-Poor Stars and Nucleosynthesis in Type II Supernovae” in *Subaru Telescope Conference Series Volume 1, Workshop on Subaru HDS: Decipherment of Cosmic History with Spectroscopy* (Tokyo: NAOJ), 87-98.
- [57] Nakasato, N., Mori, M., Nomoto, K., 2000, “Numerical Simulations of Formation of Globular Cluster” in *IAU Symp. 187, Cosmic Chemical Evolution*, ed. J. W. Truran, K. Nomoto (Dordrecht: Kluwer), in press.
- [58] Nakasato, N., Nomoto, K., 1999, “Numerical Simulations of Formation of Disk Galaxies” in *A.S.P. Conf. Ser. Vol. 182, Galaxy Dynamics, A Rutgers Symposium*, ed. D. Merritt, J. A. Sellwood, M. Valluri (San Francisco: ASP), 547-548.
- [59] Nakasato, N., Yahagi, H., Mori, M., 1999, “Parallel Particle Simulations” in *Numerical Astrophysics*, ed. S. M. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Dordrecht: Kluwer), 395-396.
- [60] Nomoto, K., Blinnikov, S. I., Iwamoto, K., 2000, “Modeling the Light Curve of SN1987A” in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [61] Nomoto, K., Kobayashi, C., Umeda, H., 2000, “Type Ia Supernovae and Chemical Evolution of Galaxies” in *IAU Symp. 187, Cosmic Chemical Evolution*, ed. J. W. Truran, K. Nomoto (Dordrecht: Kluwer), in press.
- [62] Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T., Iwamoto, K., Mazzali, P. A., Danziger, I. J., Patat, F., 1999, “Hypernovae and Their Nucleosynthesis” in *Subaru HDS Workshop on Stars and Galaxies: Decipherment of Cosmic History with Spectroscopy*, ed. Takada-Hidai, M., Ando, H. (Tokyo: NAOJ), 218-230.
- [63] Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T., Iwamoto, K., Suzuki, T., Mazzali, P. A., Turatto, M., Danziger, I. J., and Patat, F., 2000, “Properties of Hypernovae: SNe 1997ef, 1998bw, and 1997cy” in *Gamma Ray Bursts*, ed. Kippen, R. M., Mallozzi, R. S., Fishman, G. J. (New York: American Institute of Physics), in press.
- [64] Nomoto, K., Mazzali, P. A., Nakamura, T., Iwamoto, K., Maeda, K., Suzuki, T., Turatto, M., Danziger, I. J., Patat, F., 2000, “The Properties of Hypernovae: SNe Ic 1998bw, 1997ef, and SNIIn 1997cy” in *Supernovae and Gamma Ray Bursts*, ed. Livio, M. et al. (New York: Cambridge University Press), in press.
- [65] Nomoto, K., Nakamura, T., Iwamoto, K., Umeda, H., Mazzali, P. A., 1999, “Hypernova models for SN1998bw/GRB980425 and SN1997ef,” in *Nuclei in the Cosmos V*, ed. N. Prantzos, S. Harrissopoulos (Paris: Editions Frontieres), 252-258.
- [66] Nomoto, K., Umeda, H., Hachisu, I., Kato, M., Kobayashi, C., Tsujimoto, T., 2000, “Type Ia Supernova Progenitors, Environmental Effects, and Cosmic Supernova Rates” in *Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology*, ed. J. Truran, J. Niemeyer (New York: Cambridge University Press), in press.
- [67] Nomoto, K., Umeda, H., Kobayashi, C., Hachisu, I., Kato, M., Tsujimoto, T., 2000, “Type Ia Supernovae: Progenitors and Evolution with Redshift” in *Cosmic Explosions*, ed. S. S. Holt, W. W. Zhang (New York: American Institute of Physics), in press.
- [68] Shigeyama, T., Nakamura, T., 2000, “A Constraint on the Explosion Energy of Self-Similar Supernovae” in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [69] Suzuki, T., Nomoto, K., 2000, “X-Ray Light Curve of SN1987A and Circumstellar Medium” in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [70] Thielemann, F.-K., Brachwitz, F., Iwamoto, K., Nomoto, K., Hashimoto, M., Hix, W. R., 1999, “Supernova Nucleosynthesis: Models vs. Observations” in *Chemical Evolution from Zero to High Redshift*, ed. J. Walsh, M. Rosa (Garching: ESO), 10-23.
- [71] Thielemann, F.-K., Freiburghaus, C., Rosswog, S., Nomoto, K., Nakamura, T., Umeda, H., Hashimoto, M., 2000, “Type II Supernova Nucleosynthesis and Early Galactic Evolution,” *Memorie della Società Astronomica Italiana*, in press.
- [72] Umeda, H., Nomoto, K., Nakamura, T., 2000, “Evolution and Nucleosynthesis of Metal-free Massive Stars” in *The First Stars*, ed. A. Weiss, T. Abel, V. Hill, (Heidelberg: Springer), 137-160.
- [73] Umeda, H., Nakamura, T., Nomoto, K., Thielemann, F.-K., Burrows, A., 1999, “Type II Supernova Nucleosynthesis and [Cr/Fe], [Mn/Fe], and [Co/Fe] Trends in Metal Poor Stars” in *Nuclei in the Cosmos V*, ed. N. Prantzos, S. Harrissopoulos (Paris: Editions Frontieres), 518-522.
- [74] Umeda, H., Nomoto, K., 2000, “Evolution and Nucleosynthesis of Massive Pop III Stars” in *The Birth and Evolution of the Universe*, ed. K. Sato, M. Kawasaki (Tokyo: Universal Academy Press), in press.
- [75] Umeda, H., Nomoto, K., 2000, “Nucleosynthesis in Massive Metal Free Stars” in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, ed. S. Kubono, T. Kajino (Singapore: World Scientific), in press.

- [76] Umeda, H., Nomoto, K., Tsuruta, S., Mineshige, S., 2000, "The Nature of the X-Ray Point Source in Cassiopeia A" in *Cosmic Explosions*, ed. S.S. Holt, W. W. Zhang (New York: American Institute of Physics), in press.
- [77] Umeda, H., 2000, "The Ejection of Relativistic Bullets from Supernovae and the Generation of Gamma-Ray Bursts," *The Astrophysical Journal*, 528, L89-L93.
- [78] Young, T. R., Shigeyama, T., Nomoto, K., 2000, "Adaptive Grid Applications: Shock Breakout and Propagation into the Circumstellar Medium" in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [79] Takizawa M., & Naito, T.: "Non-Thermal Emission from Clusters of Galaxies", 4th RESCUE International Symposium, in press,
- (国内雑誌)
- [80] 野本 憲一, 1999, "宇宙進化—華麗なる星の死, 超新星爆発," *AERA Mook 天文学がわかる*, pp. 38-39.
- [81] 野本 憲一, 1999, "天文学," *東大 99*, pp. 152-153.
- [82] 野本 憲一, 1999, "宇宙の大爆発: 極超新星とガンマ線バースト," *理学部広報*, 31 巻, 3 号, pp. 14-15.
- (学位論文)
- (著書)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [83] Shigeyama, T.: "What extremely metal-poor stars tell about nucleosynthesis in supernovae", the 35th Liège International Astrophysics Colloquium, (Liège, Belgium, July, 1999).
- [84] Shigeyama, T.: "A New Model for Chemical Evolution in the Galactic Halo: First Stars with Heavy Elements", *The First Stars*, the MPA/ESO workshop, (Garching, Germany, Aug., 1999).
- [85] Takizawa M.: "Non-Thermal Emission from Clusters of Galaxies", 4th RESCUE International Symposium, (Tokyo, Japan, Nov., 1999)
- [86] Umeda, H.: "Pre-supernova evolution of metal-free massive stars," *MPA/ESO Workshop, The First Stars*, Garching, Germany, 1999/08/04-06.
- [87] Umeda, H.: "The Nature of the X-Ray Point Source in Cassiopeia A," 10th Annual October Astrophysics Conference in Maryland, *Cosmic Explosions*, Maryland, USA, 1999/10/11-13.
- [88] Umeda, H.: "Evolution and Nucleosynthesis of Massive Pop III Stars," 4th RESCEU International Symposium on The Birth and Evolution of the Universe, Tokyo, Japan, 1999/11/16-19.
- [89] Umeda, H.: "Evolution and Nucleosynthesis in Massive Population III Stars," *Subaru HDS Workshop on Stars and Galaxies*, Tokyo, Japan, 1999/12/08-10.
- [90] Umeda, H.: "Nucleosynthesis in Massive Metal Free Stars," *International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, Tokyo, Japan, 2000/01/19-21.
- 招待講演
- [91] Shigeyama, T.: Inhomogeneous Chemical Evolution in the Galactic Halo, "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000" (Tokyo, Jan., 2000)
- [92] Nomoto, K.: "The Properties of Hypernovae: SNe Ic 1998bw, 1997ef, and SNIIn 1997cy," *The Space Telescope Science Institute 1999 May Symposium, The Largest Explosions since the Big Bang: Supernovae and Gamma Ray Bursts*, Baltimore, U.S.A., 1999/05/03-06.
- [93] Nomoto, K.: "The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae," *Aspen Center for Physics Workshop, Type Ia Supernovae*, Aspen, U.S.A., 1999/06/14-25.
- [94] Nomoto, K.: "Theory of abundance patterns in first generation massive stars," *MPA/ESO Workshop, The First Stars*, Garching, Germany, 1999/08/04-06.
- [95] Nomoto, K.: "Type Ia Supernovae: Progenitors," 10th Annual October Astrophysics Conference in Maryland, *Cosmic Explosions*, Maryland, U.S.A., 1999/10/11-13.
- [96] Nomoto, K.: "Properties of Hypernovae: SNe 1997ef, 1998bw, and 1997cy," 5th Huntsville Symposium on Gamma Ray Bursts, Huntsville, U.S.A., 1999/10/18-22.
- [97] Nomoto, K.: "The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae," 4th RESCEU International Symposium on The Birth and Evolution of the Universe, Tokyo, Japan, 1999/11/16-19.
- [98] Nomoto, K.: "Nucleosynthesis in Hypernovae," *Subaru HDS Workshop on Stars and Galaxies*, Tokyo, Japan, 1999/12/08-10.
- [99] Nomoto, K.: "Nucleosynthesis in Hypernovae," *International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, Tokyo, Japan, 2000/01/19-21.
- (国内会議)
- 一般講演
- [100] Paolo A. Mazzli: "Hypernova と GRB(観測と理論)-I," *理研シンポジウム『HETE がひらくガンマ線バースト観測新時代』*, 理化学研究所 (埼玉県和光市) 大河内記念ホール, 1999/06/07-09.

- [101] 野本憲一: “Hypernovae and GRBs,” 基研研究会「ガンマ線バースト」, 京都大学基礎物理学研究所, 1999/12/1-3.
- [102] 滝沢元和: Off-center mergers of clusters of galaxies, 日本天文学会秋季年会, (九州大学, 1999年10月)
- [103] 滝沢元和 & 内藤継也: “銀河団からの非熱的放射,” 第12回理論天文学懇談会シンポジウム, (三鷹国立天文台, 1999年12月)
- [104] 梅田秀之: “種族 III 大質量星の進化、超新星爆発、元素合成”, 日本天文学会秋季年会, (九州大学, 1999年10月)
- [105] 梅田秀之: “Relativistic Bullets Ejection from Supernovae and Generation of Gamma Ray Bursts,” 基研研究会「ガンマ線バースト」, 京都大学基礎物理学研究所, 1999/12/01-03.
- [106] 梅田秀之: “Ia 型超新星の進化や環境効果は宇宙定数の決定に影響するか?”, 観測的宇宙論における諸問題, 京都大学基礎物理学研究所, 2000/03/13-15.
- [107] 梅田秀之: “X 線衛星 Chandra の発見したカシオペア A の点光源は中性子星かブラックホールか?”, 日本天文学会春季年会, (東京大学, 2000年4月)

招待講演

(セミナー)

- [108] K. Nomoto: “Hypernovae and Gamma-Ray Bursts,” Colloquium talk at the University of Amsterdam, Netherland, 1999/08/19.
- [109] K. Nomoto: “The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae,” Colloquium talk at the Osservatorio di Padova, Italy, 2000/02/01.
- [110] K. Nomoto: “Type Ia Supernovae and Application in Cosmology,” Colloquium talk at SISSA, Trieste, Italy, 2000/02/03.

### 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)

クエーサーやセイファート銀河など中心核活動を示す天体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、赤外線最大光度の時間の遅れを測定することで、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た。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形口径2Mの自動望遠鏡を設置して、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、望遠鏡と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った。望遠鏡設置場所である米国ハワイ州マウイ島ハレアカラ観測所において、近年のドームに起因する星像の劣化に関する研究結果を可能な限り取り入れ、星像の劣化を最小限に抑え、観測適地の環境を最大限に生かして限界等級・測光精度の向上をはかるよう改修された望遠鏡設置ドーム内に、望遠鏡システムとしての組み上げが完了し、天体の光を導入する機能試験を終了した望遠鏡を運搬、設置した。さらに、天体の光を導入して絶対指向精度に関する機能試験を果たし、望遠鏡及びドームについて、本格的な観測のための様々な試験/調整をすすめている。

望遠鏡にとりつけられる観測装置のうち、活動銀河核のモニター観測を行なう多波長カメラについては、室内実験による光学系及び電気系の調整の結果ほぼ満足する性能を達成した。また、さらなる性能向上のため、ビームスプリッターおよびフィルタの再製作を行ない、交換した。これにより、可視波長域で2倍以上の効率の向上を果たすという成果を得た。また、効率のよい可視/赤外線の同時自動観測を実現するために、カメラ制御ソフトウェアの開発をすすめた。

遠隔自動観測に不可欠である、観測可能な天候を判断し、また悪天候から観測装置を守るための天候/雲量監視装置の開発を継続し、国立天文台/天文学教育研究センター三鷹キャンパスにおいて、雲量監視装置の試験観測を開始した。数分に1回の割合で、継続的に全天の雲分布画像を取得することに成功している。

観測所制御システムの開発については、これまでに開発してきた天体選択ソフトウェア、カメラ制御ソフトウェア、観測可能な天候を判断し、また悪天候から観測装置を守る雲量監視装置ソフトウェアなど各コンポーネントの統合/試験を始めた。これらの装

置によって観測可能性を判断するだけでなく、観測夜における条件の好悪もある程度判断できることがわかった。自動観測システムの中心となる実時間での観測天体の選択については、適切な判断基準を作成するために、ひきつづき観測のシミュレーションを行っている。

また、観測計画の準備としておよそ350個の活動銀河核について、宇宙科学研究所の1.3M望遠鏡にとりつけた赤外線カメラPICNICを用いた近赤外線撮像測光観測と東京大学天文学教育研究センター木曾観測所シュミット望遠鏡を用いた可視撮像測光観測を行った。得られた可視光から赤外線までの測定/スペクトルデータの解析によれば、これまで赤外線での活動銀河核の変光は比較的小さいと考えられていたが、我々の計画している高い測光精度では、赤外線でもほとんどの活動銀河核が変光することを確かめた。また、近赤外線での変光の性質が、活動銀河核の電波強度によって異なる可能性があることを見出した。

#### 3.1 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。11年度に観測開始予定であったが、カメラ完成が遅れ、実際の観測を始めることはできていない。また、重力レンズ解析を行うためには、多数のイメージの楕円率を測定しなければならず、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せ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、観測データを得ることができたため、重力レンズの解析はこちらを用いて開始した。立ち上げ時期であったため、質のよいデータはかぞえるほどしかないが、A851という赤方偏移が0.41の銀河団のR-bandのデータは、1時間積分で星像サイズが0.42秒角という非常に優れたデータを取得することができた。このデータに重力レンズ解析を行い、銀河団中心にひとつ、そこから約1分角離れたところにもうひとつの重力集中を検出できた。この銀河団の質量構造は静水圧平衡などの単純なモデルでは表せないことが明らかになった。この質量分布はROSAT-HRIが取得したX線強度分布と酷似しており、これは我々のデータ解析の正しさを裏付けている。

## 3.2 ハッブルディープフィールド (HDF) における銀河計数の解析

HDF は現在のところ最遠方の銀河の姿を我々に提供している。この HDF における銀河計数及び赤方偏移分布に対する包括的かつ系統的な解析を行った。特に、宇宙論的に銀河の表面輝度が赤方偏移の増加とともに急激に暗くなる効果を初めて考慮に入れ、その結果、以前までの研究とは異なる結果を得た。宇宙モデルと銀河の数密度進化の縮退が解かれ、数密度進化を考慮にいれても宇宙項入りの宇宙モデルが最も観測を良く説明することが示された。

## 3.3 銀河系の金属欠乏星の動力学

銀河系ハローに存在する金属欠乏星の運動は、銀河系が形成された時期の動的物理状態を明らかにする上で大変重要である。この目的のために、我々は2100個もの金属欠乏星に関する最新の恒星データ(位置、離、金属量、視線速度)を網羅した新しい恒星カタログを作成した。特筆すべきこととして、その半数以上の恒星に関してヒッパルコス衛星や最新の地上観測に基づく高精度固有運動データを揃えることが可能となり、質、量ともに他に類を見ないものである。このようなカタログに基づいて、銀河系形成に関する新たな側面が明らかにされる。

## 3.4 原始リチウム組成の高精度決定と宇宙の総バリオン量

我々の銀河における様々な元素の進化を解析する手法として、銀河化学進化モデルと言われる一種の理論モデルが使われている。このモデルは銀河を一樣な空間で満たされた一つの箱(元素組成がどこも同じ)という仮定をしているが、この仮定は初期銀河系における元素進化の解析においては成り立たないことが観測的に支持されている。すなわち超新星爆発等による重元素汚染の効果が、銀河全体に行き渡るには時間がかかるため、より小さいローカルなスケールにおいて重元素汚染の効果を考えなくてはならないのである。そのようなローカルな環境の効果を考慮し、重元素(炭素より重い元素)の進化を取り扱う非一樣化学進化モデルが辻本らにより提唱されたが、主に宇宙線の原子核反応により生成される軽元素(ここではリチウム、ベリリウム、ボロン)進化モデルは未だ存在しなかった。そこで我々は宇宙線の理論モデルを非一樣化学進化モデルと整合性良く作ることで、非一樣な初期銀河系での軽元素の進化のモデルを構築した。我々のモデルの最も重

要な結果は、非常に古い星の軽元素の組成量は重元素に比べ時間との対応関係が良く、それ故、星の年齢決定に使用できると言うものである。また我々のモデルにより、ビッグバンで生成されたりチウム量がこれまでよりも精密に決定することが可能になり、宇宙に存在するバリオンの量に対してもより強い制限を与えることが可能となった。

## 3.5 適合格子分割を用いた宇宙論的数値計算コードの開発

我々は複数の銀河形成過程を数値的に再現するための数値計算コードの開発をしている。昨年度開発した動的適合格子分割(DAMR)を用いた自己重力多体系計算コードに引き続き、今年度はDAMRを用いた自己重力流体計算コードを開発し、自己重力多体系計算コードと統合した。DAMRとは最初は等間隔に離散化されたシミュレーション領域を、系が時間発展するにつれ局所的に物質が集まった場合に、そのような領域の格子を動的に再帰的に細分することによって数値計算のダイナミックレンジを上げる方法である。今後はこのコードを用いて銀河の形成過程を銀河の環境まで含めて解明していく。

## 3.6 銀河初期の化学進化と $r$ 過程元素の起源の解明

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た。このモデルによって、ハローで観測されている星の重元素量頻度分布と同時に、星々間に存在する重元素量比の分散を矛盾なく再現することを示し、従来の化学進化モデルでは説明することのできなかつたハロー星の化学組成の非均一性に初めて理論的解釈を与えることに成功した。さらに、我々の提唱するシナリオにおいて、 $r$  過程元素が  $20M_{\odot}$  以下の星では合成されないと仮定すると、 $r$  過程元素の重元素組成パターンが矛盾なく再現できることを示し、 $r$  過程元素の起源に新たな知見を与えた。

### <報文>

(原著論文)

- [1] Yahagi, H., Mori, M., and Yoshii, Y. :The Forest Method as a New Parallel Tree Method with the Sectional Voronoi Tessellation; The Astrophysical Journal Supplement Series, **124**, 1-9 (1999).
- [2] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y. :Probing the Site for R-Process Nucleosynthesis

- with Abundances of Barium and Magnesium in Extremely Metal-poor Stars; *The Astrophysical Journal*, **531**, L33-L36 (2000).
- [3] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Chemical Evolution of the Galactic Halo through Supernova-induced Star Formation and Its Implication for Population III Stars; *The Astrophysical Journal*, **519**, L63-L67 (1999).
- [4] Suzuki, T. K., Yoshii, Y., and Kajino, T.: Evolution of Beryllium and Boron in the Inhomogeneous Early Galaxy; *The Astrophysical Journal*, **522**, L125-L128 (1999).
- [5] Suzuki T. K., Yoshii, Y., and Beers, T. C.: Primordial Lithium Abundance as a Stringent Constraint on the Baryonic Content of the Universe; *The Astrophysical Journal*, **540**, 99-103 (2000).
- [6] Totani, T., and Yoshii, Y.: Unavoidable Selection Effects in the Analysis of Faint Galaxies in the Hubble Deep Field: Probing the Cosmology and Merger History of Galaxies; *The Astrophysical Journal*, **540**, 81-98 (2000).
- [7] Beers, T.C., Chiba, M. Yoshii, Y., Platais, I., Hanson, R.B., Fuchs, B., and Rossi, S.: Kinematics of Metal-Poor Stars in the Galaxy. II. Proper Motions for a Large Non-Kinematically Selected Sample; *The Astronomical Journal*, **119**, 2866-2881 (2000).
- [8] Mori, M., Yoshii, Y., and Nomoto, K.: Dissipative Process as a Mechanism of Differentiating Internal Structures between Dwarf and Normal Elliptical Galaxies in a Cold Dark Matter Universe; *The Astrophysical Journal*, **511**, 585-594 (1999).
- (会議抄録)
- [9] Yoshii, Y.: Theoretical Modeling of Early Evolution of Galaxies; in the Proc. of "Galaxies in the Young Universe", ed. H. Hippelein, (2000).
- (国内雑誌)
- [10] 吉井 謙: 100 億光年彼方の宇宙像、冷凍第 74 巻 第 862 号 (1999)、pp715-724
- (学位論文)
- [11] 塩谷 圭吾: (博士論文) 近赤外域における活動銀河核の変光、総合研究大学院大学数物科学研究科天文科学専攻
- [12] 富田 浩行: (修士論文) マグナムプロジェクトのための可視赤外多波長撮像測光器の開発、東京大学大学院理学系研究科
- (著書)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Chemical Evolution of the Galactic Halo through Supernova-induced Star Formation, in the 35th Liege International Astrophysics Colloquium, (Belgium, July 1999) .
- [14] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: A New Model for Chemical Evolution of the Galactic Halo: formulation and applications, The MPA/ESO conference "The First Stars", (Germany, August 1999).
- [15] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Inhomogeneous Chemical Evolution of the Galactic Halo, The Chemical Evolution of the Milky Way: Stars vs Clusters, (Italy, Sep. 1999).
- [16] Suzuki, T.K., Yoshii, Y., and Kajino, T.: Evolution of Light Elements in the Inhomogeneous Early Galaxy, IAU Symposium 198 (Light Elements and Their Evolution), (Brazil, Nov. 1999).
- [17] Suzuki, T.K., Yoshii, Y., Kawanomoto, S., Kajino, T. and Ando, H.: A New Model of Evolution of Light Elements in Galactic Halo, Subaru HDS Workshop on Stars and Galaxies, (Tokyo, Dec. 1999).
- [18] Suzuki, T.K., Yoshii, Y., Kawanomoto, S., Kajino, T. and Ando, H.: New Determination Method of Primordial Li7 abundance, Subaru HDS Workshop on Stars and Galaxies, (Tokyo, Dec. 1999).
- [19] Suzuki, T.K., Yoshii, Y., Kajino T., & Beers, T.C.: A New Model of Evolution of Light Elements in Inhomogeneous Galactic Halo, International Conference of "Origin of Matter and Evolution of Galaxy 2000" (Tokyo, Jan. 2000).
- [20] 矢作 日出樹, 吉井 謙: Cosmological Hydrodynamics code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement, The 4th RESCEU International Symposium "The Birth and Evolution of the Universe", (Tokyo, Nov, 1999).
- 招待講演
- [21] Beers, T.C., Yoshii, Y. and Suzuki, T.K.: The light elements Be and B as stellar chronometers in the early galaxy, IAU Symposium 198 (Light Elements and Their Evolution) (Brazil, Nov. 1999).
- [22] Yoshii, Y.: Theoretical Modeling of Early Evolution of Galaxies, Galaxies in the Young Universe, (Germany, Aug. 1999).
- (国内会議)
- 一般講演
- [23] 戸谷 友則 (国立天文台), 吉井 謙: ハッブルディープフィールドにおける銀河計数の解析、日本天文学会 1999 年秋季年会 (九州大学、1999 年 10 月) .

- [24] 千葉 柁司 (国立天文台), Beers, T.C. (Michigan State U.), 吉井 讓, Platais, I. (Yale U.), Hanson, R.B. (Lick Obs.), Fuchs, B. (Rechen-I. Heidelberg): 銀河系の形成と進化 I. 新しい金属欠乏星カタログの完成と解析、日本天文学会 1999 年秋季年会 (九州大学、1999 年 10 月) .
- [25] 鈴木 健, 吉井 讓, 梶野 敏貴 (国立天文台): 非一様初期銀河系でのベリリウム、ボロンの進化、日本天文学会 1999 年秋季年会 (九州大学、1999 年 10 月) .
- [26] 岩室 史英, 舞原 俊憲, 本原 顕太郎, 寺田 宏, 後藤 美和, 岩井 淳一, 田辺 裕久, 田口 智之, 秦 隆志, 大家 真, 吉井 讓, 戸谷 友則, すばる望遠鏡チーム: すばるディープフィールド I — 観測と結果、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [27] 戸谷 友則, 吉井 讓, 岩室 史英, 舞原 俊憲, 本原 顕太郎, 寺田 宏, 後藤 美和, 岩井 淳一, 田辺 裕久, 田口 智之, 秦 隆志, 大屋 真, すばる望遠鏡チーム: すばるディープフィールド II — カウントと背景放射の理論モデルとの比較による宇宙論・銀河形成論への示唆、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [28] 矢作 日出樹, 吉井 讓: 適合格子分割を用いた宇宙論的数値計算コードの開発、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [29] 鈴木 建, 吉井 讓, Timothy C. Beers: ビッグバン元素合成時のリチウム組成の精密決定と宇宙のバリオン密度、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [30] 吉井 讓, 小林 行泰, 峰崎 岳夫, 塩谷 圭吾, 菅沼 正洋, 富田 浩行, 青木 勉, B. A. Peterson, : MAGNUM Project (1) 遠方銀河距離決定の新技术、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [31] 峰崎 岳夫, 吉井 讓, 小林 行泰, 塩谷 圭吾, 菅沼 正洋, 富田 浩行, 青木 勉, B. A. Peterson, : MAGNUM Project (2) 活動銀河核の可視赤外線変光遅延時間と絶対等級の相関、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [32] 小林 行泰, 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 青木 勉, 塩谷 圭吾, 菅沼 正洋, 富田 浩行, B. A. Peterson, : MAGNUM Project (3) ハレアカラ専用望遠鏡設置の進捗状況、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [33] 塩谷 圭吾, 小林 行泰, 吉井 讓, 峰崎 岳夫, 菅沼 正洋, 富田 浩行, : MAGNUM Project (4) 近赤外域における活動銀河核の変光、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大、2000 年 4 月)
- [34] 矢作 日出樹, 吉井 讓, 郷田 直輝: Large scale structure and galaxy formation, すばる望遠鏡主焦点ファイバー多天体分光器 FMOS サイエンスワークショップ, (国立天文台 1999 年 12 月)
- [35] 矢作 日出樹, 吉井 讓: Cosmological Hydrodynamics code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement, 第 12 回理論天文学懇談会シンポジウム, (国立天文台, 1999 年 12 月)
- [36] 矢作 日出樹, 吉井 讓: Cosmological Simulation with Dynamically Adaptive Mesh Refinement」, 次世代数値計算法研究会, (国立天文台 2000 年 1 月)
- [37] 吉井 讓: Young Globular Cluster から探る星形成, 銀河系天文学研究会, (神奈川、2000 年 3 月)
- [38] 矢作 日出樹: Toward the Numerical Galaxy Catalogue, (神奈川、2000 年 3 月)
- 招待講演
- [39] 吉井 讓: 宇宙観測の最前線、日本冷凍空調学会、平成 11 年度通常総会特別講演 (東京、1999 年 5 月)
- (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)

星間分子雲は恒星が形成される場所であり、宇宙における物質循環の主要経路にあたる。本研究室では、星間分子雲に存在する原子や分子に着目し、電波望遠鏡による観測的研究と、実験室での分子分光実験を行っている。特に、天文学において未開拓の波長領域であるサブミリ波（波長 1 mm から 0.1 mm の電磁波）の検出技術の開拓に力を入れており、わが国唯一のサブミリ波望遠鏡を富士山頂に設置して観測を行っている。特に、中性炭素原子の放つ 492 GHz のスペクトル線の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と比較することで、星間分子雲の詳細構造や形成過程を明らかにしつつある。また、同時に国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45 m ミリ波望遠鏡をはじめとする内外の電波望遠鏡を用いて、星間分子雲の物理・化学状態と星形成過程の研究を推進している。

#### 4.1 観測装置の開発・改善

##### ○ 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（周波数にして 300 GHz から 1 THz の電波）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乾燥するので、サブミリ波天体観測の邪魔になる水蒸気が少なく、観測には絶好の場所である。その優れた観測条件を活かして、中性炭素原子 (CI) のスペクトル線 ( $^3P_1 - ^3P_0$ ; 492 GHz,  $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809 GHz) や一酸化炭素分子 (CO) のサブミリ波スペクトル線 ( $J = 3 - 2$ ; 345 GHz) の観測を行い、星間分子雲の形成と進化や、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 年度より製作を行い、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、商用衛星通信を用いた遠隔操作によって観測を行っている。2 回の冬季のシーズンで 35 平方度にもよる領域のサーベイを CI のスペクトル線で行うことができた。これは、これまでの CI の観測規模を 1 桁上回るものであり、近傍星間分子雲における CI の分布の全貌を描き出しつつある。1999 年-2000 年のシーズンには、345GHz/ 492 GHz/ 809 GHz の 3 バンドを観測できる超伝導受信機を搭載し、CI の 809 GHz のスペクトル線の観測も行うことができた。1999 年 11 月から観測を開始し、途中、落

雷による観測中断があったものの、最終的には 2000 年の 3 月まで観測を行うことができた。また、他機関・グループの研究者との共同研究を公募し、3 件を実施した。

本研究は初期宇宙研究センター（代表：佐藤勝彦教授）のプロジェクトの 1 つとして推進しており、国立天文台野辺山観測所の関本裕太郎氏、立松健一氏、野口卓氏、宮澤敬輔氏、福井大学の齋藤修二氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、国立天文台天文学データ解析センターの大石雅寿氏、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善** 富士山頂サブミリ波望遠鏡用 SIS 超伝導受信機の改良を行なった。我々はこれまで、345 GHz、492 GHz 帯の Nb-Base の SIS ミキサの開発を行ってきた。今期は、CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ; 492 GHz) のもう一つ上の遷移輝線である CI ( $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809 GHz) を観測するため、まず 492-GHz SIS ミキサをスケールダウンし、809-GHz SIS ミキサの製作を行なった。Nb-base の SIS ミキサはギャップ周波数（約 700 GHz）以上の周波数に対しては検出感度が大幅に低下する。しかしながら、実験室で測定した 809-GHz SIS ミキサの受信機雑音温度は 580 K と実用的な性能を達成したため [18]、今期は、345/492/809 GHz の 3 バンド対応の受信機を望遠鏡に搭載した（ミキサはすべて DSB ミキサ）。345 GHz、492 GHz 帯受信機の雑音温度は昨年のもとのほぼ同じである。これらの SIS 素子はいずれも、国立天文台野辺山のクリーンルームで製作されたもので、809-GHz SIS ミキサの素子の tuning circuit は parallel connected twin junctions (PCTJ) を採用している。

今期の受信機システムは 3 バンド対応にしたため、その分、熱流入・発熱量が増加する。そこで受信機が十分冷えるように、冷凍機 (GM2 段式 4K 冷凍機 (無調整)) は 4 K ステージが 0.5 W の冷却能力を持つ冷凍機に交換した。そのうえで、IF 系の雑音温度を下げるため、492 と 809 GHz 用の冷却 HEMT 増幅器を 4 K-stage に取り付けた。このような改善の結果、今期の観測時の 492 GHz 帯、809 GHz 帯のシステム雑音（大気、レドームの損失込み）は、比較的天気の良い時で、それぞれ約 1800 K (DSB)、6300 K (DSB) を得た。のための

**3 バンド受信機光学系の開発** 345GHz / 492GHz / 809GHz の 3 バンド受信機光学系の開発を行い、富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載した。この 3 バンド光学系では、アンテナからの RF 信号はまず、45° の角度で設置された偏波グリッドで 492 GHz ミキサ方向と 345GHz / 809GHz ミキサ方向に分離される。345GHz / 809GHz 方向に分離したほうは 30° の角度で設置されたローパス・フィルタで 345 GHz ミキサ方向（透過）と 809 GHz ミキサ方向（反射）に分離される。それぞれの周波数に分離された RF 信号は、ミキサ前方に設置された LO カップリング・グリッドによりデューア上窓から導入される LO 信号と混合され、ミキサのホーンに入る。

この 3 バンド受信機の搭載により、CO  $J=3-2$  (345

GHz) 輝線、CI  $^3P_1-^3P_0$  (492 GHz) 輝線、および CI  $^3P_2-^3P_1$  (809 GHz) 輝線の観測が、リモート切替で行えるようになった。

**On-the-fly マッピング観測法の確立** 広域マッピングを効率的に行なうために、On-the-fly Mapping Mode (OTF) の手法を確立した。高速なデータ積分が可能な積分機システムには Pentium Processor を使用し、ホストコンピュータへはイーサケーブルを介して圧縮したデータを転送するようにした。これら積分機システムと同期したアンテナ制御を開発し、データ転送時間に対する観測効率の低下がない状態で、1分角を1秒の割合でスキャンするモードでの動作を確認した。

**OTF 対応新積分器の開発** 富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載されている音響光学型分光器 (AOS) から出力されるデータに対して高速な積分処理を行い、将来実装予定の on the fly (OTF) 方式の観測に対応可能な積分器の開発を行った。AOS の CCD から出力されたビデオ信号はこの積分器に送られ、16bit の AD 変換器によってデジタル化された後、クロック周波数 200MHz の CPU をもつ計算機上で積算される。AD 変換器は 12bit の分解能を実現し、AD 変換の量子化雑音を CCD 雑音と比較して十分小さくすることができた。実験室における仮想的な信号に対する実験では、データの取得に成功した。

**チョッピング副鏡の開発** 微弱かつコンパクトなサブミリ波源に対する感度を向上させるため、富士山頂サブミリ波望遠鏡用のチョッピング副鏡の開発を行っている。開発中のチョッピング副鏡の駆動機構としては、従来の複数のアクチュエータで副鏡を支持する方式ではなく、向かい合う歯車の付いた電磁石と永久磁石から成る全く新しい方式を採用した。このチョッピング副鏡の導入により、実際の観測における感度向上はもちろん、惑星からの連続波を受信して望遠鏡の指向観測ができるようになるため、望遠鏡の指向精度にも格段の向上が見込まれる。

現段階で実験室における第一号試作機の性能試験が終了し、5 Hz の振動周期で duty cycle  $\approx$  90% が実現可能であることが確認された。現在この結果をふまえて、10 Hz で duty cycle  $>$  95% を安定して実現すべくさらに改良を加えた第二号試作機を製作中である。

#### ○ 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中である。この望遠鏡の利点は、世界中至る所にあるサブミリ波観測の適地に持ち込むことが出来、しかも口径が小さい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。主要な観測周波数は、富士山頂サブミリ波望遠鏡と同じ、492 GHz と 809GHz である。

**受信機システムの開発** 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡に搭載する 492 GHz 受信機のみキサ・ブロックおよびフィード・ホーン的设计、製作を行った。みキサには国立天文台野辺山で作られた SIS 超伝導素子を使用している。汎用性を考慮して、IF サーキットはみキサ・ブロック外部 (Bias-Tee box) に装備した。受信機の冷却には、住友重機製の消費電力 1 kW の GM 2 段式 4K 冷凍機を使う予定である。フィード・ホーンにはダイアゴナル・ホーンを採用した。18cm サブミリ波望遠鏡の光学系の制限から、フィード・ホーンは出来るだけデューアの窓に近づける必要があり、このためホーンは最短にはなっていない。

**制御システムの開発** 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡の制御システムの開発を行なった。OS に Windows NT を用いたマルチタスク処理を行ない、これまでにない価格と手軽さで安定した望遠鏡制御システムを構築することができた。

#### ○ Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

本研究室では、野辺山天文台、東京大学天文学科、名古屋大学のグループと共同で ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 計画を推進している。ASTE 計画とは、電波天文学における次期大型プロジェクトである LMSA 計画のプロトタイプアンテナを LMSA 建設予定地であるチリのアタカマ砂漠 (標高 4800 m) に設置する計画である。現在、望遠鏡は野辺山でのテスト段階にある。

本研究室では野辺山のグループと共同で、この望遠鏡に搭載する 345 GHz 帯サブミリ波受信機の開発を行った。観測効率の向上には、受信機雑音温度の低減が重要となる。そこで、SIS 素子の性能評価、光学系でのノイズ成分の評価などをくり返し、受信機を組みあげ、受信機システムの低雑音化をはかった。その結果、受信機雑音温度は 345 GHz で約 60 K (DSB) と非常に高い性能を実現している。

## 4.2 星間分子雲の観測的研究

### オリオン KL 領域における CI ( $^3P_2-^3P_1$ ; 809GHz)

**輝線の観測** 富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載した 345 GHz/ 492 GHz/ 809 GHz 3 バンド受信機を用いて、オリオン KL を中心とした  $3' \times 3'$  領域を CI の 809 GHz のスペクトル線で観測した。観測は周波数スイッチモードで行い、大気込みシステム雑音温度は 6500 K (DSB) であった。観測の結果、809 GHz のスペクトル線の強度分布は、対応する 492 GHz のスペクトル線の強度分布とよく対応していることがわかった。2本のスペクトル線の強度から求めた励起温度は 30–60 K でほぼ一様であり、オリオン KL のホットコア方向でも励起温度の上昇は特に認められなかった。このことは、この領域の CI の放射が分子雲表面の光解離領域におもに由来していることを示している。このように CI の 809 GHz のスペクトル

ル線の観測は CI 放射領域の物理状態を探るのに非常に有効であることが示された。

#### 富士山頂サブミリ波望遠鏡による

**Orion B 分子雲の CI 広域観測** 昨年度の Orion A 巨大分子雲 [6] に引き続き、そのコンパニオンである Orion B 分子雲に対して、そのほぼ全領域、約 7 平方度に対して 3' グリッドで CI(492 GHz) の広域観測を富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて行なった。Orion A 分子雲同様、CI は分子雲全体にわたって広がっていて、全体としてその分布は  $^{13}\text{CO}(1-0)$  とよい相関を示した。分子雲コアにおける CI/CO 比は、0.1-0.2 程度とほぼ同じ値を示すが、全体としては Orion B 分子雲では Orion A 分子雲 (特に南部) に比べて CI/CO 比が低くなっていることが分かった。その原因のひとつとして、分子雲の化学的年齢の違いを反映している可能性が考えられる [17]。

**牡牛座分子雲複合体における元素組成のばらつき** 昨年度までの、NRAO 12 m 電波望遠鏡 (Kitt Peak) と野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いた、 $\text{H}^{13}\text{CN}(1-0)$ 、 $\text{HC}^{15}\text{N}(1-0)$  の観測の結果、 $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$  比が牡牛座分子雲複合体内において 3.4 から 12.8 と、3 倍以上ものばらつきを示すことが明らかになっていった。これらは分子雲複合体を形成しているガスの組成自体が一樣ではないという可能性を示唆しており、そのことを確かめるために、さらに野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて数点の牡牛座分子雲コアにたいして同様の観測を高感度で行なった。その結果、空間的に近い点における比は近い値を示すことが明らかになり、上記の可能性を再確認する結果となった [?] [16]。

**牡牛座暗黒星雲の Heiles' Cloud 2(HCL2) 周辺領域における CI の広域観測** 牡牛座分子雲にある HCL2 領域は 150pc と距離が近く、内部には TMC-1 のような高密度分子雲コアが存在する典型的な暗黒星雲である。またこの領域は、OB 型星などの紫外線源が近くに存在しないため、分子雲や分子雲コア自身の物理・化学進化のメカニズムを調べるには絶好のターゲットである。

昨年度は、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて、この HCL2 領域の CI 輝線のマッピング観測を行ない、HCL2 領域の南部分に CI と CO 分子の存在量比 ( $\text{N}(\text{CI})/\text{N}(\text{CO})$ ) の高い領域 (0.8) が存在することを発見した。この領域は、可視減光  $A_V$  が  $A_V > 6$  と高いため、このような高い比を PDR モデルで説明することが難しく、むしろまだ年齢の若い分子雲 (CI rich cloud) を捉えていると考えられる [7]。今期の観測では、この HCL2 領域の東側へとさらに観測領域を広げた (2 平方度、観測点数 750 点)。その結果、CI は CI rich cloud から東側へと連続的に伸びており、 $^{13}\text{CO}$  や IRAS 100  $\mu\text{m}$  の分布と大局的に似ていることが分かった。さらに、この CI の分布のうち代表的な場所 (14 箇所) で、国立天文台野辺山の 45m 望遠鏡を用いて  $^{13}\text{CO}$  と  $\text{C}^{18}\text{O}$  分子輝線の観測を行ない、 $\text{N}(\text{CI})/\text{N}(\text{CO})$  比を詳しく調べたところ、いずれの場所でも比が 0.5~1.5 となり、CI rich cloud と同程度もしくはそれ以上の高い値を示した。

一方、この領域の可視減光は、IRAS 100 $\mu\text{m}$  と 60 $\mu\text{m}$  の強度比から  $A_V < 4$  と低いことが分かる。これらのことから、この HCL2 領域の東側に広がる CI は translucent cloud に付随するものと推察され、そこでの高い  $\text{N}(\text{CI})/\text{N}(\text{CO})$  比は PDR モデルでも説明が可能であると考えられる [18]。

昨年度と今年度の結果から、HCL2 領域周辺には 3 つの異なる進化段階、すなわち、translucent cloud 的な領域、CI rich cloud のように分子雲が形成されつつある領域、TMC-1 のように分子雲コアがすでに形成されている領域、が連なって存在していることが分かった。

**暗黒星雲 Lynds134 の CI  $^3P_2-^3P_1$  輝線観測** Lynds 134 (L134) は L183 (L134N) 複合分子雲を構成する L183, L169, L134 の 3 つの主な分子雲のうちの一つであり星形成が進んでいない代表的な暗黒星雲である。我々はこの領域の分子雲の構造や形成過程を調べる目的で昨年 L183, L169 に続いて L134 について富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI 輝線 ( $^3P_1-^3P_0$ , 492 GHz, ビーム幅 2'.2) の広域観測を行なった。観測点数は 240 点約 1 平方度にわたりこれにより L134 全体の CI の分布を明らかにすることができた。

また上記 3 つの分子雲について IRAS 衛星による波長 100  $\mu\text{m}$  と 60  $\mu\text{m}$  の赤外線分布から星間ダストの分布を表す可視減光を求めて、CI 分布と比較することによりすることにより、分子雲ごとにその性質が異なることを見出した。すなわち、L169 が希薄な分子雲であるのに対し L183, L134 は高密度分子雲り、L183 においては可視減光量と CI 分布が良く一致するが L134 では一致しない部分が存在している。このことは分子雲の進化段階に差があることを示唆している可能性がある。

**NGC1333, Barnard1 領域の CI 観測** 富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて NGC1333 領域、Barnard1 領域を約 2 平方度に渡って 3' グリッドで観測した。その結果、NGC1333 領域のコア部分では CI/CO 比は 0.1 - 0.4 と他の代表的分子雲コアと比較して大きい値をとることが分かった。B1 領域では北部に CI/CO 比が南部 CO コアに比べて高い領域が新しく発見された [20]。

**銀河面の CI によるサーベイ** Solomon et al.(1987) によって発見された銀経  $8^\circ - 9^\circ$ 、銀緯  $-1^\circ - +1^\circ$  に存在する 273 個の CO クラウドのうち、アンテナ温度が 15K 程度以上クラウドの 28 個に対して富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI ラインによる観測を行なった。結果、25 個のクラウドについて CI ラインを検出した。

**$\rho$  Oph 領域の CI 広域観測** へびつかい座領域 ( $\rho$  Oph) の暗黒星雲 L1688 のほぼ全領域、約 1.7 平方度に対して CI(492 GHz) の広域マッピング観測を行い、この暗黒星雲全体における CI の分布を初めて明らかにした (図??)。CI の広がりには  $^{13}\text{CO}(1-0)$  とおむね

良い相関を示すが、南の CI ピークには対応する  $^{13}\text{CO}$  のピークはみられなかった。一方 CII はこの領域の主な紫外線源である B2 型星 HD147889 を中心として分布しており、CI の分布とは大きく異なっていた。また、HD147889 と南の CI ピークの間には  $\text{C}^{18}\text{O}$  でトレースされる分子雲コアがある。従って、HD147889 から南の CI ピークにかけて CII/CO/CI の順に並んでおり、PDR モデルによる予想 (CII/CI/CO) に反する結果になった。また、南の CI ピークでは柱密度比  $N(\text{CI})/N(\text{CO})$  が 0.4 と他の部分より大きい値を示す。その原因の一つとして、化学的に比較的若い領域である可能性が考えられる [22]。

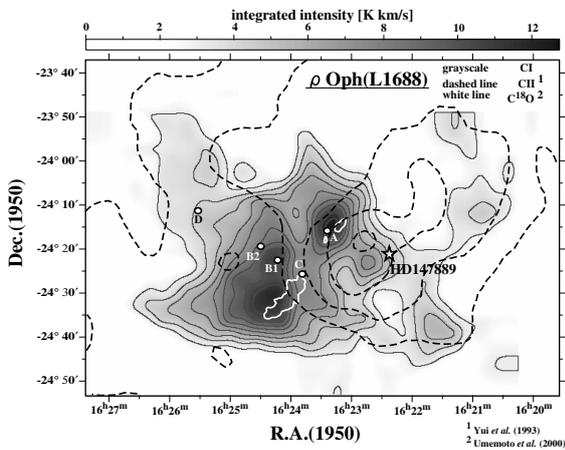


図 4.2 a: 富士山頂サブミリ波望遠鏡で得られた  $\rho$  Oph 領域の暗黒星雲 L1688 周辺の CI  $^3P_1-^3P_0$  輝線積分強度図。グレイスケールが CI、破線の等高線が Yui *et al.* (1993) による CII、白線の等高線が Umemoto *et al.* (2000) による  $\text{C}^{18}\text{O}$  の分布を示す。星印はこの領域の主な紫外線源である B2 型星 HD147889。丸印は分子雲コア。

**Maddalena cloud の CI 広域観測** Maddalena cloud は、Orion 分子雲の倍程度の質量をもつにもかかわらず活発な星形成の起こっていない特殊な巨大分子雲である。その中心領域約 1 平方度に対して CI の分布を明らかにした。この天体では CI の強度は  $T_{mb}$  で 1.5 K 以下と非常に弱く、1 点あたり 100-400 s の積分時間を要した。観測の結果、CI の分布は  $^{13}\text{CO}$  の分布とほぼ同じような分布を示した。この分子雲における CI/CO 柱密度比は 0.2-1.8 であり、典型的な巨大分子雲や暗黒星雲で観測されている値 (cf. Orion A  $\sim 0.03$ , V0.2, L134N  $\sim 0.1$ ) よりも translucent cloud で観測されている値 (0.4-6) に近いことがわかった [23]。

**中間赤外暗黒星雲周辺の CI 輝線観測** MSX (Midcourse Space Experiment) 衛星により、中間赤外域 (8-25  $\mu\text{m}$ ) で数分角の広がりを持つ patchy な暗黒星雲状の天体が銀河面上に約 2000 個発見された。これらは非常に高い可視減光 (>100 等) を有し、その後のミリ波分子輝線観測の結果より、星形成の始まっている

ない、あるいは非常に初期にある高密度分子雲コアであることが分かっている。

これらの中間赤外暗黒星雲のうち、HII 領域 DR15 に付随する 2 つの中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 について、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた中性炭素 (CI)  $^3P_1-^3P_0$  (492GHz) および一酸化炭素 (CO)  $J=3-2$  (345GHz) 輝線によるマッピング観測、および野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡を使用した一酸化炭素の同位体 ( $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ )  $J=1-0$  (110GHz) 輝線によるマッピング観測を行い、以下のような結果を得た (図 4.2 b)。[1] CO  $J=3-2$  輝線強度ピークは、HII 領域 DR15 方向に一致する。[2] CI 輝線強度ピークは、DR15 方向の約 5' (1.5 pc) 北西、二つの中間赤外暗黒星雲を挟んで HII 領域 DR15 とは反対側に位置する。[3]  $^{13}\text{CO}$  および  $\text{C}^{18}\text{O}$   $J=1-0$  輝線強度ピークは、中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 の位置に一致する。上記の HII/CO/CI の空間的配列は、古典的な光解離領域 (Photodissociation Region) モデルの予測とは相容れず、早期型星からの紫外光が中性炭素分布を決定する支配的要素ではない事を示唆すると同時に、紫外光の入り込めない分子雲の奥深くまで CI が存在する可能性を示している [13]。

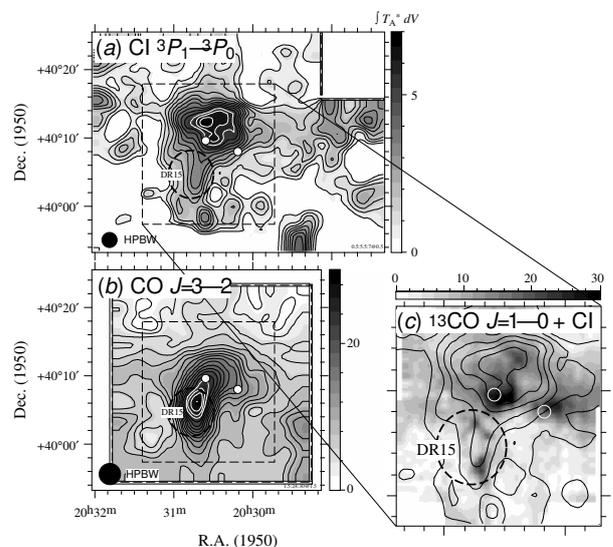


図 4.2 b: (a) 富士山サブミリ波望遠鏡で得られた DR15 周辺の CI  $^3P_2-^3P_1$  輝線積分強度図。(b) 同じく CO  $J=3-2$  輝線積分強度図。(c) 野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡で得られた  $^{13}\text{CO}$   $J=1-0$  輝線積分強度図。それぞれ白丸はカタログされた中間赤外暗黒星雲の位置。

**低銀緯未同定  $\gamma$  線源周辺の CO 輝線観測** Compton  $\gamma$  線天文衛星の EGRET 検出器によって  $E > 100$  MeV の高エネルギー領域で銀河面上に検出された  $\gamma$  線点源は 35 個にのぼるが、そのうち回転駆動型パルサーに同定された 5 つ以外は他波長で未同定な天体である。それら未同定天体の正体および  $\gamma$  線放射機構の解明は高エネルギー天文学の重要な課題である。我々は、位置の良く決定された低銀緯未同定  $\gamma$  線源

2EG J1811-2339 方向の X 線撮像観測およびミリ波分子輝線観測を行い、それが回転駆動型パルサー+星間分子雲というシステムである事を見出した。このシステムでは、パルサーによって加速された高エネルギー荷電粒子が星間分子雲中のバリオンに衝突し、制動放射+ $\pi_0$  崩壊過程によって高エネルギー  $\gamma$  線が放射されていると考えられる [4]。

今回我々は、上記の 2EG J1811-2339 のような  $\gamma$  線天体の普遍性を調べる目的で、同様にパルサーらしき X 線源およびダスト雲が付随している低銀緯未同定  $\gamma$  線源の一つ GEV J1837-0610 について、野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡を使用した CO  $J=1-0$  輝線観測を行い、この領域の分子ガス分布が軟 X 線放射を取り囲むように直径約 20 pc のアーク状構造を示すことを見出した。この結果により、この GEV J1837-0610 がおそらくはパルサー/超新星残骸/分子雲システムであること、この超新星残骸と分子雲の相互作用および超新星爆発の結果誕生したパルサーが高エネルギー荷電粒子を供給していること、そしてその高エネルギー荷電粒子と分子雲中のバリオンの相互作用によって  $\gamma$  線が放射されている事が示唆される [12]。

### 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の短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が数多く含まれている。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ので、星間分子雲に存在することが予想されていても、スペクトルの周波数が知られておらず、探索ができていないものが少なくない。そこで、本研究室では、「短寿命分子」の回転スペクトルを実験室での高感度ミリ波サブミリ波分光によって研究している。

**DSC ラジカルのマイクロ波分光** 昨年の HSC ラジカルのマイクロ波分光による検出に引き続いて、その重水素化物である DSC ラジカルの回転スペクトルをマイクロ波領域にて測定した (図 4.3 c)。D<sub>2</sub>S と CO を放電して DSC を生成した。HSC と DSC の解析を合わせて HSC の分子構造を  $r(\text{HS}) = 1.390(3)$  Å,  $r(\text{CS}) = 1.6403(5)$  Å,  $\alpha(\text{HSC}) = 104.2(2)^\circ$  と決定した。

**CS、SO の振動励起状態のフーリエ変換ミリ波分光** 基本的な 2 原子分子である CS ( $X^1\Sigma^+$ )、SO ( $b^1\Sigma^+$ ) に着目し、実験室でフーリエ変換ミリ波分光計を用いて振動励起状態の回転スペクトルの測定を行った。CS については希ガスに希釈した CS<sub>2</sub> をパルス放電ノズルを通して生成した。生成した CS は強く振動励起しており、34 - 49 GHz の範囲で  $v = 39$  までの  $J = 1-0$  の回転スペクトルを測定できた。また、C<sup>34</sup>S、<sup>13</sup>CS、C<sup>33</sup>S、C<sup>36</sup>S のスペクトルも振動励起状態を含めて測定できた。<sup>13</sup>CS の場合、核スピンによる超微細構造分裂を測定することができ、核スピン回転

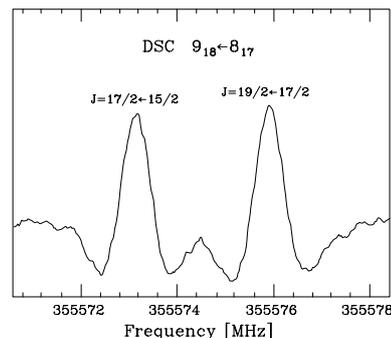


図 4.3 c: 355.6 GHz 付近に観測した DSC ラジカルの  $9_{18}-8_{17}$  回転遷移を示す。重水素核による超微細構造分裂は、小さいため分離して観測できなかったが、対電子スピンによる微細構造分裂が観測できた。

相互作用定数が求められた。同様に SO ( $b^1\Sigma^+$ ) についても  $v = 22$  までの  $J = 1-0$  の回転スペクトルを 33 - 42 GHz の範囲で測定できた。以上の結果からフーリエ変換ミリ波分光によって分子の高励起状態を調べることができることがわかった。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Tomofumi Umemoto, Hitomi Mikami, Satoshi Yamamoto, Naomi Hirano, "The Ortho-to-para Ratio of Ammonia in the L1157 Outflow", *Astrophys. J.* 525, L105-L108 (1999).
- [2] Tomoya Hirota, Satoshi Yamamoto, Kentarou Kawaguchi, Akihiro Sakamoto, and Nobuharu Ukita, "Observations of HCN, HNC, and NH<sub>3</sub> in Comet Hale-Bopp", *Astrophys. J.* 520, 895-900 (1999).
- [3] Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Masafumi Ikeda, Hiroyuki Maezawa, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Keisuke Miyazawa, Sheng-Cai Shi, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Junji Inatani, Masatoshi Ohishi, Kazufusa Noda, and Yuichi Togashi, "The Mt. Fuji Submillimeter-wave Telescope", *Rev. Sci. Instr.* in press.
- [4] T. Oka, N. Kawai, T. Naito, T. Horiuchi, M. Namiki, Y. Saito, R. W. Romani, & T. Kifune, "A Dark Cloud Associated with an Unidentified EGRET Source", *The Astrophysical Journal*, 526, 764 (1999)
- [5] Hideta Habara and Satoshi Yamamoto, "Microwave spectrum and molecular structure of the HSC radical", *Journal of Chemical Physics*, Jun 2000 in press.
- [6] M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, G. Saito, Y. Sekimoto, S. Yamamoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, and J. Inatani

“Large-scale mapping observations of the CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ) and CO ( $J = 3 - 2$ ) lines toward the Orion A molecular cloud”

Astrophysical Journal, 527, L59-L62 (1999)

- [7] H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, G. Saito, Y., Sekimoto, S. Yamamoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S.C. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, & J. Inatani, “Large-Scale Mapping Observations of the  $C_I$   $^3P_1 - ^3P_0$  Line toward Heiles Cloud 2 in the Taurus Dark Cloud”, The Astrophysical Journal, 254, L129 (1999)

(学位論文)

- [8] 羽原秀太: Molecular Structures of Sulfur-bearing Free Radicals As Studied by Microwave Spectroscopy (マイクロ波分光によるイオウを含むフリーラジカルの分子構造の研究) (博士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Satoshi Yamamoto: Atomic Carbon As a Probe of Galaxies, 4th RESCEU International Symposium (Tokyo, Nov. 1999)
- [10] H. Habara and S. Yamamoto: Microwave spectra of the HCS and HSC radicals, The 54th Ohio state university international symposium on molecular spectroscopy (Columbus, Ohio USA, June 14-18, 1999)

(国内会議)

一般講演

- [11] 山本 智、前澤裕之、池田正史、伊藤哲也、岡朋治、斎藤岳、岩田充弘、亀谷和久、酒井剛、関本裕太郎、立松健一、有川裕司、麻生善之、野口卓、史生才、斎藤修二、藤原英夫、大石雅寿、尾関博之、稲谷順司: 富士山頂サブミリ波望遠鏡による Orion KL 領域の  $CI(^3P_2 - ^3P_1; 809 \text{ GHz})$  輝線の観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [12] 岡 朋治、河合誠之、内藤統也、桜井郁也、坂本貴紀、R. Romani: 低銀緯未同定  $\gamma$  線源 GEV J1837-0610 方向の CO マッピング観測、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)
- [13] 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による中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 周辺の  $CI(^3P_2 - ^3P_1)$  輝線観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [14] 羽原秀太、山本智: DSC ラジカルのマイクロ波分光、分子構造総合討論会 (大阪大学、1999 年 9 月)
- [15] 池田正史、広田朋也、山本智: Variation of isotope abundance in the Taurus Molecular Complex, NRO ユーザーズミーティング (野辺山国立天文台、1999 年 7 月)

- [16] 池田正史、山本智: 牡牛座分子雲複合体における元素組成のばらつき、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)

- [17] 池田正史、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 Orion B 分子雲の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)

- [18] 前澤裕之、伊藤哲也、斎藤岳、酒井剛、岡朋治、山本智、関本裕太郎、野口卓、立松健一、麻生善之、斎藤修二、稲谷順司、他富士山頂サブミリ波グループ: 富士山頂サブミリ波望遠鏡用 809GHz 帯 SIS 超伝導受信機の開発、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)

- [19] 伊藤哲也、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 の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)

- [20] 岩田 充弘、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: NGC1333 の  $CI(^3P_1 - ^3P_0)$  及び  $CO(J=3-2)$  による広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)

- [21] 金銀淑、羽原秀太、山本智: HCCS、DCCS のフーリエ変換ミリ波分光、分子構造総合討論会 (大阪大学、1999 年 9 月)

- [22] 亀谷和久、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  $\rho$  Oph 領域における CI の広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)

- [23] 酒井剛、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 Maddalena cloud の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)

招待講演

- [24] Satoshi Yamamoto: Development of Astrochemistry; Chemical Evolution of Dark Cloud Cores、日本化学会 (日本大学、2000 年 3 月)

- [25] 山本 智: 富士山頂サブミリ波望遠鏡で探る星の誕生、日本天文学会公開講演会 (東京大学、2000 年 4 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

我々の宇宙には通常の物質の10倍以上の光らない物質があることを示唆する観測的および理論的根拠が数多くある。この物質は暗黒物質(ダークマター)と呼ばれており、その正体は素粒子の超対称性理論の予言する粒子ニュートラリーノである可能性が高い。

暗黒物質ニュートラリーノが通常の原子核と弾性散乱を行なうと原子核は10 keV程度の反跳エネルギーを受ける。我々はこの反応を利用し暗黒物質ニュートラリーノを直接検出するために、ボロメーターを開発し、実験を行なっている。本研究は筑波大学大塚洋一教授と共同で行なっている。

ボロメーターは10 mK程度に冷却した吸収体とそれに取り付けられた高感度抵抗温度計(サーミスター)からなる極低温熱量計型検出器である。10 keV程度のエネルギーによる吸収体の温度上昇をサーミスターにより電気信号に変換するというのがボロメーターを用いたニュートラリーノ検出の原理である。

原子核 $^{19}\text{F}$ はそのスピン構造から、スピンに依存した相互作用を行なうニュートラリーノに対し非常に大きな弾性散乱断面積を持つと考えられており、 $^{19}\text{F}$ (自然存在比100%)を含んだ検出器は暗黒物質ニュートラリーノの探索には非常に有利である。我々はこの観点から20gのフッ化リチウム $\text{LiF}$ の単結晶を吸収体としたボロメーターを完成させ、検出器の大質量化のために、8個並べて用いている。

本年は、それまで千葉県富津市鋸山のトンネル内に設置してあったボロメータを、宇宙線の強度が5桁程少ない宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室へ移設した。鉱山内での希釈冷凍機の運転のために、空気から液体窒素を製造する装置を導入し、既に使用しているヘリウム再凝縮装置とあわせて寒剤の補給なしに長期運転のできる体制を整えた。

また、神岡鉱山内は空気中の放射性ラドンガス濃度が高いことが知られているので、希釈冷凍機近傍にラドンが入り込まないようにするためのガスバッグを設置した。ガスバッグの中にはラドン濃度の低い上記液体窒素製造機からの蒸発ガスを流している。

このように、神岡において低放射線バックグラウンド実験を行なう上で空気中のラドンガスのモニタが必須であるので、そのために静電捕集型ラドン検出器(図5.1 a)を製作して蒸発ガスの常時モニタを行なっている。このモニタは、市販の安価な「ステンレス製バケツ」を利用している。

このラドン濃度の測定値をもとに電子・ガンマ線シミュレーションコード(EGS)を使って検出器への影響を調べ、検出器周辺のラドンガスの放射能による測定への影響は無視できるレベルに押え込むことができることを確認した。

実験中には希釈冷凍機の各部の温度や圧力などの運転状況が本郷構内よりインターネット経由で実時間監視ができるが、神岡・東京間の移動中などでも運転状況がわかるように、携帯電話でも監視ができるようになっている。

2000年のはじめより神岡での最初の測定が開始された。これまでは宇宙線の影響などで見ることができなかった検出器近傍の物質中のウラン・トリウム系列やカリウムの自然放射能をまず調べることに全力を注いでいる。この自然放射能についても起源を特定してできる限り完全に取り除くことにしている。



図 5.1 a: Radon gas monitor

ところで、われわれの実験はスピンに依存した相互作用を行なうニュートラリーノに対して大きな感度を持つように設計されているが、それにたいしてスピンに依存しない相互作用を行なうニュートラリーノの探索実験もいくつかのグループにより行なわれている。このスピンに依存しない相互作用を行なうニュートラリーノの検出には、普通に使われている $\text{NaI(Tl)}$ などのシンチレーション検出器やゲルマニウム検出器を用いることができるので、比較的感度を上げやすいという特徴がある。どちらの種類のニュートラリーノが暗黒物質としてふさわしいかについては、素粒子論・宇宙論的には決めることは難しいと

されている。

2、3年前からイタリアのローマ大学を中心とする暗黒物質探索の国際共同実験グループ DAMA が、このようなシンチレーション検出器を用いて暗黒物質ニュートラリーノによると考えられる検出率の季節変動をとらえたと称する報告をしている。理論的に予想される季節変動の大きさはわずか3%程度と小さいので、検出器の雑音などの経年変化などによるものではないかと、この結果を疑問視する声もあった。

ところが、2000年のはじめにアメリカのカリフォルニア大学バークレー校とスタンフォード大学を中心とするグループ (CDMS グループ) の、やはりスピニンに依存しない相互作用を行なうニュートラリーノに適したゲルマニウムボロメータ検出器による実験の結果が報告され、DAMA グループの主張するようなニュートラリーノは観測されなかったことを明らかにした。この論争がどのように決着するかは今のところ予測できないが、いずれにせよ彼らの実験とは相補的な我々の実験の感度を高めた結果を早く出してゆくことが重要であると考えている。

## 5.2 アクシオンヘリオスコープ実験

QCD における強い CP 問題はアクシオンモデルを導入する事によって解決されるが、それに伴って擬南部 Goldstone 粒子であるアクシオンが生じる。仮にこのアクシオンが存在した場合、太陽からも放出されていると考えられる。われわれの実験は、太陽から放出されている太陽アクシオンを地上で光子 (X 線) に変換し検出する事を目的としたものである。このための装置が図 5.2 b に示すアクシオンヘリオスコープである。本研究は高エネルギー加速器研究機構の山本 明教授と共同で行なっている。

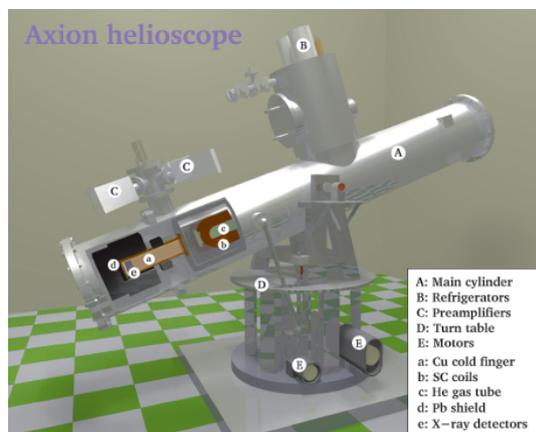


図 5.2 b: Axion helioscope

アクシオンを光子に変換するためにはアクシオンの進行方向に対して垂直な向きに磁場をかければ良

い。このためわれわれのヘリオスコープでは 4 T、2.3 m のレーストラック形超伝導磁石を太陽の方向に向けて追尾するという手法をとっている。そして、磁石の開口部の後方に置かれた X 線検出器 (PIN フォトダイオード) によってアクシオン起源の X 線を観測する。

これまでの観測において、 $m_a < 0.03 \text{ eV}$  の領域での他グループによる実験に比べて 4.5 倍強い制限を与えることができたが、第二回目の観測として磁場を印加した領域を極低温高密度の He ガスで満たして、axion 質量  $0.3 \text{ eV}$  以下の領域に感度を持つ観測をおこなう予定である。変換領域にガスを導入する事によって光子に見かけ上の質量を持たせるというものである。変換用の管の検出器側には、アクシオンが変換されてできる  $3 \sim 10 \text{ keV}$  の低エネルギー X 線が透過できるようにベリリウムでできた X 線窓があり、それを通して PIN フォトダイオード (浜松フォトニクス製 S3590-06、 $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ) で X 線を検出する。

これまでのところ、バッファースガス管 (断面  $18 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$  長さ  $2300 \text{ mm}$  でステンレス製) およびその周辺部に細かな真空もれが見つかり、場所の特定と修理にかなりの時間が費やされたが、現在は問題は解決している。

また、実装状態で PIN フォトダイオードのエネルギー較正を行なう必要があるため、そのための回転式  $^{55}\text{Fe}$  線源ホルダーが開発された。この装置により、冷却状態で真空容器内に設置されている PIN フォトダイオードにたいして、必要な時だけ較正用の X 線をあてることができ、それ以外の時は遮蔽容器に線源が格納されるようになった。この操作は真空容器の外部からおこなうことができるようになっている。

X 線検出器に関しては、冷却時の熱収縮によって PIN フォトダイオードが割れるという現象、および冷凍機の振動によるマイクロフォニック雑音をひろいやすいという問題があったが、PIN フォトダイオードを熱膨張率の小さなインバーの上に貼りつけて、全体を基台の上にネジで固定するという方法をとることによりこれらの問題はほぼ解決したと考えている。図 5.2 c に PIN フォトダイオード 4 枚のモジュールを示す。ヘッドアンプ部はエポキシ樹脂で固めてある。

これらの改造によって、ヘリウムガスを充填した第 2 次測定への準備がほぼ完了した。

### < 報文 >

(原著論文)

- [1] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, Y. Inoue, T. Watanabe, M. Yoshida, Y. Ito and Y. Ootuka: First Results from Dark Matter Search Experiment in the Nokogiriyama Underground Cell Phys. Lett. B461 (1999) 371–375.
- [2] T. Watanabe, H. Sekiya, K. Takahisa, M. Tanikawa and Y. Ito: Development of low background CdZnTe detectors for detection of double beta decays of  $^{64}\text{Zn}$  Nucl. Instr. and Meth. A436 (1999) 155–159.



図 5.2 c: PIN photodiodes Hamamatsu S3590-06 assembled with head amplifiers

- [3] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, T. Watanabe, Y. Ito, A. Takeda, Y. Inoue and Y. Ootuka: Tokyo dark matter search experiment with lithium fluoride bolometer  
Nucl. Instr. and Meth. A436 (1999) 233–237.

(会議抄録)

- [4] M. Minowa, S. Moriyama, Y. Inoue, T. Namba, Y. Takasu and A. Yamamoto: The Tokyo axion helioscope experiment  
Proceedings of the Second International Workshop on the Identification of Dark Matter, Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific) (1999) pp.447–453.
- [5] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, T. Watanabe, Y. Ito, Y. Inoue and Y. Ootuka: Search for particle dark matter with LiF bolometer  
Proceedings of the Second International Workshop on the Identification of Dark Matter, Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific) (1999) pp.371–376.

(国内雑誌)

- [6] 身内賢太郎・蓑輪 眞: 暗黒物質検出のための複合型ボロメータと NTD サーミスタ, 「放射線」 Vol. 26, No. 1, pp. 23–33, JAN. 2000 年.

(学位論文)

- [7] 竹田 敦: ボロメータの高感度化に用いるラドンモニタの開発, 2000 年 2 月 (修士論文).

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [8] 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、島根大学 1999 年 9 月 23 日.
- [9] 難波俊雄: 宇宙天体からのアクシオンとその地上での観測、日本物理学会秋の分科会、島根大学 1999 年 9 月 25 日.
- [10] 竹田 敦: 暗黒物質探索実験に用いるボロメータの高感度化、日本物理学会秋の分科会、島根大学 1999 年 9 月 25 日.
- [11] 身内賢太郎: ボロメータによる暗黒物質の探索、宇宙線研究所共同利用研究発表会、東京大学宇宙線研究所 (田無) 1999 年 12 月 16 日.
- [12] 身内賢太郎: LiF ボロメータによる暗黒物質探索実験 in 神岡、第 6 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2000 年 2 月 22 日.
- [13] 難波俊雄: 太陽アクシオン検出実験、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000 年 4 月 1 日.
- [14] 竹田 敦: 暗黒物質探索実験のバックグラウンド低減に用いる Rn 検出器の開発、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000 年 4 月 2 日.
- [15] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 I、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000 年 4 月 2 日.
- [16] 関谷洋之: 暗黒物質探索用ボロメータの結晶周囲環境のシミュレーション、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000 年 4 月 2 日.

## 6 銀河と宇宙構造の研究

——銀河と宇宙構造の研究—— (岡村・土居・嶋作ら)

初期宇宙の物理に深く関わる宇宙論の基本的な疑問に答えるべく、我々は銀河の大規模なサーベイ観測によるデータ収集を行なっている。その柱となるのが、米国の9つの研究機関とともに推進中のスローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) 計画である。この計画は、広視野の専用望遠鏡に超大型モザイク CCD カメラと多天体同時分光器を取り付けて、全天の4分の1の領域において1億個の銀河と10万個のクエーサーを観測し、宇宙における銀河の空間分布を表す「宇宙地図」を今日の5倍遠方の25億光年まで拡大するというものである。我々は、国立天文台と共同で、世界最大のモザイク CCD カメラを開発した実績を持つ。この実績を生かして、我々を含む日本のグループは、SDSS 計画において、観測の中心機器であるカメラの設計・製作や、データ処理ソフトウェアの開発などを担当して、計画推進にあたっている。

また、SDSS 計画と並行して我々は、東大・国立天文台のモザイク CCD カメラを用いて銀河団や遠方銀河などの広視野観測を行なうほか、8m「すばる」望遠鏡用の主焦点広視野カメラの開発およびそれを用いた銀河の深い撮像観測を行なっている。

これらのサーベイ観測によって数年間に得られるデータは、現存する銀河・クエーサーのデータベースを質・量ともにはるかに上回り、宇宙の広い領域と、現在から過去に向かっての長い時間とをカバーする。このデータベースを用いて初期宇宙の物理に光を当てるのが我々の目標である。

### 6.1 スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の推進

#### ○ 概要

30年以上にわたって観測的宇宙論の基礎となっていた、パロマーシュミット望遠鏡による全天写真サーベイ (銀河の限界等級約 20.5 等) を一新する SDSS 計画を米国の研究者と共同で推進している。この計画は、超大型モザイク CCD カメラを専用の口径 2.5m

望遠鏡にとりつけ、北天の約半分を5色のバンドで観測し、23等級までの銀河1億個を測光する。このうち19等より明るい100万個の銀河と10万個のクエーサーのスペクトル観測を行う。観測限界は距離にして今日の約5倍、体積にして100倍以上拡大される。試験観測が始まり、数千個の銀河の赤方偏移、500個以上のクエーサーのスペクトルが得られた。また撮像データからは2個のメタン型褐色矮星やM型より晩期の星が見つかった他、大型望遠鏡を用いて確認された高赤方偏移クエーサーは50個を越えつつある。

#### ○ CCD の性能評価 (土居)

SDSS 撮像カメラは全部で54個の CCD を有するカメラである。1999年6月にはそのうち astrometry 用24個の CCD のゲイン、読み出し雑音、線形性の検査を行った。2000年1月には photometry 用 CCD の一部の量子効率の測定を行った (土居他)。

## 6.2 銀河

### ○ かみのけ座銀河団の矮小銀河の性質 (小宮山, 岡村, 土居, 嶋作, 八木 (国立天文台), B.Mobasher (Univ. College London) ら)

かみのけ座銀河団のメンバーであることが確実な444個の銀河について、1996, 1998年にラパルマ天文台行った撮像、分光観測を元に、測光パラメータ、吸収線強度を集約したカタログを構築した。この中にある200個あまりの矮小銀河に対して、その性質が、銀河団の中心と外縁部で系統的に違うかどうかを調べた。その結果、(1)輝度分布は銀河団中心と外縁部で全く違いが見られない、(2)  $B-R$  色指数は、中心から外に行くにつれて青くなる、(3)  $Mg_2$  吸収線強度は中心から外に行くにつれて減少する、(4)  $H\beta$  吸収線強度は中心と外で変わらない事がわかった。これらの結果は、かみのけ座銀河団の矮小銀河均質な力学構造を持つが、中心にあるものほど重元素量が多いことを示唆する。矮小銀河に対する環境効果を検出したと考えられる。

### ○ おとめ座銀河団の極めて暗い矮小銀河の研究 (沢田, 岡村, 土居, 嶋作, 八木 (国立天文台) ら)

1998年にラパルマ天文台行った撮像観測から、これまで調べられていたよりも格段に暗い ( $-16 < M_R < -11$ ) 矮小銀河47個のサンプルを得た。その解析から、極めて暗い矮小銀河の数密度は従来の指摘より少ないこと (光度関数のいわゆるシェヒターパラメータは  $\alpha \sim 2$  ではなく  $\alpha \sim 1.4$  である)、ここまで暗くなると矮小銀河の諸性質に大きなばらつきが見られる事がわかった。

### ○ 不規則銀河の定量分類 (中村佳博, 土居, 嶋作, 岡

## 村, 八木 (国立天文台)

不規則銀河を定量的に分類する方法の一つに, Abraham 他が提案した非対称パラメータと中心集中度を用いる方法がある. この方法は HST による遠方銀河に用いられてきているにも関わらず近傍サンプルに適用した場合にどうなるか十分調べられていなかった. そこで Photometric Atlas of Northern Bright Galaxies の画像を用い, 近傍のほぼ complete な銀河サンプルに対して同方法を適用した. その結果, 不規則銀河の分布は近傍では Abraham 他が用いてきたものとは違った境界で分ける方が良く, dwarf spheroidal も分類できること, 銀河の早期型・晩期型分類では中心集中度と平均表面輝度を用いる方法と同程度に良いことなどを示した.

### ○銀河団の $B$ バンド光度とバリオン質量の比の進化 (嶋作)

銀河団の  $B$  バンド光度 - バリオン質量比 ( $L_B/M_b$ ) を用いて銀河団内の大局的な星形成史を  $0 < z < 1$  の銀河団について調べた. その結果, 以下のことがわかった. (i)  $L_B/M_b$  は  $z=0$  から 1 までに約 2.5 倍大きくなる. これは, 銀河団のバリオン全体が楕円銀河的な (すなわち single burst 的な) 進化をする場合の予想と矛盾しない. (ii)  $L_B/M_b$  の進化は, 絶対値を含め, フィールド銀河の  $B$  バンド光度密度 - バリオン質量密度比の観測と誤差の範囲で一致する. (iii) 近傍における星形成効率 (全バリオンのうち何割が星になったか) は銀河団とフィールドとで観測誤差の範囲で一致する.

### ○かみのけ座銀河団の質量 - 光度比とフィールド銀河の光度密度に基づく密度パラメータ $\Omega_0$ の測定 (嶋作, 勝野 (日本女子大))

Taguchi (1999) によるかみのけ座銀河団の最新の質量 - 光度比の見積もりと, 近傍のフィールド銀河の光度関数のさまざまな測定データを用いて,  $\Omega_0$  を求めた. 質量 - 光度比に対する環境効果を調べるために  $B$  バンドと  $K$  バンドで別々に  $\Omega_0$  の見積もりを行った. その結果, 以下のことがわかった. (i)  $\Omega_0$  の値は,  $B$  バンドのデータに基づく  $\Omega_0 = 0.29 - 0.50$ ,  $K$  バンドのデータに基づく  $\Omega_0 = 0.10 - 0.40$  である. (ii) バンドによる  $\Omega_0$  の違いは, 「銀河団の質量 - 光度比 = フィールドの質量 - 光度比」という等式が少なくともどちらかのバンドで成り立っていないことが原因と思われる. (iii) 上記の  $\Omega_0$  の値は, 宇宙年齢が 12 Gyr 以下であれば, 宇宙定数を導入しなくても  $H_0 = 70 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$  という観測と矛盾しないが, 宇宙年齢が 15 Gyr 以上の場合には正の宇宙定数が必要となる.

### ○遠方銀河団の多色撮像観測 (児玉, Richard Bower, Eric Bell (Durham))

遠方銀河団候補である QSO (3C336) の周りの領域を, WHT で BVRI の 4 色で観測した. 既存の  $K$

バンドのデータと HST の撮像データとを併せて現在解析中である.

### ○早期型銀河のポテンシャル構造と光学特性 (児玉, 松下 (都立大))

ROSAT で観測された近傍早期型銀河 52 個について, X 線強度と銀河の形態や力学には有意な相関があるが, 銀河の色やスペクトル指数とは相関がないことを示した. これは早期型銀河の星形成期とアセンブリー期の時期とが異なることを意味する.

### ○中間 $z$ 銀河団銀河の星形成史 (児玉, Richard Bower)

7 つの CNOC 銀河団 ( $0.23 < z < 0.43$ ) の測光分光データを用い, フィールド銀河を除去した色等級図を作成し, その進化から銀河団銀河の降着史と星形成史を導出した.

### ○近傍銀河団の光度関数の研究 (川崎, 岡村)

赤方偏移が測定されている南天の約 240 個の近傍銀河団の銀河の光度関数を調べた.  $\alpha = -1.25$  の Schechter 関数で fit した結果, 従来と良く合う  $M_{B_j}^* = -19.95 \pm 0.03$  という結果を得た. また, 銀河団の規模及び形態別に  $M^*$  の値を調べたところ,  $M^*$  の値は銀河団の規模には依存しないが, 不規則銀河団 ( $T_{BM}=\text{III}$ ) では規則銀河団 ( $T_{BM}=\text{I}$ ) に比べて  $M^*$  が約 0.5 等明るいことがわかった. 従来の研究の 10 倍近いサンプルを用いることにより, 信頼性の高い結果を得ることができた.

### ○Photometric Redshift 法に基づいた HDF 銀河の解析 (古澤, 嶋作, 土居, 岡村)

Hubble Deep Field (HDF) の撮像データ ( $UBVIJHK$ ) を用いて改良した Photometric Redshift (高赤方偏移で  $\sigma_z = 0.15$ ) に基づき, HDF 銀河の測光的性質を再解析した. HDF 銀河の光度関数は, 近傍では 2dF や CFRS などの赤方偏移サーベイの結果と良く一致し,  $z = 1 - 3$  では個数密度の増加が見られたが,  $M^*$  の有意な変化は確認出来なかった. これは, 銀河の形成史が純粋な光度進化のみでは説明されないことの示唆かもしれない. また, 個々の銀河に対してダストによる減光を補正したところ, ピークの値で従来よりも約 10 倍大きな星生成率を示し,  $z = 1$  より遠方で星生成率が有意に落ちないという結果が得られた.

## 6.3 銀河系および星間物質

### ○スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) によるハローの RR Lyrae 星, A 型星の分布 (岡

村, 土居, 嶋作, 福来 (宇宙線研), 池内 (阪大理), 関口 (宇宙線研), 市川, 安田 (国立天文台), 渡辺 (宇宙研), 濱部 (天文学教育研究センター), 市川 (東北大), 須藤 (物理), 佐藤 (物理) ら

SDSS の試験観測で同じ場所を 2 度以上撮像した結果からハローの RR Lyrae 型星候補を 150 個以上見つけた。偏在した分布から銀河系と衛星銀河の相互作用による比較的最近の星生成の可能性も示唆する。同様に A 型の色をした水平分枝の星の分布もハローにおける分布が得られつつある。

## 6.4 恒星

○早期型銀河に起きる超新星の探索 (茂山, 土居, 山岡 (九大), 国内の公共天文台)

7 つの公共天文台によってそれぞれ担当の視野を 1 から 2 週間おきにモニターし超新星を探し, 銀河団や楕円銀河の高温ガスに存在する重元素にどのくらい寄与できるのかを定量的に調べる。

## 6.5 機器開発

○すばる望遠鏡主焦点カメラの開発 (岡村, 土居, 嶋作, 仲田, 古澤, 澤田他)

すばる望遠鏡主焦点広視野 CCD カメラ (Suprime-Cam) は, 岡村を PI, 関口 (宇宙線研) 及び宮崎 (国天) を Sub-PI として開発を進めてきたが, 1999 年 1 月にカセグレン焦点につけてファーストライト観測を行った。今年度は 6 月までカセグレン焦点において望遠鏡立ち上げのための試験観測を行い, 7 月には CCD 8 素子を装着 (最終的には 10 素子入る) して初めて主焦点につけた。以来 2 度ほど主焦点立ち上げのための試験観測を行ったが, 立ち上げ作業は現在も継続中である。

○15 色狭帯域同時撮像装置 (土居, 岡村, 嶋作, 古澤, 仲田)

モザイク CCD 1 号機にダイクロイックミラーを用いた前光学系をとりつけた 15 色狭帯域同時撮像装置を MAGNUM 望遠鏡にむけて軽量化した。その他, ダイクロイック・ミラーのサポートの仕方の改良を行った。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Fan, X. et al. (89 authors including Doi, M., Okamura, S., Shimasaku, K.): High-Redshift Quasars Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data; *AJ*, **118**, 1-13 (1999).

- [2] Hasegawa, T., Wakamatsu, K., Malkan, M., Sekiguchi, K., Menzies, J., Parker, Q.A., Jugaku, J., Karoji, H., & Okamura, S.: A Galaxy Survey near the Galactic Centre. I. Discovery of the Ophiuchus Supercluster; *MNRAS*, in press (2000).
- [3] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., & Okamura, S.: New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF; *ApJ*, in press (2000).
- [4] Iye, M. et al. (99 authors including Okamura, S., Shimasaku, K., Doi, M., Furusawa, H., Nakata, F., Sawada, Y.): Subaru First-Light Deep Photometry of Galaxies in A851 Field; *PASJ*, **52**, 9-23 (2000).
- [5] Komiyama, Y. et al. (33 authors including Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Nakata, F., Sawada, Y., Shimasaku, K.): High-Resolution Images of the Ring Nebula Taken With the Subaru Telescope; *PASJ*, **52**, 93-98 (2000).
- [6] Nakata, F., Shimasaku, K., Doi, M., Kashikawa, N., Kawasaki, W., Komiyama, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M., Yagi, M., & Yasuda, N.: Probing the evolution of early-type galaxies using multi-colour number counts and redshift distributions; *MNRAS*, **309**, L25-29 (1999).
- [7] York, D. et al. (100 authors including Doi, M., Okamura, S., Shimasaku, K.): Technical Overview of the Sloan Digital Sky Survey; *AJ*, in press (2000).
- [8] Okamura, S. for the SDSS collaboration: The Sloan Digital Sky Survey is about to Start; *WG on Sky Surveys*, *IAU Comm.* **9**, Newsletter, No.11, pp.11-19 (1999).
- [9] Fan, X. et al. (30 authors including Doi, M.): The Discovery of a High-Redshift Quasar without Emission Lines from Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data; *ApJL*, **526L**, L57-L60 (1999).
- [10] Hanami, H., Tsuru, T., Shimasaku, K., Yamauchi, S., Ikebe, Y., & Koyama, K.: Merging Young Clusters in the Shapley Supercluster; *ApJ*, **521**, 90-98 (1999).
- [11] Shimasaku, K.: Evolution of the Blue Luminosity-to-Baryon Mass Ratio of Clusters of Galaxies; *PASJ*, in press (2000).
- [12] Kodama, T., Bower, R. G., Bell, E. F.: The Colour-Magnitude Relation of Early-Type Galaxies in the Hubble Deep Field; *MNRAS*, **306**, 561 (1999).
- [13] Kodama, T., Bower, R. G., Bell, E. F.: The Colour-Magnitude Relation of Early-type Galaxies in the Hubble Deep Field North; *Astrophysics and Space Science*, in press (2000).
- [14] Kodama, T., Matsushita, K.: Homogeneity of Stellar Populations in Early-Type Galaxies with Different X-ray Properties; *ApJ*, in press (2000).

- [15] Tamura, N., Kobayashi, C., Arimoto, N., Kodama, T., Ohta, K.: Origin of Color Gradients in Elliptical Galaxies in the Hubble Deep Field North; *ApJ*, in press (2000).
- [16] Tanaka, I., Yamada, T., Aragon-Salamanca, A., Kodama, T., Miyaji, T., Ohta, K., Arimoto, N.: A Rich Cluster of Galaxies Near the Quasar B2 1335+28 at  $z = 1.1$ : Colour Distribution and Star Formation Properties; *ApJ*, **528**, 123 (2000).
- (会議抄録)
- [17] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., and Okamura, S.: New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF; Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium “The Birth and Evolution of the Universe”, in press.
- [18] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., and Okamura, S.: New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF; *ASP Conf. Ser.*, in press.
- [19] Okamura, S., Komiyama, Y., Doi, M., Shimasaku, K., Sekiguchi, M., Yagi, M., Kashikawa, N., Yasuda, N., Iye, M., Mobasher, B., Carter, D., Poggianti, B., & Bridges, T.: Dwarf Galaxy Population in the Coma Cluster from a Large Spectroscopic Sample; Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium “The Birth and Evolution of the Universe”, in press.
- [20] Shimasaku, K.: Evolution of the Blue Luminosity-to-Baryon Mass Ratio of Clusters of Galaxies; Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium “The Birth and Evolution of the Universe”, in press.
- [21] Kawasaki, W.: The APM/Matched-Filter Cluster Catalog; Clustering at High Redshift (IGRAP99 International Conference), in press (2000).
- [22] Kodama, T.: in *Photometric Redshifts and High Redshift Galaxies (ASP Conference Series)*; in press (2000).
- [23] Tanaka, I., Yamada, T., Aragon-Salamanca, A., Kodama, T., Ohta, K., Arimoto, N.: Red Galaxies around a Quasar at  $z = 1.1$  and their Ages; Cosmological Parameters and the Evolution of the Universe (IAU symposium 183), p.164 (1999).
- (国内雑誌)
- [24] 宮崎 聡, 岡村定矩, 関口真木: 主焦点広視野カメラ; *科学*, Vol.69, No.12, pp.966–970 (1999).
- [25] 岡村定矩: 冷たい暗黒物質を探す; *AERA Mook 天文学がわかる*, pp.10–13 (1999).
- [26] 岡村定矩: スーパー望遠鏡すばる: *Suprime-Cam; サイエンス*, 7月号, pp.69–70 (1999).
- [27] 岡村定矩: 見え始めてきた銀河の進化; *UP (東京大学出版会)*, Vol.329, pp.22–29 (1999).
- (学位論文)
- 小宮山 裕: Photometric Properties of the Dwarf Galaxy Population in the Coma Cluster of Galaxies (著書)
- [28] 岡村定矩: 銀河系と銀河宇宙; 東大出版会 (1999).
- [29] 岡村定矩: こよみ; 東京大学公開講座 70; 東大出版会 (共著) (1999).
- [30] 岡村定矩: 天文学の 20 世紀; 朝日選書 627; 朝日新聞社 (共著) (1999).
- [31] 岡村定矩: 理科年表 2000; 丸善 (共著) (1999).
- [32] 川崎渉: 天文年鑑 2000 年版; 誠文堂新光会 (共著) (1999).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [33] Okamura, S.: Dwarf Galaxy Population in the Coma Cluster from a Large Spectroscopic Sample; The Birth and Evolution of the Universe, 4th RESCEU Symposium, Univ. Tokyo, 1999/11/16-19.
- [34] Ouchi, M., Doi, M.: High Redshift Type Ia Supernova Search with the Wide Field Camera of SHOUT and Subaru Prime Focus Camera; Space Factory on JEM/ISS; Tsukuba Space Center of Tsukuba, 1999/6/7-9.
- [35] Shimasaku, K.: Evolution of the Blue Luminosity-to-Baryon Mass Ratio of Clusters of Galaxies; The Birth and Evolution of the Universe, 4th RESCEU Symposium, Tokyo 1999/11/16-19
- [36] Kodama, T.: Global Star Formation History in Cluster Environment; Physics of Galaxy Formation; Univ of Tsukuba, 1999/12
- [37] Kodama, T.: Photometric Butcher-Oemler Effect Revisited; TMR Network Annual Meeting: Galaxy Formation and Evolution; Asiago, Italy, 1999/9.
- [38] Kodama, T., Bell, E. F., Bower, R. G.: Identification of High Redshift Clusters Using Photometric Redshifts; Photometric Redshifts and High Redshift Galaxies; Pasadena, USA, 1999/4.
- [39] Kawasaki, W.: The APM/Matched-Filter Cluster Catalog; IGRAP99 International Conference; Clustering at High Redshift; Institut Gassendi pour la Recherche Astronomique en Provence (IGRAP), Marseille, France, 1999/06/29-07/02.
- [40] Furusawa, H.: New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF; The Birth and Evolution of the Universe, 4th RESCEU Symposium, Univ. Tokyo, 1999/11/16-19.

- [41] Nakata, F., Miyazaki, S., Kimura, M., and Sekiguchi, M.: CCD Mosaicing Technique for Suprime-Cam (SUbaru PRIME focus CAMera); 4th ESO CCD Workshop, Optical Detectors for Astronomy, European Southern Observatory (Munche,n,Germany), 1999/9/13-16.

## 招待講演

(国内会議)

## 一般講演

- [42] 岡村定矩: 「すばる」を用いた銀河団観測, 「第 12 回理論天文学懇談会シンポジウム」, 国立天文台, 1999/12/20-22.
- [43] 土居 守: 銀河形態分類, 天文学ソフトウェア開発シンポジウム, 国立天文台, 1999/11/30-12/2.
- [44] 土居 守: ダイクロイック・ミラー型カメラの活用, 大風呂敷研究会, 国立天文台, 1999/12/16.
- [45] 土居 守: Sloan Digital Sky Survey and GAO telescopes, ぐんま天文台における天体物理学, ぐんま天文台, 2000/2/28-29.
- [46] 嶋作一大: SuprimeCamを用いた宇宙論的研究, 「第 12 回 理論天文学懇談会シンポジウム: すばる望遠鏡時代における理論天文学の展望」, 国立天文台, 1999/12/20-22.
- [47] 児玉忠恭: 遠方銀河団のサイエンス, すばる望遠鏡主焦点ファイバー多天体分光器 FMOS ワークショップ, 国立天文台, 1999/12/17.
- [48] 児玉忠恭: 銀河団銀河の進化, 第 12 回理論天文学懇談会シンポジウム, 国立天文台, 1999/12/20-22.
- [49] 川崎 渉: Matched Filter: すばるによる超遠方銀河団の探索を目指して, 第 9 回観測天文学ソフトウェア開発シンポジウム」国立天文台, 1999/11/30-12/2.
- [50] 仲田史明: Suprime-Cam のデータ解析, 第 9 回天文学ソフトウェア開発シンポジウム, 国立天文台, 1999/11/30-12/2.
- [51] 仲田史明, 大内正己: Subaru Deep Survey の follow-up 観測, すばる望遠鏡主焦点ファイバー多天体分光器 FMOS ワークショップ, 国立天文台, 1999/12/17.
- [52] 仲田史明: すばる主焦点広視野カメラ「Suprime-Cam」, 天文情報処理研究会第 40 回会合「大フォーマット CCD 素子の現況と将来」, 木曾勤労者福祉センター, 2000/2/21-22.
- [53] 仲田史明, 古澤久徳, 大内 正己: Study for High-z Objects from SPDS and WFCAM images, すばる・UKIRT Wide Field Survey ミーティング, 国立天文台, 2000/2/24.
- [54] 古澤久徳: Photometric redshift 法のレビュー, 天文学ソフトウェア開発シンポジウム, 国立天文台, 1999/11/30-12/2
- [55] 大内 正己: Suprime-Cam による High-z Ly  $\alpha$  源探査案について, 第 10 回光赤外線ユーザーズミーティング, 国立天文台, 1999/10/26-28.

- [56] 大内 正己: Subaru Deep Survey の follow-up 観測 II, すばる望遠鏡主焦点ファイバー多天体分光器 FMOS ワークショップ, 国立天文台, 1999/12/17.

- [57] 大内 正己: Suprime-Cam Narrowband filter で探る原始銀河, 原始銀河団候補天体, 第 12 回理論天文学懇談会シンポジウム, 国立天文台, 1999/12/20-22.

## 招待講演

- [58] 岡村定矩: 暦と天文学; 暦の科学的基礎; 東京大学公開講座 No.70, 東京大学安田講堂, 1999/4/10.

- [59] 岡村定矩: 新しい宇宙像とすばる望遠鏡; 東北理科大学教育研究大会, 米沢市民会館, 1999/10/7.

- [60] 岡村定矩: 超広視野カメラがねらうもの; 朝日カルチャーセンター横浜, 1999/11/20.

## (セミナー)

- [61] 岡村定矩: ‘動き出した大規模銀河探査計画; 名古屋大学+名古屋市科学館公開セミナー, 1999/8/16-18.

- [62] 唐牛 宏, 岡村定矩: すばるでどこまで宇宙が見えてくるか; 第 6 回土曜セミナー, 大学セミナーハウス, 1999/12/4.

## 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・折戸・田代・吉村)

### 7.1 反物質探査

#### 7.1.1 高エネルギー電子・陽電子衝突装置 LEP による実験

世界最高エネルギーの  $e^+e^-$  衝突型加速器 LEP を用いて, 素粒子の構造と相互作用を調べ, 未知の素粒子現象を探る研究を, 素粒子物理国際研究センターと共同で行なっている (OPAL 国際共同実験)。

1989 年に重心系エネルギー 90 GeV 近辺で実験を開始して以来, 弱い相互作用を媒介するゲージ粒子である  $Z^0$  粒子の観測を通して, 「統一ゲージ理論 (標準理論) の精密検証」, 「クォーク・レプトン群の世代数の決定」, 「大統一理論の検証」等を行ってきた。

今年度は, 加速器の調整が順調に行なわれた為, 衝突エネルギーを前人未踏の 202 GeV まで増強すると同時に, 昨年度を大きく上回る積算ルミノシティ  $225\text{pb}^{-1}$  相当のデータを, 91% を越える高い効率で収集することができた。この大量のデータを用いて, 以下の主要な研究成果が得られた [3]–[40]。

##### ○ $W^\pm$ 粒子の精密測定による統一ゲージ理論の検証

$W^\pm$  粒子は,  $Z^0$  粒子と並んで「弱い力」を伝達するゲージ粒子である。今年度に観測された約 4000 例の  $W^+W^-$  対生成事象を含めて行なった質量の直接測定結果 ( $M_W = 80.446 \pm 0.051 \pm 0.039$  GeV) と, LEP で精密測定された  $Z^0$  粒子の種々の観測量を合わせて, 統一ゲージ理論の整合性を極めて高い精度で検証した。

##### ○ ヒッグス粒子の探索

粒子質量の起源を探ることは, 現在の素粒子物理学における最重要課題である。ヒッグス粒子は, 真空に凝縮していると考えられるスカラー場の直接の証拠となるものであり, その存否及び質量値は今後の

素粒子物理の方向を定める重要な情報となる。電子・陽電子衝突ではヒッグス粒子を極めて明確に検出できると考えられる。現在, 標準理論的なヒッグス粒子探索においては LEP の 4 実験を併せて質量下限値 110 GeV を得ている。

##### ○ 超対称性粒子の探索

LEP に於けるゲージ理論の精密検証の結果, 超対称性による力の大統一の可能性が示唆された。この超対称性は, 重力まで統一する理論として最も有望視されているものであり, LEP で発見が可能な領域の近くに, 多くの新粒子の存在を予言している。これらの新粒子の兆候は発見されなかったが, 超対称性理論のパラメータ, 特に, 宇宙の暗黒物質の有力な候補である中性のニュートラリーノの質量について強い制限を与えることができた。

2000 年度には, 更に衝突エネルギーを上げるため, 電磁カロリメータシステムの保守点検の体制強化と, 測定器の運転とデータ解析の準備を進めている。

#### 7.1.2 線型電子・陽電子衝突装置 JLC (Japan Linear Collider) 計画

LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず, 更に, 強い相互作用をも統一する大統一理論, 及び超対称性の正しさを示唆している。もしこれが正しいとすれば, 理論は 130 GeV 以下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言しており, また超対称性粒子があまり高くないエネルギーに存在する可能性が高い。

この認識に立つて, 当研究室は 1992 年に LEP の先のエネルギーフロンティアを開く 300~500 GeV の直線型  $e^+e^-$  衝突装置が, 「軽いヒッグス粒子の検出とその性質の精密測定」及び「超対称性粒子の探索」を通じて, 21 世紀の素粒子物理学の方向を決定する可能性が高いことを指摘し, JLC の早期建設を提案した。今年度も JLC に於ける物理及び測定器の検討を継続し, その実現に向けて全国の研究者と共に努力を重ねた。

#### 7.1.3 気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙粒子線の観測

宇宙線反陽子等の観測を通して, 「宇宙における素粒子現象」を探求する実験を, 高エネルギー加速器研究機構・神戸大学・宇宙科学研究所・米国防航空宇宙局 (NASA) と国際共同で行なっている。

加速器技術で培った最先端の技術を駆使して設計・製作された BESS 測定器は, 超伝導ソレノイド・飛跡検出器・高性能粒子識別装置・並列処理型高速データ収集システムで構成され, 同種の測定器では世界最大級の大面積立体角を有し, 0.2~150 GeV の広いエネ

ルギー領域を同時に高精度で測定できるという、これまでの飛翔体観測器に無い特長を備えている。この特長を生かして、「陽子・ヘリウム・電子等の各種宇宙粒子線」の絶対流束及びスペクトラムを精密に測定すると同時に、「反陽子・反ヘリウム等の反粒子」を極微量まで探索している。

宇宙線中の反陽子は、その大部分が宇宙線陽子と星間物質の衝突によって二次的に生成されると考えられている。この様な衝突反応を起源とする反陽子のスペクトラムは、2 GeV 付近にピークを持つ特徴的な形をしていると予想される。特に、1 GeV 以下の低エネルギー領域の流束は、相対論的な運動学により生成が制限される。

一方、「宇宙初期に作られた原始ブラックホールの Hawking 輻射」、あるいは「暗黒物質の候補である超対称性粒子の対消滅」などといった宇宙論的・素粒子物理学的に興味ある現象が仮に存在したとすると、低エネルギーの反陽子を生成すると考えられている。従って、低エネルギー反陽子はこれらの未知現象の兆候を探査するのに絶好の場所であるが、その期待される流束は微少で検出は困難であった。

しかしながら我々は、大面積かつ高感度な BESS 測定器を用いて、1993,94 年度に質量の同定という確実な方法で 8 例の反陽子を検出することに成功し、低エネルギー反陽子の存在を世界で初めて確認した。'95 年度には飛行時間分解能の向上により 0.2~1.4 GeV のエネルギー領域で 43 例の反陽子を明瞭に観測した。

'97 年から'98 年に至る間、エアロジェルチェレンコフカウンターの搭載等、更なる改良を加え、'97 年には 0.2~3.5 GeV のエネルギー領域に、'98 年には更に広い 0.2~4.5 GeV の領域に、各々約 420 例の反陽子の観測に成功した。

'98 年までに得られたデータの詳細な解析により、これまでの実験と比較して圧倒的に優れた精度で反陽子のスペクトラムを得た。その結果、「衝突起源の反陽子」から期待される 2 GeV 付近の特徴的なピークを世界で初めて検出した (図 7.1 a)。

#### ○ 低エネルギー反陽子の起源の探求

測定された反陽子スペクトラムを検証すると、1 GeV 以下の低エネルギー領域では、予想される「衝突起源の反陽子」の曲線に比べて、若干の過剰を示しているようにも見る事ができる。これは、あるいは、前述の「原始ブラックホールの Hawking 輻射」等の未知過程からの低エネルギー反陽子の存在を示唆しているのかも知れない。

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、その影響は低エネルギーの宇宙線ほど大きい。従って、今後予想される太陽活動の活発化に伴う、スペクトラムの変化を利用することで、観測された低エネルギー側の若干の過剰が、未知過程の兆候であるのか、或は「衝突起源の反陽子」の曲線を計算する際に用いた宇宙線伝搬モデルに変更を加えるものであるのか、決定できる可能性がある。

従って我々は、太陽が活動の極大期に向かう今年度のスペクトラムを測定し、極小期からの変化を観測

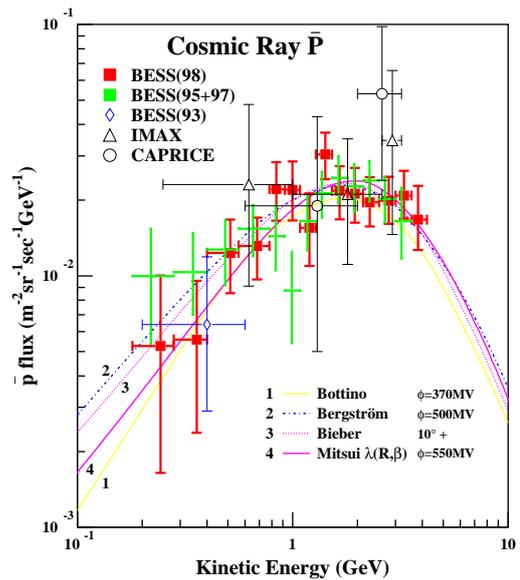


図 7.1 a: 宇宙線反陽子のエネルギースペクトラム

すべく、今年度の飛翔実験に臨んだ。

今年度の飛翔実験は 7 月カナダ・リンレークにおいて実施され、NASA の大型気球により高度約 37km の高空に上げられた BESS 測定器は、約 34 時間の飛行中完全に動作した。このデータにより約 700 例の反陽子を明瞭に検出し、現在、スペクトラムの太陽活動極小期からの変化を見出すべく解析を進めている (図 7.1 b)。

#### ○ 反陽子ビームによる反陽子検出効率の直接測定

1995 年には 43 例であった反陽子事象は、'97 年から'99 年のフライトで約 1600 例へと飛躍的に増加し、BESS 実験における反陽子エネルギースペクトラムの測定は今や精密測定となっている。従って、系統誤差の主要因となっている反陽子検出効率の不定性を改善することが、非常に重要かつ急務である。

この状況を踏まえて、KEK-PS 東カウンターホール K2 ビームラインにおいて、反陽子ビームによる BESS 測定器のビームテストを行なった。このビームテストのポイントは、BESS 測定器に入射する粒子を確実に識別することであり、そのために 30ps の時間分解能をもつトリガーカウンタ、位置測定用のドリフトチェンバー、反陽子識別用小型エアロジェル・カウンタをビームラインに設置した。これにより、0.6~1.67 GeV の運動量領域の反陽子・陽子・ $\pi$  粒子・ヘリウムなどを入射し、大量のデータを取得した。

結果は解析中であるが、反陽子の検出効率を各エネルギーに対して直接かつ精密に求め、系統誤差を 5%まで下げることができると期待される。

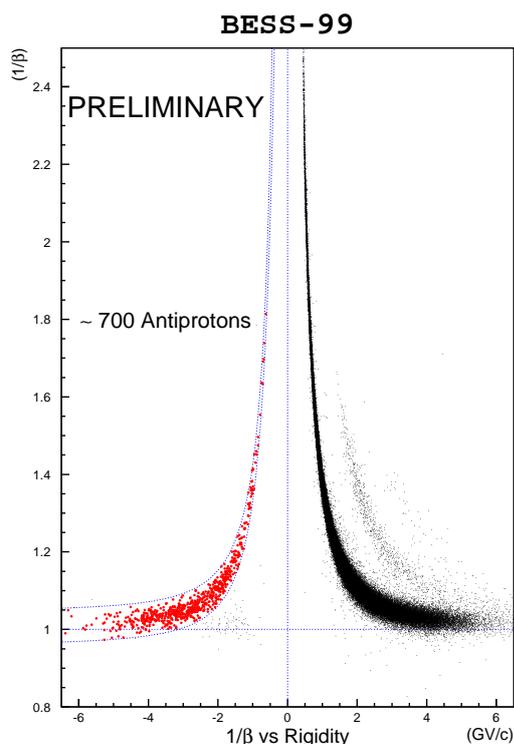


図 7.1 b: 反陽子の識別 ('99 年データ)

#### ○ 山頂高度における宇宙線観測

1998 年 6 月, スーパーカミオカンデ実験はニュートリノ振動が起こっている確実な証拠を世界で初めて発表した. この解析には大気ニュートリノの絶対流束の理論計算値が使われているが, 大気シャワーの発展の様子が正確に理解されていないために不定性を持っている.

そこで我々は, 大気シャワー問題の解決を目標に, 宇宙線研究所附属乗鞍観測所 (標高 2700m, 気圧 720mb) に於いて宇宙線の観測を行なった. この実験は, BESS 測定器の特徴である, 大面積・大立体角を持ち, 広いエネルギー領域を同時に高精度で測定でき, かつ運搬可能であるという点を最大限に生かしたものである. 実験は 1999 年 9 月に行なわれ 5 日間で  $2 \times 10^7$  イベントを観測した.

結果は解析中であるが, 山頂高度での反陽子を実質世界で初めて, しかも約 200 例も精密に測定するなどの成果を既にあげている.

なお, この実験は宇宙線研究所の共同利用研究に採択されたものである.

#### ○ 宇宙起源反ヘリウムの探索

現在我々の知る宇宙が物質優勢であるのは, ビッグバン直後に起きた物質・反物質の対称性の破れの結

果として解釈されている. しかし, もしこの破れが局所的に起こったと考えれば, 宇宙が物質と反物質の領域に分かれたドメイン構造をしている可能性もあり得ると指摘されている. 反ヘリウムは通常の宇宙線と星間ガス等との衝突反応で作られる確率は極めて低く, もし一例でも観測されれば, 初期宇宙にその起源を求めざるを得ない. また反ヘリウムは負の電荷をもっているため, 実験的に極めて明確に粒子識別可能である.

今年度に行なわれた飛翔実験のデータを解析し, その中に反ヘリウムイベントを探したが, 一例も見つけることは出来なかった. これにより, 98 年までのデータも含めて  $\overline{\text{He}}/\text{He}$  比の上限  $9 \times 10^{-7}$  を得た. これは現在世界で最も感度の高い上限である. これにより, 我々の銀河およびその周辺の宇宙が物質のみからできていることの最も直接的な証拠を得た (図 7.1 c).

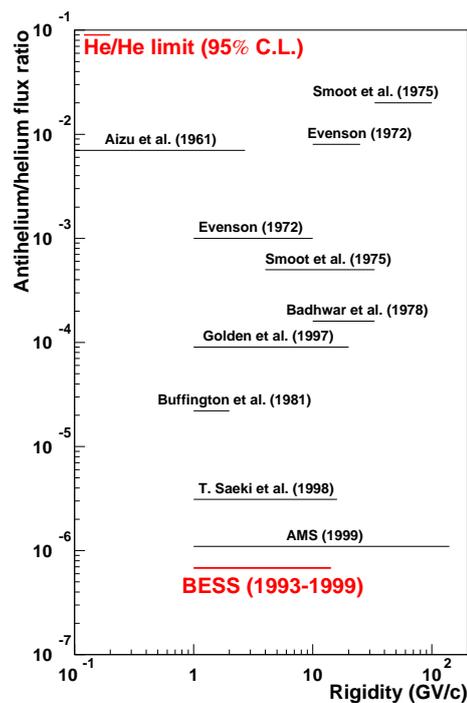


図 7.1 c: ヘリウムに対する反ヘリウムの流束比

#### ○ 低エネルギー陽子のスペクトラム測定

陽子・ヘリウム等の一次宇宙線の絶対流束は, 宇宙線の基礎データであるにもかかわらず, BESS 実験以前の測定値には 40% 近くの食い違いがあったが, BESS 実験は, これらを 0.2~150 GeV の広い領域に渡って精度よく測定することを可能にした.

しかし, 太陽系内の宇宙線は太陽活動の影響を受けるため, より精密な議論のためには, 太陽活動の影響を正確に理解する必要がある. 中でも, 影響を受け易い低エネルギー陽子の大气頂上での流束の測定が求められる. ところが, 宇宙線陽子が大气圏内に入射

すると、大気中の原子核と様々に相互作用し、その流束は複雑に変化する。我々の上空での測定も当然、約  $5\text{g}/\text{cm}^2$  の残留大気の影響を受け、特に低エネルギー領域で変化は顕著になる。

この大気の影響を正しく理解し、大気頂上での流束をより高い精度で決定するため、今年度は、地上から上空まで測定器が上昇する最中に、低エネルギーの陽子を選択的に採取した。これにより、低エネルギー陽子の各大気深度での流束変化を、連続的かつ従来の約 30 倍の統計精度で測定することに成功した。

結果は解析中であるが、双方の影響をモデル化し、総合的な知見が得られることが期待される。

### ○ 宇宙線 $e/\mu$ 粒子の観測

陽子・ヘリウムなどの一次宇宙線のエネルギースペクトラムは BESS 実験などにより、近年精密に測定されるようになったが、大気ニュートリノの絶対強度の理論的な推定には、ハドロン相互作用や大気構造などによる不確定性が依然として残っており、地上から上空に至る各高度での大気  $e/\mu$  粒子の精密な測定は、大気ニュートリノの理論計算において絶対強度の不確定さを改善するために重要なデータである。

今年度は宇宙線中の  $e^\pm$  と  $\mu^\pm$  成分を識別するため、シャワーカウンターを新たに開発し、BESS に搭載した。シャワーカウンターは、電磁シャワーを発生させる鉛と、その二次粒子を観測するアクリルチェレンコフカウンターで構成されており、 $e^\pm$  と  $\mu^\pm$  がアクリルで発生させる光量の違いを利用して  $e/\mu$  の識別を行なう。

結果は現在解析中であるが、地上・上昇中・上空のデータに乗鞍山頂での結果を加え、大気シャワー問題の解決を図っていく予定である。

### ○ 中重原子核の観測、ストレンジ・マターの探索

宇宙線中の多電荷原子核である、ベリリウム・ホウ素・炭素・鉄などの原子核成分の絶対流束や同位体比を求めることは、宇宙線の伝搬モデルを決定する上で重要である。また、宇宙初期のハドロン相転移の名残として「ストレンジ・マター」が存在し得ることが指摘されており、電荷  $Z \sim \mathcal{O}(10)$  の粒子として宇宙線中に観測できる可能性がある。

今年度は、これら多電荷粒子に対する測定精度の向上を目的とした測定器を新たに開発し、BESS に搭載した。測定器は 2 層構造で、プラスチックシンチレータとアクリルチェレンコフカウンターで構成されており、チェレンコフカウンターはシャワーカウンターと兼用になっている。また、1 イベント当たりの許容データ量を拡大する等データ収集系を改良し、多電荷粒子の検出効率を改善した。これにより、BESS 実験において実質初めて多電荷粒子の測定を行なった。

解析は現在進行中であるが、電荷  $3 < Z < 26$  の広範囲に渡って主要宇宙線原子核の絶対流束を求めることができるの見通しを得た。また、チェレンコフカウンターを用いてホウ素や窒素の同位体比を求める

方法を得た。ストレンジ・マターに関しては、'99 年度のデータ中には、候補となるイベントを見つけることはできなかった。

### ○ BESS-TeV 計画

大気ニュートリノの理論計算における不定性を更に改善するには、一次宇宙線の絶対流束を 500 GeV 付近まで精密に測定する必要がある。現在の BESS の運動量測定精度は 100 GeV の粒子に対して約 50% であり、また、100 GeV 以上の宇宙線については、今までの測定結果には不定性がある。

そこで測定可能領域を 1TeV 付近まで拡大した測定器を新たに開発し、2001 年度に実験を行なうことを計画している。今年度は、BESS 測定器の最外層に搭載する新しい飛跡検出器の開発、及びデータ収集系エレクトロニクスの改良などを行なった (図 7.1 d)。

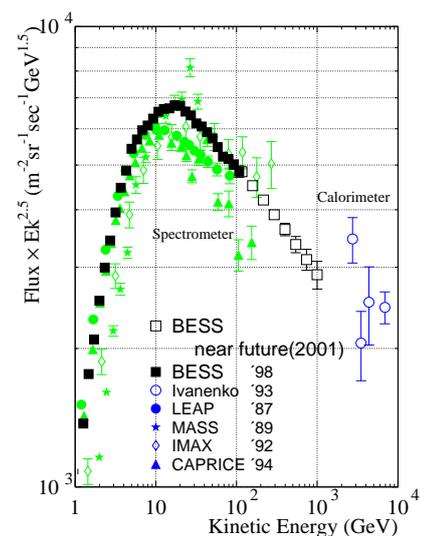


図 7.1 d: BESS-TeV 計画で期待される陽子スペクトラム

### 7.1.4 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験の検討

LEP のデータは超対称性と大統一を導入することによって、現在の統一ゲージ理論の枠組みを用いて  $10^{17} \sim 10^{19}$  という遙かに高いエネルギーまで素粒子の相互作用を記述できるという驚くべき可能性を示唆している。この「超対称性大統一」の大筋がもし正しければレプトンフレーバー保存を破る  $\mu$  粒子の希崩壊  $\mu \rightarrow e\gamma$  が  $\mu$  の通常崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ ) の  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  程度、即ちこれまでの実験で得られた上限の数十分の 1 から数百分の 1 という非常に稀な確率で起こる可能性が高いことが指摘されている。

またスーパーカミオカンデにより報告されたニュートリノ振動は、ニュートリノが極微の質量を持ち、二

ニュートリノのレプトンフレーバ保存の破れが存在することを意味する。この起源は超高エネルギーの素粒子現象にあるものと思われるが、ニュートリノ振動の発見を越えてその起源を解明するにはレプトンフレーバ保存を破る他の過程である  $\mu \rightarrow e\gamma$  からの情報が鍵になる。

当研究室では 95 年からこれに注目し、スイス国立 PSI 研究所の、 $3 \times 10^8 \text{sec}^{-1}$  という世界最強の  $\mu^+$  ビームを使った新しい  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索実験の可能性を検討してきた。昨年 7 月、これまでの R&D に基づき PSI 研究所に実験の提案書を提出して受理され、東京大学、早稲田大学、高エネルギー加速器研究機構、ロシア Budker 研究所、PSI 研究所の国際共同実験として正式にプロジェクトがスタートした。現在、2003 年の実験開始に向けて各測定器の R&D と詳細設計を進めている。

$\gamma$  線検出器として、約  $1\text{m}^3$  の液体 Xenon からのシンチレーション光を約 1000 個の光電子増倍管で捉える測定器を新たに考案し、昨年度より R&D を行なっている。本年度は、32 本の光電子増倍管を使ったプロトタイプを液体 Xe 中で作動させ、各種  $\gamma$  線源を使って時間分解能を測定した。320keV $\sim$ 1.8MeV の低エネルギー領域で得られた時間分解能はシミュレーションから予測される値とよく一致しており、52.8MeV の  $\gamma$  線に対して要求されている 50psec の時間分解能が得られることを確認した。

また、 $e^+$  のタイミング測定用カウンタのプロトタイプを製作し、高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンを用いて性能評価を行った。0.5 GeV/c の陽子に対して 21 psec の時間分解能が得られ、 $\gamma$  線検出器とともに、アクシデンタル等のバックグラウンドを克服して、 $10^{-14}$  までの  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索に十分な性能を持つことを示した。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] S. Orito, T. Maeno, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 1078-1081
- [2] Y. Ajima, K. Anraku, T. Haga, Y. Higashi, H. Honda, M. Imori, S. Inaba, N. Kimura, M. Kobayashi, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Motoki, M. Nozaki, Y. Nishihara, J. Nishimura, S. Orito, M. Otoba, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, K. Shimamura, J. Suzuki, K. Suzuki, N. Takimi, K. Tanaka, T. Tsunoda, I. Ueda, T. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, H. Yamaoka, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Superconducting Solenoidal Spectrometer for a

Balloon-Borne Experiment, Nucl. Instr. and Methods **A443** (2000) 71-100

- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Acoplanar Lepton Pair Events in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}=161,172$  and  $183$  GeV, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 551-565
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Average Polarization of b Baryons in Hadronic  $Z^0$  Decay, Phys. Lett. **B444** (1998) 539-554
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Chargino and Neutralino Production at  $\sqrt{s}=181-184$  GeV at LEP, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 255-272
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of  $R_b$  using a Double Tagging Method, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 217-239
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Anomalous Photonic Events with Missing Energy in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}=130,136$  and  $183$  GeV, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 23-40
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Semileptonic Branching Ratio of Charm Hadrons produced in  $Z^0 \rightarrow cc$  Decays, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 573-584
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. :  $W^+W^-$  production and triple gauge boson couplings at LEP energies up to  $183$  GeV, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 191-215
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at  $183$  GeV, Eur. Phys. J. **C7** (1999) 407-435
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Bose-Einstein Correlations in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at  $172$  and  $183$  GeV, Eur. Phys. J. **C8** (1999) 559-571
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Baryon and Lepton Number Violating  $Z^0$  Decays, Phys. Lett. **B447** (1999) 157-166
- [13] The OPAL collaboration G. Abbiendi et al. : A Measurement of the  $\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}$  Branching Ratio, Phys. Lett. **B447** (1999) 134-146
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of the Product Branching Ratio  $f(b \rightarrow \Lambda_b) \cdot BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_X)$  in  $Z^0$  Decays, Eur. Phys. J. **C9** (1999) 1-9
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the  $B^+$  and  $B_0$  Lifetimes and Search for CP(T) Violation using Reconstructed Secondary Vertices, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 609-626
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Colour reconnection studies in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at  $\sqrt{s}=183$  GeV, Phys. Lett. **B453** (1999) 153-168

- [17] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the W Mass and Width in  $e^+e^-$  Collisions at 183 GeV, Phys. Lett. **B453** (1999) 138-152
- [18] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Searches for R-Parity Violating Decays of Gauginos at 183 GeV at LEP, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 619-642
- [19] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Intermittency and Correlations in Hadronic  $Z^0$  Decays, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 239-250
- [20] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurements of the QED Structure of the Photon, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 409-425
- [21] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Experimental Properties of Gluon and Quark Jets from a Point Source, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 217-238
- [22] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Scalar Top and Scalar Bottom Quarks at  $E_{CM}=189$  GeV at LEP, Phys. Lett. **B456** (1999) 95-106
- [23] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for R-parity Violating Decays of Scalar Fermions at LEP, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 1-24
- [24] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Test of the Flavour Independence of  $\alpha_s$  Using Next-to-leading Order Calculations for Heavy Quarks, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 643-659
- [25] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurements of inclusive semileptonic branching fractions of b hadrons in  $Z^0$  decays, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 225-240
- [26] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Higgs Boson and Other Massive States Decaying into Two Photons in  $e^+e^-$  Collisions at 189 GeV, Phys. Lett. **B464** (1999) 311-322
- [27] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of  $B_s^0$  Meson Oscillation Using Hadronic  $Z^0$  Decays Containing Leptons, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 587-598
- [28] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Multi-photon production in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s}=189$  GeV, Phys. Lett. **B465** (1999) 303-314
- [29] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Production Rate of Charm Quark Pairs from Gluons in Hadronic  $Z^0$  Decays, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 1-13
- [30] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Neutral Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}\sim 189$  GeV, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 567-586
- [31] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Tests of the Standard Model and Constraints on New Physics from Measurements of Fermion-pair Production at 189 GeV at LEP, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [32] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for pair-produced leptoquarks in  $e^+e^-$  interactions at  $\sqrt{s}=183$  GeV, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 15-27
- [33] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of Three-Prong Tau Decays with Charged Kaons, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 197-212
- [34] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Anomalous Production of Acoplanar Dilepton Events in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [35] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Chargino and neutralino Production at  $\sqrt{s}=189$  GeV at LEP, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [36] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the  $W^+W^-$  gamma Cross-section and First Direct Limits on Anomalous Electroweak Quartic Gauge Couplings, Phys. Lett. **B471** (1999) 293-307
- [37] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Tau decays with Neutral Kaons, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 213-223
- [38] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Unstable Heavy and Excited Leptons at LEP2, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [39] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Z Boson Pair Production in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, Phys. Lett. **B476** (2000) 256-272
- [40] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for New Physics in Rare B Decays, Phys. Lett. **B476** (2000) 233-242
- (会議抄録)
- [41] J.Z. Wang, E.S. Seo, K. Anraku, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Measurement of Cosmic-Ray H and He Isotopes in a Series of Annual Balloon Flights, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 37-40
- [42] K. Yoshimura, T. Maeno, S. Orito, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, J.Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto and T. Yoshida : Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in the Energy Range 0.18 to 3.56 GeV at Solar Minimum, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 81-84

- [43] M. Nozaki, M. Sasaki, T. Saeki, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, S. Orito, J. Ormes, T. Sanuki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, J.Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Search for Antihelium down to  $10^{-6}$  Relative to Helium, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 85-88
- [44] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E.S. Seo, J.Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, M. Sasaki, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton Spectrum with BESS Spectrometer, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 93-96
- (学位論文)
- [45] T.Maeno : "Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum", 2000 年 3 月, (博士論文)
- [46] 泉康介 : 「BESS 測定器による低エネルギー領域における宇宙線陽子流束の測定」, 2000 年 3 月, (修士論文)
- [47] 福家英之 : 「BESS 実験による宇宙線ストレンジ・マターの探索」, 2000 年 3 月, (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [48] BESS Collaboration, J.Z. Wang : "Measurement of Cosmic-Ray H and He Isotopes in a Series of Annual Balloon Flights", Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [49] BESS Collaboration, K. Yoshimura : "Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in the Energy Range 0.18 to 3.56 GeV at Solar Minimum", Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [50] BESS Collaboration, M. Nozaki : "A Search for Antihelium down to  $10^{-6}$  Relative to Helium", Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [51] BESS Collaboration, T. Sanuki : "A Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton Spectrum with BESS Spectrometer", Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [52] K. Yoshimura : "Recent result of the BESS experiment", The 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe" (Nov. 1999) Tokyo
- (国内会議)
- 一般講演
- [53] 大和一洋 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験における環境モニターシステムの開発」, 日本物理学会 (1999 年 9 月) 島根大学
- [54] 佐賀智行 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - 陽子流束測定結果」, 日本物理学会 (1999 年 9 月) 島根大学
- [55] 松本浩 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - ヘリウム流束測定結果」, 日本物理学会 (1999 年 9 月) 島根大学
- [56] 浅岡陽一 : 「反陽子ビームによる BESS 測定器反陽子検出効率の直接測定」, 日本物理学会 (1999 年 9 月) 島根大学
- [57] 安部航 : 「BESS99 実験経過報告」, 日本物理学会 (1999 年 9 月) 島根大学
- [58] 吉村浩司 : 「乗鞍観測所における超伝導スペクトロメータを用いた宇宙線観測実験」, 宇宙線研究所共同利用研究発表会 (1999 年 12 月) 宇宙線研究所
- [59] 志風義明 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - BESS-99 実験経過 -」, 大気球シンポジウム (1999 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [60] 山本康史 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - シャワーカウンターの性能評価 -」, 大気球シンポジウム (1999 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [61] 元木正和 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - 実験結果 -」, 大気球シンポジウム (1999 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [62] T.Sanuki : "Primary Cosmic Ray Flux", Workshop of "Neutrino Oscillations and Their Origin" (Feb. 2000) Fuji-Yoshida
- [63] M.Motoki : "A Precise Measurement of the Flux of Atmospheric Muons", Workshop of "Neutrino Oscillations and Their Origin" (Feb. 2000) Fuji-Yoshida
- [64] 前野忠嗣 : 「気球搭載型超伝導スペクトロメータ (BESS) による宇宙起源反陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- [65] 佐々木誠 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - 宇宙起源反ヘリウムの探索 ('93-'99)」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- [66] 灰野禎一 : 「BESS による TeV 領域一次宇宙線強度精密測定のための測定器の開発」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- [67] 藤川元治 : 「BESS 測定器を用いた山頂高度での宇宙線観測」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- [68] 山本康史 : 「BESS 搭載型シャワーカウンターによる宇宙線ミュオン観測」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- [69] 福家英之 : 「BESS 実験による宇宙線ストレンジ・マターの探索」, 日本物理学会 (2000 年 3 月) 近畿大学
- 招待講演

- [70] 浅岡陽一: 「BESS におけるチェレンコフ光を用いた宇宙線粒子識別」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [71] 吉田哲也: 「BESS 実験の最近の成果と将来展望」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学 (セミナー)
- [72] 吉田哲也: 「気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の探索」, 青山学院大学理工学部物理学科コロキウム (1999年11月) 青山学院大学

## 7.2 X線, $\gamma$ 線観測

### 7.2.1 「あすか」 GIS 装置の運用と較正

打ち上げ5年目に入った宇宙X線衛星「あすか」は、しだいに軌道高度が下がってはいけるものの、順調に稼働している。近地点高度は、打ち上げ当初の520 km から2000年4月現在で464 km に下がり、同じく遠地点高度はこの間に620 km から502 km へと低下してきた。我々の責任製作になる撮像型蛍光比例計数管 (GIS=Gas Imaging Spectrometer) は、ゲインのゆるやかな時間変動や、場所による相対的ゲインのわずかな変化はあるものの、まったく問題なく動作を続け、全世界に貴重なデータを供給し続けている。粒子バックグラウンドは昨年あたりまでは徐々に増加 (年間約4%) していた。これは軌道上で長い崩壊寿命をもつ放射性同位体が作られ蓄積してきたためと考えられる。今年度ありからは、軌道の低下を反映して、GISの粒子バックグラウンドは減少に転じている。

### 7.2.2 「あすか」による宇宙X線の観測

○ 近傍銀河の Kerr ブラックホール候補天体 近傍の多くの渦巻銀河の腕領域には、中性子星のエディントン限界を1~2桁もしのぐ謎の強いX線源 (ULX; Ultra-Luminous Compact X-ray Source) が存在する。牧島、水野、久保田らは昨年度に引き続き、ULXのX線スペクトルが標準降着円盤からの多色黒体放射で記述できること、よってULXはソフト状態にあるブラックホール連星であること、しかも大光度なのでそれらのブラックホールは、 $\sim 100 M_{\odot}$  の質量をもつことを、観測的に確立した [1][13][22] [35][42] [48][55]。古徳らは渦巻銀河 NGC 2403 に、ULX と系内ブラックホール連星との中間的な性質をもつ天体を確認した [54]。

ULX では円盤の温度が異常に高く、Schwarzschild ブラックホールと考えては矛盾が生じる。Kerr ブラッ

クホールだと、円盤内縁が中心により近づくことによる温度の上昇と、より強い相対論的效果とが競合するが、円盤が pole-on に近くない限り前者が勝ち、観測された高い円盤温度が説明できることが、水野により示された [35]。よって ULX は、Kerr ブラックホールである可能性が高い [1][13][22] [42] [55][62]。

2000年2月に行われた「あすか」による渦巻銀河 IC 342 の観測を1993年の結果と比べることで、決定的な証拠をえた。この銀河にある2つのULXのうち、一方 (Source 1) は1993年には図7.2 a のように、スペクトル的にソフト状態だったが、2000年にはハード状態に遷移していた。他方のULX (Source 2) のスペクトルは偶然、まったく逆の遷移を行っていた [62]。このような挙動は、銀河系内ブラックホール連星に固有であることから、ULX がブラックホール連星であることは確実に言ったと言える。

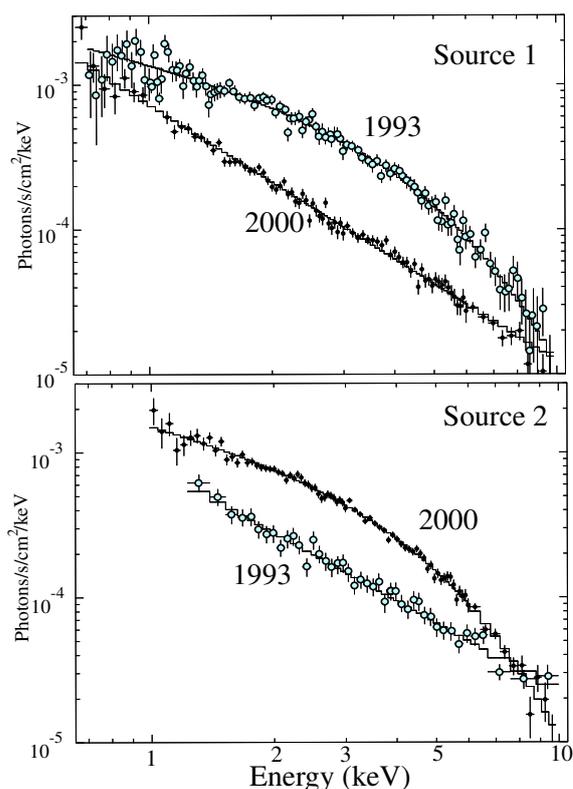


図 7.2 a: X-ray spectra of Source 1 (top) and Source 2 (bottom) of the spiral galaxy IC 342 obtained with ASCA, compared between the September 1993 and February 2000 observations. The data are corrected for the instrumental responses and photoelectric absorption. Thus, Source 1 made a spectral transition from the soft state to the hard state, *vice versa* for Source 2.

○ 標準降着円盤の検証 ブラックホールまわりの標準

降着円盤では、円盤の温度は半径の  $p = -3/4$  乗で中心に向け上昇し、円盤の内縁は最終安定軌道の位置で一定に保たれる。しかし光度がエディントン限界に近づくと、アドベクションの効果が効き、これらの性質が破れるであろう。水野らは「あすか」による ULX (上述) および銀河系内/大マゼラン雲のブラックホール連星のデータを詳しく調べた結果、3 個の ULX では、変動にともない円盤の見かけの内縁半径が、内縁温度にほぼ反比例して変化することを発見した。これはアドベクションが効いていることを示唆する [35]。

いっぽう久保田らは、これらの天体のスペクトルを、温度の指数  $p$  を変えて合成したスペクトルのモデルと比較したところ、ほぼ  $p = -3/4$  であることが確認され、アドベクションの効果が小さいという答を得た [21][49][61]。これら 2 つの結果は一見あい矛盾しており、今後さらなる研究が必要である。

### ○ ライン X 線の共鳴散乱効果の研究

昨年度、牧島、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ことで、ライン放射が異方性をもつ可能性を指摘した。今年度はさらに強磁場白色わい星の代表である AM Her の「あすか」データを解析し、磁極を上から見下ろすフェーズで、鉄ラインが強くなっている気配を発見した [60]。またヨーロッパの巨大 X 線衛星 XMM-Newton (1999 年 12 月に打ち上げ) では、この効果の確認をねらった寺田らの観測提案が採択され、観測を待っている。

### ○ 活動銀河核の変動のタイムスケール

伊豫本らは昨年度、構造関数とモンテカルロシミュレーションを用いることで、ひじょうにまばらな時系列データから、変動のパワースペクトルを推定する新しい方法を開発した [18] [40] [45]。ひき続き伊豫本、江副らはこの方法を発展させ、代表的な低光度 AGN である M81 の中心核の X 線強度と、たまたまその近くに見られる遠方のクエーサーの X 線強度を、6 年にわたって追跡した。その結果、2 つの天体の変動の特徴的な時間がともに数百日と長いことがわかった [40][64]。よって 2 つの中心核は、光度が 4-6 桁も異なるにもかかわらず、ほぼ同程度 ( $\sim 10^8 M_{\odot}$ ) の質量をもつと考えられる。これらの結果は、宇宙の進化とともにクエーサーの質量降着が減り、低光度 AGN になったことを示唆する。

### ○ ジェットをもつ活動銀河核の物理

田代、磯部、杉保らは、BL Lac 型天体 OJ287 からの X 線を、変動が激しくソフトなシンクロトロン放射と、変動が遅くハードなシンクロトロン自己コンプトン放射という、2 成分に分解することに成功した [6][8] [19][46] [63]。

電波ジェットの終端ローブで発生する逆コンプトン放射の研究も続けられた。ジェット中、ならびに

定衝撃波でローブが形成された時点では、粒子エネルギーは磁場エネルギーに勝っているようである。いっぽうローブの周辺にかけては、磁場が圧縮されるとともに粒子がエネルギーを失い、最終的には磁場の壁により粒子が閉じ込められていることがわかった [16] [32] [41] [44] [65]。磯部らは Centaurus A のローブのデータ解析に着手した。XMM-Newton 衛星では、逆コンプトン X 線の探査をねらった我々の 3 件の観測提案がすべて採択され、観測を待っている。

### ○ 銀河群からの X 線と粒子加速

中澤らは、木曾シュミット望遠鏡を用いて暗黒銀河団の候補である X 線源 RX J1833.6+6520 を光学観測し、光で検出限界以下の銀河まで考えると、必ずしも暗黒銀河団とは断定できない [17] [50]。

高橋らは小平 (天文台) と協力し、これまで X 線で研究されていなかった Shakhbazyan のコンパクト銀河群を「あすか」で観測し、3 つのうち 2 つ (SCGG202 および SCGG223) から X 線を検出した [56]。これらの銀河群は光ではきわめて大きな速度分散を示すが、X 線観測でえられた温度と光度は、他の銀河群のものと大差ないので、高い速度分散は銀河の運動が緩和していないことを示唆する。

昨年、深沢 (釜江研) の主導により発見された、銀河群からの広がった非熱的放射も、ひき続き研究されており、銀河群で定常的に粒子加速が起きている可能性が検討されている [47] [66]。牧島は、銀河がプラズマ中を運動することで生じる磁気乱流により、銀河の運動エネルギーがプラズマ加熱と粒子加速に費やされているという考えを発展させた [15] [39]。

### ○ 銀河団の中心における物理の総まとめ

牧島は深沢泰司 (釜江研)、大橋隆哉、松下恭子 (都立大)、池辺靖 (Max Planck)、江澤元 (天文台野辺山)、田村隆幸 (SRON/Utrecht)、徐海光 (上海交通大学) らと協力し、「あすか」で得られた銀河団の中心における物理の総まとめを進めた。要点は、(1) 銀河団の中心で重力ポテンシャルはカスプをもち [14]、さらに cD 銀河の影響でそこに階層的なポテンシャルの凹みができること [4][11]、(2) cD 銀河の周囲には重元素に富んだ低温プラズマが閉じ込められており [4]、それは固有の磁気圏を形成しているらしいこと、(3) この磁場のリコネクションにより、低温プラズマは熱的に安定に保たれ、さらに粒子加速が生じていること [15]、(4) そのエネルギー源は、cD 銀河が自己重力系として収縮したり、メンバー銀河が中心に落下するさいに解放するエネルギーで賄われること [15]、(5) 磁気圏をつき破った重元素はすみやかに銀河間空間に運ばれること [7] [12] [28] [29]、というものである。従来は銀河は化学的に閉じた系とみなされ、銀河団プラズマは放射冷却により中心に流れ込むとされていたが、「あすか」の観測により、そうした古い描像が一新されつつある [38]。とくに高温プラズマ中を銀河が運動することに伴う磁気流体効果に着目したことは、プラズマ物理学者から高い評価を受けた [27][39]。

### 7.2.3 硬X線検出器 (HXD) の開発

我々は ASTRO-E 衛星に搭載される4つの装置の一つとして、硬X線検出器 (HXD) を、釜江研、宇宙研、阪大核物理センターなどと共同で開発してきた。後述のように ASTRO-E は軌道投入を果たせなかったが、HXD の開発は無事に完了した。

#### ○ HXD-S 衛星搭載品の製作

HXD 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 [51] を組み合わせ、10–700 keV のエネルギー域を確保する。HXD-S は BGO/GSO フォスウィッチ構成、BGO のアクティブコリメーション、複眼型の検出器モジュール構成、BGO のアンチカウンタなどを用いることで、きわめて低いバックグラウンドを実現する [9]。HXD のアナログ電子回路部 (HXD-AE) は、100 チャンネルに及ぶ信号の並列処理を行うもので、衛星搭載の電子回路部としては、従来にない複雑さをもつ [10]。HXD アナログ電子回路部 (HXD-DE) は、HXD-AE からのデジタル信号に CPU 処理を施して情報の編集と圧縮を図るとともに、衛星と HXD 装置とのインタフェースを司る役目をもつ [24]。これら3つの衛星搭載コンポーネントは、いずれも 1999 年5月までに完成された [9][10]。

#### ○ HXD の単体較正試験

1999 年6月には、ほぼ1月を費やして、HXD の単体較正試験が宇宙研にて行われた。前半には HXD-S の熱真空試験 (HXD-AE は真空槽の外、HXD-DE はプロトモデルを使用) が行われ、真空中での動作が確認された。

ついで HXD-S を恒温槽 (大気中) で  $-20^\circ$  に保った状態で、外部の HXD-AE と接続し、基本的な動作および性能を確認した [10][52]。とくに図 7.2 b に示すように、PIN 検出器のエネルギー下限は設計目標である 10 keV を確保でき、また PIN 検出器も GSO 検出器も、目的とする低いバックグラウンドを達成することができた [37]。ついで検出器の正面からさまざまなアイソトープを照射することで、検出器のエネルギー応答 [53] [67] [59] [68] および角度応答 [23] [57] [70] が詳しく較正された。

最後に検出器を常温に置き、さまざまな方向からアイソトープを照射することで、アンチカウンタの応答を較正した [43] [58] [69]。

#### ○ 衛星上での各種試験

単体試験を終えた HXD 装置は 1999 年7月初め、宇宙科学研にて ASTRO-E 衛星に搭載された。以後は12月まで、衛星全体としての電氣的インタフェース試験、電磁干渉試験、熱真空試験、振動・衝撃試験など、打ち上げ前の一連の試験が行われた。この間、HXD-S の CFRP 遮光板を臭素を含まない素材に取り替え、AE のカレントリミタの感度を調整し、

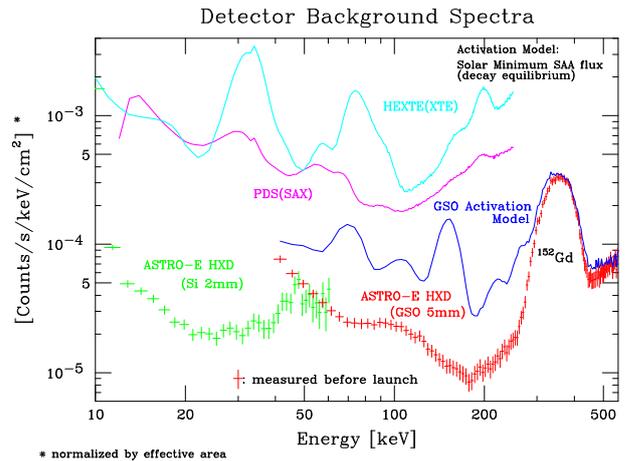


図 7.2 b: Room background spectra of the HXD experiment, taken in the pre-flight calibration at a temperature of  $-20^\circ$  and normalized to the effective area. The lower energy threshold of 10 keV has been achieved, together with very low background levels which satisfy the design goal. Also shown are the predicted in-orbit HXD background, in comparison with those of other satellite experiments.

HXD-DE ソフトウェアのわずかな変更を行ったほかは、HXD に不具合は発生せず、無事に試験をパスした。また衛星の他の機器から HXD への電磁干渉もなく、単体試験と同様に、低いバックグラウンド特性が確認できた。

○ シリコン PIN ダイオードの詳細較正試験 HXD のために開発した 2 mm 厚のシリコン PIN ダイオードは、複雑なエネルギー応答を示す [51]。上述の較正試験では不十分なため、フライト予備品を用い、スリットで絞って  $^{109}\text{Cd}$  の X 線、また  $^{241}\text{Am}$  の X 線および  $\alpha$  線を照射することで、場所ごとの応答を調べた。その結果、p 層の周辺にあるガードリング電極付近で X 線が止まると、電荷がガードリングに分割されるので、正しいイベントの 2/3 のパルスハイットをもつイベントが生じること、また完全に空乏化していないと、i 層と n 層の境界付近で止まったイベントは、スペクトルに低エネルギーのテールを作ることがわかった [37] [68]。

### 7.2.4 ASTRO-E 衛星の打ち上げ失敗

重量 1670 kg の ASTRO-E 衛星は、2000 年2月10日の日本標準時 10:30 に、宇宙科学研の内之浦宇宙空間観測所より、M-V 型ロケット 4 号機にて打ち上げられた。しかしロケット 1 段目のノズル部分を絞りこむグラフィイト断熱材に破損が生じ、発射後

52 秒ごろから 3500 °C の燃焼ガスが、ノズルの根元を破って横に漏れたため、ノズルの首振りを制御するサーボアンプが焼損し、発射後 55 秒から 75 秒（1 段目の燃焼終了）まで、ロケットは姿勢制御されない状態で飛行してしまった。このためロケットは進行方向の推力をロスするとともに、姿勢の乱れにより、大きな空気抵抗を受ける結果となった。2 段目と 3 段目は、地上からの軌道修正の指令に応じて完璧に動作したにもかかわらず、1 段目の損失を完全には回復できず、衛星の最終速度は地球周回にとって必要な値に、ごくわずか（0.7% ほど）届かなかった。結果として衛星は地球を 1/3 ほど回った地点で大気圏に再突入し、我々の HXD 装置を含めて、すべて燃え尽きて失われてしまったと考えられる。ASTRO-E 計画が承認された時点からは 6 年間、それ以前に釜江研で行われていた基礎開発を含めると、10 年近い歳月を HXD 装置の開発に費やしたにもかかわらず、このような結果に終わってしまったことは、無念としか言いようがない。一日も早く同型の衛星を再び打ち上げられるよう、奔走中である。

### 7.2.5 新しい $\gamma$ 線検出器の開発

釜江研と協力し、MeV 領域の $\gamma$ 線の新しい検出方法として、結晶シンチレータの発光を青色に感度をもつ新型フォトダイオード（浜松ホトニクス S3590-18）で読み出す方法を開発した [36] [71]。フォトダイオードは信号増幅を行わないため電氣的雑音の問題となるが、100% に近い量子効率をもつので、フォトチューブ読み出しに比べ、統計的雑音は減ると期待される。じっさい 10 mm 角の GSO シンチレータをフォトダイオードで読み出した場合、エネルギーの下限は 150 keV まで下げることができ、 $> 1.5$  MeV ではフォトチューブで読み出した場合より、エネルギー分解能が良くなることが検証された。将来は、小型シンチレータを 3 次元に並べ、個別にフォトダイオードで読み出すことで、コンプトン望遠鏡の実現をはかる。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Mizuno, T., Ohnishi, T., Kubota, A., Makishima, K. & Tashiro, M.: ASCA Observations of Two Ultra-Luminous Compact X-Ray Sources in the Edge-On Spiral Galaxy NGC 4565, *Publ. Astr. Soc. J.* **51**, 663 (1999)
- [2] Ueda, Y., Takahashi, T., Inoue, H., Tsuru, T., Sakano, M., Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Makishima, K. et al.: LogN-LogS Relations and Spectral Properties of Sources from the ASCA Large Sky Survey, *Astrophys. J.* **518**, 656 (1999)
- [3] Ueda, Y., Takahashi, T., Ishisaki, Y., Ohashi, T. & Makishima, K.: The ASCA Medium-Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Counts and Evidence for Emerging Population of Hard Sources, *Astrophys. J.* **524**, L11 (1999)
- [4] Ikebe, Y., Makishima, K., Fukazawa, Y., Tamura, T., Xu, H., Ohashi, T. & Matshushita, K.: Two-Phase Intracluster Medium in the Centaurus Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **525**, 58 (1999)
- [5] Makishima, K., Mihara, T., Nagase, F. & Tanaka, Y.: Cyclotron Resonance Effects in Two Binary X-Ray Pulsars and the Evolution of Neutron Star Magnetic Fields, *Astrophys. J.*, **525**, 978 (1999)
- [6] Kataoka, J., Takahashi, T., Makino, F., Inoue, S., Madejski, G. M., Tashiro, M., Urry, C. M. & Kubo, H.: Variability Pattern and the Spectral Evolution of the BL Lacertae Object PKS 2155-304, *Astrophys. J.*, **528**, 243 (2000)
- [7] Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K. & Ohashi, T.: Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium in the Central Region of Clusters, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **313**, 21 (2000)
- [8] Watson, D., Hanlon, L., McBreen, B., Smith, N., Tashiro, M. et al.: Simultaneous Multifrequency Observations of the BL Lac MS 0205.7+3509, *Astron. Astrophys.* **345**, 414 (1999)
- [9] Nakazawa, K., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M., Fukazawa, Y., Tamura, T., Iyomoto, N., K. Ebisawa, Ezoe, Y. et al.: Fabrication of the ASTRO-E Hard X-ray Detector, *SPIE*, **3765**, 148
- [10] Tanihata, C., Kataoka, J., Murakami, T., Ota, N., Ozawa, H., Takahashi, T., Tamura, T., Uchiyama, Y., Watanabe, S., Yamaoka, K., Yonetoku, D., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Isobe, N., Iyomoto, N., Kamae, T., Kokubun, M., Kotoku, J., Kubota, A., Makishima, K., Matsumoto, Y., Mizuno, T., Nakazawa, K., Onishi, T., Sugiho, M., Takahashi, I., Tanaka, M., Tashiro, M., Terada, Y. et al.: Preflight Performance of the ASTRO-E Hard X-ray Detector, *SPIE*, **3765**, 645 (1999)
- [11] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. & Tamura, T. ASCA Observations of a Near-by Cluster in the Antlia, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, in press (2000)
- [12] Matsushita, K., Makishima, K., & Ohashi, T.: Metal Abundances in the Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies Observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, in press (2000)
- [13] Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M. et al.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies. *Astrophys. J.*, **535**, in press (2000)
- [14] Tamura, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., & Xu, H.: X-Ray Measurements of the Gravitational Potential Profile in the Central Region of Abell 1060 Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.*, **535**, in press (2000)

(会議抄録 (レフェリーつき) )

- Proc. 4th ASCA Conference, *The Heating and Accerrelation in the Universe*, Hachioji, March 1999
  - [15] Makishima, K.: Energy Non-Equipartition Processes in the Universe, *Astronomische Nachrichten* **320**, 163 (1999)
  - [16] Tashiro, M., Iyomoto, N., Kaneda, H., Makishima, K. & Isobe, N.: ASCA Measurements of Non-Thermal Pressures in the Radio Lobes, *ibid*, 217
  - [17] Nakazawa, K., Fukazawa, Y. & Makishima, K.: ASCA Observation of Diffuse X-ray Source RXJ1833.6+6520, a Candidate for Dark Cluster? *ibid*, 294
  - [18] Iyomoto, N. & Makishima, K.: Long-Term Variability of the M81 Nucleus, *ibid*, 300
  - [19] Sugiho, M., Tashiro, M., Perlman, E. S., Makishima, K. et al.: ASCA Observation of the BL Lac Object PKS 1413+135 Embedded in a Spiral Galaxy, *ibid*, 316
  - [20] Kaneda, H., Makishima, K., Yamauchi, S., Sugizaki, M. & Yamasaki, N. Y.: Investigation of the Galactic Ridge X-Ray Emission, *ibid*, 322
  - [21] Kubota, A., Marshall, F., Makishima, K., Dotani, T., Ueda, Y. & Negoro, H.: ASCA Observations of the X-ray Transient XTE J1550-564, *ibid*, 353
  - [22] Mizuno, T., Ohnishi, T., Kubota, A., Makishima, K. & Tashiro, M.: ASCA Observation of Ultra-Luminous X-Ray Sources and Interpretation of their Nature, *ibid*, 356
  - [23] Matsumoto, Y., Nakazawa, K., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M. & Fukazawa, Y.: Angular Response of the Hard X-Ray Detector (HXD) onboard ASTRO-E, *ibid*, 376
  - [24] Terada, Y., Tashiro, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Kawaguchi, G., Matsuzaki, K., Odagi, I., Tanaka, Y., Makishima, K. & Kamae, T.: The Digital Data Processing System of the ASTRO-E Hard X-Ray Detector, *ibid*, 377
  - Proc. 32nd COSPAR Symposium E1.1, *Broad Band Spectra of Cosmic Sources*, Nagoya, July 1998
  - [25] Mizuno, T. & Makishima, K.: X-Ray Observations of the Normal Spiral Galaxies with ASCA, *Advances in Space Research* **25**, 395 (2000)
  - [26] Kubota, A., Tanaka, Y., Makishima, K. et al.: ASCA Observation of the X-Ray Transient GRS 1009-45, *ibid*, 449
  - [27] Matsumoto, R., Valinia, A., Tajima, T., Makishima, K. & Shibata, K.: Formation of Localized Strongly Magnetized Regions in Galaxies and Clusters of Galaxies: *ibid*, 499
  - [28] Matsushita, K., Ohashi, T. & Makishima, K.: X-Ray Study of Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies, *ibid*, 583
  - [29] Ohahshi, T., Kikuchi, K., Matshushita, K., Yamasaki, N., Ezawa, H., Fukazawa, Y., Makishima, K., Kamae, T. et al.: Metallicity and Temperature Distributions in Clusters of Galaxies, *ibid*, 593
  - [30] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. and Tamura, T.: ASCA Observation of a Near-By Cluster, Antlia, *ibid*, 607
  - [31] Obayashi, H., Makishima, K. & Tamura, T.: ASCA Observations of the Sculptor supercluster, *ibid*, 625
  - [32] Tashiro, M., Makishima, K. & kaneda, H.: ASCA Measurements of Field-Particle Energy Density Distribution in Radio Lobes, *ibid*, 751
  - [33] Ueda, Y., Akiyama, M., Hasinger, G., Inoue, H., Ishisaki, Y., Makishima, K. et al.: Results from the ASCA Large Sky Survey, *ibid*, 839
  - [34] Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Ueda, Y., Yamashita, A., Takahashi, T., Inoue, H., Makishima, K., Mi-uaji, T. & Hasinger, G.: ASCA Detection of Faint Sources in the Lockmann Hole and its Comparison with ROSAR Sources, *ibid*, 845
- (学位論文)
- [35] Mizuno, T.: *ASCA Investigation of Ultra Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies*, 博士論文
  - [36] 大西呂尚, 「結晶シンチレータとフォトダイオードを用いた宇宙 $\gamma$ 線検出器の基礎実験」, 修士論文
  - [37] 杉保昌彦, 「ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器の低エネルギー応答の打ち上げ前最終測定」, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
  - [38] Makishima, K.: New X-ray Insight into Galaxy Clusters and Groups, in the 4th RESCEU International Symposium *The Birth and Evolution of the Universe*, Univ. Tokyo, November 16-19, 1999
  - [39] Makishima, K.: Magnetic Reconnections in Large Scale Cosmic Plasmas, in *Magnetic Reconnections in Space and Laboratory Plasmas*, Univ. Tokyo, Feb.29–March 4, 2000
  - 一般講演/ポスター
  - [40] Iyomoto, N., Makishima, K., Ezoe, Y.: Long-Term Variability of the LLAGN in M81, *X-Ray Astronomy '99: Stellar Endpoints, AGN and the Diffuse X-ray Background*, September 6–10, 1999, Bologna, Italy
  - [41] Tashiro, M. et al.: ASCA measurements of non-thermal pressures in radio lobes, *ibid*

- [42] Kubota, A., Makishima, K., Mizuno, T. & Ebisawa, K.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-Ray Sources in Nearby Sprial Galaxies, *ibid*
- [43] Y. Terada, K. Yamaoka, M. Kokubun, J. Kotoku, T. Mizuno, J. Kataoka, T. Takahasi, T. Murakami, K. Makishima, T. Kamae and the HXD team: Capability of the ASTRO-E Hard X-ray Detector for High-Energy Transients and  $\gamma$ -Ray Bursts, in *Fifth International Compton Symposium Registration*, September 15–17, 1999,
- [44] Tashiro, M.: ASCA measurements of field and particle energy distributions in radio lobes, in it ASCA/ROSAT workshop on AGNs, November 6–8, 1999, ISAS, Japan
- [45] Iyomoto, N: Long-Term Variability of the LLAGN in M81, *ibid*
- [46] Isobe N., Sugiho M, Tashiro M & Makishima K.: ASCA Observations of BL Lacertae Object OJ2871, *ibid*
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (9月23~26日、島根大学)
- [47] 深沢泰司、牧島一夫、中澤知洋:「あすか」による銀河群からの硬 X 線放射の検出、25pSD1
- [48] 水野恒史、牧島一夫、田代信、久保田あや、大西呂尚、古徳純一:「あすか」で見た近傍渦巻き銀河中の強 X 線源、25pSD2
- [49] 久保田あや、牧島一夫ほか:「あすか」が観測したブラックホール候補天体について、25pSD3
- [50] 中澤知洋、牧島一夫、高橋勲、深沢泰司:「あすか」衛星を用いた、ダーククラスターの探索、25pSD4
- [51] 太田直美、村上敏夫、高橋忠幸、田村隆幸、牧島一夫、釜江常好、田代信、深沢泰司ほか: ASTRO-E 衛星搭載 PIN 型半導体検出器の開発とフライト品の性能、25pSD8
- [52] 谷畑千春、磯部直樹、伊豫本直子、内山泰伸、江副祐一郎、太田直美、大西呂尚、小澤秀樹、片岡淳、釜江常好、久保田あや、国分紀秀ほか: ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器の地上特性評価試験、25pSD9
- [53] 磯部直樹、釜江常好、牧島一夫、村上敏夫、高橋忠幸、田代信、深沢泰司、杉保昌彦、松本縁、中澤知洋、国分紀秀、高橋勲ほか: ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器の地上特性評価試験、25pSD10
- 日本天文学会・秋の年会 (10月7~9日、九州大学・六本松キャンパス)
- [54] 古徳純一、水野恒史、久保田あや、大西呂尚、牧島一夫、田代信: 近傍渦巻き銀河 NGC2403 中の大光度 X 線源の観測、R29a
- [55] 牧島一夫、水野恒史、久保田あや、古徳純一、大西呂尚、田代信ほか: 近傍渦巻き銀河に見られる大光度 X 線の Kerr ブラックホール解釈、R30a
- [56] 高橋勲、中澤知洋、牧島一夫: 「あすか」による Shakhbazyan のコンパクト銀河群の観測、T18a
- [57] 松本縁、中澤知洋、深沢泰司、田代信、釜江常好、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫ほか: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) の角度レスポンス、W10a
- [58] 山岡和貴、高橋忠幸、村上敏夫、田村隆幸、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司、能町正治ほか: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) アンチカウンタの地上較正、W11a
- [59] 杉保昌彦、内山泰伸、磯部直樹、高橋勲、牧島一夫、釜江常好、高橋忠幸、村上敏夫、田代信、深沢泰司ほか: ASTRO-E 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) のエネルギー応答の地上キャリブレーション、W12a
- 日本天文学会・春の年会 (4月3~5日、東京大学・本郷キャンパス)
- [60] 寺田幸功、牧島一夫、石田学、松崎恵一、今成武: 「あすか」による強磁場激変星を用いた共鳴散乱の検証、N11a
- [61] 久保田あや、牧島一夫、水野恒史、古徳純一、海老沢研: 「あすか」によるブラックホール降着円盤の X 線スペクトル詳細解析、N16a
- [62] 水野恒史、牧島一夫、久保田あや: 近傍渦巻き銀河にある強 X 線源からの放射機構の「あすか」による観測的研究、N17a
- [63] 磯部直樹、杉保昌彦、田代信、牧島一夫: 「あすか」による BL Lac 天体 OJ287 の観測、S07a
- [64] 江副祐一郎、伊豫本直子、牧島一夫: The Lockmann Field における AGN の長期時間変動、S08a
- [65] 田代信、深沢泰司、牧島一夫: 銀河団中の電波銀河 PKS B2356–611 の X 線観測、S17b
- [66] 中澤知洋、深沢泰司、磯部直樹、牧島一夫: 「あすか」による Fornax 銀河団からのハード X 線放射の観測、T07a
- [67] 渡辺伸、内山泰伸、久保信、谷畑千春、高橋忠幸、村上敏夫、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司ほか: ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器 (HXD) の地上最終キャリブレーション (1)、W12b
- [68] 杉保昌彦、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司、国分紀秀、中澤知洋、磯部直樹、松本縁、江副祐一郎ほか: ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器 (HXD) の地上最終キャリブレーション (2)、W13b
- [69] 古徳純一、山岡和貴、寺田幸功、国分紀秀、牧島一夫、釜江常好ほか: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) アンチカウンタの応答関数の構築、W14b
- [70] 松本縁、中澤知洋、深沢泰司、田代信、釜江常好、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫ほか: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) 有効面積の角度応答、W15b
- [71] 高橋勲、大西呂尚、牧島一夫、田代信、釜江常好: フォトダイオードで読み出す硬 X 線・ $\gamma$  線検出器、W21b
- その他
- [72] 田代 信: 「あすか」時代から戦国時代へ、第2回 NRO 「ディスクとジェット」の相互作用」研究会 (国立天文台、2000年3月6-7日)

## II

# 1999年度 ビッグバン宇宙国際研究センター全般に関する報告



# 1 教官，職員，および研究員

## ビッグバン宇宙国際研究センター

佐藤 勝彦（センター長／教授）

川崎 雅裕（教授）

茂山 俊和（助教授）

杉之原 立史（助手）

山田 章一（助手）

樽家 篤史（機関研究員）

滝沢 元和（機関研究員）

パオロ マザーリ（機関研究員）

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	学振特別研究員 <sup>(1)</sup>
1. 初期宇宙進化論	佐藤 勝彦	白水 徹也	飯田 圭 滝沢 重博 千葉 剛 山口 昌英 蓑 泰志
	須藤 靖	松原 隆彦	景 益鵬
	柳田 勉	井澤 健一	佐藤 丈 浅賀 岳彦
2. 銀河進化理論	野本 憲一	鈴木 知治	梅田 秀之
3. 可視光近赤外観測	吉井 讓		
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	児玉 忠恭 川崎 渉
	牧島一夫 折戸 周治	田代 信 吉村 浩司	伊豫本 直子 松永 浩之 佐貫 智行
7. 気球観測による反物質 探査，衛生による X 線・ γ 線観測			

(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-1/99  
Deciphering cosmological information from redshift surveys of high- $z$  objects - the cosmological light-cone effect and redshift-space distortion -,  
Yasushi Suto, Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, Takahiko Matsubara and Kazuhiro Yamamoto,  
Prog.Theor.Phys.Suppl. 133 (1999)183-210.
2. RESCEU-2/99  
COSMOLOGICAL IMPLICATIONS OF GALAXY CLUSTERS IN X-RAY, MILLIMETER, AND SUBMILLIMETER BANDS,  
Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Eiichiro Komatsu, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Hiroshi Matsuo, Sabine Schindler, and Kohji Yoshikawa,  
Advances in Space Research, in press.
3. RESCEU-3/99  
Submillimeter detection of the Sunyaev – Zel’dovich effect toward the most luminous X-ray cluster at  $z$ ,  
Eiichiro Komatsu, Tetsu Kitayama, Yasushi Suto, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Hiroshi Matsuo, Sabine Schindler, and Kohji Yoshikawa,  
ApJ 516(1999)L1-L4.
4. RESCEU-4/99  
Observations of HCN, HNC, and NH<sub>3</sub> in Comet Hale-Bopp,  
Tomoya HIROTA, Satoshi YAMAMOTO, Kentarou KAWAGUCHI, Akihiro SAKAMOTO, and Nobuharu UKITA,  
The Astrophysical Journal, in press.
5. RESCEU-5/99  
Gravitational Mass in Asymptotically de Sitter Space-Times with Compactified Dimension,  
Tetsuya Shiromizu,  
Physical Review D60, 64019(1999).
6. RESCEU-6/99  
Superheavy Dark Matter and Thermal Inflation,  
T. Asaka, M. Kawasaki and T. Yanagida.
7. RESCEU-7/99  
Cosmological Constraints on Late-time Entropy Production,  
M. Kawasaki, K. Kohri and Naoshi ,  
Phys.Rev.Lett.,82, 4168 (1999).
8. RESCEU-8/99  
A NEW EVOLUTIONARY PATH TO TYPE Ia SUPERNOVAE: HELIUM-RICH SUPER-SOFT X-RAY SOURCE CHANNEL,  
I. Hachisu, M. Kato, K. Nomoto, and H. Umeda,  
To appear in The Astrophysical Journal vol.519, 1999.
9. RESCEU-9/99  
A WIDE SYMBIOTIC CHANNEL TO TYPE Ia SUPERNOVAE,  
I. Hachisu, M. Kato, and K. Nomoto,  
To appear in The Astrophysical Journal vol.521, 1999.

10. RESCEU-10/99  
Evolution of Axionic Strings and Spectrum of Axions Radiated From Them,  
M. Yamaguchi, M. Kawasaki and J. Yokoyama,  
Physical Review Letters in press.
11. RESCEU-11/99  
Chemical evolution of the Galactic halo through supernova-induced star formation and its implication  
for Population III stars,  
Tsujiimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.,  
the Astrophysical Journal (Letters).
12. RESCEU-12/99  
Space-Times which are asymptotic to certain FRW space-times at Timelike Infinity,  
Tetsuya Shiromizu and Uchida Gen,  
Classical and Quantum Gravity Vol. 16, 2955(1999).
13. RESCEU-13/99  
Cosmological Moduli Problem and Thermal Inflation Models,  
T. Asaka and M. Kawasaki,  
Physical Review D in press.
14. RESCEU-14/99  
Stochasticity of Bias and Nonlocality of Galaxy Formation: Linear Scales,  
Takahiko Matsubara,  
Astrophysical Journal, in press.
15. RESCEU-15/99  
Leptogenesis via Inflaton Decay,  
T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida.
16. RESCEU-16/99  
Cosmological light-cone effect on the power spectrum of galaxies and quasars in wide-field redshift  
surveys,  
Kazuhiro Yamamoto, Hiroaki Nishioka and Yasushi Suto,  
ApJ.
17. RESCEU-17/99  
Cosmological Redshift-space distortion on clustering of high-redshift objects: correction for nonlinear  
effects in power spectrum and tests with N-body simulations,  
Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, and Yasushi Suto,  
ApJ.
18. RESCEU-18/99  
Cyclotron Resonance Effects in two Binary X-Ray Pulsars and the Evolution of Neutron Star Magnetic  
Fields,  
K. Makishima, T. Mihara, F. Nagase and Y. Tanaka,  
Astrophys. J.
19. RESCEU-19/99  
Dilatonic Probe, Force Balance and Gyromagnetic Ratio,  
Tetsuya Shiromizu,  
Physics Letter B460, 141(1999).
20. RESCEU-20/99  
Initial Condition for New Inflation in Supergravity,  
T. Asaka, M. Kawasaki and M. Yamaguchi.
21. RESCEU-21/99  
Quantum Creation of the Multidimensional Universe,  
Hirotaka Ochiai and Katsuhiko Sato.

22. RESCEU-22/99  
Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum,  
S. Orito, T. Maeno, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, and K. Yoshimura,  
Physical Review Letters, 84, 1078 (2000).
23. RESCEU-23/99  
The Origin of Diversity of Type Ia Supernovae and Environmental Effects,  
H. Umeda, K. Nomoto, C. Kobayashi, I. Hachisu and M. Kato,  
to appear in Astrophysical Journal (Letters).
24. RESCEU-24/99  
Two-point correlation functions of X-ray selected clusters of galaxies: theoretical predictions for flux-limited surveys,  
Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Kazuhiro Yamamoto and Y.P. Jing,  
ApJ.
25. RESCEU-25/99  
Neutrino – nucleon reaction rates in the supernova core in the relativistic random phase approximation,  
Shoichi Yamada and Hiroshi Toki,  
Phys. Rev. C.
26. RESCEU-26/99  
Reduction of neutrino - nucleon scattering rate by nucleon - nucleon collisions,  
Shoichi Yamada,  
Nucl. Phys. A.
27. RESCEU-27/99, Stringy Probe Particle and Force Balance,  
Tetsuya Shiromizu,  
Physical Review D60, 104046(1999).
28. RESCEU-28/99  
Leptogenesis in Inflationary Universe,  
T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida,  
To appear in Physical Review D.
29. RESCEU-29/99  
The Correlation Function in Redshift Space: General Formula with Wide-angle Effects and Cosmological Distortions,  
Takahiko Matsubara,  
ApJ Submitted.
30. RESCEU-30/99  
Stochastic Biasing and Weakly Non-linear Evolution of Power Spectrum,  
Atsushi Taruya,  
ApJ, submitted.
31. RESCEU-31/99  
Probing the evolution of early-type galaxies using multi-colour number counts and redshift distributions,  
Fumiaki Nakata, Kazuhiro Shimasaku, Mamoru Doi, Nobunari Kashikawa, Wataru Kawasaki, Yutaka Komiyama, Sadanori Okamura, Maki Sekiguchi, Masafumi Yagi, Naoki Yasuda,  
to appear in MNRAS(Letter), astro-ph/9909063.
32. RESCEU-32/99  
Density profiles of dark matter halo are not universal,  
Y.P.Jing and Yasushi Suto,  
ApJL, submitted.

33. RESCEU-33/99  
Cosmological SPH simulations with four million particles: statistical properties of X-ray clusters in a low-density universe,  
Kohji Yoshikawa, Y.P.Jing and Yasushi Suto,  
ApJL, submitted.
34. RESCEU-34/99  
LARGE SCALE MAPPING OBSERVATIONS OF THE CI 3P1-3P0 LINE TOWARD HEILES' CLOUD 2 IN TAURUS DARK CLOUD,  
Hiroyuki MAEZAWA, Masafumi Ikeda, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Keisuke Miyazawa, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Masatoshi Ohishi, Junji Inatani,  
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS.
35. RESCEU-35/99  
The light-cone effect on the clustering statistics in the cosmological redshift space,  
Yasushi Suto, Hiromitsu Magira and Kazuhiro Yamamoto,  
PASJ, submitted.
36. RESCEU-36/99  
Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure,  
T. Kanazawa, M. Kawasaki, N. Sugiyama, and T. Yanagida,  
To appear in Physical Review D.
37. RESCEU-37/99  
Q-ball Formation through Affleck-Dine Mechanism,  
S. Kasuya and M. Kawasaki.
38. RESCEU-38/99  
Evolution of a Global String Network in a Matter Dominated Universe,  
M. Yamaguchi, J. Yokoyama and M. Kawasaki.
39. RESCEU-39/99  
Cosmological Spinning Multi-'Black Hole' Solution in String Theory,  
Tetsuya Shiromizu,  
Progress of Theoretical Physics Vol. 102, 1207(1999).
40. RESCEU-40/99  
The Einstein Equation on 3 Brane World,  
Tetsuya Shiromizu, Kei-ichi Maeda and Misao Sasaki,  
Phys.Rev.D62:024012,2000.
41. RESCEU-41/99  
LARGE SCALE MAPPING OBSERVATIONS  
OF THE CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ) AND CO ( $J = 3 - 2$ ) LINES  
TOWARD THE ORION A MOLECULAR CLOUD,  
Masafumi Ikeda, Hiroyuki Maezawa, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Keisuke Miyazawa, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Masatoshi Ohishi, and Junji Inatani.  
The Astrophysical Journal Letters.
42. RESCEU-42/99  
Primordial Black Holes and Primordial Nucleosynthesis: Effects of Hadron Injection from Low Mass Holes,  
K. Kohri and Jun'ichi Yokoyama,  
Phys. Rev. D61, 023501 (2000).
43. RESCEU-43/99  
Pulsar Kick and Asymmetric Iron Velocity Distribution in SN 1987A,  
K. Kohri and S. Nagataki.

44. RESCEU-44/99  
Spherical Infall Model in a Cosmological Background Density Field,  
A.Taruya and J.Soda,  
MNRAS, submitted.
45. RESCEU-45/99  
Cosmological Parameters from the Eigenmode Analysis of the Las Campanas Redshift Survey,  
Takahiko Matsubara, Alexander S. Szalay, and Stephen D. Landy,  
Astrophysical Journal Letters, submitted.
46. RESCEU-46/99  
A Probe Particle in Kerr-Newman-deSitter Cosmos,  
Tetsuya Shiromizu and Uchida Gen,  
Classical and Quantum Gravity Vol. 16, 1361(2000).
47. RESCEU-47/99  
Hydrodynamical study of neutrino-driven wind as an r-process site,  
K. Sumiyoshi, H. Suzuki, K. Otsuki, M. Terasawa and S. Yamada,  
Publ. Astron. Soc. Jpn.
48. RESCEU-48/99  
The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies,  
K. Makishima, A. Kubota, T. Mizuno, T. Ohnishi, M. Tashiro, et al.,  
Astrophysical Journal.
49. RESCEU-49/99  
Gravity, Stability and Energy Conservation on the Randall-Sundrum Brane World,  
Misao Sasaki, Tetsuya Shiromizu and Kei-ichi Maeda,  
Phys.Rev.D62:024008,2000.
50. RESCEU-50/99  
Global Structure of Exact Cosmological Solutions in the Brane World,  
Shinji Mukohyama, Tetsuya Shiromizu and Kei-ichi Maeda,  
Phys.Rev.D62:024028,2000.