

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

Annual Report

2000

平成12年度 年次研究報告



東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター

目次

I	プロジェクト別 2000 年度 研究活動報告	iv
1	初期宇宙進化論	1
1.1	初期宇宙論・相対論	1
1.2	観測的宇宙論	2
1.3	超新星・高密度天体	5
1.4	高エネルギー現象論	6
1.5	その他	7
2	銀河進化理論	12
2.1	最初の星の進化と超新星元素合成	12
2.2	銀河初期における重元素合成サイクル	12
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	13
2.4	極超新星	13
2.5	その他の超新星	13
3	可視光近赤外観測	16
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	16
3.2	OH 夜光除去分光器による $z > 4.4$ Quasars の近赤外分光	16
3.3	すばるディープフィールド (SDF) における遠方銀河の解析	16
3.4	銀河系ハローの非一様の化学進化モデルと r 過程元素、奇数元素の起源	17
3.5	非一様初期銀河における軽元素進化	17
3.6	階層的銀河形成モデルを用いた銀河計数の解析	17
3.7	宇宙論的数値計算コードの開発	17
3.8	N 体シミュレーションと準解析的銀河形成モデルによる数値的銀河カタログの作成	18
4	サブミリ波観測	20
4.1	観測装置の開発・改良	20
4.2	星間物質の観測的研究	22
4.3	実験室分子分光	24
5	暗黒物質観測	27
5.1	ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験	27
5.2	アクシオンヘリオスコープ実験	27
5.3	太陽以外の天体を観測する	28
5.4	検出器開発	28
6	銀河と宇宙構造の研究	31
6.1	銀河・銀河団の観測的研究	31
6.2	装置・ソフトウェアなどの開発研究	32
7	気球観測による反物質探査, 衛生による X 線・γ 線観測	36
7.1	反物質探査 (BESS 実験)	36
7.1.1	概要	36
7.1.2	低エネルギー反陽子の起源の探求	36
7.1.3	反陽子ビームによる反陽子検出効率の直接測定	37
7.1.4	宇宙起源反ヘリウムの探査	37
7.1.5	低エネルギー陽子のスペクトラム測定	37
7.1.6	山頂高度における宇宙線観測	38
7.1.7	宇宙線 e/μ 粒子の観測	38

7.1.8	BESS-TeV 実験	38
7.1.9	BESS-Polar 計画	38
7.2	X 線、 γ 線観測	41
7.2.1	「あすか」衛星と GIS 装置	41
7.2.2	「ようこう」衛星を用いた研究	41
7.2.3	コンパクト天体の観測的研究	41
7.2.4	星間・銀河間空間での粒子加速	42
7.2.5	ASTRO-E 衛星の回復と硬 X 線検出器 (HXD) の再製作	43
7.2.6	将来に向けての開発など	43
II	2000 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	47
1	教官, 職員, および研究員	49
2	プレプリント・リスト	50

I

プロジェクト別 2000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・山田・杉之原・松原・白水・井澤)

1.1 初期宇宙論・相対論

Q ボールの研究

Q ボールはグローバルな $U(1)$ 対称性を持ったスカラー場の理論においてスカラー場のポテンシャルの形によって存在するノントポロジカル・ソリトン解で、今から15年以上前にその存在が指摘されていたが、ようやく最近になって、超対称化された素粒子の標準理論においてQボール解が存在することが分かり、現実的な「粒子」として注目を集めるようになった。超対称化された標準理論ではQボールを作っているスカラー場はスカラークォークやスカラーレプトン場で一般にQボールはバリオン数やレプトン数を持つ。したがって、Qボールは宇宙のバリオン数生成に重要な役割を果たす。

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

我々はこのアフレック・ダイン機構におけるQボール生成に関する詳しい研究を行った。まず、大規模な数値シミュレーションを行いアフレック・ダイン機構において実際に非常に大きなバリオン数をもったQボールが生成されることを示した([1])。しかも、アフレック・ダイン機構で生成されたバリオン数がほとんど全てQボールに取り込まれることが分かった([2])。このことは、もし、Qボールが安定であればバリオン数はQボールに閉じこめられ我々に「見えない」という問題が起こる。Qボールが安定であるかどうかは超対称性モデルにおいて超対称性がどのように破れるかの枠組みによっていて、ゲージ相互作用によって超対称性の破れが伝わる枠組みでは、Qボールは安定である。この場合、宇宙初期では周りの熱プラズマとの相互作用でQボールの1部が蒸発しバリオン数を放出する。この放出されたバリオン数が最終的に核子(バリオン)となって現在星などを作っているバリオンの量を説明するのである。さ

らに、蒸発で残ったQボールは安定であるため宇宙の暗黒物質を説明できる可能性がある。我々は、このシナリオに基づいて、詳しい解析を行いアフレック・ダイン機構がQボールの存在によって宇宙のバリオン数を説明できるか、Qボールが暗黒物質になり得るかを調べ、理論パラメータ空間に対する厳しい制限を求めた([3])。

カオティックインフレーションモデル

超重力理論におけるインフレーションのなかでそのモデル構築がもっとも困難であるカオティックインフレーション・モデルの研究を行った。カオティックインフレーションはインフレーションモデルの中でももっとも単純でインフラトン場の初期値に関する調整が全く必要がない、つまり、他のインフレーションモデルが多少なりとも持っている初期値問題が無いという非常に魅力的なモデルである。しかし、超重力理論においては、一般に、スカラー場のポテンシャルがプランクスケールを越えると急激に立ちが上がり、インフレーションを起こすのに必要とされる平坦なポテンシャルが実現できない。そこで、理論に新たな対称性を導入し、プランクスケールを越えてインフラトン場のポテンシャルが平坦になるようにし、カオティックインフレーションを実現するモデルの構築に成功した([4])。

その他のインフレーションモデル

宇宙初期においてスカラー場が自発的対称性の破れによって大きな期待値を持つ際に位相欠陥が生成される。このとき、スカラー場の期待値がプランクスケール以上になると位相欠陥中心部でインフレーションが起きることが知られている。このように位相欠陥を通じてインフレーションが起きるモデルはトポロジカル・インフレーションモデルと呼ばれる。我々は超重力理論の枠組でこれを実現するモデルを提案した([5])。また、超重力理論の効果でニュー・インフレーションの初期値問題を回避するアイデアを提示した([6])。

密度揺らぎの進化と再加熱期の粒子生成

宇宙初期のインフレーション理論に基づく密度揺らぎの進化と再加熱期の粒子生成について議論した。特に、一般化されたアインシュタイン理論で2つの場が存在する系での曲率のゆらぎについて、場が1つの時には保存すると考えられている曲率ゆらぎが、インフレーション中に成長し得ることを見出した。また再加熱期の曲率ゆらぎの進化についてもイギリスの研究者たちとともに研究を行い、インフレーション中に等曲率ゆらぎの急激な減少が起らないようなモデルにおいては、曲率ゆらぎが再加熱期に増幅する可能性があることを見出した。このことはイン

フレーションモデルの構築に際して重要な意味を持ったために、今後の発展が期待される。再加熱期には、ボース粒子やフェルミ粒子が共鳴的に生成する前加熱という時期が存在することが知られているが、我々は、増幅された曲率ゆらぎによって前加熱期に粒子生成が起ることを見出した ([8, 9])。

ブレインワールド・ブラックホール

超紐理論の最近の非摂動的側面から、我々の宇宙は高次元中のドメイン壁的なものとするのが自然とされている。しかし、ブレインワールドの非線形領域は未だ明らかになっていない。そこで、非線形が重要となる物体であるブラックホールの初期データの構成 [13]、電荷を有するブラックホールのバルクでの振る舞い等を調べた [14]。

ホログラフィー

我々の住むブレインはバルク時空の端（境界）であると見なすと、バルクの重力の自由度を境界上の共形場としてとらえることができると信じられている (AdS/CFT 対応予想)。そこで、我々が以前導出したブレイン上の重力場の方程式の Einstein 方程式からのずれの項を、共形場のエネルギー・運動量テンソルの期待値のトレイスレス部分とアノマリー部分とで説明した [15]。

多次元宇宙の量子論的創生

正の宇宙定数のある多次元宇宙モデルのユークリッド解を数値計算して、「準アトラクター」的ふるまいを見いだした [16]。また、同じモデルで宇宙の波動関数を数値計算した [17]

ディラトン重力理論におけるブレーンワールド

ディラトン重力理論におけるブレーンワールドにおいて、動的な厳密解を見だし、その時空構造について調べた。[18], [80]

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、たとえば銀河分布等の観測

結果をうまく説明できる事が知られている [57, 65]。一方で、最近観測された反陽子粒子線束が原始ブラックホールの蒸発による可能性が指摘されているが、ダブル・インフレーションによって原始ブラックホールが作られる場合について考察した [19, 58, 71, 81]。

ダブル・インフレーションとブーメラン実験

最近、気球による宇宙背景放射観測実験であるブーメランの観測結果が発表され、それによると宇宙はほぼ平坦でありインフレーションの枠組みと無矛盾である事が示された。その一方で、宇宙背景放射非等方性の角度スペクトルにおいて、2番目のアコースティック・ピークが低いという結果も得られている。他の多くの観測から予想される宇宙論パラメータではこの低いセカンド・ピークを説明できないが、ダブル・インフレーションによって他の観測と無矛盾にこの結果を説明できる事を示した [65, 106]。

1.2 観測的宇宙論

遠方天体の2点統計における光円錐効果

遠方天体の空間相関は、時間一定面上ではなく、過去の光円錐上で定義される。この効果に関しては、今まで主として解析的な定式化を行ってきたが、それを応用して、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 [20]。また、大規模数値シミュレーションを組み合わせて光円錐上での模擬サンプルを構築し、この解析的予言の妥当性を実際に確認した [21]。

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い、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 [22]。この領域をすばる望遠鏡を用いてさらに詳細に観測した結果を現在解析中である。

宇宙論的流体シミュレーションを用いた銀河、銀河団のバイアスモデルの検証

Press – Schechter 理論は解析的な近似理論として、銀河団に関する宇宙論的予言を行う際にひろく使われている。我々は、 $N = 128^3$ のガス粒子および同数のダークマター粒子を用いた、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、解析的近似では無視されている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 [23]。また、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を構築し [24]、シミュレーションから同定した銀河・銀河団の空間相関と比較することで、このバイアスモデルを検証した [25, 26]。

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

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 のミリ波領域でのスニャーエフ・ゼルドビッチ効果による 2 次元マップを得た。今回の高角度分解能観測によって、従来知ら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 [27]。この結果は、最近の米国 X 線天文衛星チャンドラによって確認されている。このような形態の非一様性の起源はまだ理解されておらず、銀河団の進化に対する新たな謎を投げかけることになる。

遠方天体における等密度統計の宇宙論的效果

大規模構造の統計的性質を特徴づける指標に、等密度統計と呼ばれる幾何学的な統計量があり、こうした統計量を用いて、銀河、銀河団分布に対し、クラスタリングの性質や初期ゆらぎのガウス性の検証が盛んに行われている。現在のところ、このような解析は比較的近傍の天体に限られているが、我々は、遠方天体を用いて等密度統計を解析した際、赤方偏移歪みや幾何学的効果といった宇宙論的效果がどう影響するかを考察した [30]。宇宙論的效果を取り入れた等密度統計の理論モデルを構築、解析的表式を用いた評価から、等密度統計は宇宙論的距離指標に敏感であることがわかり、今後の遠方観測において、宇宙論的效果の影響が無視できない場合があることを指摘した。

[74]

非線形バイアスを考慮した銀河団分布に対するジーナス統計

等密度統計の一種であるジーナス統計は、大規模構造の幾何学的特徴をとらえる有力手段として、今後、スローンデジタルスカイサーベイなどから得られる銀河、銀河団分布を用いて、精密な統計解析が行われる予定である。こうした統計量に対する理論予言には、天体分布のバイアス、及び非線形重力進化を考慮する必要があるが、我々は、ダークマターハローの解析的バイアスモデル [24] を軸に、バイアスの非線形と重力進化を同時に取り入れたジーナス統計の解析的表式を導いた [31]。解析的表式に基づき、将来、スローンデジタルスカイサーベイから得られる銀河団分布に対し、ジーナス統計の予言を行い、バイアス、宇宙モデルの依存性についての考察を行った。

冷たい暗黒物質宇宙における非線形重力多体系の速度分布関数

赤方偏移で観測する天体の位置は、その天体の固有速度のために、実の位置からずれて見える（赤方偏移歪み）。強非線形領域において、赤方偏移歪みを取り込んだ 2 点相関関数の理論予言を行うためには、精度の良い相対特異速度統計が必要である。これまでは、アインシュタイン-ドジッター宇宙において、ハローの密度プロファイルに等温球を仮定するという理想化された場合に速度分布関数が計算されてきた。今回我々は、現実的とされている冷たい暗黒物質宇宙において、最近のシミュレーションから示されている普遍密度プロファイルを用いて速度分布関数を計算し、それが準指数関数型をなすことを導いた。あわせて、速度分布関数と速度分散の宇宙モデル依存性とスケール依存性について調べた。[70, 83, 84]

赤方偏移空間における 2 点相関関数

観測的宇宙論における最も重要な対象のひとつ、銀河、クエ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 [32]。さらに、近年注目を集めている弱重力レンズ効果を赤方偏移サーベイによる解析によって検出できるかどうかを調べた [34]。SDSS サーベイを例にとると、銀河の相関関数を用いることにより、 S/N が 10 で測定可能であるという注目すべき結果を示した。

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

我々はジョンスホプキンス大学の共同研究者と共に、カーネギー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 [33]。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。

弱重力レンズ場のトポロジー

近年急速に発展してきた宇宙論的弱重力レンズ場の解析法としては初めてトポロジーを用いる方法を調べた [35]。現在進行中の弱重力レンズの観測で、トポロジーの解析により宇宙論モデルを区別することが可能であること、また、現在提案中のより野心的な計画では、極めて有望な方法となることを示した。

銀河団の進化と X 線基準面

Fujita & Takahara (1999) は、銀河団高温ガスの温度 T 、中心密度 ρ_0 、コア半径 r_c によって張られる 3 次元のパラメータ空間 ($\log \rho_0, \log r_c, \log T$) に銀河団の観測データをプロットすると、それが 1 平面上によく乗ることを見だし、この平面を X 線基準面 (X-ray fundamental plane) と名付けた。この X 線基準面が、標準的な構造形成シナリオによって再現できるかどうか、また、X 線基準面の物理的意味は何かという問題をシミュレーションによって調べることが、本研究の目的である。本年度は、そのための第 1 ステップとして、1 個の銀河団の ($\log \rho_0, \log r_c, \log T$) 空間における時間的な進化の様子を詳しく調べた。結果をまとめると (1) ρ_0, r_c, T は、現在に至るまで時々刻々その値を変化させた (一定値に落ち着く様子はみられなかった)。 (2) $z \sim 1$ 以降はほぼ観測されている X 線基準面に沿うように進化し、 $z = 0$ において X 線基準面上に到達した。 [86]

2 点相関関数の準自己相似的成長

宇宙における密度場の非線形段階での成長に関し、最もよく使われているモデルは、Davis & Peebles (1977) による self-similar evolution + stable clustering ansatz である。このモデルは、非線形性の強いスケールにおいて $\xi(x) \propto x^{-3(n+3)/(n+5)}$ を予言する。ここで、 $\xi(x)$ は 2 点相関関数、 n は初期の密度ゆらぎのポワースペクトルのべき指数 ($P(k) \propto k^n$) である。しかし、このモデルは $\Omega_0 = 1$ の宇宙にしか適用できない。そこで本研究では、このモデルを

拡張し、 $\Omega_0 \neq 1$ の宇宙に適用できるようにすることを試みた。

そのために、quasi-self-similar evolution という考え方を導入した。これは、2 点相関関数の成長を短い時間ごとに区切り、それぞれの時間内での成長は近似的に self-similar になっているという仮定に基づく。さらに、物理的な動機に基づいた「ピリアル化条件」を導入し、この条件が満たされているスケールでは stable clustering が成り立つと仮定した。これらの仮定から、強非線形領域における 2 点相関関数のふるまいを予言することができる。この予言は、 $\Omega_0 < 1$ の宇宙において N 体シミュレーションの結果とよく一致することがわかった。 [87]

質量密度非線形ゆらぎの確率分布関数

質量密度ゆらぎの確率分布関数は、重力多体系を特徴づける基本的な統計量である。しかしながら、宇宙初期に微小なガウス分布のゆらぎから出発した質量密度ゆらぎも、重力的發展をすることにたがって重力の非線形性、非局所性のために解析的理解が非常に困難となる。そこで我々は、高分解能 N 体シミュレーションを用いて、1 点の確率分布関数および 2 点の確率分布関数を調べた。その結果、1 点確率分布関数については対数正規分布関数でよく近似されることを、従来の研究よりも高非線形領域において確かめた。さらに、2 点確率分布関数に関しては、対数正規分布関数の考え方を応用した拡張を試み、これがシミュレーション結果をよく近似することを見出した [68]。さらに、これらの結果の宇宙初期密度ゆらぎポワースペクトル依存性が大変弱く、統一的に対数正規分布関数を用いることができるという興味深い結果も得ている [82]。

大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。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。 [55]

1.3 超新星・高密度天体

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。更にジェット状爆発時に引き起こされる中性子星の固有運動や、r-process 元素合成の可能性についても議論を行なった。[38, 39, 40, 41, 56, 91, 92, 93, 94, 112]

超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の到来方向が一様分布しているように見える事実を、ボトムアップシナリオによって説明出来るか否かを、Monte Carlo 計算を用いて検証した。結論として、10nG 程度の銀河間磁場を仮定すれば deflection angle が10度角のオーダーにまで大きくなることを示した。現在の100EeV以上の宇宙線の観測数の少なさ(25 events)を考慮すれば、宇宙線の起源がたとえ超銀河平面付近に多数分布していても、観測と統計的に無矛盾であることも示された。超銀河平面との相関は、1000events位の観測数が必要で、将来計画のTA, Auger, EUSO計画により解明されるであろうという展望も示された。[78, 66]

超新星コアにおける非球状原子核

重力崩壊型超新星において、コアの流体力学的性質並びにニュートリノ透過率は、爆発のダイナミクスに影響を及ぼす重要な要素である。これらは、超新星コアを構成する高密度物質の性質やそこでの原子核の状態によって決まるものであり、その意味でも超新星内部物質の研究は欠かすことができない。特に、超新星コアは重力崩壊の結果、標準核密度近傍まで圧縮されるが、このような状況下では、円柱状や板状及びバブル状といった非球状の原子核(“Nuclear Pasta”と呼ばれている)が現れ得ることが過去の研究結果からも期待されており、それ自体も興味深い対象となり得る。

超新星コアにおいては、中性カレントを介した原子核とのコヒーレント散乱によって、ニュートリノが一時的にトラップされ Fermi 縮退するということが起こり、その点が中性子星物質との大きな違いである。本研究では、温度ゼロの下 Fermi 縮退したニュートリノを考慮した上で、不定性の大きな高密度下で

の原子核の性質と“nuclear pasta”の各相の出現状況との関係を体系的に調べた。同時に、中性子星物質の場合と比較することによって、“nuclear pasta”に及ぼすニュートリノトラッピングの種々の効果を明らかにした。また、現実の有限温度の状況下での知見を得るために、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を見積もり、それらの構造の安定性を議論した。[37, 90, 111]

クォーク物質の超流動相

中性子星のコアにおいて、相対論的でありかつ縮退したクォーク物質が存在し、しかもそれがカラー超伝導状態にある可能性がある。そこで、一般化されたGinzburg-Landau理論を強結合・超相対論的クォーク超流体に応用することにより、転移温度近傍における超流動相を調べた。カラー磁気相互作用を含むギャップ方程式を用いて、Ginzburg-Landau自由エネルギーの弱結合極限を押えた。カラー間に化学ポテンシャルの差を導入することにより、カラー中性条件を取入れた。オーダーパラメーターがカラー空間において異方的な場合、カラー中性条件下、カラー間に化学ポテンシャルの差が生じ、結果としてペアリングギャップが抑制されることがわかった。[36, 72, 88]

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。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収めた。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。[79]

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。特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

ついて考察を行ない、それに基づいたプログラムの開発を行った。

超新星ニュートリノにおけるニュートリノ振動

現実的な超新星ニュートリノフラックス、密津分布モデルのもとで、三世代ニュートリノ振動による conversion probability の変化、および銀河中心付近に超新星爆発を仮定した場合の地球上での観測結果を数値計算した。さらに、SuperKamiokande と SNO での観測結果の比較により、ニュートリノ振動の解を一部見分けることが可能であることを示した。[67, 101, 102]

超新星ニュートリノにおける地球効果

超新星からのニュートリノが地球内部で起こすニュートリノ振動について解析した。太陽ニュートリノ問題の解が LMA であるなら、地球の効果を見ることにより、 θ_{13} の値の大小を見積もることができることがわかった。[42] [97] [98]

銀河団内宇宙線とガンマ線

地球に降り注ぐ宇宙線の大部分は我々の銀河で作られている。同位体の観測より、銀河内に $\sim 10^7$ 年滞在した後、銀河外に流出していると考えられている。これら宇宙線は荷電粒子であるため、銀河内の磁場によりこのような「閉じこめ」が起こっていると考えられている。

銀河から流出した宇宙線が次に閉じこめられる可能性があるのは、強い磁場と磁場の乱れの存在する銀河団である。銀河団内の伝播モデルを調べること、銀河団内に存在する宇宙線の様子を調べた。モデルを立てるに当たって、銀河団の形成史、つまり小さな銀河団があつまって大きな銀河団が形成されていく過程の効果、および星形成史を考慮に入れた [95, 96]。

銀河団の中にある宇宙線は直接検出することができないので、宇宙線粒子が銀河団ガスと衝突することにより生成される π^0 を起源とするガンマ線が検出可能かどうかを調べた。また、そのガンマ線を積分することで、銀河団が宇宙ガンマ線背景にどの程度影響を与えるかも調べた。その結果、近傍の銀河団からのガンマ線は、EGRET では検出不可能であること（このことは EGRET がそのようなガンマ線を検出できなかったという実験事実と一致する）、そして GLAST であれば検出できる可能性があることを示した。またガンマ線背景に関しては EGRET が検出したフラックスの 10^{-5} 以下の寄与しかないことも示した。

1.4 高エネルギー現象論

素粒子論的宇宙論

浅賀、柳田は、強い相互作用の CP 問題の解決策であるアクシオン模型を考えると、超重力模型で予言されるグラビティーノ粒子の宇宙論的困難が解決されることを示した [43]。

宇宙のバリオン生成機構として、超対称理論に存在する、バリオンあるいはレプトン数を持つスカラー場のコヒーレントな運動を利用した Affleck-Dine baryo/leptogenesis という方法が存在する。浅賀、藤井、濱口、柳田は近年のニュートリノ振動実験から、最も興味深い Affleck-Dine leptogenesis について、宇宙初期の有限温度効果も含めた解析を行い、ニュートリノの質量に対する厳しい制限を得た [46]。

藤井、濱口、柳田は上記の機構について、全ての有限温度効果を加えた再解析を行った。その解析で、宇宙のバリオン数が最も軽いニュートリノの質量だけで決定されること、更にこの機構が将来の neutrinoless double beta decay の観測を通じて検証可能な事を見つけた。また、必要とされる非常に軽いニュートリノを自然に説明できる方法も提案した。[47]。

近年の宇宙論的観測から、宇宙定数がゼロでない正の値をとっていることが示唆されている。その宇宙定数が仮想的スカラー場のポテンシャルエネルギーからくるとした場合、そのポテンシャルは電弱ゲージ場のインスタントン効果によるものと考えられるのが自然であることが知られている。野村(泰)、渡利、柳田は、電弱ゲージ場のインスタントン効果を超対称性理論の場合について調べ、そのポテンシャルエネルギーが宇宙定数の観測値にちょうどよいことを発見した [48]。

インフレーションをひきおこす物理は、この自然の基本スケールでの物理に関する情報を含んでいる。渡利、柳田は、ハイブリッドインフレーションモデルにおいては、 $N=2$ の超対称性を課すことができ、さらに、それによってモデルのいくつかの困難を同時に解決できるかもしれない、という示唆的な結果を得た [50]。

超対称統一理論

単純な超対称標準模型は、実験的には小さな割合でしか起こらない過程である FCNC (Flavor-Changing Neutral Current) が非常に大きな割合で起こると予言してしまう。野村(泰)、柳田は超対称性を破る場と標準模型の場が高次元で異なる ($3+1$) 次元部分空間に局在化しているために、上記の問題が回避される模型を構築した [45]。この模型では、超対称性の破れは高次元に置かれた $U(1)$ ゲージ相互作用により標準模型のセクターに伝えられ、 μ 項と呼ばれるヒッグス粒子の超対称質量が現象論的に望ましい値をとることが示される。

超対称性の破れの伝達機構の有力な一つとして、アノマリー伝達機構が知られている。川崎、渡利、

柳田は、この伝達機構の場合には一般に、高エネルギーの物理の効果が現在の真空の不安定性をひきおこすことを指摘した。しかしながらその不安定性は、宇宙の歴史の時間スケールの中では、十分に小さなものであることを示した [49]。

レプトンフレーバー物理

太陽、大気ニュートリノに加えて、LSND で観測されているニュートリノ振動も説明しようとする、少なくとも4世代のニュートリノが必要になる。最近、LSND の実験結果を受けて、ほとんど電弱相互作用をしない重い (~ 1 eV) ニュートリノと他の3世代の軽いニュートリノ (e, μ, τ ニュートリノを主な成分とする) とで構成されるような、(1+3) 階層性と呼ばれる質量階層性が再び注目を浴びている。浜口、柳田は、F. Borzumati(KEK) と共に、この (1+3) 階層性を超対称性を用いて巧みに説明するモデルを提案した [44]。

1.5 その他

山田章一助手が2000年8月16日付で、大阪大学核物理センター助教授に、松原隆彦助手が、2000年9月16日付で、名古屋大学物理学教室助教授に、杉之原立史助手が、2001年4月1日付で、小樽商科大学商学部助教授に、それぞれ転出した。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Kasuya, and M. Kawasaki: Q-ball Formation through Affleck-Dine Mechanism, *Physical Review* **D61** (2000) 041301.
- [2] S. Kasuya and M. Kawasaki, Q-ball formation in the gravity-mediated SUSY breaking scenario, *Physical Review* **D62**(2000) 023512.
- [3] S. Kasuya and M. Kawasaki, A New Type of Stable Q-balls in the gauge-mediated SUSY Breaking, *Physical Review Letters* **85** (2000) 2677.
- [4] M. Kawasaki, M. Yamaguchi, T. Yanagida: Natural Chaotic Inflation in Supergravity, *Physical Review Letters* **85** (2000) 3572.
- [5] M. Kawasaki, N. Sakai, M. Yamaguchi and T. Yanagida, Topological Inflation in Supergravity, *Physical Review* **D62** (2000) 123507.
- [6] T. Asaka, M. Kawasaki and M. Yamaguchi: Initial Condition for New Inflation in Supergravity, *Physical Review* **D61** (2000) 027303-1-3 .
- [7] M. Kawasaki, K. Kohri, and N. Sugiyama: MeV-scale Reheating Temperature and Thermalization of Neutrino Background, *Physical Review***D62** (2000) 023506.
- [8] S. Tsujikawa, K. Maeda and T. Torii, Preheating of the non-minimally coupled inflaton fields *Physical Review D* **61** (2000) 103501.
- [9] S. Tsujikawa and T. Torii, Spinodal effect in natural inflation model *Physical Review D* **62** (2000) 043505.
- [10] T. Tamaki and T. Torii, BIon black hole in string theory *Physical Review D* **62** (2000) 061501(R).
- [11] M. Narita, T. Torii and K. Maeda, Analytic description of singularity in non-vacuum Gowdy spacetime *Classical and Quantum Gravity* **17** (2000) 4597.
- [12] T. Chiba, T. Okabe, and Masahide Yamaguchi, Kinetically driven quintessence *Physical Review D* **62** (2000) 023511.
- [13] T. Shiromizu and M. Shibata, *Phys. Rev.* **D62**,127502(2000).
- [14] A. Chamblin, H. S. Reall, H. Shinkai and T. Shiromizu, *Phys. Rev.* **D63**, 064015(2001).
- [15] T. Shiromizu and D. Ida, hep-th/0102035, accepted for *Phys. Rev. D*
- [16] H. Ochiai, K. Sato: Dynamical Properties of Euclidean Solutions in a Multidimensional Cosmological Model, *Progress of Theoretical Physics* **103** (2000) 893.
- [17] H. Ochiai, K. Sato: Numerical Analysis of the Wave Function of the Multidimensional Universe, *Progress of Theoretical Physics* **104** (2000) 483.
- [18] H. Ochiai, K. Sato: Vacuum Brane and the bulk dynamics in dilatonic brane world, *Phys. Lett.* **B503** (2001) 404.
- [19] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki and T. Yanagida: Double inflation in supergravity and the primordial black hole formation, *Phys. Lett.* **B482**, 174 (2000).
- [20] 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)551-558 (astro-ph/9907105).
- [21] Takashi Hamana, Stephane Colombi, and Yasushi Suto: Two-point correlation functions on the light cone: testing theoretical predictions against N-body simulations; *Astronomy and Astrophysics* **367**(2001) 18-26 (astro-ph/0010287).
- [22] Ichi Tanaka, Toru Yamada, Edwin L. Turner and Yasushi Suto: Superclustering of Faint Galaxies in the Field of a QSO Concentration at $z \sim 1.1$; *The Astrophysical Journal* **547**(2001)521-530(astro-ph/0009229).
- [23] 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)593-601 (astro-ph/0001076).

- [24] Atsushi Taruya and Yasushi Suto: Nonlinear stochastic biasing from the formation epoch distribution of dark halos; *The Astrophysical Journal* **542**(2000)559-577 (astro-ph/0004288).
- [25] Kohji Yoshikawa, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Nonlinear Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos in Cosmological Hydrodynamic Simulations; *The Astrophysical Journal* **558** (2001) September 1 issue, in press (astro-ph/0104361).
- [26] Atsushi Taruya, Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Nonlinear Stochastic Biasing of Peaks and Halos: Scale-Dependence, Time-Evolution, and Redshift-Space Distortion from Cosmological N-body Simulations; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **53** No.2, (2001) 155-167 (astro-ph/0012511).
- [27] Eiichiro Komatsu, Hiroshi Matsuo, Tetsu Kitayama, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Kotaro Kohno, Nario Kuno, Sabine Schindler, Yasushi Suto, and Kohji Yoshikawa: Substructures Revealed by the Sunyaev-Zel'dovich Effect at 150GHz in the High Resolution Map of RX J1347-1145; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **53**(2001) 57-62 (astro-ph/0006293).
- [28] Atsushi Taruya: Stochastic Biasing and Weakly Nonlinear Evolution of Power Spectrum; *The Astrophysical Journal* **537**(2000) 37-49 (astro-ph/9909124).
- [29] Atsushi Taruya, and Jiro Soda: The Spherical Infall Model in a Cosmological Background Density Field; *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* **317**(2000) 873-879 (astro-ph/9911116).
- [30] Atsushi Taruya, and Kazuhiro Yamamoto: Iso-density Statistics on Clustering of High-z Objects in Cosmological Redshift Spaces; *The Astrophysical Journal* **550**(2001) 528-546 (astro-ph/0011426).
- [31] Chiaki Hikage, Atsushi Taruya, and Yasushi Suto: Genus Statistics for Galaxy Clusters and Nonlinear Biasing of Dark Matter Halos; *The Astrophysical Journal* **556**(2001) August 1 issue, in press (astro-ph/0104013).
- [32] Takahiko Matsubara: The Correlation Function in Redshift Space: General Formula with Wide-angle Effects and Cosmological Distortions; *Astrophysical Journal*, **535** (2000), 1-23.
- [33] 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), L1-L4.
- [34] Takahiko Matsubara: The Gravitational Lensing in Redshift-Space Correlation Functions of Galaxies and Quasars; *Astrophysical Journal Letters*, **537** (2000), L77-L80.
- [35] Takahiko Matsubara, Bhuvnesh Jain: The Topology of Weak Lensing Fields; *Astrophysical Journal Letters*, **552** (2001), May 10 issue, in press.
- [36] Kei Iida and Gordon Baym: Superfluid phases of quark matter: Ginzburg-Landau theory and color neutrality, *Phys. Rev. D* **63** (2001) 074018.
- [37] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Effects of neutrino trapping on thermodynamic properties of nuclear "pasta"; *Nuclear Physics A* 687 (2001) 512
- [38] Kazunori Kohri and Shigehiro Nagataki: Pulsar Kick and Asymmetric Iron Velocity Distribution in SN 1987; *Progress of Theoretical Physics*, **103** (2000) 713.
- [39] Shigehiro Nagataki: Neutrino-Driven Jets and Rapid-Process Nucleosynthesis; *The Astrophysical Journal*, **551** (2001) 429.
- [40] Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: Implications of the Discovery of Millisecond Pulsar in SN 1987A; *Progress of Theoretical Physics*, **105** (2001) 429.
- [41] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Rapid-Process Nucleosynthesis in Neutrino-Magneto-Centrifugally Driven Winds; *Publications of the Astronomical Society of Japan* (2001), in press (astro-ph/0101347).
- [42] K.Takahashi, M.Watanabe and K.Sato: The Earth Effects on Supernova Neutrino Spectra, astro-ph/0012354, *Physics Letters B*, accepted.
- [43] T. Asaka and T. Yanagida, "Solving the gravitino problem by axino", *Phys. Lett.* **B494**, 297 (2000).
- [44] F. Borzumati, K. Hamaguchi and T. Yanagida: "Supersymmetric seesaw model for the (1+3)-scheme of neutrino masses", *Phys. Lett. B* **497** (2001) 259.
- [45] Y. Nomura and T. Yanagida, "Bulk U(1) Messenger", *Phys. Lett.* **B487** (2000) 140.
- [46] T. Asaka, M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, "Affleck-Dine leptogenesis with an ultralight neutrino," *Phys. Rev. D* **62**, 123514 (2000).
- [47] M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, "Reheating-temperature independence of cosmological baryon asymmetry in Affleck-Dine leptogenesis," *Phys. Rev. D* **63**, 1235XX (2001), hep-ph/0102187.
- [48] Y. Nomura, T. Watari and T. Yanagida, "Quintessence axion potential induced by electroweak instanton effects," *Phys. Lett. B* **484** (2000) 103 [hep-ph/0004182].
- [49] M. Kawasaki, T. Watari and T. Yanagida, "Vacuum instability in anomaly mediation models with massive neutrinos," *Phys. Rev. D* **63** (2001) 083510 [hep-ph/0010124].

- [50] T. Watari and T. Yanagida, “ $N = 2$ supersymmetry in a hybrid inflation model,” *Phys. Lett. B* **499** (2001) 297 [hep-ph/0011389].
- (会議抄録)
- [51] M. Yamaguchi, M. Kawasaki, T. Yanagida
Natural chaotic inflation model in supergravity
Proceedings of COSMO-00 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe, eds. J. E. Kim et al. (World Scientific, 2000)
- [52] M. Yamaguchi, M. Kawasaki, J. Yokoyama
Relic axions radiated from axionic strings
Proceedings of the 3rd International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2000) (York, Oct, 2000), in press.
- [53] M. Narita, T. Torii and K. Maeda
Analytic description of singularity in non-vacuum Gowdy spacetime
Proceedings of 10th Meeting on General Relativity and Gravity, eds. Y. Eriguchi et al. (2000)
- [54] S. Kasuya
Q-ball formation, baryogenesis, and dark matter in the gauge-mediated SUSY breaking scenario
Proceedings of the 4th International Workshop on Particle Physics and the Early Universe (COSMO-2000), Sep.4-8, 2000, Cheju, South Korea, pp.346-354.
- [55] Shigehiro Nagataki: Chemical Evolution in the Large Magellanic Cloud, in the Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium on “Birth and Evolution of the Universe”, eds. K. Sato and M. Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo, 2001) p.385.
- [56] 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「すばる望遠鏡時代の理論天文学の展望」, 和田、犬塚、戸谷、千葉編集 (2000) p.146.
- [57] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure; in the Proceedings of the 4th RESCEU international symposium “The Birth and Evolution of the Universe”, eds. K. Sato and M. Kawasaki (Universal Academy Press, 2001).
- [58] Toshiyuki Kanazawa: Double inflation in supergravity and PBH formation: In the Proceedings of the Tenth Workshop on General Relativity and Gravitation, eds. M. Sasaki, J. Yokoyama, T. Nakamura and K. Tomita (Osaka University, 2000).
- (国内雑誌)
- [59] 樽家 篤史: 銀河分布から宇宙の進化を推測する～非線形・確率的バイアス～; 日本物理学会誌 **56** (2001) 169.
- [60] 佐藤勝彦, 深尾良夫: 次の宇宙像・地球像を求めて I, 科学 (岩波書店) 71巻3号 (2001), pp.237-245
- [61] 佐藤勝彦, 深尾良夫: 次の宇宙像・地球像を求めて II, 科学 (岩波書店) 71巻4号 (2001)
- [62] 佐藤勝彦: 素粒子物理が宇宙開闢の謎を解く, 日本の科学者 (日本科学者会議), 36巻1号 (2001) pp.23-29
- [63] 佐藤勝彦: 宇宙における時間, 数理科学, 39巻1号 (2001) pp.19-35
- [64] 佐藤勝彦: インフレーション理論を確かめた気球観測, 日経サイエンス, 2001年4月号 (学位論文)
- [65] 金澤 敏幸: Double inflation in supergravity and its observational implications (博士論文)
- [66] 井出喜徳: Propagation of UHERCRs in the inhomogeneous source model (修士論文)
- [67] 渡辺万里子: Effects of neutrino oscillation on the supernova neutrino spectrum (修士論文)
- [68] 加用一者: A Biasing Model for Cosmological Two-Point Statistics and the Probability Distribution Function of Nonlinear Mass Fluctuations (修士論文)
- [69] 日影千秋: Genus Statistics for Large-Scale Structure as a probe of Primordial Random-Gaussianity and Nonlinear Stochastic Biasing (修士論文)
- [70] 桑原健: Velocity Distribution Functions for Nonlinear Gravitating Many-body Systems in Cold Dark Matter Universes (2000) (修士論文)
- (国際会議)
- 一般講演
- [71] Toshiyuki Kanazawa: Double inflation in supergravity and PBH formation, The Tenth Workshop on General Relativity and Gravitation, Osaka University (2000, September).
- [72] Kei Iida and Gordon Baym: The superfluid phases of quark matter: Ginzburg-Landau theory and color neutrality, The Fifteenth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM 2001), Stony Brook, New York, January 15-17, 2001.
- [73] Atsushi Taruya: Nonlinear Stochastic Biasing From the Formation Epoch Distribution of Dark Halos, The 9th Marcel Grossman Meeting 2000, Rome (2000年7月9日).
- [74] Yasushi Suto: The universe traces by clusters, invited review at Institut d’Astrophysique de Paris 2000 conference on “Constructing the Universe with Clusters of Galaxies”, Paris (2000年7月5日).
- [75] Yasushi Suto: Stable clustering solutions and the nonlinear stochastic biasing models for dark matter halos, invited talk at the workshop “Cosmology in the New Millennium”, 上海天文台 (2000年10月19日)

- [76] Katsuhiko Sato: Inflationary Universe Model, Marcel Grossman Conf. Rome, (July, 2000)
- [77] Katsuhiko Sato: Neutrino Oscillation and Supernova Neutrino Burst, Physics Potential of Supernova II, UCLA (Feb., 2001)
- [78] Y. Ide, S. Nagataki, S. Tsubaki and K. Sato: Propagation of UHECRs in the Inhomogeneous Source Model, International Workshop: "Extremely High Energy Cosmic Rays - Experiments, Theories and Future direction -" Tokyo, March, 2001.
- [79] Yasushi Mino: 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)
- (国内会議)
- 一般講演
- [80] 落合洋敬, 佐藤勝彦: デイラトン重力理論におけるプレーン世界の宇宙論的解, 日本物理学会年次大会 (新潟大学 2000年9月)
- [81] 金澤敏幸, 川崎雅裕, 柳田勉: 超重力理論での原始ブラックホール生成, 日本物理学会 (新潟大学, 2000年9月).
- [82] 加用一者, 樽家篤史, 須藤靖: 質量密度ゆらぎの確率分布関数, 日本天文学会 2001年春季年会 (千葉大, 2001年3月)
- [83] 桑原健, 樽家篤史, 須藤靖: 銀河の特異速度統計と強非線形領域における2点相関関数, 第13回天文学理論懇談会 (京都大学, 2000年12月)
- [84] 桑原健, 樽家篤史, 須藤靖: ダークマターの特異速度統計とハローの密度プロファイル, 日本天文学会春季年会 (千葉大学, 2001年3月)
- [85] 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)
- [86] 杉之原立史, 藤田裕, 高原文郎: 3次元パラメータ空間における銀河団の進化とX線基準面, 日本天文学会 2000年秋季年会 (群馬県総合教育センター, 2000年10月)
- [87] 杉之原立史: 2点相関関数の準自己相似的成長, 第13回理論天文学懇談会シンポジウム (京大基研, 2000年12月)
- [88] 飯田圭, Gordon Baym: クォーク物質の超流動相: カラー中性の効果, 日本物理学会第56回年会 (東京, 2001年3月29日)
- [89] 佐藤勝彦: 超新星・中性子星の中の中性子過剰核, CNS研究会「RIBの物理」, 理化学研究所, 2000年8月24日
- [90] 渡辺元太郎, 飯田圭, 佐藤勝彦: 超新星コアにおける"Nuclear Pasta"の熱力学的性質に対するneutrino-trappingの効果, 日本物理学会 2000年第55回年次大会 (新潟大学, 2000)
- [91] 長滝重博: 磁気圧駆動型 r-process 元素合成, 日本天文学会秋季年会 (群馬県総合教育センター, 2000年10月)
- [92] Shigehiro Nagataki: Effects of Jetlike Explosion in Collapse-Driven Supernovae, 研究会「高エネルギー宇宙物理学の展望」(京大基研, 2000年11月)
- [93] 長滝重博: Supernova Jets and Explosive Nucleosynthesis, 研究会「元素の起源と初期宇宙・銀河の進化」(上智大, 2001年1月)
- [94] 長滝重博, 佐藤勝彦: Implications of the Discovery of Millisecond Pulsar in SN 1987A, 日本天文学会春季年会 (千葉大, 2001年3月)
- [95] 椿信也, 北山哲, 佐藤勝彦: 銀河団の進化と宇宙線起源のガンマ線, 日本物理学会第55回年次大会 (新潟大学, 2000年9月)
- [96] 椿信也, 北山哲, 佐藤勝彦: 銀河団の進化と銀河団内宇宙線による γ 線, 日本天文学会 2000年秋季年会 (群馬県総合教育センター, 2000年10月)
- [97] 高橋慶太郎, 渡辺万里子, 佐藤勝彦, 戸谷友則: Effects of Neutrino Oscillation on the Supernova Neutrino Spectrum, 日本天文学会春期年会 (千葉大学, 2001年3月)
- [98] 高橋慶太郎, 渡辺万里子, 佐藤勝彦: The Earth Effects on Supernova Neutrino Spectra, 日本物理学会第56回年次大会 (中央大学, 2001年3月)
- [99] 日影千秋, 樽家篤史, 須藤靖: ハローのバイアスを考慮した銀河団のジナス統計, 日本天文学会秋期年会 (群馬県総合教育センター, 2000年10月)
- [100] 日影千秋, 樽家篤史, 須藤靖: Predicting the Genus Statistics for Galaxy Clusters: Comparison with Hubble Volume Simulations, 日本天文学会春期年会 (千葉大学, 2001年3月)
- [101] 渡辺万里子, 戸谷友則, 佐藤勝彦: 超新星ニュートリノとニュートリノ振動, 日本物理学会年次大会 (新潟大学, 2000年9月)
- [102] 渡辺万里子, 戸谷友則, 佐藤勝彦: 超新星ニュートリノと三代ニュートリノ振動, 日本天文学会春期年会 (千葉大学, 2001年3月)
- 招待講演
- [103] 佐藤勝彦: 宇宙論とプランク定数, 日本物理学会プランク定数発見100周年シンポジウム, 新潟2000年9月
- [104] 佐藤勝彦: 宇宙線と宇宙初期, 宇宙線国際プレシンポジウム, 2000年10月14日
- [105] 須藤靖: 21世紀の観測的宇宙論, 日本物理学会宇宙線分科シンポジウム「観測的宇宙論の進展と大型観測装置の役割」於新潟大学 (2000年9月24日)
- [106] Toshiyuki Kanazawa: Cosmological Implications of Recent CMB Observations, SENDAI PHENOMENOLOGY WORKSHOP: NEW DIRECTIONS TO UNIFIED THEORIES, Tohoku University (2000, October).

(セミナー)

- [107] 須藤 靖: ダークハローの非線形確率的バイアスモデル、京都大学物理学教室 談話会 (2001年2月22日) “
- [108] 佐藤勝彦: Neutrino Burst From supernova and Neutrino Oscillation, . Univ. of Canterbury, Christchurch, NZ, 7th, Dec. 2000
- [109] 杉之原立史: コンピュータの中の宇宙、青山学院大学物理学科コロキウム (2000年5月)
- [110] 杉之原立史: コンピュータの中の宇宙、東邦大学物理学科コロキウム (2000年7月)
- [111] 渡辺 元太郎: 高密度物質における Nuclear ”Pasta” の熱力学的性質、理化学研究所 計算科学技術推進室 セミナー (2000年8月)
- [112] 長滝 重博: Supernova Jets and Gamma-Ray Bursts、大阪大学レーザー核融合研究センター、核融合研セミナー (2001年2月6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・中里・梅田・Deng)

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

近年の観測技術の進歩により、より遠くの天体、より暗い天体についての詳細な観測データが大量に得られるようになってきた。遠くの天体を観測する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 γ 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 γ 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10,000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する理論的なモデルの構築を目指している。そのた

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

主系列星から重力崩壊直前までの大質量星の進化を詳しい元素合成とともに計算し、その初期質量と金属量に対する依存性を調べている。特に Pop III 星の元素合成が Pop I, II 星のものどどのように異なるか調べた。

重力崩壊超新星の爆発中の元素合成を調べている。特に Pop III 星の元素合成の特徴を Pop I, II 星のものと比較しハローの金属欠乏星に Pop III 星型の組成パターンが見られるかどうか調べている。

最近、超低金属ハロー星の組成観測で予想外に Zinc の量が多いことが見つかったが、これまで Zinc の起源は明らかでなかった。この研究では低金属 II 型超新星による元素合成の計算を行ない、爆発時の完全 Si 燃焼領域からの合成元素量が多い、すなわち相対的に mass-cut が深いと、超低金属ハロー星に見られる組成パターン (Zn, Co 量の増加と Mn, Cr 量の減少) を同時に説明出来る事、更に観測された豊富な Zn 量を説明するには極超新星のような高エネルギー爆発が必要であることを示した。

100–300 M_{\odot} の大質量星は、酸素燃焼直前の段階で大量の電子・陽電子対生成による力学的不安定性のために星全体が崩壊を起し、さらに崩壊中の酸素燃焼によって崩壊が爆発に転じて超新星爆発を起こす (Pair-Instability Supernovae)。この過程の数値流体計算を行ない、詳細な核反応ネットワークを用いて爆発時の元素合成を計算した。また、この天体の銀河の化学進化への寄与についても調べている。

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。[41]

銀河系ハローの最初の超新星爆発によって重元素がどのように星間ガスに撒き散らされたかを3次元数値流体力学計算を行うことで調べた。その結果、星間ガスが自己重力や放射冷却によって非一様な分布になった場合においても、超新星によって最終的に掃き集められたガスの重元素濃度は一様なガス内で爆発した超新星の時とほぼ同様の値を示すことがわかった。[1]

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 $20 M_{\odot}$ 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], [16], [17], [18], [19], [20]

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。[36], [37]

2.4 極超新星

近年、従来の超新星よりもはるかに大きな(10倍以上)爆発エネルギーをもつ超新星が次々と発見され、これらの天体は超新星を超えるという意味で“極超新星(Hypernova)”と呼ばれるようになった。この極超新星における元素合成の詳しい計算を行ない、普通の超新星における元素合成との比較を行なって、銀河の化学進化に与える影響を調べた。[45], [48], [49]

Ic型極超新星SN1998bwの光度曲線の計算を後期まで延長し、爆発エネルギーと ^{56}Ni の質量の推定値を、それぞれ、 5×10^{52} ergと $0.4 M_{\odot}$ に改訂した。また、計算した後期光度曲線は観測された光度曲線より減光が早く、非球対称爆発を考える必要のあることを見出した。極超新星の非球対称爆発に

伴う元素合成の2次元計算を行なった。後期スペクトルにおける鉄と酸素の輝線に特徴的な振舞いが現れることを示し、これを極超新星1998bwの観測と比較し、この超新星が非常に非球対称性の大きい爆発であることを示した。[15], [33], [34]

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

2.5 その他の超新星

爆発エネルギーと ^{56}Ni の生成量が極端に小さい超新星1997Dの親星の質量を特定するために、後期の光度曲線のモデルと観測を比較した。現段階では大質量と小質量の両方が可能である。[3]

<報文>

(原著論文)

- [1] Nakasato, N. & Shigeyama, T. 2000, “Metal Enrichment of the Primordial Interstellar Medium through Three-dimensional Hydrodynamical Evolution of the First Supernova Remnant,” *The Astrophysical Journal*, 541, L59-L62.
- [2] 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.
- [3] Benetti, S., Turatto, S., Balberg, S., Zampieri, L., Shapiro S.L., Cappellaro, E., Nomoto, K., Nakamura, T., Mazzali, P.A., Patat, F. 2001, “The Fading of SN1997D,” *Monthly Notice of Royal Astronomical Society*, 322, 361-369
- [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, 934-947 (astro-ph/0001464).
- [6] Deng, J. S., Qiu, Y. L., Hu, J. Y., Hatano, K., Branch, D., 2000, “Spectrum Analysis of the Type Ib Supernova 1999dn: Probable Identifications of C II and H-alpha,” *Astrophysical Journal*, 540, 452
- [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 Letters, 534, L189-L192 (astro-ph/0003322).
- [8] Hatano, K., Branch, D., Lentz, E. J., Baron, E., Filippenko, A. V., Garnavich, P. M., 2000, "On the Spectroscopic Diversity of Type Ia Supernovae," *Astrophysical Journal*, 543, 49
- [9] 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.
- [10] 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, 660-669 (astro-ph/9807060).
- [11] Nakasato, N., Mori, M., Nomoto, K., 2000, "Numerical Simulations of Globular Cluster Formation," *The Astrophysical Journal*, 535, 776-787 (astro-ph/0001333).
- [12] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 2000, "The History of the Cosmic Supernova Rate Derived from the Evolution of the Host Galaxies," *Astrophysical Journal*, 539, 26-38 (astro-ph/9908005).
- [13] Mazzali, P.A., Iwamoto, K., Nomoto, K., 2000, "A Spectroscopic Analysis of the Energetic Type Ic Hypernova SN 1997ef," *The Astrophysical Journal*, 545, 407-419 (astro-ph/0007222).
- [14] Mazzali, P.A., Nomoto, K., Cappellaro, E., Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K., 2001, "Can Differences in the Nickel Abundance in Chandrasekhar Mass Models Explain the Relation between Brightness and Decline Rate of Normal Type Ia Supernovae?" *The Astrophysical Journal*, 547, 988-994 (astro-ph/0009490).
- [15] Nakamura, T., Mazzali, P. A., Nomoto, K., Iwamoto, K., 2001, "Light Curve and Spectral Models for the Hypernova SN1998bw Associated with GRB980425," *Astrophysical Journal*, 550, 991-999.
- (会議抄録)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y., "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.
- [20] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Yoshii, Y., "Inhomogeneous chemical evolution of the Galactic halo," 2000, in *The Evolution of the Milky Way: stars versus clusters*. eds. F. Matteucci, F. Giovannelli. (Kluwer Academic Publishers), 531
- [21] Höflich, P., Wheeler, J.C., Nomoto, K., Umeda, H., 2000, "On the Evolution of Type Ia Supernovae with Redshift," in "Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology," ed. J. Truran & J. Niemeyer (Cambridge: Cambridge University Press), p. 89-99.
- [22] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., Hachisu, I., Kato, M., 2000, "Metallicity Effects on Type Ia Supernovae and Cosmic Supernova Rates in Cluster vs. Field Galaxies," *Memorie della Societa Astronmica Italiana*, 71, 461-470.
- [23] Kobayashi, C., Tsujimoto, T., Nomoto, K., 2000, "Metallicity Effects on Type Ia Supernovae and Galactic and Cosmic Chemical Evolution," in *Proc. of "The Chemical Evolution of the Milky Way: Stars versus Cluster"*, ed. S. Fabrizio & F. Matteucci (Dordrecht: Kluwer), 573-578.
- [24] Kobayashi, C., Nomoto, K., Tsujimoto, T., 2000, "Cosmic Supernova Rate History and Type Ia Supernova Progenitors," in *Proc. of "Cosmic Evolution"*, eds. A. Burkert et al. (World Scientific), in press (astro-ph/0102247).
- [25] Kozasa, T., Nomoto, K., 2001, "Dust Formation in Supernovae" in *SN1987A: Ten Years After*, ed. M. Phillips, N. Suntzeff (San Francisco: ASP), in press.
- [26] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 2000, "Line Gamma-Ray Emissions from Supernovae and Supernova Remnants," *Advances in Space Research*, 25. 5: 699-702.
- [27] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 2000, "High Energy Emissions from Supernovae and Supernova Remnants," in *Proc. of Astronomy with Radioactivities*, ed. R. Diehl & D. Hartmann (Garching: MPE), p. 181-187.
- [28] Kumagai, S., Iwabuchi, K., Nomoto, K., 2001, "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.
- [29] Maeda, K., Nakamura, T., Nomoto, K., Hachisu, I., 2001, "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.

- [30] Mazzali, P. A., Cappellaro, E., Turatto, M., Benetti, S., Patat, F., Danziger, I. J., Nomoto, K., Young, T. R., Iwamoto, K., 2000, "Inhomogeneity of SN Types: Results, Implications, and Future Prospects," *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 71, 411-427.
- [31] Mazzali, P.A., Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T., 2001, "Hypernovae and Gamma Ray Bursts" in *ESO Astrophysics Symposia, Gamma Ray Bursts in the Afterglow Era*, ed. L. Piro (Springer-Verlag), in press.
- [32] Mazzali, P.A., Nomoto, K., Maeda, K., Nakamura, T., 2001, "Hypernovae and Gamma Ray Bursts" in *The 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, ed. C.J. Wheeler (New York Academy of Science), in press.
- [33] 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*, 71, 345-355.
- [34] 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.
- [35] Nakamura, T., Umeda, H., Iwamoto, K., Nomoto, K., Hashimoto, M., Hix, W. R., Thielemann, F.-K., 2001, "Hypernova Nucleosynthesis and Implications for Cosmic Chemical Evolution," in *Proc. of "Cosmic Evolution"*, eds. A. Burkert et al. (World Scientific), in press (astro-ph/0101469).
- [36] Nakasato, N., 2001, "Formation and Chemical Dynamics of the Galaxy" in *Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000*, ed. S. Kubono, T. Kajino (Singapore: World Scientific), in press.
- [37] Nakasato, N., Mori, M., Nomoto, K., 2001, "Numerical Simulations of Formation of Globular Cluster" in *IAU Symp. 187, Cosmic Chemical Evolution*, ed. J. W. Truran, K. Nomoto (Dordrecht: Kluwer), in press.

(国内雑誌)

- [38] 宇宙の進化 (放送大学), 2001, 野本憲一 (4-6 章, p. 54-94, 分担執筆)
- [39] 野本憲一, 2000, "天文学科," 東大 2001, p. 173.

(学位論文)

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [40] Umeda, H., Nomoto, K. "Supernovae and Compact Star Remnants," the First KIAS Astrophysics Workshop, Seoul, Korea, 2000/5/24-27.
- [41] Umeda, H., Nomoto, K. "Nucleosynthesis in Massive Pop III Stars: Mass Dependence and Implications for the IMF," *The Physics of Galaxy Formation*, Tsukuba, Japan, 2000/7/3-7.
- [42] Umeda, H. "On the Origin of Diversity of Type Ia Supernovae," ECT workshop on SN Ia, Trento, Italy 2000/7/24-31.
- [43] Deng, J. S., Hatano, K., Nakamura, T., Maeda, K., Nomoto, K., Nugent, P., Aldering, G., Branch, D. "Luminous Supernova 1999as: a Hypernova with 4 Solar Mass Ni56 Ejected?," *New Century of X-ray Astronomy*, Yokohama, Japan, 2001/3/6-8.

招待講演

- [44] Nomoto, K. "Progenitors of Type Ia Supernovae," ECT workshop on SN Ia, Trento, Italy 2000/7/15-8/4.
- [45] Nomoto, K. "Hypernova Nucleosynthesis and Galactic Chemical Evolution," *Workshop on The Influence of Binaries on Stellar Population Studies*, Brussels, Belgium 2000/8/20-25.
- [46] Nomoto, K., Umeda, H., Tsuru, T., "Chemical Abundances in M82 and Hypernova Nucleosynthesis," *New Century of X-Ray Astronomy*, Yokohama, Japan, 2001/3/6-8.

(国内会議)

一般講演

- [47] 梅田秀之, 野本憲一: "Nucleosynthesis in Massive Supernovae; Abundance in Very Metal Poor Stars and a Star Burst Galaxy M82," *元素の起源と初期宇宙・銀河の進化*, 上智大学, 2001/1/22-24.

招待講演

(セミナー)

- [48] Nomoto, K., "Hypernova Nucleosynthesis and Galactic Chemical Evolution," *Colloquium talk at the University of Arizona, Tucson, U.S.A.* 2001/3/26.
- [49] Nomoto, K., "Hypernova Nucleosynthesis and Abundances in Metal-Poor Stars," *Colloquium talk at the University of Texas, Austin, U.S.A.* 2001/3/29.

3 可視光近赤外観測

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

クエーサやセイファート銀河など活動銀河核の光度の時間変動を多波長(可視、近赤外)でモニター観測し、可視変動から赤外変動の遅れ時間を測定することによって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型口径2 mの望遠鏡を設置して、観測を行う計画を推進している。この計画の特徴は活動銀河核を短時間間隔で密にモニター観測しそれを数年間続けることである。したがって観測適地の望遠鏡を占有して観測することが必要であり、望遠鏡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である。

今年度ついにハワイ州マウイ島ハレアカラ観測所に設置した望遠鏡に我々が開発してきた可視赤外多波長カメラを取り付けてファーストライトを果たした。その後、望遠鏡光学系の調整を進め、全天で良好な星像を得ることができるようになった。シーイングの影響も含め最良で0.5秒角の星像サイズを達成した。そのほか、指向精度、追尾精度を改善するために全天にわたって星の位置測定をしてポイテンシング解析などを行った。また自動観測のためにドーム運用の信頼性を向上させるべくその改修を行った。多波長カメラについては当初強力な電磁波障害(観測所ドーム近くの放送塔起源と思われる)によるノイズの増大に悩まされたが、電子回路の改良によりそれを大幅に減少させることに成功した。観測精度、効率の向上のため望遠鏡を含めた機能試験とさらなる電磁波障害対策を進めた。

遠隔自動観測に向けてのシステム開発も進めた。雲量モニターはファーストライトから定常的な運転を行っており、気象モニターと合わせて観測条件についての情報を提供している。これらの情報を総合して観測可能性を判断し指定した天体リストに基づいて自動的に観測を行うシステムを構築した。同システムの安全性や信頼性の向上を計るべく運用試験を繰り返している。

さらに観測システムの総合的な性能評価や観測手順などのノウハウを取得、活動銀河核のダスト層の反響探査法モデルや本計画の距離測定法の検証を目的として近傍の明るい活動銀河核について、可視赤外のモニター観測を行う試験観測を開始した。

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

マウイ島に建設したマグナム望遠鏡用の広視野カメラの開発を引き続き進めている。平成12年度に観測開始予定であったが、カメラの調整が遅れ、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自動ガイダー機能をカメラ側に追加する作業を行っている。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、重力レンズ観測データを得ることができた。赤方偏移が0.41のA851銀河団について、R-bandの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。重力レンズ解析から、銀河団中心とそこから約1分角離れたそれぞれの場所に重力集中を検出した。この銀河団の質量分布はROSAT-HRIが取得したX線強度分布と酷似していることを明らかにした。

3.2 OH夜光除去分光器による $z > 4.4$ Quasars の近赤外分光

重元素のない初期宇宙の星間ガスから星が誕生し、その星の超新星爆発により重元素が生成されるが、鉄は主として低質量星を起源とするIa型超新星で生成される。従って、大質量星を起源とするII型超新星で生成されより早く発生するマグネシウムなどと比較して、鉄の生成には時間がかかる。そのため、高赤方偏移天体のマグネシウムと鉄の存在比を調べ、どの赤方偏移の時点で天鉄の存在比が減少しているのかを確認できれば、宇宙年齢に制限をかける事が可能となる。すばる望遠鏡赤外ナスマス焦点に設置されたOH夜光除去分光器(OHS)を用いて、赤方偏移 $z = 4.4 - 5.3$ QSO 13天体のJH-band(1.1-1.8 μm)分光を行なった。OHSは広い波長範囲を同時にカバーすることができるため、広い範囲にまとまって存在するFeII輝線を高い信頼度で連続光から分離することができ、また同時に検出されるMgII輝線との比較によりFeII/MgII輝線比を求めた。その鉄存在量の赤方偏移分布に基づいて宇宙年齢への制限を得た。

3.3 すばるディープフィールド(SDF)における遠方銀河の解析

SDFは銀河進化やダストの不定性が少ないので深宇宙を探索する上で重要と言われている近赤外線領域で、現在最も高いクオリティと深さを誇るデータである。我々はそのフィールド内の遠方銀河に対し

て詳細な理論解析を行い、幾つかの興味深い結果を得た。まず、銀河計数は現在最も支持されている宇宙定数入りの宇宙モデルの場合、銀河計数は数密度進化なしのモデルでよく説明され、楕円銀河の数密度進化に対し強い制限が得られた。また、SDFの銀河計数は近赤外領域の宇宙背景放射の90%以上を分解して、ハッブル望遠鏡による光学領域のデータを凌ぐことがわかった。一方、銀河計数の積分としての背景放射は独立な広がったソースとしての背景放射観測値に比べ有意に低く、宇宙には銀河起源以外の謎の光が満ちているかも知れないという興味深い結果が得られた。また、異常に赤い銀河が多数発見され、これらは長年探し求められてきた形成途中の楕円銀河がダストに隠されたものである可能性が高いことを示した。

3.4 銀河系ハローの非一様の化学進化モデルとr過程元素、奇数元素の起源

超新星爆発後その超新星残骸で掃き集められた密度の高いガス塊から星が生まれる。つまり超新星爆発で星形成が誘発されるというシナリオに基づき銀河系ハローの化学進化モデルを構築した。このモデルに基づき金属量超欠乏星の[Ba/Mg]の特異なパターンから、r過程元素の起源を探った。我々は質量が $20M_{\odot}$ から $25M_{\odot}$ という非常に限られた範囲の星の超新星爆発で、r過程が起きるといった新たな知見を得るとともに、現時点では観測できていないLa、Ce、Ndといった中性子捕獲元素の金属量超欠乏星での観測の重要性を指摘した。さらに、Na、Alといった奇数元素の、観測で明らかにされたハロー星の化学組成パターンに初めて理論的解釈を与えるとともに、合成放出される重元素量を星の質量と金属量の関数として評価した。

3.5 非一様初期銀河における軽元素進化

軽元素は宇宙開闢数分後のビッグバン元素合成で生成された後、その組成量は銀河系内で時間とともに増えてきたと考えられている。その軽元素は、高速で銀河内を飛び回る原子核(宇宙線)と銀河内に存在する原子核の破碎融合反応により生成される。従って軽元素進化を調べるには、銀河系の化学進化と整合性のある宇宙線の理論モデルの構築が必要不可欠となる。銀河系内の重元素(炭素より重い元素)は局在して分布していたということが観測的に支持されている。そこで、これまで全く考慮されていなかった非一様性を取り入れた銀河系化学進化と整合する軽元素進化モデルを構築した。このモデルから得られる特に重要かつ新しい結果は

以下の二点にまとめることができる。

1. 古い星の軽元素量は、重元素に比べ、その星の年齢と非常に良い相関がある。この結果は、銀河系ハローを構成する古い星の軽元素量の観測からその星の年齢を決定できることを示唆している。
2. リチウム量は、重元素に比べ、高い信頼度で時間を遡って推定することができる。そのため、古い星のリチウム観測からビッグバン元素合成で生成されたリチウム量が非常に精密に決定できる。その結果、宇宙のバリオン密度に対し、これまで以上に強い制限を与えることができた。

3.6 階層的銀河形成モデルを用いた銀河計数の解析

銀河計数は古くから宇宙論パラメータへの制限をつけるための重要な観測量として用いられてきた。これは宇宙の幾何学を測るものであるため、もし時空のプローブとして適切なものを用いれば強力な制限を得ることが可能である。しかし、プローブとして用いられる銀河はその形成過程がまだよく理解されてはいない。銀河計数の解析では、遠方での銀河同士の合体を含む進化効果が重要になるため、適切な銀河の形成モデルを構築することが重要になる。一方、近年の宇宙論的構造形成過程の理解においては、単一の雲が崩壊し小さい天体が形成されるという銀河形成シナリオの描像とは逆に、小さい天体がまず形成され、それらの合体によって大きい天体が形成されてきたというシナリオが標準となりつつある。そこで、このようなシナリオに基づいた準解析的手法による銀河形成モデルが近年開発され、銀河計数も調べられてきた。しかし、その結果は、 $\Omega_0 = 1$ のEinstein-de Sitter (EdS)宇宙でも観測を再現できるというものであり、従来の銀河進化モデルや最近の観測的宇宙論の結果と矛盾するものであった。我々は同様の準解析的モデルを用い、現在での銀河の光度関数を再現するような星形成などのパラメータを選ぶことに注意し、銀河計数を計算した。さらに、銀河内部でのダストによる吸収、銀河間中性水素雲による吸収、遠方で表面輝度が急激に落ちて銀河が検出できなくなる宇宙論的效果を考慮し、Hubble Deep Fieldの結果と比較した。その結果、現行のモデリングの範囲では、EdS宇宙で観測を再現することは難しく、低密度宇宙が好ましいことがわかった。これは銀河計数が銀河形成への重要な制限を与えていることを示している。

3.7 宇宙論的数値計算コードの開発

我々は適合格子分割 (Adaptive mesh refinement、以

下 AMR) を用いた N 体計算コード及び流体計算コードの開発を今まで行ってきた。今年度はまず初めにこの二つの計算コードの統合を目指した。この二つのコードは AMR を用いて立方格子を再帰的に空間を細分する点では同じではあったが、時間方向の分割が異なっていた。即ち、流体計算コードにおいて格子は空間的に細分されるだけでなく、時間幅が格子の大きさに反比例するように時間的にも細分されていた。しかしながら、 N 体計算コードの場合、各粒子の時間幅は全て一定となっていたため、格子が細分されるにつれて系全体の時間幅が小さくなっていった。そこで、 N 対計算コードにも時間方向の分割を導入した。

続いて、 N 体計算コードについては東大情報基盤センターの SR8000 と国立天文台の VPP5000 に対しそれぞれに最適化を行った。現在はメモリが 16GB ある VPP5000 システムを用いた計算を実行しており、100Mpc の領域の宇宙が現在の大きさのおおよそ 50 分の 1 の時から現在に至るまでの計算を 256^3 体用いても僅か 4 日で行うことができた。100Mpc の領域での 256^3 体計算はこの分野での最大規模の計算と同規模であり、今後このコードを並列化すれば 100Mpc という比較的狭い領域における 512^3 体計算という他に類が無く、銀河の統計的性質を調べる上で欠くことのできない計算が実行できる見通しがあった。

3.8 N 体シミュレーションと準解析的銀河形成モデルによる数値的銀河カタログの作成

準解析的手法による銀河形成モデルは、拡張 Press-Schechter モデルで構成されたダークハローのマーキングツリーに、星やガスの成分を加えることによって、銀河形成と進化を追うモデルとして考案された。我々は拡張 Press-Schechter モデルに基づくマーキングツリーの代わりに、AMR を用いた高分解能 N 体シミュレーション結果からハローファインディングによって抽出されたマーキングツリーを使い、ハローの空間情報まで含めた銀河モデル、すなわち数値的銀河カタログを作成した。

<報文>

(原著論文)

- [1] Maihara, T., Iwamuro, F., Tanabe, H., Taguchi, T., Hata, R., Oya, S., Kashikawa, N., Iye, M., Miyazaki, S., Karoji, H., Yoshida, M., Totani, T., Yoshii, Y., Okamura, S., Shimasaku, K., Saito, Y., Ando, H., Goto, M., Hayashi, M., Kaifu, N., Kobayashi, N., Kosugi, G., Motohara, K., Nishimura, T., Noumaru, J., Ogasawara, R., Sasaki, T., Sekiguchi, K., Takata, T., Terada, H., Yamashita, T., Usuda, T., and Tokunaga, A.: Subaru Deep Survey. I. Near-Infrared Observa-

tions; Publications for the Astronomical Society of Japan, **53**, 25-36 (2001).

- [2] Suzuki, T. K. and Yoshii, Y.: A New Model for the Evolution of Light Elements in an Inhomogeneous Galactic Halo; The Astrophysical Journal, **549**, 303-319 (2001).
- [3] Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., and Motohara, K.: Diffuse Extragalactic Background Light versus Deep Galaxy Counts in the Subaru Deep Field: Missing Light in the Universe?; The Astrophysical Journal, **550**, L137-L141 (2001).
- [4] Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., and Motohara, K.: Near Infrared Faint Galaxies in the Subaru Deep Field: Confronting the Theory with Observations for Galaxy Counts, Colors, and Size Distributions to $K \sim 24.5$; The Astrophysical Journal, **559**, 592-605, (2001).
- [5] Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., and Motohara, K.: Hyper-Extremely Red Objects in the Subaru Deep Field : Evidence for Primordial Elliptical Galaxies in Dusty Starburst Phase; The Astrophysical Journal, **558**, L87-L91, (2001).
- [6] Nagashima, M., Totani, T., Gouda, N., and Yoshii, Y.: Galaxy Number Counts in the Hubble Deep Field as a Strong Constraint on a Hierarchical Galaxy Formation Model; The Astrophysical Journal, **557**, 505-518, (2001).
- [7] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: N -Body Code with Adaptive Mesh Refinement; The Astrophysical Journal, **558**, 463-475, (2001).

(会議抄録)

- [8] Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., Motohara, K., Terada, H., Gotou, M., Iwai, J., Tanabe, H., Taguchi, T., Hata, T., and Oya, S.: K -band Extragalactic Background Light from Deep Galaxy Counts in the Subaru Deep Field; IAU Symposium 204, The Extragalactic Infrared Background and its Cosmological Implications, eds. M. Harwit, and M. G. Hauser (San Francisco, ASP), 84-90 (2000).
- [9] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: A New Model for Chemical Evolution of the Galactic Halo; in the Proceedings of the 35th Liege International Astrophysics Colloquium, The Galactic Halo : From Globular Cluster to Field Stars, eds. A. Noels, P. Magain, D. Caro, E. Jehin, G. Parmentier, and A. A. Thoul (Paris, Institut d'Astrophysique), 51-57 (2000).
- [10] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: A New Model for Chemical Evolution of the Galactic Halo: Formulation and Applications; in the Proceedings of the MPA/ESO Workshop, The First Stars', eds. A. Weiss, T. Abel, and V. Hill (Berlin, Springer), 181-182 (2000).

- [11] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Inhomogeneous Chemical Evolution of the Galactic Halo; in the Proceedings of “The Chemical Evolution of the Milky Way: Stars versus Cluster”; eds. S. Fabrizio, and F. Matteucci (Dordrecht, Kluwer), 573-578 (2000).
- [12] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Cosmological Hydrodynamics code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement; in the Proceedings of ASP Conference Series 222, The Physics of Galaxy Formation, eds. M. Umemura, and H. Susa (San Francisco, ASP), 419-422 (2000).
- [13] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Cosmological Hydrodynamics code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement; in the Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium on “Birth and Evolution of the Universe”, eds. K. Sato, and M. Kawasaki (Tokyo, Universal Academy Press), 445-446 (2001).
- [21] 矢作 日出樹, 吉井 謙: 適合格子分割を用いた N 体計算によるダークハローの性質及び分布, 日本天文学会 2000 秋季年会 (群馬県総合教育センター, 2000 年 10 月) .
- [22] 戸谷 友則 (国立天文台), 吉井 謙, 岩室 史英 (京大理), 舞原 俊憲 (京大理), 本原 顕太郎 (京大理): Hyper-Extremely Red Objects in the Subaru Deep Field: Evidence for Primordial Elliptical Galaxies in Dusty Starburst Phase, 日本天文学会 2001 年春季年会 (千葉大学, 2001 年 3 月) .
- [23] 岩室 史英 (京大理), 本原 顕太郎 (国立天文台), 舞原 俊憲 (京大理), 吉井 謙, 原島 隆 (京大理), 木村 仁彦 (京大理), 島 尚徳 (京大理), 衛藤 茂 (京大理), すばる望遠鏡チーム: OHS による $z > 4.4$ Quasars の近赤外分光, 日本天文学会 2001 年春季年会 (千葉大学, 2001 年 3 月) .
- [24] 峰崎 岳夫, 吉井 謙, 青木 勉, 小林 行泰 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (国立天文台), 菅沼 正洋, 富田 浩行, B. A. Peterson (ANU): MAGNUM 計画, 第 10 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, 2001 年 1 月).
- [25] 長島 雅裕 (国立天文台), 戸谷 友則 (国立天文台), 郷田 直輝 (国立天文台), 吉井 謙: 銀河計数から探る銀河形成過程, 理論天文学懇談会シンポジウム (京大基礎物理学研究所, 2000 年 12 月) .
- [26] 矢作 日出樹: 適合格子分割を用いた N 体計算によるダークハローの性質及び分布, 新世紀における銀河宇宙観測の方向 (東大三崎臨海実験所, 2001 年 2 月) .

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., and Motohara, K.: K -band Extragalactic Background Light from Deep Galaxy Counts in the Subaru Deep Field; IAU Symposium 204 (Manchester, Aug. 2000).
- [15] Tsujimoto, T., Shigeyama, T., and Yoshii, Y.: Theoretical Interpretation of Abundance Trends Seen in Extremely Metal-poor Stars; Cosmic Evolution (Paris, Nov. 2000).
- [16] Suzuki, T. K., and Yoshii, Y.: Evolution of Light Elements in an Inhomogeneous Galactic Halo; Cosmic Evolution (Paris, Nov. 2000).
- [17] Nagashima, M., Totani, T., Gouda, N., and Yoshii, Y.: Galaxy Number Counts in a Hierarchical Merger Model; The Physics of Galaxy Formation (Tsukuba, July 2000).
- [18] Yahagi, H., and Yoshii, Y.: Cosmological Hydrodynamics Code with Dynamically Adaptive Mesh Refinement; The Physics of Galaxy Formation (Tsukuba, July 2000).

(国内会議)

一般講演

- [19] 青木 勉, 吉井 謙, 峰崎 岳夫, 小林 行泰 (国立天文台), 塩谷 圭吾 (国立天文台), 菅沼 正洋, 富田 浩行, B. A. Peterson (ANU): 自動観測を目指す MAGNUM 望遠鏡の制御系, 天文情報処理研究会第 42 回会合 (県立ぐんま天文台, 2000 年 6 月).
- [20] 長島 雅裕 (国立天文台), 戸谷 友則 (国立天文台), 郷田 直輝 (国立天文台), 吉井 謙: 階層的銀河形成モデルを用いた銀河計数の解析, 日本天文学会 2000 秋季年会 (群馬県総合教育センター, 2000 年 10 月) .

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・分子に着目して、サブミリ波望遠鏡による観測的研究と、実験室での分子分光を行っている。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、テラヘルツ波領域(波長 1 mm から 0.1 mm)の検出技術の開拓に力を入れており、わが国ではじめて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、809 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などと比較することで、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、このような研究を銀河系スケールで展開するために、口径 18cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発している。さらに、国立天文台が中心となって推進する ASTE 計画、ALMA 計画にも積極的に参加している。

4.1 観測装置の開発・改良

富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡(口径 1.2 m)は、サブミリ波を観測するわが国で初めての望遠鏡である。富士山頂は冬季に気温が低く乾燥するので、サブミリ波天体観測を妨げる水蒸気が少なく、観測には絶好の場所である。その優れた観測条件を活かして、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)の観測を行い、星間分子雲の詳細構造や形成・進化、およびそこでの星形成過程を研究している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を行い、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、衛星通信回線を利用した遠隔制御によって観測を行っている。3 回の冬季の観測シーズンで、492 GHz のスペクトル線については 35 平方度に及ぶ領域のサーベイを行うことができた。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 分布の全貌を描き出しつつある。2000 年-2001 年の観測シーズンでは、昨年度と同様に 345 GHz/492 GHz/809 GHz の 3 バンド受信機を搭載した。しかし、492 GHz ミクサーが観測開始直後に不調となったため、809 GHz の CI スペク

トル線観測に専念した。このスペクトル線の観測は、技術的困難のためにこれまで世界的にみてもほとんど行われていなかった。しかし、我々の 1 シーズンにわたる集中的観測の結果、いくつかの代表的分子雲において、はじめてその 2 次元分布を明らかにすることができた。また、中小質量星形成領域において、はじめて 809 GHz のスペクトル線を検出した。その結果、CI が存在する領域の物理状態を直接調べることが可能となった。

本研究は初期宇宙研究センター、ビッグバン宇宙国際研究センターのプロジェクトの 1 つとして推進しており、国立天文台の関本裕太郎氏、立松健一氏、野口卓氏、大石雅壽氏、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、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 本年度は 345GHz/492GHz/809GHz (すべて DSB ミクサー) の 3 バンド対応の受信機を搭載した。345GHz 帯と 492GHz 帯の 2 バンドを周波数帯域の広い distributed junction タイプの 492GHz 帯 SIS 素子ひとつで受信できるようにし、ミクサー 2 台で 3 バンドに対応した。492GHz ミクサーで、492GHz 帯と 345GHz 帯の 2 バンドを受信するために、必要な局部発振信号の切り換えシステムを製作した。光学系でのロスを低減した結果、809GHz 帯のシステム雑音温度は 4400K となり、従来の 3 分の 2 に減少させることができた。

音響光学型分光計の開発 18cm 望遠鏡ならびに、富士山頂サブミリ波望遠鏡で使用することを目的とした音響光学型分光計(AOS)を開発した。プラグセルは現在富士山頂で稼働している AOS(一号機)と同型のものを用いて(Marconi)、光学系を含む設計、製作を行った。LD には HL7851G (Hitachi)、CCD アレイには TH7811A (Thomson)を用いている。筐体の大きさは可搬性を重視し、(405 × 175 × 135 mm)と小型にした(一号機の 3 割の容量)。現在、入力信号レベル -34 dBm/MHz に対して、3 dB バンド幅 700 MHz、周波数分解能 1.6 MHz を達成していて、一号機より 10 dB 弱い信号を検出することが可能となった。

高速積分器の開発 音響光学型分光計から出力される分光データに対して高速な積分処理を行い、on the fly(OTF)方式のマッピング観測に対応可能な積分器の開発を行った。今回製作した積分器には、現行の富士山望遠鏡の積分器に比べて約 4 倍の処理速度の Z80CPU を搭載して高速化を実現した。また、データ入出力ポートを 2 系統備えたメモリ IC を採用することにより、データ転送時のデッドタイムを 32ms まで抑えた。ホスト計算機へのデータ転送は GPIB インターフェースを介して行なう。可搬性を考慮して省スペース化を図り、現行の富士山望遠鏡の積分器と比べて半分以下の容積を実現した。

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飛躍的に向上させる目的

で、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。このチョッピング副鏡は、その駆動機構として、従来採用されてきた複数のアクチュエータで副鏡を支持する方式とは異なり、向かい合う歯車状の電磁石と永久磁石から成る全く新しい方式を採用している。現在は実験室において、二つの試作機の実験結果を踏まえて設計・製作された搭載機の性能評価および調整を行っている。現段階で5 Hzの振動周期で duty cycle \approx 88% を達成している。この夏、望遠鏡に搭載し観測に用いる予定である。

望遠鏡モニタプログラムの改良 富士山望遠鏡の操作・モニタの諸プログラムは、従来は UNIX の X-Window システムを利用することで遠隔操作を実現していた。しかしながら、コンソール-望遠鏡間の通信は通信速度 64kbps の衛星通信を介しているために、従来の X ウィンドウを転送する方法は負荷が大きく、望遠鏡操作の少なからぬ非効率化を招いていた。今回、富士山頂-コンソール間のデータ転送を行なうプログラムを新たに開発した。このプログラムは、転送されるデータ量を必要最低限に止め、GUI 操作のウィンドウの生成をコンソール側で行なう事により、データ転送に要する時間の大幅な短縮を実現している。

可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

本研究室では、小型（口径 18cm）で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発している [22]。この望遠鏡は、中性炭素原子が放射する二本のサブミリ波スペクトル線 ($CI^3P_1-3P_0$: 492GHz, $3P_2-3P_1$: 809GHz) による広域サーベイ観測を行うことによって、銀河系スケールにおける原子ガスの分布・運動・物理状態を調べることが目的としている。この望遠鏡の特長は、可搬型のため世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことができ、しかも主鏡口径が 18cm と小さい ($HPBW = 13' @ 492GHz$) 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。

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目的で、492GHz/809GHz 帯の小型 SIS 受信機を開発した。ミキサ素子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。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 冷凍機を用いている。フィード・ホーンにはダイアゴナル・ホーンを採用した。実験室における 492GHz 帯受信機の望遠鏡に搭載した状態での総合性能は、 $T_{sys} = 203$ K である。このうち入力部分の雑音成分は $T_{RF} \approx 150$ K と比較的高く、光学系およびデューワー窓材の選択等にまだ改善の余地が残されている。

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として、Windows NT 計算機をベースにした制御システムを開発した。機器の制御およ

びモニタは、基本的には GPIB インターフェースを使用している。制御ソフトウェアは Visual C++ 言語により記述され、高地での作業性を考慮して操作はほぼ全て GUI で行えるようになっている。

チリ・アタカマ高地でのテスト運用 本年度末（平成 13 年 3 月）、この可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡をチリ・アタカマ高地パンパラボラへ移設し、約二週間のテスト運用を行った。今回は天候不順のため、残念ながら科学的意義のあるデータは取得できなかったが、標高 4800m の高地で受信機デューワー内が 3K 近くまで冷却できた事を始め、望遠鏡システムが正常に機能することが確認された。



図 4.1 a: アタカマ高地パンパラボラでテスト運用中の可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

ASTE は、チリ・アタカマ砂漠パンパラボラに、口径 10 m のサブミリ波望遠鏡を移設し、稼働させる計画である。この望遠鏡は、日米欧共同で進められている Atacama Large Millimeter Array (ALMA) 計画のプロトタイプであり、ALMA 建設予定サイトであるパンパラボラで、初めて実際に試験運用を行なう。また、ASTE は、南半球における初めての大口徑サブミリ波望遠鏡である。本研究室では昨年度に引き続き、国立天文台、東京大学天文学科、名古屋大学、大阪府立大などのグループと共同で、この計画を推進してきた。望遠鏡は、2001 年 6 月まで野辺山で試験運用したのち、チリに移設する予定である。

ASTE 350 GHz 帯受信機の開発 本研究室では、野辺山のグループと共同で、ASTE に搭載するサブミリ波 350 GHz 帯超伝導受信機の開発を行ってきた。本年度は、IF の total power の安定性の評価、SIS junction にかかる磁場の最適化、LO 光学系のアライメントの最適化などを行なった。その結果、受信機雑音温度は、最も良いところで 52 K @ 352 GHz と量子雑音限界の約 3 倍の値を示した。また、デューワー内部の温度と真空度の監視システムの製作や LO の Phase Lock 制御の一部リモート化も行った。

2001 年 1 月から、野辺山において、この受信機を望遠鏡に搭載し、CO ($J = 3 - 2$): 346 GHz, CS ($J =$

7-6):343 GHz, HCN($J=4-3$):356 GHz などのテスト観測を行った。システム雑音温度は、比較的天候の良い時で 600 K(DSB) を得ている [30]。

4.2 星間物質の観測的研究

オリオン巨大分子雲における CI 広域分布とその起源昨年度までに、Orion A, B 巨大分子雲に対する CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線の観測を行ってきた。観測領域は約 15 平方度、観測点数は約 8000 点にも及び、世界最大規模のものである。観測の結果、CI 輝線の分布は大質量形成領域である Orion nebula(M42) や NGC2024 から、低温な暗黒星雲にいたるまで、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の分布とよく一致することがわかった。そして、CI と CO の存在量比も、分子雲のバルク領域に関しては 0.1-0.2 とほぼ一定の値を示した。CI/CO 比が意味することを調べるため、CI の強度をもとに同定した CI 雲に対してピリアル解析を行った。すると、CI/CO 比は分子雲が希薄なガスから形成される進化過程に相関を持つ可能性が明らかになった。しかし、なぜ分子雲バルク全域に対して CI/CO 比がほぼ一定の値を示すのかは、既存のモデルでは説明が困難であり、CI が分子雲内部で CO と共存できる新たなメカニズムの可能性を示唆している [23]。

牡牛座暗黒星雲 Heiles' Cloud 2 周辺領域の CI 広域観測 Heiles' Cloud 2 (HCL2) 周辺の CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線の観測は、現時点で 3.4 平方度、観測点数は 1389 点とかつてない規模に及んでいる。その結果から、この領域では以下に示す 3 つの特徴的領域が連続的に連なっていることがわかってきた。1. Dense Core 領域 CI/CO 比が 0.1 程度と低く、CI は主に分子雲表面近くの光解離 (PDR) 領域に付随している。

2. CI Rich Cloud 領域 CI/CO 比が 0.2-0.7 程度と高く、CI から CO への変換がまだ十分に進んでいない。この領域は物質の存在量も比較的多い(可視減光 > 7 mag) ことから、形成初期段階にある若い分子雲ではないかと考えられる。3. Translucent Cloud 領域 CI/CO 比が 0.5 以上と高く、可視減光は 1-4 mag と低い値を示す。星間紫外光が雲内部まで浸透し、雲全体に PDR 領域が広がっている。

2001 年 2 月には、CI Rich Cloud 中の CI 輝線強度ピーク方向に対して、CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線の観測を行った。輝線は検出できなかったが、その結果 CI の励起温度は 15 K 以下であることが導かれた。これにより、CI Rich Cloud における CI/CO 比は Dense Core 領域のそれよりも有意に高いことが確認された。さらに、2000 年 3 月、国立天文台野辺山 45m 望遠鏡を用いて CI Rich Cloud で CS, SO, HCO⁺ 分子を検出した。これにより、CI Rich Cloud 内部には、 10^4 cm^{-3} 程度の密度を伴い、星間紫外光から十分遮断された領域が存在することが明らかとなった [24]。

巨大分子雲 M17 の CI $^3P_2-^3P_1$:809GHz 輝線マッピング観測 M17(オメガ星雲) は距離 2.2 kpc にある HII 領域で、その南西側に分子雲を伴っている。今

年度はこの領域の CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線のマッピング観測を進めた。最終的な観測領域は M17SW を中心に 160 点、 $30' \times 20'$ に達した。CI ピークで $^3P_2-^3P_1$ 輝線と $^3P_1-^3P_0$ 輝線の強度から求めた CI 励起温度は $T_{\text{ex}} = 29.8 \pm 3.5 \text{ K}$, CI 柱密度 $N(\text{CI}) = 7.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ であった。全体的には $^3P_2-^3P_1$ 輝線の分布は $^3P_1-^3P_0$ 輝線とほぼ同じように分布していたが、北東部で多少 $^3P_2-^3P_1$ 輝線が強くなっている。また CI 励起温度には東から西にかけての温度勾配が見られる。CI の柱密度分布と温度勾配は ^{13}CO の柱密度の分布と温度勾配 (Howe et al. 2000) とよく一致した。このことは CO と CI が分子雲内の同じ領域に存在することを示している [25]。

散光星雲 NGC1333 方向での CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線の検出 中小質量星形成領域である NGC1333 は、Orion KL 領域などの大質量星形成領域に比べると比較的低温 ($T_{\text{k}} \sim 20 \text{ K}$) かつ低密度 ($n(\text{H}_2) \sim 10^{3-4} \text{ cm}^{-3}$) の領域であることが知られている。我々は、この NGC1333 コア領域の H-H12 を中心とした 3×3 点に対して一点 380 秒の積分を行った結果、9 点全てにおいて有意な CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線を検出した [26]。大質量星など強烈な紫外光源の影響の無いこのような領域において、CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線が検出されたのは、世界的にも初めてのことである。昨年取得した CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線の結果と併せて、局所熱平衡を仮定して NGC1333 コアの物理状態を求めた。CI の励起温度は 27 K であり、これは NH₃ の観測から求められている値 ($\sim 20 \text{ K}$) に比べてやや高い。また CI 柱密度は $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、これから CI/CO 存在比は 0.24 という値が得られた。この値は、Orion KL 領域などの大質量星近傍における値 (CI/CO ~ 0.05) に比べて非常に高い値であり、むしろ紫外光源の影響の少ない静的な領域のそれに一致する。

ρ Oph 領域における CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線の検出 ρ Oph 領域における CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線の検出 ρ Oph 領域の暗黒星雲 L1688 に対して昨年度に行なった CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線観測における 2 つの強度ピーク位置 (ρ Oph A, CI peak) について、CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線の観測を行ない、両方の位置において検出に成功した。2 輝線の観測結果から CI の励起温度を求めたところ ρ Oph A では 44 K, CI peak では 29 K となった。これらの値は CO の観測から得られたものよりも若干大きい、CI peak よりも ρ Oph A の方が高温であるという傾向には矛盾しない。この温度で局所熱平衡を仮定して CI/CO 柱密度比を求めたところ、0.10(ρ Oph A), 0.17(CI peak) となった。CI peak における比は他の領域より大きく、その原因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。

Orion A 分子雲の CI $^3P_2-^3P_1$ 輝線観測 Orion A 分子雲は、太陽系近傍 (距離 450 pc) の巨大分子雲のひとつであり、大質量星が活発に生まれている領域である。本年度は CI の $^3P_2-^3P_1$ 輝線を用いて、Orion KL を中心に 1.5 グリッドで 252 点 (約 0.15 平方度) におよぶ観測を行なった。その結果、分子雲の ridge に沿って広く分布している CI $^3P_1-^3P_0$ 輝

線に較べて、CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線は KL 付近に局在しており、CI ${}^3P_2-{}^3P_1/{}^3P_1-{}^3P_0$ 強度比が ridge の東側で高くなっていることが分かった。これは、OB 型星である θ^1, θ^2 による強烈な紫外線によって照らされていることによるものである。局所熱平衡を仮定して柱密度と励起温度を求めた結果、(1) CI 柱密度の分布と ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線の積分強度の分布がほとんど一致している、(2) Orion KL, S 領域で柱密度は大きく ($8-10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$)、ridge にも CI が広く分布している、(3) θ^1, θ^2 ori の周りを取り囲む高温領域 (60–100K) が存在している、などのことが分かった。さらに、CI の柱密度の分布と励起温度の分布を重ね合わせると、柱密度ピークは高温領域に対して励起星から遠い側にあることも分かった。このことから紫外線の強さは CI の柱密度を決定する主要な要因ではなく (PDR モデルでもそのことは指摘されている)、むしろ、geometry も含めた分子雲の構造による可能性があると考えられる [31]。

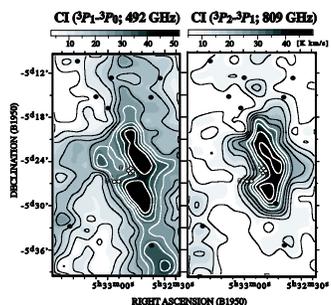


図 4.2 b: Orion A 分子雲の CI 積分強度図: 黒丸は IRAS point source、白丸は O, B 型星

巨大分子雲 DR21 の CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線による観測 典型的な大質量星形成領域として知られる巨大分子雲 DR21 のほぼ全域にわたり、CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線を富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて観測した。この領域の CI の分布は過去の ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線による観測によって、CO の分布とほぼ一致していることが明らかになっているが、今回の観測に基づく LTE 計算の結果は、HII region に近い南部に位置するコア (DR21, W75S) では $N(\text{CI}) \sim 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 、 $T_{\text{ex}} \sim 35 \text{ K}$ であったのに対し、近傍に O 型星の存在しない北のコア (CO9) においては、 $N(\text{CI}) \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 、 $T_{\text{ex}} \sim 23 \text{ K}$ であることを示している。このことは、周囲の物理的な環境や、コアの性質の違いを反映して、各々の領域の CI が異なる起源から生じている可能性を示唆する。

Orion B 分子雲における CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線のマッピング観測 Orion B 分子雲は距離約 400pc に位置する巨大分子雲の一つで、典型的な大質量星形成領域である。本年度は、Orion B 分子雲内の NGC2023, NGC2024 領域において CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の観測を行った。観測点は 1.5 分角グリッドで合計 264 点、約 0.2 平方度の領域にわたっている。CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の広がり、CI ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線とおおむねよい相関を示すが、NGC2024 領域の強度ピーク方向に約 1.5 分のずれが見られた。また今回の観測により ${}^3P_2-{}^3P_1/{}^3P_1-{}^3P_0$ の強度比から LTE モデルを用いて、直接 CI の光学的厚み、励起温度、柱密度を求めた。その結果、励起温度の高い領域は ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の強度ピーク方向に集中しており、柱密度の分布は ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線の積分強度分布にほぼ一致することがわかった。 ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線強度ピーク方向における励起温度、柱密度はそれぞれ 73 K、 $6.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ と求められた。さらに、 ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の強度ピーク方向は CO, CS, CII などのピークとほぼ一致することから、支配的な励起星が ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線強度ピーク方向に存在することが予想される [33]。

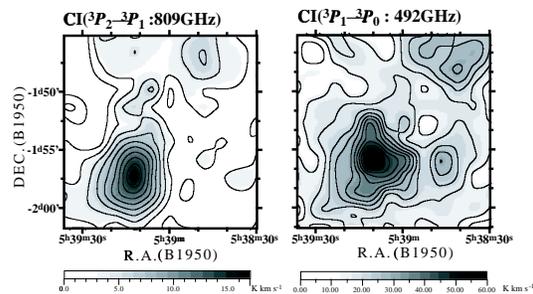


図 4.2 c: Orion B 分子雲/NGC2024 領域における、CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線積分強度図 (左) と CI ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線積分強度図 (右)

Photodissociation Region (PDR) モデル計算 星間空間に存在している分子雲では力学的変化 (収縮など) だけでなく、化学反応による化学的变化も起こっている。PDR モデルとは、外部からの FUV ($6 \text{ eV} < h\nu < 13.6 \text{ eV}$) に照らされた分子雲の状態を、chemical network (gas-gas, gas-dust 反応, photodissociation 反応) を解くモデルである。具体的には、FUV 強度: G_0 、cloud の密度: n と温度: T 、abundance の初期値をパラメータとし、スラブを切って各スラブごとに chemical network (418 個の分子種、4138 個の反応: 反応コードは NSM のものを使用) を時間に対して解いた。その結果、CO, CI の存在量は時間に対して敏感で、CI/CO 柱密度比は時間に対して減少していく傾向を示した。現在のコードでは、熱収支や cloud の収縮による密度変化は考慮に入れていない。そのため、より現実に近づくためにこれらの効果を加えたシミュレーションを今後行っていく予定である。

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、スペクトル線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。

FCO ラジカルのマイクロ波スペクトル FCO ラジカルは大気の化学反応過程に重要な役割を果たしていると考えられている。この FCO ラジカルのマイクロ波領域でのスペクトルをフーリエ変換ミリ波分光計を用いて初めて測定した。FCO ラジカルは F_2CO とアルゴンの混合ガスを高圧放電させて生成し、その回転スペクトルを 22, 44, および 67 GHz 領域に測定した。スペクトルを解析することにより、この分子の電子状態についての情報を得た [10]。

フーリエ変換ミリ波分光計の測定周波数の 85 GHz までの拡張 これまで当研究室のフーリエ変換ミリ波分光計は約 10 GHz から 52 GHz の周波数帯で測定が可能であった。しかし 50–100 GHz の電波領域には HCN, HCCl など、天文学や化学反応動力学の研究に応用できる、比較的重要で軽い分子の回転遷移が存在する。これらの分子の遷移周波数を正確に測定する目的でこの分光計の測定周波数領域を 65–85 GHz に拡張した。ミリ波の共鳴キャビティへの導入には減衰が大きい同軸ケーブルの代わりに導波管を用い、専用の半導体素子を用いることにより 65–85 GHz 領域の分子の遷移をこのタイプの分光計では初めて測定することができるようになった。これを用いて HCCl (71 GHz) および FCO (67 GHz) のスペクトルを測定した。

エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光 エチルラジカル (C_2H_5) は基本的なアルキルラジカルである。エチルラジカルはメチル基の内部回転自由度をもち、その分子構造に興味を持たれている。今回、フーリエ変換ミリ波分光計を用いて、その回転スペクトル線 ($N_{K-1, K+1} = 1_{01} - 0_{00}$) を初めて検出することに成功した。エチルラジカルは C_2H_5I を Ar の中に希釈し、放電することによって生成した。43 GHz 領域を探索したところ、全部で 28 本の C_2H_5 回転スペクトル線を検出した。そのスペクトルは電子スピンや核スピンにより複雑に分裂するが、ゼーマン効果の解析から、うち 19 本を帰属する事ができた。それらを用いて最小二乗解析を行い、回転定数および微細、超微細構造相互作用定数を決定した [29][18]。

< 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] Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Masatoshi Ohishi, & Satoshi Yamamoto, "Observations of NH_2D toward Dark Molecular Clouds", *The Astrophysical Journal*, **535**, 227-230 (2000).
- [3] Hiroko Shinnaga & Satoshi Yamamoto "Zeeman Effect on the Rotational Levels of CCS and SO in the $^3\Sigma^-$ Ground State", *The Astrophysical Journal*, **544**, 330-335 (2000)
- [4] Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Tomoharu Oka, Masafumi Ikeda, Hiroyuki Maezawa, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Keisuke Miyazawa, Sheun-Cai Shi, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Junji Inatani, Kazufusa Noda, & Yuichi Togashi, "The Mt. Fuji Submillimeter-Wave Telescope", *Rev. Sci. Instr.*, **71**, 2895-2907 (2000).
- [5] Satoshi Yamamoto, Hiroyuki Maezawa, Masafumi Ikeda, Tetsuya Ito, Tomoharu Oka, Gaku Saito, Mitsuhiko Iwata, Kazuhisa Kamegai, Takeshi Sakai, Yutaro Sekimoto, Ken'ichi Tatematsu, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Keisuke Miyazawa, Shuji Saito, Hideo Fujiwara, Masatoshi Ohishi, Hiroyuki Ozeki, & Junji Inatani, "Observation of the $CI\ ^3P_2 - ^3P_1$ Line toward the Orion KL Region", *The Astrophysical Journal*, **547**, L165-L169 (2001).
- [6] Tomoya Hirota, Masafumi Ikeda, & Satoshi Yamamoto, "Observations of DNC and $HN^{13}C$ in Dark Cloud Cores", *The Astrophysical Journal*, **547**, 814-828 (2001).
- [7] T. Oka, S. Yamamoto, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, K. Kamegai, T. Sakai, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S.-C. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, & J. Inatani, "Atomic Carbon and CO Isotope Emission in the Vicinity of DR15", *The Astrophysical Journal*, **556**, in press (2001)
- [8] K. Sorai, T. Hasegawa, R. S. Booth, M. Rubio, J.-I. Morino, L. Bronfman, T. Handa, M. Hayashi, L.-Å. Nyman, T. Oka, S. sakamoto, M. Seta, & K. S. Usuda, "The $CO\ J=2-1/J=1-0$ Ratio in the Large Magellanic Cloud", *The Astrophysical Journal*, **551**, 794- (2001)
- [9] D. Pierce-Price, J. S. Richer, J. S. Greaves, W. S. Holland, T. Jenness, A. N. Lasenby, G. J. White, H. E. Matthews, D. Ward-Thompson, W. R. F. Dent, R. Zylka, P. Mezger, T. Hasegawa, T. Oka, A. Omont, & G. Gilmore, "A Deep Submillimeter Survey of the Galactic Center", *The Astrophysical Journal*, **545**, L121-L125 (2000)
- [10] Hideta Habara & Satoshi Yamamoto, "Microwave spectrum of the FCO radical in the $^2A'$ electronic

ground state” Journal of Molecular Spectroscopy, in press (2001)

- [11] Hideta Habara & Satoshi Yamamoto, “Microwave spectrum and molecular structure of the HSC radical”, Journal of Chemical Physics, **112**, 10905-10911 (2000)

(学位論文)

- [12] 池田正史: Distribution of Atomic Carbon in the Whole Region of Orion Giant Molecular Cloud (オリオン巨大分子雲における炭素原子の広域分布), (博士論文)
- [13] 前沢裕之: Structure and Evolution of Taurus Molecular Cloud as studied by Submillimeter-Wave CI Line Observations (サブミリ波 CI 輝線観測による牡牛座分子雲の構造と進化の研究), (博士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] T. Oka, T. Ito, K. Kamegai, N. Kuboi, K. Matuo, K. Tanaka, & S. Yamamoto, “CI $^3P_2-^3P_1$ Line Observations of Nearby Star Forming Regions”, “Spectroscopy in the 21st Century”, Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [15] H. Habara, E. Kim, & S. Yamamoto, “Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy of Transient Molecules in the Frequency Range up to 85 GHz”, “Spectroscopy in the 21st Century”, Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [16] M. Ikeda, T. Oka, & S. Yamamoto, “Distribution of Atomic Carbon in the Orion Giant Molecular Cloud”, “Spectroscopy in the 21st Century”, Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [17] Hiroyuki Maezawa, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Yutaro Sekimoto, & Satoshi Yamamoto: “Developments of the 810-GHz SIS Receiver with Nb-Based Junctions”, “1th International Symposium on Space Terahertz Technology”, The University of Michigan (May 1-3, 2000)
- [18] Eunsook KIM, Hideta HABARA, and Satoshi YAMAMOTO: Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy of the Ethyl Radical, “Spectroscopy in the 21st Century”, Hayama, Kanagawa, Japan (March, 2001)

招待講演

- [19] Satoshi Yamamoto: “Large Scale Distribution of Neutral Carbon Atom in Interstellar Clouds Observed with Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope”, “Spectroscopy in the 21st Century”, Hayama, Kanagawa, Japan (March, 2001)

(国内会議)

一般講演

- [20] 山本 智: ASTE 計画進捗状況, 日本天文学会 2000 年秋季年会 (群馬, 2000 年 10 月)
- [21] 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近傍分子雲の [CI] 輝線観測, 日本天文学会 (群馬県総合教育センター, 2000 年 10 月)
- [22] 岡 朋治, 山本 智, 岩田充弘, 亀谷和久, 松尾公大, 関本裕太郎, 立松健一, 神庭利彰: 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 4 月)
- [23] 池田正史, 他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: オリオン巨大分子雲における CI の広域分布とその起源, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)
- [24] 前沢裕之, 山本智: 牡牛座暗黒星雲の Heiles' Cloud 2 (HCL2) 領域における CI Rich Cloud の化学組成, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 4 月)
- [25] 伊藤哲也, 関本裕太郎, 山本智, 他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: 富士山頂サブミリ波望遠鏡による巨大分子雲 M17 の炭素原子 $^3P_2-^3P_1$ 輝線の広域観測, 日本天文学会 (千葉大学, 2000 年 3 月)
- [26] 岩田充弘, 岡 朋治, 山本 智, 他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: 富士山頂サブミリ波望遠鏡による NGC1333 領域での CI ($^3P_2-^3P_1$) 輝線の検出, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 4 月)
- [27] 亀谷和久, 池田正史, 尾関博之, 藤原英夫, 吉田久史, 他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: On-the-fly マッピング観測法対応の高速積分器システムの開発, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)
- [28] 金銀淑, 羽原秀太, 山本智: CS($X^1\Sigma^+$), SO($b^1\Sigma^+$) 分子の振動励起状態のフーリエ変換ミリ波分光, 分子構造総合討論会 (東京大学, 2000 年 9 月)
- [29] 金銀淑, 羽原秀太, 山本智: エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光, 日本化学会 (甲南大学, 2001 年 3 月)
- [30] 酒井剛, 関本裕太郎, 立松健一, 河野孝太郎, 野口卓, 田中邦彦, 山本智, 他 ASTE チーム: ASTE 350 GHz 帯受信機の安定性評価, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)
- [31] 久保井信行, 山本 智, 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 OMC-1 の CI ($^3P_2-^3P_1$) 観測, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)
- [32] 田中 邦彦, 山本 智, 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 DR21/W75 領域の CI($^3P_2-^3P_1$) 輝線の観測, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)
- [33] 松尾公大, 山本 智, 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 OMC-1 の CI ($^3P_2-^3P_1$) 観測, 日本天文学会 (千葉大学, 2001 年 3 月)

招待講演

- [34] 山本 智: 宇宙からの信号を分ける, 東京大学公開講演会 (東京大学, 2000 年 10 月)

- [35] 山本 智：LMSA が拓くサイエンス、日本天文学会
LMSA 特別セッション（群馬、2000 年 10 月）
- [36] 山本 智：大型ミリ波サブミリ波干渉計計画と星間
化学、分子構造総合討論会、シンポジウム「星間物質
の化学：現状と将来」（東京大学、2000 年 9 月）

5 暗黒物質観測

——神岡鉱山における暗黒物質探査——
(箕輪・井上)

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

5.1 ポ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、ポ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。

ポロメーターは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ポ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}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}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20 gのフッ化リチウム LiF の単結晶を吸収体としたポ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。

2000年のはじめより、宇宙線の影響を避けて宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室で観測が開始された。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が見えるようになってきている。暗黒物質の観測限界を向上させるため、この自然放射能について起源を特定してできる限り完全に排除する作業を行なっている。

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、その中にはラドン濃度の低い液体窒素製造機

からの蒸発ガスを流している。2000年度には、さらにきれいな環境を用意するために、坑外からラドンガス濃度の低い新鮮な外気をダクトにより実験室に導入するようにした。さらに残留するラドンガスの除去のために活性炭による除去装置を製作して設置した。

また、検出器の中核部であるフッ化リチウム結晶の表面に放射能があることが明らかになった。これは結晶製作時の研磨工程で研磨剤に含まれる放射性物質が埋め込まれた可能性があると考えている。現在は放射能の低い新しい結晶に取り替えて観測中である。

また、検出器部分をケブラー糸で懸架するなどの改造を行い、冷凍機の振動雑音耐性の改善を行なった。

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。われわれはアクシオンヘリオスコープを開発し、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）に変換し検出する実験を行なっている。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。

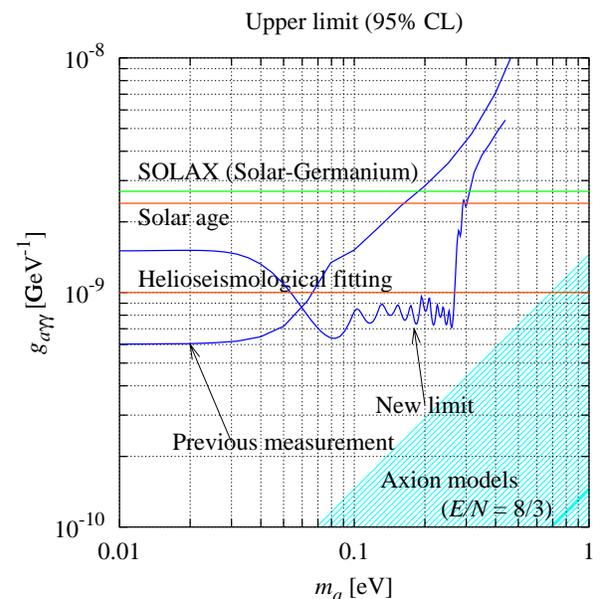


図 5.2 a: axion と光子の結合定数に対してつけられた制限

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 ガスで満たして光子に見かけ上の質量を持たせ、axion 質量 0.26 eV 以下の領域に感度を持つ観測をおこなった。その結果、アクシオンの有意な信号は見つからなかったがアクシオンと光子の結合定数にあらたな制限がつけられた (図 5.2 a 参照)。

5.3 太陽以外の天体を観測する

また、アクシオンヘリオスコープを「アクシオンテレスコープ」として使用し、太陽以外の天体を観測した。今まで天体からのアクシオン放射に対する実験的制限は、中性子星の表面温度からアクシオン放出による冷却を見積もったり、星間磁場によって変換された X/ γ 線の検出によるもののみであった。これらの制限のうち、前者は中性子星の個性や中性子星の内部モデルに非常に依存し、また、観測例も少ない。一方、後者は変換に長い距離を必要とするため、質量が 10^{-9} eV 以下の非常に軽いアクシオンに対してしか制限を与えることができない。以上のような理由で、われわれの実験は各天体からのアクシオン放射に対して直接的制限を与えた最初の実験ということになる。

天球面のスキャン

テレスコープを真南に固定し、天球の動きにまかせてスキャンを行った。この測定では、天球上の各点での測定の積分時間は約 60 秒となる。そして、10 日間にわたり 1 日に一度テレスコープの仰角を変化させることにより、天球上の約 10 % の領域を観測した。

天体追尾測定

銀河中心、さそり座 X-1、帆座 X-1 およびかに星雲に対して各 2 日間の追尾測定を行った。測定に際しては、約 6 時間または 12 時間ごとに追尾測定とバックグラウンド測定を交互に行い、それぞれの差をとった。測定対象を追尾したため、この測定の積分時間は非常に長く、58000 秒から 80000 秒程度である。

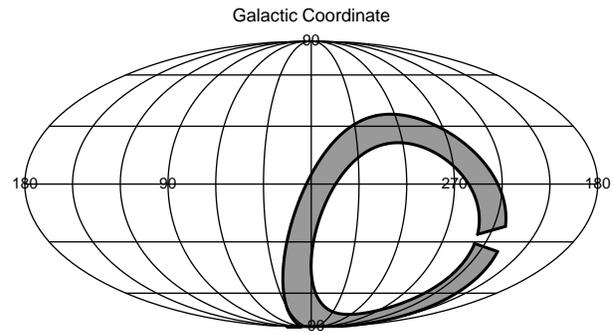


図 5.3 b: 天球面のスキャンされた領域 (灰色の部分)。銀河座標で示す。

測定結果

これらの測定の結果、アクシオンの飛来を確認できる信号は見つからなかった。しかしながら、この測定によって天体から飛来するアクシオンの地上での流束に対して制限をつけることができる。

まず、天球面のスキャンに対しては、観測されたイベントがすべてアクシオンによるものと仮定し、解析を行った。その結果、質量が 0.03 eV よりも軽いアクシオンに対してその地上での流束は $4\text{--}20 \text{ keV}$ の範囲で

$$\frac{d\Phi_a}{dE_a} < 3.3 \times \left(\frac{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}}{g_{a\gamma\gamma}} \right)^2 \text{ keV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \quad (3.0.1)$$

以下であるという制限が得られた (95 % C.L.)。なお、この制限が得られた銀河座標での領域を図 5.3 b に示しておく。全天の 10 % もの領域に対して制限を与えているため、今後何らかの天体モデルが提案される際に重要な拘束条件となりうる。

一方、天体追尾測定によって、スキャンよりも 2 桁ほど良い制限を対象天体からのアクシオン流束に対してつける事ができた。また、追尾対象のうち、帆座 X-1 とかに星雲に対しては中性子星の核からの制動放射を、さそり座 X-1 に対しては降着円盤からの黒体放射を仮定する事により、それらの天体のアクシオン光度に対して制限をつける事ができた。制限されたアクシオン光度領域を図 5.3 c に示す。ここで、 L_\odot は太陽光度であり、 $L_\odot = 3.85 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ である。

残念ながら、この制限は大変緩いもので、既存の理論モデルの検証には至っていない。しかしながら、この測定は各天体からのアクシオン放射に対する初めての直接的な観測結果である。

5.4 検出器開発

一般にシンチレーション検出器など電離損失を測定する型の検出器では、重イオンが入射した場合、

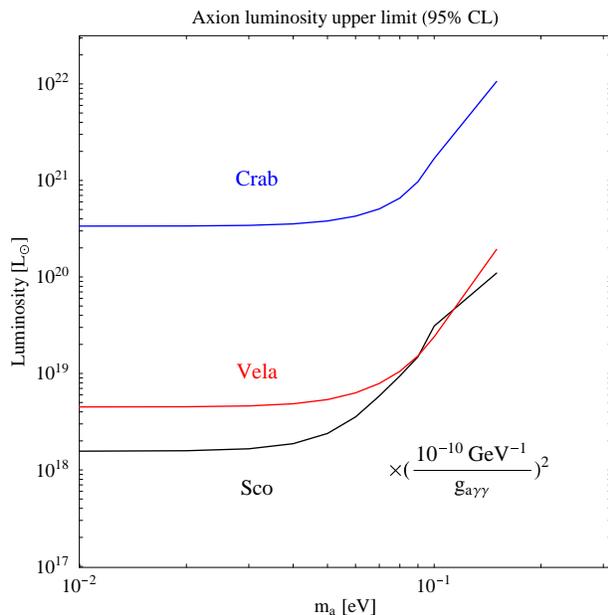


図 5.3 c: さそり座 X-1 (Sco)、帆座 X-1 (Vela) 及びかに星雲 (Crab) のアクシオン光度に対する制限。(横軸はアクシオンの質量。各天体に対して線の上側を制限)

エネルギー損失あたりの発光量は電子の場合と比べ少なくなることが知られている。その減光の程度を quenching factor と呼んでいる。暗黒物質を、検出器中の原子核の反跳により捕らえようとする場合も同様なことが起こると考えられ、あらかじめ quenching factor を測定しておくことが必要になる。

一般にはエネルギーのわかった中性子による弾性散乱の反跳原子核を使って測定することができるが、我々は加速器を使わないで中性子線源を用いて比較的簡単に quenching factor を測定する試みを考案し、その実現可能性の検証のためにいくつかの予備的な実験と計算機による simulation を行っている。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto: Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment
Preprint, astro-ph/0012338.

(国内雑誌)

- [2] 竹田 敦: ボロメータの高感度化に用いる静電捕集型ラドン検出器の開発、東京大学アイソトープ総合センターニュース Vol.31 No.2 2000.9.25
- [3] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験、ICRR ニュース No.42 2000.12.1

(学位論文)

- [4] 難波俊雄: Experimental search for celestial axions utilizing a dipole magnet and X-ray detectors, 2001年3月(博士論文).
- [5] 関谷洋之: 神岡地下実験室における暗黒物質探索のためのボロメータの改良, 2001年2月(修士論文).
- [6] 谷口哲朗: 重イオンに対するシンチレータの Quenching Factor を測定するための実験室的手法, 2001年2月(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

- [7] M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, Y. Ootuka: The LiF dark matter experiment at Kamioka mine, Third international conference on dark matter in astro and particle physics (DARK2000), Heidelberg, Germany, 12 July 2000.
- [8] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto: Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment, the 3rd International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2000), York, England, 20 September 2000.
- [9] K. Miuchi, M. Minowa, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, Y. Ootuka: Dark Matter Search with LiF Bolometer at Kamioka, 3rd International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2000), York, England, 21 September 2000.
- [10] M. Minowa: Dark Matter, International Workshop on Low Energy Solar Neutrinos (LowNu), Tokyo, 4 December 2000.

(国内会議)

一般講演

- [11] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 II、日本物理学会第 55 回年次大会、新潟大学 2000年9月25日.
- [12] 井上慶純: 太陽アクシオン検出実験、ビッグバンセンター研究会「初期宇宙の探求」、南伊豆、2001年2月19日.
- [13] 難波俊雄: 天体からのアクシオン検出実験、第7回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2001年2月20日.
- [14] 竹田 敦: 神岡地下実験室における暗黒物質探索実験、第7回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2001年2月20日.
- [15] 関谷洋之: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験、日本物理学会第 56 回年次大会、中央大学多摩キャンパス 2001年3月27日.

(セミナー)

- [16] 袁輪 眞: 加速器を使わない素粒子実験、集中講義、新潟大学大学院理学研究科、2000年10月5-6日.
- [17] 袁輪 眞: 暗黒物質探索実験、新潟大学大学院理学研究科、2000年10月6日.

6 銀河と宇宙構造の研究

——銀河と宇宙構造の研究—— (岡村・土居・嶋作ら)

6.1 銀河・銀河団の観測的研究

スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の推進 (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 (国天), 渡辺 (宇研), 濱部 (天セ), 市川 (東北大), 須藤 (物理), 佐藤 (物理), SDSS collaboration との共同研究との共同研究. 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. 試験観測のデータを用いて様々な研究が行われている. 今年度の成果で特筆すべきことは, 遠方のクエーサーの記録を塗り替える赤方偏移 $z = 5.8$ という宇宙最遠の天体を発見したことである. また, 銀河系ハローのなかに最近周辺から引きずり込まれたように見える青い星の集団の発見, メタン型褐色矮星の発見, RR Lyr を用いた銀河系ハローの密度分布の推定 ($R^{-2.7 \pm 0.2}$) などの研究が進められ, 計画の有効性が実証されつつある. この研究は, 平成 7 年度からスタートした, 「中核的研究拠点 (COE) 形成基礎研究「初期宇宙の探求」(代表者 佐藤) の研究課題の一つである.

SDSS データを用いた近傍銀河の測光的性質の研究 (嶋作, 岡村, 土居)

濱部 (天セ), 福来, 関口 (宇宙線研), 安田, 市川 (国立天文台), 市川 (東北大), 渡辺 (宇研), SDSS collaboration. SDSS で撮像された銀河のうち 484 個の明るい銀河について, 形態, 色, 見かけの大きさ, 中心集中度の間の相関を調べた. その結果, 以下のことがわかった. (1) 形態と色との間に見られる

相関は, 近傍銀河についてこれまでに知られていた相関と一致する. (2) 見かけの明るさと見かけの大きさとの間に見られる相関は, 近傍銀河のバルジとディスクについて知られていた絶対等級と物理的大きさとの間の相関と一致する. また, 見かけの明るさと見かけの大きさの相関を用いて銀河の物理的大きさ (の典型値) を推定することができる. (3) 中心集中度は形態を知るための良い指標になる. $g' = 18$ mag までの粗い形態分けが可能である.

Properties of $z \simeq 4$ galaxies in Subaru/XMM-Newton Deep field (大内, 岡村, 土居, 嶋作, 仲田, 古澤, 宮崎, Suprime-Cam グループ)

Subaru/XMM-Newton Deep Survey 領域における $z \simeq 4$ 銀河の光度関数とクラスティングスケールを求めた. 得られた g-band 光度関数は $z = 0$ (現在) の光度関数と比較した. その結果, $z \simeq 4$ は $z = 0$ に比べ明るい銀河は同程度存在するが, 暗い銀河が極端に少なくなっていることがわかった. さらに, $z \simeq 4$ 銀河の角度相関関数を求めたところ強いクラスティングシグナルを検出した. 得られた角度相関関数から典型的なクラスティングスケールを求めたところ $2.7 \text{ Mpc} (H_0 = 100 \Omega_M = 0.2 \Omega_\Lambda = 0)$ であることがわかった. これを $z = 0$ のクラスティングスケールと比べると $1/2$ 程度の大きさになっていることが分かった.

3C324 銀河団の銀河の性質 (仲田, 児玉, 嶋作)

鍛冶澤 (東北大), 山田, 田中 (国立天文台) らとの共同研究. すばる望遠鏡の Suprime-Cam, CISCO, 及び HST の WFPC2 で観測された $z = 1.2$ の銀河団 3C324 の銀河団銀河を photometric redshift により推定し, 35 個の銀河を銀河団メンバーと同定した. この 35 個の銀河を用いて, 我々は銀河団銀河の空間分布, 光度関数, 色分布, 青い銀河の割合などを調べた. その結果 (1) 色が赤く, 光度の明るい銀河は, 銀河団中心付近に極端に偏って分布する. (2) 特徴的な銀河の光度は passive evolution の予想と一致する. (3) 分散の小さい色等級関係が見られたが, 青い銀河の色分散が大きい. (4) 色等級関係を構成する銀河の紫外光が明るい. (5) $z < 1$ の銀河団に比べ, 青い銀河の割合が大きいことがわかった. $z = 1.2$ の銀河団銀河の性質を, 分光観測では難しい暗い銀河まで, 詳細に調べることに成功した.

南北 HDF 及び ESO Imaging Survey に基づくフィールド銀河の光度進化の研究 (古澤、嶋作)

これまでに解析を行った HDF-N サンプルに新たに HDF-S 及び EIS サンプルを加えた photo-z カタログを用い、 B 及び K バンドの光度関数を調べた結果、以下のことが分かった。(1) 南北 HDF の光度関数を比較すると、HDF-S の方が $z > 1$ に明るい銀河が多い。(2) 銀河内ダストによる吸収量は、 $z = 0 - 5$ で概ね $E(B - V) = 0.15$ 程度である。(3) $z = 0 - 2$ での K バンドの光度関数の振舞いは、典型的なクラスターリングモデルの予想に近い。(4) K バンドの光度密度は $z = 1 - 5$ の間で緩いピークを持つ。

$z = 4$ 銀河の星形成の非一様性 (大内、嶋作)

銀河団 CL0939+4713 ($z = 0.4$) 背後にある high- z 銀河 ($z = 4.0$) について、銀河の部分ごとの星の種族 (年齢) とダスト減光量を調べた。すばる-CISCO J, K' と HST-WFPC2 $F702W$ の 3 つの撮像データを用いてこの銀河の部分測光を 6 箇所で行なった。得られた値を銀河モデル (GISSEL 96) との比較を行なった。その結果、6 つの部分測光から得られた銀河の「構成要素」間には年齢にして、2 Myr - 500 Myr 減光量にして $E(B - V) = 0 - 0.3$ に及ぶ有意な違いが見られた。このように形成初期にある $z = 4$ 銀河にも非一様な構造があることが示唆された。

銀河団銀河の星形成史の研究 (児玉)

R.Bower (Univ of Durham, UK) との共同研究。

様々な赤方偏移にある遠方銀河団 7 つの既存の測光観測データを、独自の銀河スペクトル進化モデルを用いて解析した。銀河団銀河全体の色分布の赤方偏移に対する進化を再現するように、モンテ・カルロ的に個々の銀河に星形成史を割り振り、それを合成することによって「銀河団銀河の大局的星形成史」を世界で初めて導出した。またこのとき同時に得られる「銀河団への銀河降着史」を、拡張プレス・シェヒター理論から得られるダークハローの質量成長率の時間変化と比較し、その整合性も示した。さらに、銀河団銀河にダウン・サイジング現象 (星形成が宇宙の年齢と共に、より小さなシステムへと移っていく) が見られることを発見した。

銀河団銀河の星形成史の研究 (児玉)

I.Smail (Univ of Durham, UK) との共同研究。銀河降着 + 形態進化のシナリオのもと、銀河団中の形態頻度分布の進化をモデル化し、観測される $S 0$ 銀河の急激な増化と、円盤銀河の割合とからそれぞれ、銀河降着率がかなり高いこと ($z = 0.5$ から現在まで

で 50%以上)、円盤銀河から $S 0$ への形態進化の時間尺度が 20 億年程度と長いことを示した。

みずがめ座超銀河団領域の大規模構造の研究 (川崎)

C.Caretta, M.Maia (Observatorio Nacional, Brazil), C.Willmer (Lick Obs.) との共同研究。みずがめ座超銀河団は、近傍宇宙 ($z \leq 0.2$) で最大級の超銀河団と考えられている。この周辺の 5×10 平方度の天域について写真乾板による撮像観測を行い、matched-filter 法を用いて銀河団の探査を行った。その結果、みずがめ座超銀河団は $z=0.08$ 及び $z=0.11$ の 2 つの大規模構造が視線方向に重なって見えているものが分かった。現在、個々の銀河の分光観測を進めているが、暫定的には同じ結果が得られている。今後、分光観測を続けて、この超銀河団の詳細な構造を調べていく予定である。

銀河系中心方向にあるへびつかい座超銀河団の発見 (岡村)

長谷川隆 (群馬天文台) らとの共同研究。星間吸収を強く受けている銀河系中心方向に近いへびつかい座の $12^\circ \times 17^\circ$ 領域で、UK シュミット望遠鏡によるサーベイを用いて 4021 個の銀河を検出し、そのうちの 179 銀河について分光観測を行い視線速度を求めた。これらのデータをもとにして、この領域にある銀河は視線速度 9000 km/s のあたりに集中し、超銀河団を形成していることを明らかにした。

$z = 0.65$ の吸収を受けたクエーサー候補天体の撮像観測 (岡村, 土居, 嶋作)

秋山 (国立天文台) らとの共同研究。すばる望遠鏡により当該クエーサー候補の撮像を行い、母銀河と中心核を分離して測光し、この天体が実際に吸収を受けたクエーサーであるとする強い証拠を示した。

6.2 装置・ソフトウェアなどの開発研究

すばる望遠鏡主焦点広視野 CCD カメラ (Suprime-Cam) の立ち上げ (岡村, 土居, 嶋作, 仲田, 古澤, 大内, 宮崎他)

小宮山 (ハワイ観測所), 宮崎 (国天), 関口 (宇宙線研) らとの共同研究。1999 年 7 月に CCD8 素子を装

着して初めて主焦点に搭載した。その後、望遠鏡側の主焦点立ち上げ作業に協力しつつ調整を行い、約1年後の2000年8月に一応の機能試験をパスした。2000年12月から2001年3月にかけては、共同利用に供した。2000年春と秋に性能試験観測を行って装置を完成する予定である。

Suprime-Camのフィルター特性他の検査 (宮崎真行、土居、嶋作、岡村、仲田、古澤、大内)

国立天文台宮崎聡氏、小宮山氏、八木氏他とSuprime-Camのフィルター特性や線形性、感度などの測定を行った。フィルターの特性についてはほぼ気温から予想される経験則で正しいことが確認された。

15色同時撮像カメラの開発(土居、古澤、福本、岡村、嶋作)

ダイクロイックミラーを利用した15色同時撮像カメラの開発を進めた。面精度と透過特性の良いダイクロイックミラーをイオンアシスト方式で製作しなおし、性能の良いものが14枚全て完成した。ファブリーペローモードのための液晶型エタロンを購入、評価し、ほぼ予定通りの性能が出ていることを確認した。

SDSSカラーバンドの実測(土居、嶋作、岡村)

東北大学の市川研究室および名古屋大学の池内研究室との共同作業で、スローン・デジタル・スカイ・サーベイの2.5m望遠鏡モザイクカメラの30個のCCDのバンド特性を、モノクロメータを使って実測を行った。また宇宙線研究所の福来氏との共同作業で50cm監視望遠鏡のフィルターの透過特性の実測を行った。

MAGNUM望遠鏡用ドームフラット光源の製作(土居)

国立天文台開発実験センター岡田氏との共同研究。ハワイ、マウイ島ハレアカラ山頂にある東大2-m望遠鏡(通称MAGNUM望遠鏡)のためのドームフラットの光源を製作した。短い(約90cm)距離のところに置かれた広い(直径2.3m)スクリーンを照らすために、反射鏡1枚、レンズ2枚を使った光源を設計、製作した。ランプの発熱によって光学設計がずれないために、スーパーインバーを多用したフレームを採用した。実際に取り付けて評価を始めている。

<報文>

(原著論文)

- [] Fan, X. et al. (36 authors including Doi, M.), “High-Redshift Quasars Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. II. The Spring Equatorial Stripe”, *AJ*, **119**, 1-11 (2000).
- [1] Fan, X. et al., (39 authors including Okamura, S.), “L Dwarfs Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Imaging Data”, *AJ*, **119**, 928-935 (2000).
- [2] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., and Okamura, S., “New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF”, *ApJ*, **534**, 624-635 (2000).
- [3] Ivezić, Z. et al. (42 authors including Doi, M.), “Candidate RR Lyrae Stars Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data”, *AJ*, **120**, 963-977 (2000).
- [4] Fan, X. et al. (42 authors including Doi, M., Okamura, S., Shimasaku, K.), “The Discovery of a Luminous $Z=5.80$ Quasar from the Sloan Digital Sky Survey”, *AJ*, **120**, 1167-1174 (2000).
- [5] York, D.G. et al. (144 authors including Doi, M., Okamura, S., Shimasaku, K.), “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary”, *AJ*, **120**, 1579-1587 (2000).
- [6] Yanny, B. et al. (22 authors including Doi, M.), “Identification of A-colored Stars and Structure in the Halo of the Milky Way from Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data”, *ApJ*, **540**, 825-841 (2000).
- [7] Hasegawa, T., Wakamatsu, K., Malkan, M., Sekiguchi, K., Menzies, J., Parker, Q.A., Jugakau, J., Karoji, H., and Okamura, S., “A Galaxy Survey near the Galactic Centre. I. Discovery of the Ophiuchus Supercluster and the Ophiuchus Void”, *MNRAS*, **316**, 326-344 (2000).
- [8] Shimasaku, K., “Evolution of the Blue Luminosity-to-Baryon Mass Ratio of Clusters of Galaxies”, *PASJ*, **52**, 409-419 (2000).
- [9] Akiyama, M., Ohta, K., Tamura, N., Doi, M., Kimura, M., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Nakata, F., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., Hamabe, M., Yoshida, M., and Takata, T., “Photometric and Deep-Imaging Observations of an Absorbed QSO at $z=0.653$, AXJ131831+3341”, *PASJ*, **52**, 577-584 (2000).
- [10] Kodama, T., Matsushita, K., “Homogeneity of Stellar Population in Early-Type Galaxies with Different X-ray Properties”, *ApJ*, **539**, 149-154 (2000).
- [11] Fan, X. et al. (26 authors including Doi, M.), “High-Redshift Quasars Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. III. A Color-Selected Sample at $i^* < 20$ in the Fall Equatorial Stripe”, *AJ*, **121**, 31-53 (2001).

- [12] Maihara, T. et al. (33 authors including Okamura, S., Shimasaku, K.) , “**Subaru Deep Survey I. Near-Infrared Observations**”, PASJ, **53**, 25-36 (2001).
- [13] Kodama, T., Bower, R. G., “Reconstructing the History of Star Formation in Rich Cluster Cores”, MNRAS, **321**, 18-36 (2001).
- [14] Smail, I., Kuntschner, H., Kodama, T., Smith, G. P., Packham, C., Fruchter, A. S., Hook, R. N., “A Photometric Study of the Ages and Metallicities of Early-Type Galaxies in A2218”, MNRAS, in press (2001).
- [15] Kodama, T., “The Colour-Magnitude Relation and the Formation of Early-Type Galaxies”, ApSS, 276, 877 (2001).

(会議抄録)

- [16] Furusawa, H., Shimasaku, K., Doi, M., and Okamura, S., “New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the Hubble Deep Field”, *Imaging the Universe in Three Dimensions*, ASP Conf. Ser., **195**, 148-151 (2000).
- [17] Hayashino, T. et al. (22 authors including Doi, M., Okamura, S., Shimasaku, K.) , “Narrowband Filter System at the Subaru Prime Focus”, Proc. SPIE, **4008**, 397-404 (2000).

(著書)

- [18] 岡村定矩: 宇宙の進化 (放送大学出版教材), (分担執筆) (2001)
- [19] 岡村定矩, 柴橋博資: 理科年表 2001, (天文部, 分担執筆) (2000)
- [20] 川崎 渉: 天文年鑑 2001 年版, (分担執筆) (2000)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [21] Okamura, S., Yagi, M., Kashikawa, N., Yasuda, N., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., and Doi, M. , “Luminosity Functions of $R^{1/4}$ -like and Exponential-like Galaxies in Nearby Clusters of Galaxies”, The New Era of Wide-Field Astronomy, Preston, UK, 2000/8/21-24.
- [22] Kodama, T., Bower, R. G., “Reconstructing the Star Formation History of Galaxies in Rich Cluster Cores”, in International Workshop “Environment of Galaxies”, Birmingham, UK, 2000/8/11.
- [23] Kodama, T., Bower, R. G., “Reconstructing the History of Galaxy Assembly and Global Star Formation History of Galaxies in Rich Cluster Cores”, in the Victoria Computational Cosmology Conference, Victoria, Canada, 2000/8/22.

- [24] Nakata, F., Furusawa, H. Ouchi, M., “Probing the galaxy evolution from combined Prime-Cam and WFCAM images”, Japan-UK meeting on WFCAM survey, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2000/10/25-26.
- [25] Nakata, F. “Galaxy Population in a Cluster of Galaxies around the Radio Galaxy 3C324 at $z = 1.2$ ”, Subaru Telescope Users’ Meeting, Subaru Telescope, Hawaii, 2001/3/7-9.
- [26] Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Suprime-Cam Team, “Luminosity functions and Clustering Properties of Galaxies at $z = 4$ ”, Subaru Telescope Users’ Meeting, Subaru Telescope, Hawaii, 2001/3/7-9.
- [27] Okamura, S., “Report from the Time Allocation Committee”, Subaru Telescope Users’ Meeting, Subaru Telescope, Hawaii, 2001/3/7-9.
- [28] Okamura, S.: “Properties of Dwarf Galaxy Population in the Coma Cluster”, Purple Mountain Observatory, Nanjing, 2000/10/27; Shanghai Observatory, Shanghai, 2000/11/2.
- [29] Okamura, S.: “Subaru Telescope and Suprime-Cam”, Purple Mountain Observatory, Nanjing, 2000/10/27; Nanjing Astronomical Instruments Research Center, Nanjing, 2000/10/30; Shanghai Observatory, Shanghai, 2000/11/2.

(国内会議)

一般講演

- [30] 土居 守: “スローン・デジタル・スカイ・サーベイ”, 「新世紀における銀河宇宙観測の方向」, 東京大学臨海実験所, 2001/02/25-26.
- [31] 岡村定矩: 「宇宙史を遡る」, 下関西高校文化講演会, 2000/6/10
- [32] 岡村定矩: 「見え始めた銀河の進化」, 駿台天文講座, 2000/7/15
- [33] 岡村定矩: 「宇宙の年齢」, 五島プラネタリウム, 2000/9/22
- [34] 岡村定矩: 「宇宙史の全貌が明らかになる 21 世紀」(Lux Sophiae 「知の光」), 東京大学安田講堂, 2000/12/31.
- [35] 嶋作一六: 「銀河進化の曲がり角」, 「第 30 回天文・天体物理若手の会夏の学校」, 総合研究大学院大学 (葉山), 2000/08/18.
- [36] 大内 正己: 「 $z = 4$ 銀河内の非一様性」, 「第 30 回天文・天体物理若手の会夏の学校」, 総合研究大学院大学 (葉山), 2000/8/18
- [37] 児玉忠恭: 「銀河の大局的進化を探る - 準経験的手法 -」, 国立天文台, 三鷹, 談話会, 2000/10/27; 東京大理天文教室, 本郷, 談話会, 2000/10/31; 東北大理天文教室, 仙台, 談話会, 2000/11/13; 京大理宇宙物理学教室, 京都, 談話会, 2000/11/17.

(学会発表)

日本天文学会 2000 年春季年会, 東京大学
(2000/4/3-4/5)

- [38] 大内正己, 嶋作一大, Suprime-Cam pilot deep survey team: Suprime-Cam Pilot Deep Survey による High- z Lyman α 輝線天体探査, B13b
- [39] 古沢久徳, 嶋作一大: Photometric Redshift 法に基づく HDF 銀河の光度関数および星形成率の考察, R11b
- [40] 小宮山裕, 岡村定矩, 嶋作一大, 土居 守, 川崎 渉: かみのけ座銀河団の矮小銀河: 形状・色・金属量の半径依存性, T08a
- [41] 仲田史明: Suprime-Cam における大型 CCD の高精度配置法の開発, V13b

日本天文学会 2000 年秋季年会, 群馬県総合教育センター (2000/10/5-10/7)

- [42] 大内正己, 嶋作一大: $z=4.0$ 銀河における星形成活動の非一様性, B13b
- [43] 中村佳博, 土居守, 嶋作一大, 岡村定矩: 非対称性と中心集中度を用いた近傍銀河の定量分類, R16b
- [44] 澤田保宏, 岡村定矩, 土居 守, 嶋作一大: おとめ座銀河団の矮小銀河の測光学的性質, T12b
- [45] 児玉忠恭: 銀河団のアセンブリーと大局的星形成史, T03a.
- [46] 児玉忠恭: 早期型銀河のポテンシャル構造と星形成史, R26b.

日本天文学会 2001 年春季年会, 千葉大学
(2001/3/26-28)

- [47] 大内正己, 嶋作一大, 岡村定矩, 土居 守, 仲田史明, 古沢久徳, 宮崎真行, Suprime-Cam チーム: Subaru Deep Survey (秋) 領域における $z > 3.5$ 銀河のクラスターリング, B17b
- [48] 仲田史明, 児玉忠恭, 嶋作一大, Suprime-Cam チーム: 遠方銀河団 3C324($z=1.2$) の多色観測による銀河団銀河の進化過程の考察, B18b
- [49] 古沢久徳, 嶋作一大: 南北 HDF 及び ESO Imaging Survey に基づくフィールド銀河の光度進化の研究, R19b

7 気球観測による反物質 質探査, 衛生による X線・ γ 線観測

——飛翔体による観測データを用いた宇宙
の研究—— (牧島・折戸・田代・吉村)

7.1 反物質探査 (BESS 実験)

7.1.1 概要

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「BESS 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・米国航空宇宙局 (NASA) と国際共同で行なっている。

加速器科学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ふ、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量で検出は困難であった。

しかしながら我々は、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。

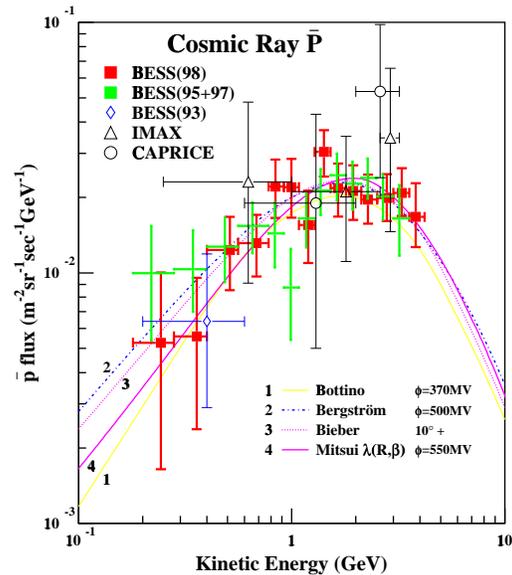


図 7.1 a: 宇宙線反陽子のエネルギースペクトラム

'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)。

7.1.2 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、2000 年から 2001 年にかけて極大期を迎えた太陽活動の活発化に伴う、低エネルギー宇宙線のスペクトラム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。

また、反陽子のスペクトラムを陽子のスペクトラムと組合せ、反陽子/陽子比とすることにより、宇宙線の伝搬に太陽活動が与える影響 (solar modulation) を顕著に検証することもできる。Solar modulation

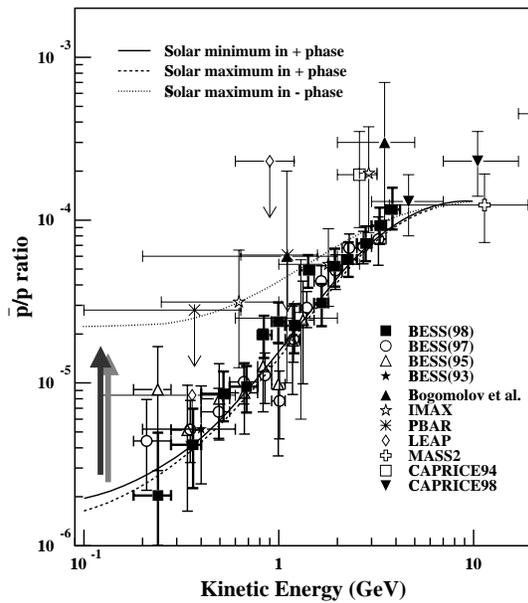


図 7.1 b: 反陽子/陽子比と予想される変化 (太矢印)

は粒子の電荷に依存すると考えられており、太陽の磁極が正から負へ反転する太陽活動極大期においては、図 7.1 b の様に反陽子/陽子比が急激に増大することが予想されている。従って、太陽活動がまさに極大期を迎えた今年度の反陽子/陽子スペクトラム比の測定により、solar modulation の電荷依存性を検証することができる。

今年度の飛翔実験は 8 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 36km の高空に上げられた BESS 測定器は、約 35 時間の飛行中完全に動作した。このデータにより約 400 例の反陽子を明瞭に検出し、現在、太陽活動に伴うスペクトラムの変化を見出すべく解析を進めている。

7.1.3 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 年から今年度のフライトで計約 2000 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、KEK-PS 東カウンターホール K2 ビームラインにおける反陽子ビームによる、BESS 測定器のビームテストを昨年度に実施した。今年度はデータの更なる解析を行ない、その結果、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、系統誤差を目標であった 5% まで下げることに成功した。

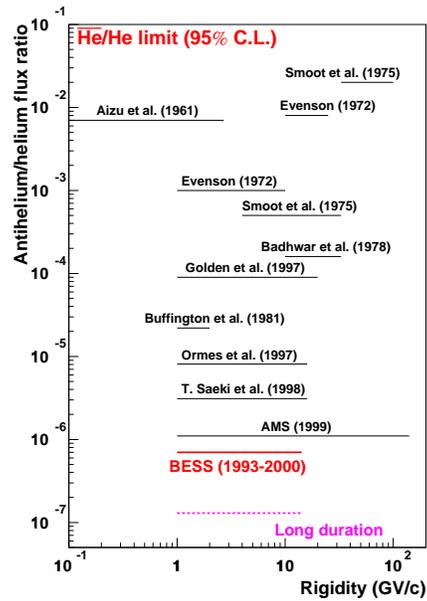


図 7.1 c: ヘリウムに対する反ヘリウムの流束比

7.1.4 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。

今年度も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、2000 年までのデータも含めて $\bar{\text{He}}/\text{He}$ 比の上限 7×10^{-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世界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)

7.1.5 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。しかし、BESS 実験では 98 年度の観測データを基に解析を行ない、1~120 GeV のエネルギー領域の陽子について、5% の精度でエネルギースペクトルを決定することに成功した(図 7.1 e)。

ところが、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、この solar

modulation を正確に理解する必要がある。更に、宇宙線は大気圏内に入射すると大気中の原子核と様々に相互作用するため、大気の影響も理解しなければならない。

このため、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べく、これらの影響を特に受け易い低エネルギー陽子を、気球が地上から上空まで至る上昇過程において選択的に測定した。

解析は現在進行中であるが、太陽活動が極大期を迎えたことによる陽子スペクトラムの大幅な減少が既に見られている。今後、輸送方程式を用いた大気中の二次生成陽子の見積りを図ることにより、低エネルギー陽子の精密なスペクトラムと、太陽活動及び大気の影響のモデル化を含む総合的な知見が得られることが期待される。

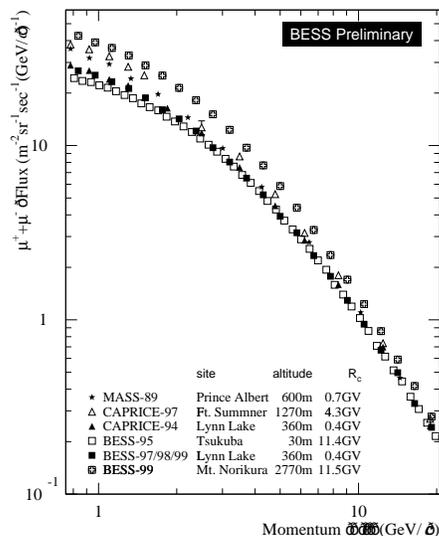


図 7.1 d: 各高度における μ 粒子スペクトラム

7.1.6 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。この解析における大気ニュートリノの絶対強度の理論計算には宇宙線の様々なデータが用いられている。中でも、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 実験などによって、近年精密に測定されるようになってきた。一方、ハドロン相互作用や大気構造など大気シャワー発展の計算に必要な情報には不確定性が依然として残っており、大気ニュートリノの絶対強度の理論計算が不定性を持つ要因となっていた。

そこで我々は、大気シャワーの発展を正確に理解することを目標に、宇宙線研究所附属乗鞍観測所(標高 2700m, 気圧 720mb)に於ける宇宙線の観測を実施した(昨年度宇宙線研究所共同利用研究)。

その結果、山頂高度における μ 粒子のエネルギースペクトラムを十分な統計で精度良く求めることに成功した。これにより、大気シャワー問題に対する重要な情報を与えることができた(次節参照)。

また同実験のデータの解析により、山頂高度での反陽子エネルギースペクトラムを世界で初めて決定することに成功した。得られた結果は、大気中の反陽子生成・伝播モデルの修正を示唆しており、現在、原因の解明を行なっている。

7.1.7 宇宙線 e/μ 粒子の観測

前節で述べたように、大気ニュートリノの絶対強度の理論計算の不定性は大気シャワー問題に依る所が大きい。そこで、大気シャワー発展の正確な理解のため、気球が地上から上空に至る上昇過程で、大気 e/μ 粒子を精密に測定した。

解析は現在進行中であるが、改良を加えたシャワーカウンタを用いて得られた今年度のデータに、前年度のものを併せることにより、上空及び各高度における運動量約 1 GeV/c 以上の μ 粒子スペクトラムがさらに精度良く求められることが期待される。

これに更に山頂高度での測定結果(前節)を加え、大気ニュートリノの理論計算において不確定性を与えているハドロン相互作用や大気構造の問題に決着をつける予定である(図 7.1 d)。

7.1.8 BESS-TeV 実験

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、BESS 以前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予定している(BESS-TeV 実験)。今年度は、BESS-TeV 実験で新しく搭載する飛跡検出器の開発・製作、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。これにより期待される陽子スペクトラムを図 7.1 e に示す。

7.1.9 BESS-Polar 計画

BESS-Polar 計画は、宇宙線反粒子を究極的な高感度で精密探査することを目的としており、2003 年度と 2006 年度に南極周回気球により行なう予定である。特に、低エネルギー反陽子をこれまでより一桁高い統計精度で測定し、その起源と伝搬を徹底的に理解することを目指している。(図 7.1 f) 同様の観点から、 10^{-7} 以下の感度の反ヘリウム探索(図 7.1 c)、及び、宇宙線反重陽子の探索も目標としている。

BESS-Polar の詳細な計画は今年度に立ち上げられたばかりであるが、既に、BESS-Polar 用の低消費

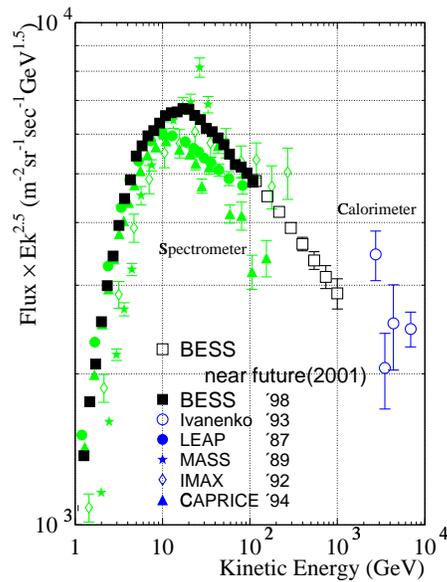


図 7.1 e: BESS-TeV で期待される陽子スペクトラム

電力エレクトロニクスの開発や、太陽電池を用いた新しい電源システムの開発などを進めている。

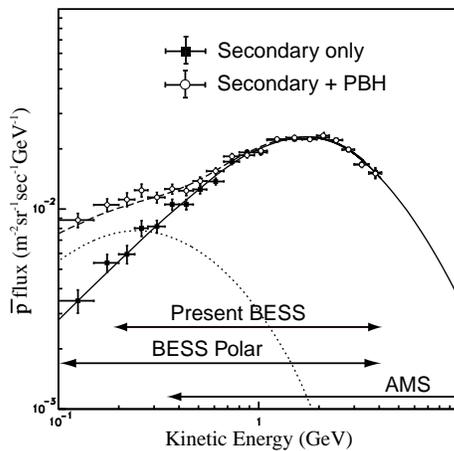


図 7.1 f: BESS-Polar で期待される反陽子スペクトラム (各々、原始ブラックホールの有無を仮定)

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Shikaze, S. Orito, T. Mitsui, K. Yoshimura, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Nozaki, T. Sonoda, I. Ueda and T. Yoshida : Large-area Scintillator Hodoscope with 50 ps timing resolution onboard BESS, Nucl. Instr. and Methods **A 455** (2000) 596-606

- [2] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E. S. Seo, J. Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, 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 : Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra with the BESS, The *AstroPhys. J.* **545** (2000) 1135-1142
- [3] T. Maeno, S. Orito, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, 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, T. Yoshida and K. Yoshimura : Successive Measurements of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in a Positive Phase of the Solar Cycle, Accepted by The *Astroparticle Phys*
- [4] J. Z. Wang, E. S. Seo, K. Anraku, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, H. Matsunaga, M. Motoki, S. Orito, T. Saeki, T. Sanuki, I. Ueda, K. Yoshimura, Y. Makida, J. Suzuki, K. Tanaka, A. Yamamoto, T. Yoshida, T. Mitsui, H. Matsumoto, M. Nozaki, M. Sasaki, J. Mitchell, A. Moiseev, J. Ormes, R. Streitmatter, J. Nishimura, N. Yajima, T. Yamagami : Measurement of Cosmic-Ray Hydrogen, Helium and their Isotopic Composition with the BESS Experiment, Submitted to The *AstroPhys*

(会議抄録)

- [5] H. Matsumoto, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, N. Matsui, H. Matsunaga, M. Motoki, J. Nishimura, S. Orito, T. Saeki, T. Sanuki, Y. Shikaze, T. Sonoda, I. Ueda, Y. Yamamoto, K. Yoshimura, Y. Makida, M. Sasaki, J. Suzuki, K. Tanaka, A. Yamamoto, T. Yoshida, T. Mitsui, M. Nozaki, K. Toki, K. Yamato, E. S. Seo, J. Z. Wang, J. Mitchell, A. Moiseev, J. Ormes, R. Streitmatter, N. Yajima and T. Yamagami : Technical Progress of the BESS Spectrometer, Proc. 22nd Intl. Symposium Space Technology and Science (Morioka) (2000) 1659-1663
- [6] H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, M. Ishino, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, Y. Toki, I. Ueda, J. Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, K. Yamato, A. Yamamoto, Y. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Recent Results from the BESS Experiment, Proc.

22nd Intl. Symposium Space Technology and Science (Morioka) (2000) 1720-1725

- [7] J. F. Ormes, BESS Collaboration: "BESS Results: Data on Cosmic Ray Anti-Proton, Proton and Helium Spectra and New Upper Limits in the Search for Anti-helium", American Astronomical Society HEAD meeting **32** (2000) 1102
- [8] Y. Shikaze, M. Imori, H. Fuke, H. Matsumoto and T. Taniguchi: Performance of a High Voltage Power Supply Incorporating a Ceramic Transformer, Proc. 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments (2000) 371-375
- [9] 大和一洋 他: 「BESS2000 実験経過報告」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 87-90
- [10] 前野忠嗣 他: 「BESS 実験の成果」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 91-94
- [11] 安部航 他: 「TeV 領域宇宙線観測のための BESS 測定器改良」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 95-98
- [12] 山本明 他: 「BESS-Polar: 南極周回気球実験による宇宙線反粒子の精密探査」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 99-102
- [13] 福家英之 他: 「気球実験用太陽電池パネルの開発」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 103-106

(国内雑誌)

- [14] 吉田哲也: 「BESS 宇宙粒子線観測」, パリティ **15(12)** (2000) 91-92
- [15] 山本明, 野崎光昭: 「BESS-Polar: 南極周回気球実験による宇宙線反粒子の精密観測」, ICRR ニュース **43** (2001) 6-9

(学位論文)

- [16] 灰野禎一: 「気球搭載実験用高精度ドリフトチェンバーの開発」, 2001 年 3 月, (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] A. Yamamoto, BESS Collaboration: "BESS and Its Future Prospect for Polar Long Duration Flights", 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw
- [18] K. Yoshimura, BESS Collaboration: "Cosmic-ray Antiproton and Antinuclei", 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw
- [19] T. Sanuki, BESS Collaboration: "Precise Measurement of Cosmic-ray Proton and Helium Spectra with BESS", 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw
- [20] T. Maeno, BESS Collaboration: "Precise Measurements of Cosmic-ray Antiproton Spectrum in a Positive Phase of the Solar Cycle", 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw

(国内会議)

一般講演

- [21] 山本明: 「飛翔体による宇宙観測用超電導マグネットの開発 (1)-基本設計」, 低温工学・超電導学会 (2000 年 5 月) 工業技術院筑波研究センター
- [22] H. Matsumoto: "Technical Progress of the BESS Spectrometer", 22nd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (May 2000) Morioka
- [23] H. Matsunaga: "Recent Results from the BESS Experiment", 22nd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (Jun. 2000) Morioka
- [24] 浅岡陽一: 「BESS 測定器反陽子検出効率の精密測定」, 日本物理学会 (2000 年 9 月) 新潟大学
- [25] 谷崎圭祐: 「BESS2000 実験経過報告」, 日本物理学会 (2000 年 9 月) 新潟大学
- [26] 佐貫智行: 「BESS による宇宙粒子線の精密測定と大気ニュートリノ流束の絶対較正」, 日本物理学会 (2000 年 9 月) 新潟大学
- [27] 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」, 日本物理学会 (2000 年 9 月) 新潟大学
- [28] T. Sanuki: "BESS Results on Primary Cosmic Ray and Atmospheric Muon Fluxes", 2nd Workshop on "Neutrino Oscillations and Their Origin" (Dec. 2000) Tokyo
- [29] T. Yoshida: "BESS-TeV Project", 2nd Workshop on "Neutrino Oscillations and Their Origin" (Dec. 2000) Tokyo
- [30] 浅岡陽一: 「BESS 測定器反陽子検出効率の精密測定」, KEK PS Program Advisory Committee Meeting (2000 年 12 月) 高エネルギー加速器研究機構
- [31] 大和一洋: 「BESS-2000 実験経過報告」, 大気球シンポジウム (2000 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [32] 前野忠嗣: 「BESS 実験の成果」, 大気球シンポジウム (2000 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [33] 安部航: 「TeV 領域宇宙線観測のための BESS 測定器改良」, 大気球シンポジウム (2000 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [34] 山本明: 「BESS-Polar 計画」, 大気球シンポジウム (2000 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [35] 福家英之: 「気球実験用太陽電池パネルの開発」, 大気球シンポジウム (2000 年 12 月) 宇宙科学研究所
- [36] 浅岡陽一: 「BESS 実験の最近の結果及び将来計画」, 素粒子センターシンポジウム (2001 年 2 月) 白馬
- [37] 佐貫智行: 「BESS 実験の成果と将来計画」, ビッグバンセンター研究会 (2001 年 2 月) 伊豆
- [38] 大和一洋: 「BESS 気球実験のための, 高速粒子識別可能データ収集システムの開発」, 日本物理学会 (2001 年 3 月) 中央大学
- [39] 松川武夫: 「BESS 測定器における分散制御型データ収集システムの開発」, 日本物理学会 (2001 年 3 月) 中央大学

- [40] 志風義明：「BESS 測定器を用いた低エネルギー宇宙線陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2001年3月) 中央大学
- [41] 藤川元治：「BESS 測定器を用いた山頂高度における宇宙線陽子・反陽子流束の決定」, 日本物理学会 (2001年3月) 中央大学
- [42] 浅岡陽一：「超伝導スペクトロメータ BESS による宇宙線反陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2001年3月) 中央大学
- [43] 灰野禎一：「BESS による TeV 領域宇宙線精密測定のためのドリフトチェンバーの開発とその性能評価」, 日本物理学会 (2001年3月) 中央大学

招待講演

- [44] 山本明：「BESS-Polar 実験：南極周回飛行による宇宙起源反粒子の精密探査」, 日本物理学会 (2001年3月) 中央大学
(セミナー)
- [45] 野崎光昭：「BESS による宇宙線反陽子の観測」, 地球惑星科学関連学会 (2000年6月) 国立オリンピック記念青少年総合センター

7.2 X線、線観測

7.2.1 「あすか」衛星と GIS 装置

次第に軌道を下がりつつあった宇宙X線衛星「あすか」は、2000年7月14日に起きた巨大な太陽フレアの影響（地球大気の膨張）により姿勢を崩し、太陽捕捉ができず、観測不能に陥った。「あすか」は2001年3月2日14:21（日本時間）、東経163.°2、南緯8.°2の大平洋上空で、大気圏に突入して消滅し、8年のミッションを全うした。我々が責任製作し、釜江研などと協同で運用を続けてきた撮像型蛍光比例計数管 (GIS) は、この8年間を通して順調に動作を続け、貴重な観測データを蓄積した [48]。

7.2.2 「ようこう」衛星を用いた研究

1991年8月30日に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」は、我々が宇宙研や国立天文台と協力して製作した、太陽硬X線望遠鏡 (HXT) を搭載する。HXTはフーリエ合成手法により、15-95 keVの硬X線領域で、太陽フレアの画像を5秒角の解像度で撮像できる。

今年度は6月中旬に、かに星雲から1.°2の距離を太陽が通過するさい、HXTを用いて、かに星雲の撮

像観測を試みたが、信号強度が足りず不成功に終わった [57] [60]。松本らは「ようこう」広帯域スペクトル計 (WBS; 立教大学などが製作) のデータを、HXTのデータと突き合わせることで、太陽フレアにおける電子加速と陽子加速の比較研究を進めている。

7.2.3 コンパクト天体の観測的研究

標準降着円盤とその破れ

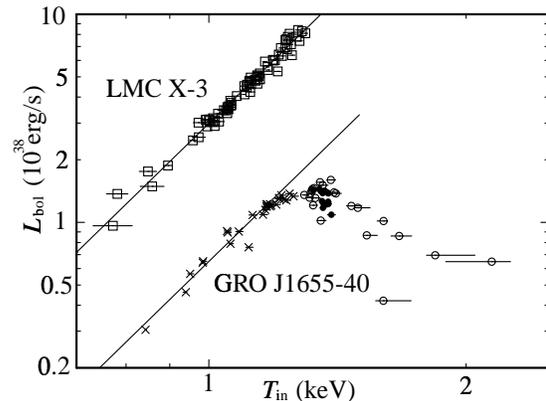


図 7.2 a: The bolometric luminosity L_{bol} of optically-thick accretion disks in two black-hole binaries, LMC X-3 and GRO J1655-40, shown against the innermost disk temperature T_{in} . The data points for LMC X-3 satisfy $L_{\text{bol}} \propto T_{\text{in}}$, indicating that its disk can be described by the standard-disk model with a constant inner radius. In contrast, the behavior of GRO J1655-40 is considerably different, even though its black hole is very similar to that in LMC X-3. This shows that GRO J1655-40 violates the standard-disk picture

久保田らは「あすか」および米国 RXTE 衛星を用い、ソフト状態にある8個のブラックホール (BH) 連星の降着円盤を研究した。その結果、ある種の BH では円盤は Eddington 限界の近くまで標準状態にあるが、他の BH では Eddington 限界の $\sim 1/7$ の光度で円盤の標準状態が破れ、コンプトン散乱が強く効いた状態に移り、それを超えるとアドベクション優勢な状態になることが発見された [22] [31] [76]。これは質量降着率が高いときの降着円盤の統一的な描像を、観測データから検証したもので、高い評価を受けつつある (図 7.2 a) [88] [90] [91]。標準状態を保つ天体は Schwarzschild BH、そうでない天体は Kerr BH である可能性がある。

ライン X 線の共鳴散乱効果の研究

寺田らは昨年度に続きモンテカルロ計算を用い、白色わい星の磁極のプラズマ中でライン光子が共鳴散乱され、縦方向にコリメートされるという効果を検証した。強磁場白色わい星 V834 Cen の「あすか」データでは、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ことを確認した [42] [59] [61]。さらに米国 Chandra 衛星のグレーティング装置のデータを用いて検証を進めている。

局所銀河の中のコンパクト天体

局所銀河群に属する M31(アンドロメダ大星雲) および M33 銀河は、「あすか」の初期に観測された。岡田らは M33 にある明るい X 線源 X-4 を研究し、そのスペクトルが温度 ~ 1 keV のプラズマ放射と、光子指数 ~ 2 のパワーロー成分から成ることを発見した。よって X-4 は大光度 ($\sim 10^{38}$ erg s $^{-1}$) の超新星残骸らしい [38] [64]。高橋(弘)らは M31 の中心から 2.4 kpc までの空間積分されたスペクトルを解析し、多くの中性子星連星からの放射成分に加え、温度 ~ 1 keV (超新星残骸の集合か) と ~ 0.3 keV のプラズマ放射 (星のコロナの集合か) の成分を含むことを示した [40] [63] [78]。

超大光度コンパクト X 線源 (ULX)

局所銀河群より遠い渦巻銀河の腕には、ULX (Ultra-Luminous Compact X-ray Source) と呼ばれる、一群の強い謎の X 線源が存在する。我々は、それらが $\sim 100 M_{\odot}$ の質量をもつブラックホール連星であるという描像を、観測的に追求している。杉保らは、渦巻銀河 IC 342 に存在する 2 つの ULX を「あすか」により長期観測し、その一方 (Source 2) から、31 時間もしくは 41 時間の、ほぼ周期的な変動を検出した [37] [39] [79]。これは $\sim 100 M_{\odot}$ のブラックホールが、同程度の質量の主系列星と近接連星を成している場合に、期待される連星軌道周期とよく一致する。よって ULX がブラックホール連星であることは、さらに確実になったと言える。

活動銀河核の変動のタイムスケール

江副らは、構造関数を用いて、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方法 [15] [9] を、Lockman Hole を観測した ROSAT 衛星のデータに適用した。この結果、5 つの活動銀河核について、変動の特徴的な時間スケールが決められ、ブラックホール質量が推定された [32] [56]。

7.2.4 星間・銀河間空間での粒子加速

銀河バルジでの加熱・加速の証拠

国分らは「あすか」および RXTE 衛星を用い、銀河系バルジの全域から、ディフューズな X 線放射を検出することに成功した。放射は、温度 ~ 0.6 keV の低温プラズマ放射、温度 ~ 3 keV の高温プラズマ放射、および光子指数 ~ 2 の非熱的放射の 3 成分から成り、後 2 者はほぼ相似な空間分布をもつ [23] [36] [54] [77]。バルジ放射は全体として、銀河面に局在する銀河リッジ放射と酷似した性質をもち、銀河面からバルジにわたる星間空間で、プラズマ加熱と粒子加速が広汎に起きていることを示唆する。

電波銀河のローブ

磯部、田代らは、新たに 2 個ほどの電波ジェットの終端ローブから、逆コンプトン放射とおぼしき X 線を検出した [33] [67] [80]。中心核が活発な天体ほど、磁場のエネルギー密度に対して粒子のエネルギー密度が卓越する傾向が示唆されている [11] [41]。昨年度の XMM-Newton 衛星に続き、Chandra 衛星でも観測提案が採択され、ともに観測を待っている。

銀河群における粒子加速

中澤らは「あすか」のデータを用い、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を詳しく研究した。その結果、18 個の銀河群のうちほぼ半数から、銀河間ガス起源の熱的 X 線を有意に上回る、硬 X 線放射を検出し、数例については硬 X 線の空間的な広がりを確認した [24] [44] [53] [82]。硬 X 線スペクトルは、非熱的な放射 (もしくは高温の熱的放射) の特徴をもち、光度は 10^{41-42} erg s $^{-1}$ に達する。これは銀河団の銀河間空間で、広く粒子加速が起きていることを示唆する。

銀河団プラズマに関するパラダイムシフト

牧島らが主導してきた、銀河団の中心における物理の総まとめは、*Publ. Astr. Soc. J.* に受理された [17]。その主眼は、「銀河団プラズマは放射冷却で冷え、そこに大規模な冷却流 (cooling flow) が発生する」という従来の定説を覆し、磁気プラズマ効果による加熱の重要性を示すことにあった。稼動を始めた米国 Chandra 衛星および欧州 XMM-Newton 衛星は、我々の先見的な主張をあい次いで追認しつつあり、パラダイムシフトが起きつつある [89]。

7.2.5 ASTRO-E 衛星の回復と硬 X 線検出器 (HXD) の再製作

ASTRO-E II 衛星

今年度は、2000年2月10日に打ち上げ失敗した ASTRO-E 衛星を回復すべく、最大限の努力を行った [19]。物理学教室を含む各方面から多くのご支援を頂いた結果、2005年の1-2月期に、ほぼ同様な衛星を ASTRO-E II として打ち上げる見通しが開けた。ロケットは、同じ M-V 型に不具合対策を施したものである。ご支援いただいた皆様に厚くお礼を申し述べたい。

HXD(硬 X 線検出器) 装置の再出発：HXD-II

ASTRO-E 衛星には4つの装置が搭載されていた。その一つが硬 X 線検出器 (HXD) で、これは我々が釜江研、宇宙研、阪大核物理センターなどと共同で開発したものである。HXD の検出器部 (HXD-S) は重量 200 kg をもち、結晶とシリコン PIN ダイオードを組み合わせて、10-700 keV のエネルギー域を確保し、きわめて低いバックグラウンドを特徴とする。アナログ電子回路部 (HXD-AE) およびデジタル電子回路部 (HXD-DE) にも、多くの技術が凝らされている。ASTRO-E II 計画のスタートに伴い、HXD 装置も HXD-II 装置として、東大、宇宙研、広島大 (釜江、深沢)、埼玉大 (田代) などの協同により再製作されることとなった [47] [70] [84]。

HXD-II 開発に向けての準備

今年度は、HXD 装置の打ち上げ前の試験データを詳しく解析するとともに [18] [35]、それを踏まえて、HXD-II 装置の設計を検討した。HXD-II は基本は HXD と同じだが、必要最小限の改良を施すこととしている。改良点としては、シリコン PIN ダイオードに代えて CdTe ダイオードを用いる可能性 [72] [73]、量子効率の改良されたフォトチューブを用いる可能性、電子回路部の部分的な手直し、搭載ソフトウェアの部分的な改良、などが検討されている。来年度から検出器の製作が始まるため、結晶シンチレータやシリコン素材を先行して購入し、予備的な評価試験を行うとともに、製作に必要なさまざまな準備を整えた。HXD-DE については、製造メーカーの変更を伴うため、具体的な開発作業に着手し、打ち合わせを重ねた。

微量放射能の混入の評価

HXD および HXD-II では、BGO および GSO という、2種類の結晶シンチレータを用いる。高橋 (勲) らは、結晶シンチレータ自身、それらの周辺材料、および結晶育成に用いるイリジウムるつぼについて、

微量放射能の混入を徹底的に下げるべく多くの評価実験を行い、いくつかの改良の指針を得た [27] [71]。また宇宙線がフォトチューブで作成出すチェレンコフイベントについても、解析を進めた [27] [71]。

7.2.6 将来に向けての開発など

キャピラリープレートの内面反射の基礎実験

ガラス毛细管の内面で X 線の全反射を起こさせると、X 線のライトガイドとして用いる可能性が開ける。江副らは、内径 $\sim 10 \mu\text{m}$ のガラス毛细管を束ねたキャピラリープレートを用いて基礎実験を行い、内面反射がじっさいに起きること、またテーパ型キャピラリープレートを用いると、X 線の集光や発散が生じることを実験的に検証した [25] [46] [49] [75]。将来の全天モニタ装置などへの応用が考えられる。

フーリエ合成法を用いた宇宙硬 X 線撮像装置

古徳らは数値シミュレーションと可視光実験により、「ようこう」HXT のフーリエ合成撮像の原理と、HXD-II の極低バックグラウンド特性をあわせもつ、新しい宇宙硬 X 線撮像装置の概念設計を行った [26] [74]。これは ASTRO-E II 以後に硬 X 線領域で高感度のイメージング観測を目指すもので、装置は約 100 個の撮像素子からなり、1つの素子は、1枚のすだれコリメータと1次元ストリップ検出器から成る。

地球外惑星の探査計画

近年ドップラー法を用いて、50 個を超える太陽系外惑星が発見され、大きな話題となっている。牧島は、須藤、坪野らと協力し、日本でその本格的な探査を行う可能性を検討し始めている [87]。

- [1] Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Ezawa, H., Xu, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., Ohashi, T.: "ASCA Measurements of Silicon and Iron Abundances in the Intracluster Medium", *Publ. Astr. Soc. J.* **50**, 187 (1998) が、2000 年度の日本天文学会論文誌論文賞を受賞。

【報文】

《原著論文》

- [2] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. & Tamura, T.: ASCA Observations of a Near-by Cluster in the Antlia, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 623 (2000)
- [3] 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**, 685 (2000)
- [4] Takahashi, I., Fukazawa, Y., Kodaira, K., Makishima, K., Nakazawa, K., & Xu, H.: ASCA Obser-

- vations of Three Shakhbazyan's Compact Groups of Galaxies, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 769 (2000)
- [5] Kotoku, J., Mizuno, T., Kubota, A., & Makishima, K.: ASCA Observation of Ultra-Luminous X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy NGC 2403, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 1081 (2000)
- [6] 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**, 602 (2000)
- [7] 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**, 632 (2000)
- [8] 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)
- [9] Ezoe, Y., Iyomoto, N., & Makishima, K.: Study of the Long-Term X-Ray Variability of a Possible Quasar RX J0957.9+6903 with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 69 (2001)
- [10] Isobe, N., Tashiro, M., Sugihō, M., & Makishima, K.: ASCA Observations of the BL Lacertae Object OJ 287 in 1997 April and November, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 79 (2001)
- [11] Tashiro, M., Makishima, K., Iyomoto, N., Isobe, N., & Kaneda, H.: X-Ray Measurements of the Field and Particle Energy Distributions in the West Lobe of the Radio Galaxy NGC 1316 (Fornax A), *Astrophys. J. Lett.* **546**, 19 (2001)
- [12] Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Isobe, N., Makishima, K., Matsushita, K., Ohashi, T., & Kamae, T.: Detection of Excess Hard X-Ray Emission from the Group of Galaxies HCG 62, *Astrophys. J. Lett.* **546**, 87 (2001)
- [13] Kubota, A., Mizuno, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kotoku, J., Ohnishi, T., & Tashiro, M.: Discovery of Spectral Transitions from Two Ultraluminous Compact X-Ray Sources in IC 342, *Astrophys. J. Lett.* **547**, 119 (2001)
- [14] Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., & Ohashi, T.: The ASCA Medium Sensitivity Survey (the GIS Catalog Project): Source Catalog, *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 1 (2001)
- [15] Iyomoto, N. & Makishima, K.: Long-Term Variability of the Low-Luminosity Active Galactic Nucleus of M81, *Mon. Not. Roy Astr. Soc.* **321**, 767 (2001)
- [16] Matsumoto, Y., Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Iyomoto, N., & Makishima, K.: The FR-I radio galaxies NGC 315 and NGC 4261 observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, in press (2001)
- [17] Makishima, K., Ezawa, H., Fukazawa, Y., Honda, H., Yasushi, F., Tsuneyoshi, K., Kikuchi, K., Matsushita, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Takahashi, T., Tamura, T., & Xu, H.: X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, in press (2001)
- [18] Sugihō, M., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M., Fukazawa, Y., et al., Spatially Dependent Response of Thick and Large Area PIN Diode for ASTRO-E Hard X-ray Detector, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, in press (2001)
- 《解説》
- [19] 牧島一夫: 「ASTRO-E 衛星の打上げ失敗とその意味」、科学 (岩波書店), **70** (8月号), p.642
- [20] 牧島一夫, 「太陽の 100 倍の質量をもつ回転ブラックホール」、理学部広報, Vol.32, 第3号, p.10
- [21] 牧島一夫, 「ガス蛍光比例計数管」、ISAS ニュース (宇宙科学研究所), 8月号
- 《学位論文》
- [22] Kubota, A.: X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes, 博士論文
- [23] Kokubun, M.: Hard X-ray Study of the Galactic Bulge, 博士論文
- [24] Nakazawa, K.: Hard X-ray Emission from Groups of Galaxies Detected with ASCA, 博士論文
- [25] 江副祐一郎, 「キャピラリプレートの内面反射を用いた宇宙 X 線集光系の基礎実験」, 修士論文
- [26] 古徳純一, 「Fourier・Bessel 合成を用いた宇宙硬 X 線撮像光学系の基礎実験」, 修士論文
- [27] 高橋勲, 「アクティブシールドを利用した低バックグラウンド γ 線検出器の研究」, 修士論文
- 【国際会議】
- 《招待講演》
- [28] Makishima, K.: Spectroscopy of Normal Galaxies, 33rd COSPAR Scientific Assembly, July 17–21, Warsaw University of Technology, E1.1-007
- [29] Makishima, K.: Evidence for Astrophysical Reconnection on Large Scales, *ibid*, D0.1-0035
- [30] Makishima, K.: Concluding Remarks, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジア
- 《一般講演》
- [31] Kubota, A.: X-ray Study of Optically Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes – the Standard Accretion Disk and beyond, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジア
- [32] Iyomoto, N. & Ezoe, Y.: Study of Long-Term X-ray Variability with Sparse Light Curves – Analysis Method and Application to Quasars, *MAXI Workshop on AGN Variability*, March 10–11, 日光金谷ホテル
- 《ポスター発表》
- [33] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., & Kaneda, H.: ASCA Observation of the Northern Outer Lobe Edge of the Radio Galaxy Centaurus A, *Particles and Fields in radio galaxies*, August 3–5, Oxford University
- [34] Matsumoto, Y.: The FR-I Radio Galaxies NGC 351 and NGC 4261 Observed with ASCA, *X-Ray Astronomy 2000*, Mondello (Palermo), Sept. 4–9, Poster No.8.12

- [35] Sugiho, M.: Spatially Dependent Response of Thick and Large Area PIN Diode Developed for ASTRO-E Hard X-ray Detector, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, October 15–20, Lyon Convention Centre, France, 604
- [36] Kokubun, M.: Diffuse Hard X-ray Emission in the Galactic Bulge, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジウム, P41
- [37] Kotoku, J.: ASCA Observations of the two Ultra Luminous Compact X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342 (I) — State Transitions — *ibid*, P42
- [38] Okada, Y.: An X-Ray Emitting Supernova Remnant Candidate, M33 X-4, *ibid*, P45
- [39] Sugiho, M.: ASCA Observations of the two Ultra Luminous X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342 (II) – Possible Orbital Periods – *ibid*, P47
- [40] Takahashi, H.: ASCA Observations of the Central Region of M31, *ibid*, P48
- [41] Isobe, N.: Relations between Core Luminosities and Physical Parameters of the Lobes of Radio Galaxies, *ibid*, P72
- [42] Terada, Y.: X-Ray Beaming due to Resonance Scattering in the Accretion Column, *ibid*, P119
- [43] Makishima, K.: Physics of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *ibid*, P148
- [44] Nakazawa, K.: Hard X-ray Emission from Groups of Galaxies Detected with ASCA, *ibid*, P152
- [45] Takahashi, I.: ASCA Observations of Three Shakhbazyan's Compact Groups of Galaxies, *ibid*, P160
- [46] Ezoe, Y.: Development of Capillary-Plate X-ray Optics, *ibid*, P184
- [47] Makishima, K.: The HXD-II on ASTRO-E-II: Another Challenge to the Hard X-ray Sky, *ibid*, P205
- [48] Tashiro, M.: Nearly-Final In-Orbit Calibration of the GIS onboard ASCA, *ibid*, P223
- [49] Ezoe, Y.: Development of Capillary-Plate X-ray Optics, *MAXI Workshop on AGN Variability*, March 10–11, 日光金谷ホテル
- [50] 田代信, 牧島一夫, 磯部直樹, 金田英宏: 宇宙 X 線観測衛星「あすか」を用いた電波ローブ中の磁場-電子エネルギー分布の観測, 23aWJ5
- [51] 江副祐一郎, 伊豫本直子, 牧島一夫: AGN の長時間変動と光度, 中心質量の関係 – Lockmanhole –, 23aWJ7
- [52] 松本縁, 杉保昌彦, 牧島一夫, 小杉健郎, 坂尾太郎: かに星雲の, 太陽 X 線観測衛星「ようこう」による硬 X 線撮像への挑戦, 23aWJ8
- [53] 杉保昌彦, 釜江常好, 牧島一夫, 高橋忠幸, 村上敏夫, 田代信, 深沢泰司, 大田直美, 米徳大輔, 渡辺伸: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 PIN 型シリコンダイオードのエネルギー応答の測定, 23aWJ9
- [54] 寺田幸功, 牧島一夫, 石田学: 強磁場激変星の降着プラズマにおける鉄共鳴線のビーミング効果の検証, 25aWK6

《日本天文学会・秋の年会 (10月4～8日、群馬県総合教育センター)》

【国内会議】

《日本物理学会・秋の分科会 (9月22～25日、新潟大学)》

- [50] 高橋勲, 大西呂尚, 牧島一夫, 田代信, 釜江常好: GSO 結晶とフォトダイオードを用いた次世代硬 X・ γ 線検出器の開発, 24pYR3
- [51] 古徳純一, 牧島一夫, 久保田あや, 水野恒史: 近傍渦巻銀河中の大光度 X 線源の「あすか」による観測 (1), 23aWJ1
- [52] 牧島一夫, 古徳純一, 久保田あや, 水野恒史: 近傍渦巻銀河中の大光度 X 線源の「あすか」による観測 (2), 23aWJ2
- [53] 中澤知洋, 深沢泰司, 牧島一夫, 高橋勲: 「あすか」衛星による銀河群からの硬 X 線の観測, 23aWJ3
- [54] 国分紀秀, 牧島一夫, 坂野正明, 山内茂雄, 釜江常好: 「あすか」による銀河バルジの観測, 23aWJ4
- [60] 杉保昌彦, 松本縁, 牧島一夫, 小杉健郎, 坂尾太郎: 「ようこう」衛星 硬 X 線望遠鏡 (HXT) を用いたかに星雲の硬 X 線撮像観測, M01a
- [61] 寺田幸功, 牧島一夫, 石田学, 藤本龍一, 松崎恵一: 「あすか」による, 強磁場激変星を用いた共鳴散乱の検証 II, N38a
- [62] 牧島一夫, 久保田あや, 古徳純一, 水野恒史: 近傍の渦巻き銀河に見られる大光度 X 線源の正体, N39a
- [63] 高橋弘充, 岡田祐, 牧島一夫, 満田和久: 「あすか」による M31 の観測, R06a
- [64] 岡田祐, 高橋弘充, 牧島一夫, 満田和久: 近傍銀河 M33 にある X 線点源の「あすか」による解析, R07a
- [65] 深沢泰司, 伊予本直子, 久保田あや, 松本縁, 牧島一夫: M51 の隠れた AGN からの X 線放射の検出, S03a
- [66] 伊予本直子, 深沢泰司, 石原裕子, 中井直正, 牧島一夫: NGC 3079 の X 線観測, S04a
- [67] 磯部直樹, 田代信, 牧島一夫, 金田英宏: 「あすか」による電波銀河 Centaurus A の北側アウトターローブの観測, S14a
- [68] 田代信, 牧島一夫, 磯部直樹, 金田英宏: 「あすか」による電波ローブ中の粒子・磁場のエネルギー分布の観測, S15a
- [69] 松下恭子, 大橋隆哉, 牧島一夫, 中澤和洋, 磯部直樹, 深沢泰司: 銀河群からの硬 X 線成分の検証, T19a

《日本物理学会・春の年会 (3月27～30日、中央大学多摩キャンパス)》

- [70] 高橋忠幸, 牧島一夫, 釜江常好, 村上敏夫 A, 田代信, 深沢泰司: Astro-E の再挑戦 – Astro-E-II 衛星搭載用 HXD-II 検出器 –, 28pSD3
- [71] アクティブシールドを利用した低バックグラウンド γ 線検出器の開発, 29pSG10 高橋勲, 磯部直樹, 寺田幸功, 牧島一夫:
- [72] 佐藤悟朗, 渡辺伸, 高橋忠幸, 岡田祐: テルル化カドミウム (CdTe, CdZnTe) 半導体を用いた新しいガンマ線検出器の特性評価 (1)-スペクトル特性-, 29pSG11
- [73] 岡田祐, 佐藤悟郎, 高橋忠幸, 牧島一夫: テルル化カドミウム (CdTe, CdZnTe) 半導体を用いた新しいガンマ線検出器の特性評価 (2) – タイミング –, 29pSG12
- [74] 古徳純一, 寺田幸功, 牧島一夫: フーリエ・ベッセル合成を用いた宇宙硬 X 線撮像光学系の基礎研究, 28pSD4

- [75] 江副祐一郎, 牧島一夫, 杉保昌彦, 渥美卓治: キャピラリプレート内面反射をもちいた X 線集光系の開発, 28pSD6

《日本天文学会・春の年会 (3月25~28日, 千葉大学)》

- [76] 久保田あや, 牧島一夫: X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証, N36a
- [77] 国分紀秀, 牧島一夫, 山内茂雄, 坂野正明, 海老沢研: 硬 X 線を用いた銀河系バルジの観測, R33a
- [78] 高橋弘充, 岡田祐, 牧島一夫: 「あすか」による M31 の観測 (2), R34a
- [79] 杉保昌彦, 久保田あや, 古徳純一, 牧島一夫, 水野恒史: 渦巻銀河 IC 342 中の大光度 X 線源の「あすか」による観測, R36a
- [80] 磯部直樹, 牧島一夫, 田代信, 金田英宏, 伊予本直子: 「あすか」による電波銀河 4C73.08 観測, S11b
- [81] 田代信, 谷畑千春, 高橋忠幸, 窪秀利, 牧島一夫, 杉保昌彦: 「あすか」による BL Lacertae の光度変動の観測, S16a
- [82] 中澤知洋, 深沢泰司, 牧島一夫, 松下恭子: 銀河群からの硬 X 線放射の観測, T06a
- [83] 深沢泰司, 中澤知洋, 牧島一夫: Chandra 衛星による超過吸収銀河団 2A0335+096 の吸収分布の測定, T17a
- [84] 牧島一夫, 釜江常好, 深沢泰司, 村上敏夫, 高橋忠幸, 田代信, ほか HXD-II チーム: ASTRO-E 衛星の再挑戦 - ASTRO-E II 搭載 HXD-II 検出器, W10a

【談話会、集中講義】

- [85] 牧島一夫: 「近傍銀河に見えつつある大質量ブラックホール候補天体」, 立教大学理学部物理学教室コロキウム, 10月14日
- [86] 牧島一夫: 「太陽の100倍の質量をもつ回転ブラックホール」, 東京大学理学系天文学教室談話会, 2000年10月24日。
- [87] 牧島一夫, 寺田幸功, 須藤靖, 坪野公夫, 小谷隆行, 山田亨, 大石奈緒子, E. L. Turner, D. N. Spergel: 「中型衛星による太陽系外惑星の探査計画」, 宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所), 1月11日。
- [88] 久保田あや: “X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes”, 京都大学宇宙物理学教室談話会, 2月21日。
- [89] 牧島一夫: 「銀河・銀河団におけるプラズマ加熱と粒子加速」, 国立天文台談話会, 2月23日。
- [90] 久保田あや: 「X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証」, 宇宙科学研究所談話会, 2001年4月23日
- [91] 久保田あや: 「X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証」, 立教大学理学部物理学教室コロキウム, 2001年4月28日
- [92] 牧島一夫: 「地球から見た宇宙, 宇宙から見た地球」, 名古屋大学理学研究科物理学専攻集中講義, 7月3-5日。
- [93] 牧島一夫: 「高エネルギー宇宙物理学」, 立教大学理学部物理学専攻集中講義, 10月12-14日。

II

2000年度 ビッグバン宇宙国際研究センター全般に関する報告

1 教官，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫（センター長／教授）
 川崎 雅裕（教授）
 茂山 俊和（助教授）
 杉之原 立史（助手）
 山田 章一（助手）
 A.A. スタロピンスキー（外国人客員教授）
 鳥居 隆（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
1. 初期宇宙進化論	佐藤 勝彦	白水 徹也
	須藤 靖	松原 隆彦
	柳田 勉	井澤 健一
2. 銀河進化理論	野本 憲一	鈴木 知治
3. 可視光近赤外観測	吉井 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
7. 気球観測による反物質 探査，衛星による X 線・ γ 線観測	牧島一夫	田代 信
	折戸 周治	吉村 浩司

(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-1/00
New Improved Photometric Redshifts of Galaxies in the HDF,
Hisanori Furusawa, Kazuhiro Shimasaku, Mamoru Doi, and Sadanori Okamura,
Astrophysical Journal
2. RESCEU-2/00
Evolution and Nucleosynthesis of Metal-Free Massive Stars,
Hideyuki Umeda, Ken'ichi Nomoto, Takayoshi Nakamura,
To appear in "The First Stars", Proceedings of the second MPA/ESO workshop, Eds.: Weiss, Abel,
Hill, Springer, Heidelberg, 2000
3. RESCEU-3/00
Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts,
Gentaro Watanabe, Kei Iida and Katsuhiko Sato,
Nucl. Phys. A, submitted
4. RESCEU-4/00
Type Ia Supernova Progenitors, Environmental Effects, and Cosmic Supernova Rates,
Ken'ichi NOMOTO, Hideyuki UMEDA, Izumi HACHISU, Mariko KATO, Chiaki KOBAYASHI, and
Takuji TSUJIMOTO,
"Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology" ed. J. Truran & J. Niemeyer (Cambridge University
Press), 1999
5. RESCEU-5/00
Nonlinear stochastic bias from the formation epoch distribution of dark halos,
Atsushi Taruya and Yasushi Suto,
ApJ
6. RESCEU-6/00
Fate of the Kaluza-Klein Bubble,
Hisa-aki Shinkai and Tetsuya Shiromizu,
Phys.Rev.D62:024010,2000
7. RESCEU-7/00
The Peculiar Type Ic Supernova 1997ef: Another Hypernova,
Koichi IWAMOTO, Takayoshi NAKAMURA, Ken'ichi NOMOTO, Paolo A. MAZZALI, I. John DANZIGER,
Peter GARNAVICH, Robert KIRSHNER, Saurabh JHA, David BALAM, John THORSTENSEN,
To appear in the Astrophysical Journal, Vol. 534 (2000)
8. RESCEU-8/00
MeV-scale Reheating Temperature and Thermalization of Neutrino Background,
M. Kawasaki, K. Kohri and N. Sugiyama,
Phys.Rev. D62 (2000) 023506
9. RESCEU-9/00
Double Inflation in Supergravity and the Primordial Black Hole Formation,
T. Kanazawa, M. Kawasaki and T. Yanagida
10. RESCEU-10/00
Boltzmann equations for neutrinos with flavor mixings,

Shoichi Yamada,
Physical Review D

11. RESCEU-11/00
Q-ball formation in the gravity-mediated SUSY breaking scenario,
S. Kasuya and M. Kawasaki
12. RESCEU-12/00
Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra with the BESS Spectrometer,
T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E. S. Seo, J. Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, 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, K. Yoshimura,
Astrophysical Journal Letters
13. RESCEU-13/00
Features of Nucleosynthesis and Neutrino Emission from Collapsars,
S. Nagataki and K. Kohri,
Prog. Theor. Phys.
14. RESCEU-14/00
The Properties of Hypernovae: SNe Ic 1998bw, 1997ef, and SN IIn 1997cy,
K. NOMOTO^{1,2}, P.A. MAZZALI^{2,3}, T. NAKAMURA¹, K. IWAMOTO⁴, K. MAEDA¹, T. SUZUKI^{1,2},
M. TURATTO⁵, I.J. DANZIGER³, F. PATAT⁶,
To be published in "Supernovae and Gamma Ray Bursts" ed. M. Livio et al. (Cambridge University Press)
15. RESCEU-15/00
Numerical Simulations of Globular Cluster Formation,
Naohito Nakasato Masao Mori Ken'ichiNomoto,
Astrophysical Journal
16. RESCEU-16/00
The History of the Cosmic Supernova Rate Derived from the Evolution of the Host Galaxies,
Chiaki Kobayashi, Takuji Tsujimoto, and Ken'ichi Nomoto,
To appear in the Astrophysical Journal
17. RESCEU-17/00
The Gravitational Lensing in Redshift-space Correlation Functions of Galaxies and Quasars,
Takahiko Matsubara,
ApJ Letters
18. RESCEU-18/00
The Mt. Fuji Submillimeter-Wave Telescope,
Y. Sekimoto, S. Yamamoto, M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, G. Saito, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, K. Miyazawa, S.-C. Shi, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, J. Inatani, M. Ohishi, K. Noda, and Y. Togashi,
Review of Scientific Instruments
19. RESCEU-19/00
Natural Chaotic Inflation in Supergravity,
M. Kawasaki, Masahide Yamaguchi, and T. Yanagida,
Physical Review Letters
20. RESCEU-20/00
Topological Inflation in Supergravity,
M. Kawasaki, Nobuyuki Sakai, Masahide Yamaguchi, and T. Yanagida,
Physical Review D

21. RESCEU-21/00
New inflation in supergravity with a chaotic initial condition,
Masahide Yamaguchi and Jun'ichi Yokoyama,
Physical Review D
22. RESCEU-22/00
ASCA Observations of Three Shakhbazyan's Compact Groups of Galaxies,
Isao Takahashi, Yasushi Fukazawa, Keiichi Kodaira, Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa, Haiguang Xu,
PASJ 52, 769-774 (2000)
23. RESCEU-23/00
A spectroscopic analysis of the energetic type Ic 'hypernova' SN 1997ef,
Paolo A. Mazzali, Koichi Iwamoto, Ken'ichi Nomoto,
To appear in The Astrophysical Journal
24. RESCEU-24/00
Numerical Analysis of the Wave Function of the Multidimensional Universe,
Hirotaka Ochiai and Katsuhiko Sato,
Progress of Theoretical Physics
25. RESCEU-25/00
Black Holes in the Brane World:Time Symmetric Initial Data,
Tetsuya Shiromizu and Masaru Shibata,
Phys.Rev.D62:127502,2000
26. RESCEU-26/00
Effects of Neutrino Trapping on Thermodynamic Properties of Nuclear "Pasta",
Gentaro Watanabe, Kei Iida, Katsuhiko Sato,
submitted to Nuclear Physics A
27. RESCEU-27/00
Gravitating BIon and BIon black hole with dilaton,
Takashi Tamaki and Takashi Torii,
Phys. Rev. D62, 061501 (2000)
28. RESCEU-28/00
The excitation of a charged string passing through a shock Wave in a charged Aichelburg-Sexl space-time,
Kengo Maeda, Takashi Torii, Makoto Narita and Shigeaki Yahikozawa,
submitted to Nuclear Physics B
29. RESCEU-29/00
ASCA Observation of Ultra Luminous X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy NGC 2403,
Jun'ichi Kotoku, Tsunefumi Mizuno, Aya Kubota, and Kazuo Makishima
30. RESCEU-30/00
Type Ia Supernovae: Progenitors and Evolution with Redshift,
Ken'ichi Nomoto, Hideyuki Umeda, Chiaki Kobayashi, Izumi Hachisu, Mariko Kato, & Takuji Tsujimoto,
Cosmic Explosions, ed. S. S. Holt, W. W. Zhang (New York: American Institute of Physics)
31. RESCEU-31/00
Black hole no hair in Einstein-Maxwell-scalar system in asymptotically de Sitter spacetime,
Takashi Torii, Kengo Maeda and Makoto Narita,
Phys. Rev. D63, 047502 (2001)
32. RESCEU-32/00

Study of the Long-Term X-Ray Variability of a Possible Quasar RX J0957.9+6903 with ASCA,
 Yu-ichiro Ezoe, Naoko Iyomoto and Kazuo Makishima,
 To appear in the Publications of the Astronomical Society of Japan

33. RESCEU-33/00
 ASCA Observations of the BL Lacertae Object OJ 287 in 1997 April and November,
 Naoki Isobe, Makoto Tashiro, Masahiko Sugiho, and Kazuo Makishima
 PASJ
34. RESCEU-34/00
 Natural Chaotic Inflation in Supergravity and Leptogenesis,
 M. Kawasaki, Masahide Yamaguchi, and T. Yanagida
35. RESCEU-35/00
 Implications of the Discovery of Millisecond Pulsar in SN 1987A,
 S. Nagataki and K. Sato,
 submitted to PTP
36. RESCEU-36/00
 Is the cosmic no hair conjecture true in Einstein-Maxwell-Dilaton theory,
 Kengo Maeda, Makoto Narita, Shingo Suzuki and Takashi Torii,
 submitted to International Journal of Modern Physics A
37. RESCEU-37/00
 Charged Brane-World black Holes,
 A. Chamblin, H. S. Reall, H. Shinkai and T. Shiromizu,
 Phys.Rev.D63:064015,2001
38. RESCEU-38/00
 Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment,
 Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, A. Yamamoto,
 to appear in Proceedings of IDM2000 (World Scientific)
39. RESCEU-39/00
 The Earth effects on the supernova neutrino spectra,
 K. Takahashi, M. Watanabe and K. Sato
40. RESCEU-40/00
 Dyonic BIon black hole in string inspired model,
 Takashi Tamaki and Takashi Torii,
 submitted to Phys. Rev. D
41. RESCEU-41/00
 The scalar hair on the black hole in asymptotically anti-de Sitter spacetime,
 Takashi Torii, Kengo Maeda and Makoto Narita,
 submitted to Phys. Rev. D
42. RESCEU-42/00
 DISCOVERY OF SPECTRAL TRANSITIONS FROM TWO ULTRA-LUMINOUS COMPACT X-
 RAY SOURCES IN IC342,
 A. Kubota, T. Mizuno, K. Makishima, Y. Fukazawa, J. Kotoku, T. Ohnishi, and M. Tashiro,
 to appear in ApJL vol 547
43. RESCEU-43/00
 Anti-deSitter No-Hair, AdS/CFT and the Brane-World,
 Tetsuya Shiromizu and Daisuke Ida,
 Phys.Rev.D64:044015,2001
44. RESCEU-44/00

X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies,
K. Makishima, H. Ezawa, Y. Fukazawa, H. Honda, Y. Ikebe, T. Kamae, K. Kikuchi, K. Matsushita,
K. Nakazawa, T. Ohashi, T. Takahashi, T. Tamura, and H. Xu,
Publ. Astr. Soc. Japan