

### III. 宇宙物理理論グループ

教授 梅村 雅之

准教授 森 正夫

講師 吉川 耕司

助教, 主任研究員 岡本 崇 (科研費基盤 S, HPCI 戦略プログラム)

助教 川勝 望 (理数学生応援プロジェクト)

研究員 谷川 衝 (計算科学研究センター), 川口 俊宏 (科研費基盤 A)

大学院生 8 名

4 年生 6 名

#### 【1】 概要

本年度、当グループスタッフは、FIRST プロジェクトを推し進めると共に、これを用いた大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長、宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築、高赤方偏移銀河のサブミリ波特性の研究を行った。また、銀河進化標準モデルの構築を目的として、FIRST, T2K-Tsukuba を用いて、ライマンアルファ輝線天体とライマンブレイク銀河の理論進化モデルの構築、宇宙再電離と銀河形成・進化、銀河衝突とダークマターハローの構造、銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性、ダークマターハローの力学構造の安定性解析、コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解、超新星爆発と銀河進化の研究を行った。さらに、宇宙論・銀河形成分野で、衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究、衛星銀河問題の解決、合体銀河における星団形成、宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究を行った。

また、シミュレーション手法と計算機の開発として、TREE 構造で高速化した新たな輻射流体力学コード START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer) の開発、Tree 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用、Vlasov-Poisson 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション、GPGPU を用いた数値シミュレーションの開拓、Advanced Vector eXtension を用いた N 体計算の高速化を行った。また、プレ戦略イニシアティブ「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」(代表者 森正夫) が採択され、輻射流体力学実現のための演算加速器を搭載した並列計算機システム構築を開始し、プロトタイプ制作を行った。

#### 【2】 FIRST プロジェクト

##### (1) 宇宙シミュレータ FIRST

文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (S) 「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(平成 20 年度～平成 24 年度, 代表 梅村雅之) に基づき、宇宙第一世代天体および原始銀河形成に関する大規模なシミュレーションを実行するプロジェクト (FIRST プロジェクト) を推進した。

宇宙第一世代天体の形成過程について大規模な輻射流体力学シミュレーションを行うためには、物質と光の作用および重力相互作用を極めて高速に計算する必要がある。目的とするシミュレーションのためには、物質・光の計算性能が数 Tflops, 重力計算性能が数 10Tflops の計算機を必要とする。我々は、これを実現するために、PC クラスタに新規開発したサーバ組み込み型の**重力計算専用ボード Blade-GRAPE** を埋め込んだ **宇宙シミュレータ FIRST** を完成させた。

FIRST は、256 の計算ノード、2 つの管理ノード、3 つのファイルサーバ、および Gfarm ファイルシステムからなる。計算ノードのうち、16 ノードは 32 ビット型 Blade-GRAPE を有し、224 ノードは 64 ビット型 Blade-GRAPE X64 を有する。ファイルサーバは 3 台で合計 15TB の容量をもつ。Gfarm ファイルシステムは、ネットワーク共有ファイルシステムであり、分散したローカルディスクから一つの共有ファイルシステムをつくる機構である。これにより、総計 89TB の共有ファイルシステムが構築されている。FIRST の総演算性能は、36.1TFLOPS であり、内ホスト部分 3.1TFLOPS, Blade-GRAPE 部分 33TFLOPS である。また、主記憶容量は総計 1.6TB である。

## (2) 大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長

多くの銀河中心には  $10^6$  から  $10^9$  太陽質量の大質量ブラックホール(SMBH) が存在する。銀河はより小さな銀河同士の衝突合体によって形成されたため、その中にあるブラックホールも合体成長した可能性があるが、それらのブラックホールの合体成長過程は明らかになっていない。

SMBH 同士が合体するにはそれぞれの軌道角運動量を抜く必要がある。2 つの SMBH だけで合体することは難しい。SMBH の軌道角運動量を抜く機構の 1 つは銀河の星による力学的摩擦であるが、2 つの SMBH 間距離が収縮すると、SMBH の間を通る星がなくなるため力学的摩擦が効かなくなり、SMBH 間距離の収縮が止まるからである(Begelman et al.1980; Makino, Funato 2004)。もう 1 つ SMBH が銀河内に存在すると、その SMBH が 2 つの SMBH の軌道角運動量を持ち去るため、2 つの SMBH は合体できる(Iwasawa et al.2006)。より多くの SMBH が銀河内に存在する場合、いくつかの SMBH は合体することが予想される。

我々は 1 つの銀河の中に取り込まれた複数の SMBH がどのように進化するかを、高精度 N 体計算によってシミュレートした。その結果、星との力学的摩擦によってブラックホール 3 体相互作用の効率が増し、結果としてブラックホールの連続的合体成長により中心に一つの巨大ブラックホールが形成されることを明らかとなった (Tanikawa & Umemura 2011)。

## (3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築

ライマンアルファ輝線天体 (LAEs) は、活発な星形成を起こしている天体であり、赤方偏移 0 ~ 7 の広い範囲で観測されている。最近の観測で LAEs はその質量や色等級で多様性を示すことがわかってきた。しかし、それらが銀河進化のどのようなフェーズに対応しているのかは明らかにされていない。そこで我々は、宇宙論的計算と化学進化モデルを組み合わせ、LAE のモデルを構築した。特に、銀河内の各サブストラクチャーの星形成史・化学進化を独立な事象として扱い、スペクトル生成コード 'PEGASE'を用いて SED の計算を行った。ライマンアルファ光度については、ダスト吸収の効果も考慮した。結果として、ライマンアルファ輝線天体には、大きく 2 種類のもので存在することが明らかになった。一つは比較的質量が軽く ( $\approx 10^{10} M_{\odot}$  程度)、

銀河進化の極初期の星形成フェーズにある天体であり、もう一つは質量が重く ( $\approx 10^{10-12} M_{\odot}$ )、初期の星形成期を終了した後、ガスが降着して星形成を誘起する天体である。前者を Type 1 LAE、後者を Type 2 LAE と名づけた。また、これら 2 つのタイプで空間相関や予想される色光度を計算した結果、Type 2 LAE は近赤外の波長で観測される天体と空間相関がよく一致する事がわかった (Shimizu & Umemura 2010)。

#### (4) 高赤方偏移銀河のサブミリ波特性と ALMA での検出可能性

高赤方偏移の星形成銀河のダスト放射をシミュレーションするために、Mori & Umemura (2006) の高精度流体計算による銀河進化のシミュレーション結果に対して 3 次元輻射輸送計算を行い、ダスト温度の正確な決定とサブミリ波放射強度計算を行った。その結果、ダスト量は時間とともに単調に増加するのに対し、サブミリ波放射強度はライマンアルファ輝線天体の後期でピークとなることがわかった。これは、ライマンアルファ輝線天体の後期では、ダストが星形成領域に集中しダスト温度が高くなるためである。ライマンブレイク銀河期では、ダストは超新星爆発による激しいガスフローによって、星形成領域から遠ざかり、結果としてサブミリ波放射強度が減少する。また、ALMA の検出感度を想定すると、ライマンアルファ輝線天体期、ライマンブレイク銀河期共に 1 時間以内の観測で検出可能であることがわかった。

### 【3】 銀河進化標準モデルの構築

#### (1) 概要

飛躍的な観測技術や検出装置の進歩により、それまでは全く知り得なかった宇宙の深遠部で、活発な星形成の兆候を示すライマンアルファエミッタ、ライマンブレイク銀河、サブミリ銀河等、莫大な数の銀河が観測されている。しかしながら、そういった天体が、我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究されてきた近傍銀河とどのように関連しあっているのか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、明確な答えを我々はもっていない。文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (A) 「理論と観測の融合による銀河発生学の探究」(平成21年度～平成24年度、代表 森正夫) に基づき、銀河の標準進化モデルを構築すべく銀河形成・進化の理論研究を推進している。

#### (2) ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河の理論進化モデルの構築

本研究では、“ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河に代表される高赤方偏移で発見されている天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない” という仮説を掲げ、銀河の化学力学モデルを駆使して、銀河の発生について詳細な理論モデルを構築している。さまざまな質量のスケールで化学力学シミュレーションを行った結果、ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河が原始銀河の進化系列であることを見出すことができた。またライマンアルファエミッタで放射されるライマンアルファエミッションの光度は、原始銀河の質量および星形成率と密接な相関があることを示した。さらにその放射の物理的な起源として従来から考えられてきたメカニズムに加えて、衝撃波で加熱されたガスの放射冷却に起因するものが大きな影響を及ぼすことが分かった。

### (3) 宇宙再電離と銀河形成・進化

赤方偏移  $z \sim 1100$  で一度中性化を迎えた宇宙は、その後形成される天体からの紫外線光子によって再び電離状態へと引き戻され、現在まで高度に電離した状態を維持している事が分かっている。この宇宙再電離に関しては、近年のクエーサー観測や WMAP による観測によってその電離史に大まかな制限はつけられてきた。しかしながら、宇宙再電離を引き起こした電離源に関しては未だ理論的にも観測的にもまったく分かっていない。これら電離源や電離史の研究では、これまでいつも銀河の電離光子脱出確率の不明瞭さが解析を困難にしていた。この電離光子脱出確率は銀河内の星から放射される全電離光子数のうち銀河間空間へ脱出する割合で、これによって銀河の電離光子放射率、紫外線背景輻射強度は大きく左右される。我々は宇宙論的流体計算により計算された多数の星形成銀河に対して、3次元輻射輸送計算を行う事により、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を見積った。結果として、赤方偏移  $z=3-6$  においては星形成銀河により銀河間ガスを電離する事が可能である事が示された。さらに電離源解明の鍵を握る電離光子脱出確率についての質量依存性やそのメカニズム、電離源を担う銀河の典型的質量について議論した。

### (4) 銀河衝突とダークマターハローの構造

現在の標準的な宇宙構造形成論では、小質量銀河が衝突合体を繰返しながら成長し階層的に構造形成をおこなうことにより、現在の銀河の姿を構築したと考えられている。近傍銀河 M31 においても、アンドロメダストリームやシェルといった銀河衝突の痕跡が発見されており、ストリームの速度構造が詳細に観測・解析されている。一方、理論的には N 体シミュレーションを用いた研究により、観測されている空間構造を再現することに成功しているが、ストリームの速度構造についてはこれまで調べられてこなかった。そこで我々は、観測されている空間構造を再現できる計算結果を用いてストリームの速度構造を観測結果と比較し、多くの観測結果が説明できることを明らかにした。宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた構造形成では、ダークマターハローの密度分布がハローの外縁部で半径の $-3$ 乗となることが示唆されており、ダークマターハローの“ユニバーサルプロファイル”として知られている。このプロファイルが現実の銀河でも成り立っていることを検証するためには、星の運動を観測し、これを解析することでダークマターハローの作るポテンシャルを調べ、これと“ユニバーサルプロファイル”の作るポテンシャルを比較することが有力な手段となる。銀河衝突の痕跡は銀河外縁部においても明るく、痕跡を形成している星の運動を観測することが可能であるため、銀河外縁部でのダークマターハローのプロファイルを観測的に調べるために適している。M31 のアンドロメダストリームを用いればそのダークマターハローの外縁部の構造に迫ることができる。我々の N 体シミュレーションでは、M31 のダークマターハローのプロファイルとして半径の $-3$ 乗という密度分布を仮定し、その結果観測されているストリームの速度構造をよく再現できた。これは、半径の $-3$ 乗というダークマターハローの密度分布が実際の銀河でも成り立っていることを示唆する重要な結果である。

### (5) 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性

これまでの研究では銀河衝突現象の解析を重力多体系として解析してきたが、今後は銀河衝突に対するガスやダストの力学的な応答を調べる必要がある。特に銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性との物理的な関係は大変興味深い。銀河衝突過程によっては、ブラックホールの活動性を際立たせる場合とその活動性を著しく減衰させる効果が予想される。我々はそのような状

況を正確に解析する為、N体シミュレーションでは取り入れられないガスの効果を取り入れるための銀河衝突の流体モデルの構築に取り組み、HLLC法を採用した3次元並列流体コードの開発を開発した。銀河中心の降着円盤に対する質量供給源として力学的に安定なトーラスを想定し、そのトーラスと銀河衝突によって発生した衝撃波との衝突を様々なパラメータで数値実験を行った。その結果、衝撃波によってトーラスが破壊され、降着円盤への質量供給が抑制されるパラメータ領域を確定することに成功した。

#### (6) ダークマターハローの力学構造の安定性解析

宇宙の構造形成のパラダイムとなっているコールドダークマター(CDM)シナリオは、N体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カusp)構造を予言する。DMが力学的に主たる役割を果たし、カuspを持つことが期待される天体として矮小銀河が挙げられる。その観測結果によると、矮小銀河は中心部で密度は発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている。この理論と観測の不一致はコアカusp問題として知られ、CDMシナリオの未解決問題の一つである。コアカusp問題を解決するモデルとして、"かつて矮小銀河で大量の超新星爆発によるバリオン(ガス)の放出が起こり、その結果の重力場変動によりカuspがコアへと遷移した"というものがある。本研究では、これまで無視されてきた質量放出の起こる時間スケールに注目し、DMハローの力学応答への依存性を調べた。その結果、他の条件が同じであっても、放出時間が短いほどカuspはより平坦に遷移しやすい事を明らかにした。しかしながら矮小銀河の観測に合うような全く平坦な質量分布を再現することはできなかった。そして、従来言われてきた質量放出仮説のみではコアカusp問題を解決できないことを指摘した。

#### (7) コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

銀河風は超音速で流れる宇宙流体の1つとして知られている。銀河の中心付近で超新星爆発などにより星間ガスにエネルギーが放出されると星間ガスは銀河の外側に向かって超音速で流出するが、常に超音速で流れる場合だけではなく亜音速から始まって連続的に加速して超音速となって流れる遷音速流も存在する可能性がある。しかし先行研究では遷音速解が見つかっていなかった。本研究ではコールドダークマターハロー中の銀河風の遷音速流を発見することに成功した。銀河風をダークマターハロー中における球対称定常流であると仮定すると、内側では重力の効果が効いているために亜音速流は加速し、外側では膨張の効果が効いているために超音速流が加速するので、膨張の効果と重力の効果が釣りあっている点をちょうど音速で流れる場合は亜音速から超音速への連続的な加速が実現でき、遷音速流となることがわかった。解析の結果、銀河風が遷音速解を持つためには、ダークマターとバリオンを含む銀河の質量分布がダークマターハローのスケール長よりも内側で距離の二乗よりも大きなべきを持つ必要があることを見出した。

#### (8) 超新星爆発と銀河進化

銀河形成・進化過程で爆発的な星形成に伴って発生する多重超新星爆発は、銀河内のガスに多大なエネルギーを供給する。超新星爆発によって生成された衝撃波から高温の銀河ガスを生成し、やがて銀河からのアウトフロー(銀河風)を形成することになる。このような銀河風生成メカニズムの研究は、計算機性能の飛躍的な向上と近年の高精度銀河観測データの蓄積に後押しされながら、現在も精力的に行われているが、未だ明確な答えを我々は持っていない。そこで本研究では、軸対称密度場中での衝撃波の伝播を扱う事ができる、Laubach-Probst法と呼ばれる強

力な近似解法を用いて、銀河風生成メカニズムの理論的研究を行った。その結果、銀河風の生成効率と、銀河形状、星形成率との間の関係を明らかにした。

#### 【4】 宇宙論・銀河形成

##### (1) 衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究

銀河団の銀河は銀河団が銀河や銀河群の度重なる衝突合体で成長するとき力学的・熱的影響を強く受け形成・形態進化を遂げ、その過程で銀河団ガスに重元素を供給してきた。重元素の量と分布はこれらの形成進化をひもとく鍵であり、それは数千万度の温度にある銀河団ガスから放射される X 線を分光し、輝線を調べることで分かる。これまでに多くの銀河団で重元素の組成や量、空間分布が X 線観測の研究によって調べられてきた。これらの研究においては重元素は衝突電離平衡にあり電子・イオンは温度平衡にあると仮定されるが、これは銀河団中心部ではこれらの平衡状態に達する時間スケールが十分短いと考えられるだけガスの密度が高いからである。しかしながら、ビリアル半径にせまる希薄な周縁領域や衝突加熱領域では平衡状態に達していない可能性を我々は注目している。もしそうであれば、平衡を仮定した解析結果は誤った重元素量を推定しかねない。そこで我々は T2K-Tsukuba を用いて鉄などの主要な重元素の衝突電離平衡と電子・イオンの温度平衡を仮定せず時間進化を解くダークマターとガスを含めた様々な衝突条件下(質量比・インパクトパラメータ)での衝突銀河団の 3 次元数値実験を世界で初めて行った。その結果、銀河団外縁部と銀河団中心部でそれぞれ特徴的な衝撃波が非平衡電離状態・2 温度状態を伴って形成されることが分かった。更に、観測時の衝撃波面に対する角度によって非平衡電離状態や 2 温度状態の観測可能性が大きく変わることもわかった。実際の衝突銀河団における物理状態は、将来の X 線観測衛星でその詳細が明らかになることが期待される。また、代表的な衝突銀河団として知られ、様々な角度から研究されている弾丸銀河団 (Bullet Cluster) についてもその再現シミュレーションを行い、弾丸銀河団においても非平衡電離状態や 2 温度状態が存在することを示した。

##### (2) 衛星銀河問題の解決

構造形成の標準的な理論となっているコールドダークマターモデルは、我々の天の川銀河のような銀河が数百から数千もの衛星銀河を持つことを予言する。一方、現在まで天の川銀河の周囲には 20 程度の衛星銀河しか発見されていない。この理論と観測の矛盾は「衛星銀河問題」と呼ばれ、標準モデルのもつ大問題とされてきた。一方、この問題はダークマターのみを考慮した宇宙論的シミュレーションによって指摘されているものである。そこで我々は、宇宙背景放射や超新星爆発による星間ガス加熱の影響を取り入れた宇宙論的な銀河形成シミュレーションを行い、コールドダークマターモデルが予言する「目に見える」衛星銀河の数やその性質を調べた。その結果、超新星爆発によるガスの加熱が十分に効けば、衛星銀河の光度関数は再現可能であることを示した。このような加熱は衛星銀河の光度-金属量関係も同時に再現することも明らかにした。一方、シミュレーションで得られた衛星銀河と観測された天の川銀河のそれを光度ごとに比較した場合、シミュレーションによるものの方が力学的な質量が重いことが判明した。これは、(i) 天の川銀河のダークハローが我々が今回候補としたものよりも軽い、(ii) 衛星銀河光度関数は親銀

河のダークハロー質量が同じでも様々なばらつきを持ち得る, (iii) シミュレーションでは捉えきれないバリオンの物理過程により, 衛星銀河のダークハロー中心部はシミュレーションで得られたそれより密度が下がっている, 等の可能性が考えられる。

### (3) 合体銀河における星団形成

従来の銀河形成シミュレーションは数値的分解能が足りないため, 銀河内での星形成領域を直接取り扱うことは出来ず, 温度  $10^4$  度, 密度  $n_H \approx 0.1 \text{cc}^{-1}$  程度の温かいガスで星形成が起ると仮定していた。そこで,  $100$  度以下, 密度  $n_H$  が  $100 \text{cc}^{-1}$  以上の低温高密度ガスを扱える高分解能シミュレーションを行い, 銀河の合体時に励起される星団形成について調べた。その結果, 合体の最終段階で銀河中心に複数の巨大星団が形成されることが明らかになった。これは赤外線で見られる ULIRG や LIRG によく見られる multiple-nuclei に酷似しており, multiple-nuclei の起源として従来考えられていた 3 つ以上の銀河の合体よりも自然なシナリオである。

### (4) 宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究

ガス冷却や, 星形成, 超新星爆発等の物理過程を取り入れた宇宙論的な銀河形成シミュレーションを行い,  $z = 3.1$  におけるライマンアルファ銀河の性質を観測と比較した。我々は, 星間ガスのクランピネスが親銀河のダークハロー内のサブハローの数に比例するという現象論的モデルを導入し, ライマンアルファ銀河の角度相関・紫外及びライマンアルファ光度関数・ライマンアルファ等価幅分布という 3 つの観測量を初めて同時に再現した。

## 【5】 シミュレーション手法と計算機の開発

### (1) TREE 構造を用いた高速輻射流体スキーム START の開発

輻射は物質との相互作用を通じて, ガスの化学進化や力学進化に影響を与える。このような過程を矛盾無く解く為には, 輻射輸送計算と流体力学計算をカップルさせた輻射流体計算が必要となる。そのような輻射流体計算法の一つに Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics (RSPH)法というものがある(Susa 2006)。この手法では, 放射源一つにつきおおよそ  $O(N)$ ( $N$  は SPH 粒子数)の計算量で輻射輸送計算が可能となる。我々は, この計算法を用いて種族 III 星からの紫外線フィードバックに関する研究を行ってきた(Hasegawa, Umemura and Susa 2009 など)。この RSPH 法を含め多くの輻射輸送計算では輻射性再結合による放射はすぐその場で吸収されるという近似(On the spot 近似)を用い, 実際にはそれらの光子の輻射輸送計算を行ってはいない。これは, 再結合光子の輻射輸送を計算する事はすべての粒子を放射源として扱う事と同等であり, 計算量が  $O(N \times N)$ と膨大となり, 実現が非常に困難となる為である。また同様の理由により, 星などの放射源の数が多数の場合にも計算を実行することが困難となってしまう。そこで, 我々はこれまで使用してきた粒子法流体力学 (SPH 法) をベースにした輻射流体力学コードの輻射輸送部分についてツリー構造によって大幅な加速を実現し, 新たな輻射流体力学コード START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer)を開発した。このコードを用いることにより, これまで正確に扱うことのできなかつた散乱光子を近似なく扱うことが可能になった。この手法では, 放射源の数を  $N_s$  とした場合, 1 ステップ当たり  $N \log(N_s)$  のオーダーの計算量で輻射流体

計算をする事が可能となる。これにより、これまで非常に困難であった散乱光を考慮した輻射流体計算や多数の星からの輻射性フィードバックを同時に取り扱った計算を可能とした。この手法を用いて、光電離に対する散乱光の役割を解析した結果、吸収体の大きさが電離光子の平均自由行程と同程度になる場合、On the spot 近似が適当でないことを明らかにした。

#### (2) Tree 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用

銀河形成において、大質量星が輻射として出すエネルギーは実は超新星爆発として出すエネルギーよりも2桁近く大きい。この輻射によるフィードバック効果を銀河形成シミュレーションに取り入れるため、メッシュ流体に対して多数の点光源からの輻射輸送計算を Tree 法を用いて光速に計算する方法を開発した。これは粒子法である Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) 法に対して実装された START コードのメッシュ流体版と言える。メッシュ法の方が一般に SPH 法よりも爆発現象を扱うのに有利であり、輻射性フィードバックと超新星爆発によるフィードバックを同時に適切に扱う上でこの方法が重要な役割を果たすと期待している。

#### (3) Vlasov-Poisson 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション

これまでの自己重力系の数値シミュレーションでは、質量分布を粒子分布に置き換えて粒子間の重力相互作用を計算する N 体シミュレーションが広く採用されてきたが、N 体シミュレーションには人工的な二体緩和が起きたり、速度分散が大きな系については速度分散による密度揺らぎの減衰といった効果をうまく再現できなかつたりという弱点があった。我々は無衝突ボルツマン方程式 (Vlasov 方程式) を Poisson 方程式 と組み合わせて自己重力系の数値シミュレーションを実行するシミュレーションコードの開発を世界で初めて行い、様々なテスト計算を行った。その結果から、質量保存やエネルギー保存などを満足できる精度で満たしながら正しく自己重力系のシミュレーションが可能であることを示した。また、宇宙大規模構造でのニュートリノの影響を調べるシミュレーションに適用する為、宇宙論的膨張に沿った共動座標系での Vlasov 方程式を解けるよう拡張を行った。

#### (4) GPGPU を用いた数値シミュレーションの開拓

General Purposed GPU (GPGPU)は次世代の数値シミュレーションにおける重要な技術要素として注目されている。我々は、NVIDIA 社の GPGPU と開発言語 CUDA を用いて自己重力多体系の N 体計算と輻射輸送計算の高速化を行った。N 体計算では、FIRST に搭載されている Blade-GRAPe を凌駕する性能を得ることができたが、ホスト計算機と GPGPU の間の PCI-Express での通信によるオーバーヘッドの為に少ない粒子数では Blade-GRAPe と同様に性能の劣化が見られた。PCI-Express のコントローラが CPU に統合されている Intel の Sandy Bridge アーキテクチャのマシンに GPGPU を搭載した場合には少粒子数でもかなり性能が向上することが分かった。輻射輸送計算では、long-characteristic 法による輻射輸送計算と化学反応計算の高速化を行い、CPU での計算と比較して輻射輸送計算を 150 倍程度、化学反応計算を 20 倍程度高速化することに成功した。

#### (5) Advanced Vector eXtension を用いた N 体計算の高速化

Intel 社が新しく発表した Sandy Bridge アーキテクチャに基づく CPU に実装されている Advanced Vector eXtension (AVX)命令セットを用いて、衝突系・無衝突系の N 体計算の高速化



を行った。従来の Streaming SIMD Extension (SSE)命令を用いた高速化よりも、更に高速化することに成功し、1 コアでの性能は衝突系で 20Gflops、無衝突系で 80Gflops を達成した。これらの性能は GPGPU での最大性能には及ばないが、粒子数に依存せずどのような粒子数でも同じ性能が得られることから、大規模並列計算に適しているといえる。

#### (6) プレ戦略イニシアティブ「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」

宇宙論的流体力学計算と輻射輸送計算を完全に統合した自己矛盾のない銀河形成の輻射流体モデルを世界で初めて構築することを目指している。このような目的のため、本年度は、高速な計算機の開発準備のための GPU による計算加速器を搭載した PC クラスターの試作機を作成した。また、その計算機上で効率よく計算の行うことができるシミュレーションコードの開発及び最適化を行い、そのパフォーマンスの測定を行った。特に本年度集中的に行った研究は、自己重力多体問題計算コードの開発、輻射輸送コードの開発、高精度流体力学コードの開発である。

## <競争的資金採択状況>

- ・ 基盤研究 (S) : 梅村 雅之 (代表者) (継続)  
「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」 (1,120 万円)
- ・ 基盤研究 (A) : 森 正夫 (代表者) (継続)  
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」 (560 万円)
- ・ 挑戦的萌芽研究 : 吉川 耕司 (代表者) (継続)  
「6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション」 (90 万円)
- ・ 若手研究 (スタートアップ) : 岡本 崇 (代表者) (継続)  
「三次元輻射流体シミュレーションで探る銀河形成の物理」 (60 万円)
- ・ 若手研究 (B) : 川口 俊宏 (代表者) (継続)  
「原始活動銀河核のブラックホール・銀河共進化究明と偏光X線放射予測」 (80 万円)
- ・ 基盤研究 (C) : 川口 俊宏 (分担者) (代表者: 峰崎 岳夫) (新規)  
「活動銀河核多波長モニターデータベースと活動銀河核変光・放射機構の研究」 (10 万円)
- ・ プレ戦略イニシアティブ: 森 正夫 (代表者) (新規)  
「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」 (450 万円)
- ・ 研究活動スタート支援: 川勝 望 (代表者) (新規)  
「多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明」 (146 万円)

## <学位論文>

### 修士論文

1. 扇谷 豪  
超新星爆発のガス加熱による重力場変動のダークマターハロー中心密度分布への影響
2. 中村 繁幸  
銀河風と矮小銀河の形状の関係について
3. 三木 洋平  
銀河衝突による銀河進化と活動銀河中心核への影響に関する理論的研究
4. 横山 貴士  
非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化

### 学士論文

1. 嶋田隼人  
宇宙の大規模構造に対するニュートリノの影響
2. 吉次将士

非熱的電子によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果

3. 八重樫祥治

中心ブラックホールとダークマターハロー中の定常銀河風

4. 野口岳大

輻射優勢宇宙における原始ブラックホールの進化

5. 安部牧人

SWIFT 光度曲線データに基づくガンマー線バースト重力レンズ効果の研究

6. 齋藤祐里子

漂う巨大ブラックホールとアンドロメダストリーム

<論文>

Refereed Papers

1. Owen, P.H., Eke, V.R., Frenk, C.S., Okamoto, T., 2011, The Baryons in the Milky Way Satellites, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
2. Okamoto, T., Yoshikawa, K., Umemura, M., 2011, ARGOT: Accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
3. T. Kawaguchi, and M. Mori, Near-Infrared Reverberation by Dusty Clumpy Tori in Active Galactic Nuclei, Astrophysical Journal, submitted.
4. Tanikawa, A. Yoshikawa, K., Okamoto, T., Nitadori, K., 2011, N-body Simulation for Self-Gravitating Collisional Systems with a New SIMD Instruction Set Extension to the x86 Architecture, Advanced Vector Extensions, New Astronomy, submitted.
5. Shimizu, I., Yoshida, N., Okamoto, T., 2011, Lyman-alpha Emitters in Cosmological Simulations I: Lyman-alpha Escape Fraction and Statistical Properties at  $z=3.1$ , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
6. Matusi, H. Saitoh, T.R., Makino, J., Wada, K., Tomisaka, K., Kokubo, E., Daisaka, H., Okamoto, T., Yoshida, N., 2011, ORIGIN OF MULTIPLE NUCLEI IN ULTRALUMINOUS INFRARED GALAXIES, Astrophysical Journal, submitted.
7. Tanikawa, A., Umemura, M., 2011, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, Astrophysical Journal, 728, L31-L35.
8. Matsuda, Y.; Yamada, T.; Hayashino, T.; Yamauchi, R.; Nakamura, Y.; Morimoto, N.; Ouchi, M.; Ono, Y.; Kousai, K.; Nakamura, E.; Horie, M.; Fujii, T.; Umemura, M.; Mori, M., 2011, The Subaru Lya blob survey: a sample of 100-kpc Lya blobs at  $z = 3$ , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 410, L13-L17.

9. Hasegawa, K., Umemura, M., 2010, START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 2632-2644.
10. Shimizu, I., Umemura, M., 2010, Two types of Lyman-alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 913-921.
11. Kawaguchi, T. and Mori, M., 2010, Orientation Effects on the Inner Region of Dusty Torus of Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, 724, L183-L187.
12. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High- $z$  Galaxies, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 430-432.
13. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 400-402.
14. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in CDM Halos and Supernova Feedback, *AIP Conference Proceedings*, 1269 (Osaka), 421-423.
15. Akahori, T., Yoshikawa, K., 2010, Hydrodynamic Simulations of Merging Galaxy Clusters: Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 335-345.
16. Prokhorov, D.A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Nagataki, S., Seon, K.-I., 2011, Can electron distribution functions be derived through the Sunyaev-Zel'dovich effect?, *Astronomy and Astrophysics*, 529, A39.
17. Okamoto, T., Frenk, C. S., Jenkins, A., Theuns, T., 2010, The properties of satellite galaxies in simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 208-222.
18. Bett, P., Eke, V., Frenk, C. S., Jenkins, A., Okamoto, T., 2010, The angular momentum of cold dark matter haloes with and without baryons, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404, 1137-1156.
19. Imanishi, M., Ichikawa, K., Takeuchi, T., Kawakatu, N., Oi, N., Imase, K., 2011, Infrared 3-4 $\mu$ m Spectroscopy of Nearby PG QSOs and AGN-Nuclear Starburst Connections in High-luminosity AGN Populations, *Populations*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63 (Subaru special issue), 447-456.
20. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2011, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, *The Astrophysical Journal*, 270, 120-131.
21. Tanikawa, A., Fukushige, T., 2010, Mass-Loss Timescale of Star Clusters in an External Tidal Field. II. Effect of Mass Profile of Parent Galaxy", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 1215-1230.

22. Nagamine, K., Choi, Jun-Hwan, Yajima, H., 2010, Effects of Ultraviolet Background and Local Stellar Radiation on the H I Column Density Distribution, *Astrophysical Journal Letters*, 725, L219-L222.
23. Yajima, H., Choi, Jun-Hwan, Nagamine, K., 2011, Escape fraction of ionizing photons from high-redshift galaxies in cosmological SPH simulations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 411-422.
24. Prokhorov, D.A., Dubois, Y., Nagataki, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Unveiling the 3D temperature structure of galaxy clusters by means of the thermal SZ effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, accepted.
25. Yoshida, T., Ebisawa, K., Matsushita, K., Tsujimoto, M., Kawaguchi, T., 2010, Long-Term Spectral Variations of Ultraluminous X-ray Sources in the interacting galaxy systems M51 and NGC4490/85, *Astrophysical Journal*, 722, 760-773

#### Non-Refereed Papers

1. Saitoh, T.R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2011, Shock-induced star cluster formation in colliding galaxies, *Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 270*, 483-486.
2. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., 2010, Ultraviolet and Infrared Radiation from Protogalaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 295-296.
3. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, The Impact of Ultraviolet Radiation on Secondary Pop III Star Formation, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 262-263.
4. Tanikawa, A., Umemura, M., 2010, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 242-245.
5. Umemura, M., 2010, First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 97-102.
6. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-zgalaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 52-59.
7. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1269*, 430-432.
8. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 107-110.
9. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., 2010, The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 101-106.

10. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-z galaxies, American Institute of Physics Conference Series 1279, 52-59.
11. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, American Institute of Physics Conference Series 1279, 382-384.
12. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, American Institute of Physics Conference Series 1279 (Kyoto), 403-405.
13. Ohashi, T. et al., 2010, DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of SPIE, 7732, 77321S-77321S-9.
14. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2010, Nonthermal Emissions from Shocked Shells Driven by Powerful AGN jets, International Journal of Modern Physics D, 19, 893-899.

#### <解説記事>

1. 川勝 望, 和田 桂一 (2011), 銀河中心における超巨大ブラックホール形成の解明に向けて～多階層モデル構築の重要性～, 日本物理学会誌, 66, 285-289

#### <研究会開催>

1. 『初代星・初代銀河研究会』2011年 1月26～28日, 愛媛大学, 松山市  
 世話人: 長尾透 (愛媛大), 谷口義明 (愛媛大), 梅村雅之 (筑波大), 大向一行 (京大),  
 須佐元 (甲南大), 富永望 (甲南大), 森正夫 (筑波大), 吉田直紀 (東大)

#### <座長>

1. 川勝望  
 日本天文学会"活動銀河核"日本天文学会秋季年会, 金沢大学, 2010年9月13～16日

#### <国際会議発表・海外講演>

- 1) Umemura, M., First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)
- 2) Mori, M., Metal Enrichment in a Supernova-dominated High-z Galaxies, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)

- 3) Ogiya, G., and Mori, M., The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (April 19-23, 2010, Kyoto, Japan)(Poster)
- 4) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan)
- 5) T. Yoshida, K. Ebisawa, K. Matsushita, M. Tsujimoto, and T. Kawaguchi, A statistical study of long-term variabilities of ultraluminous X-ray sources, Ultra-Luminous X-ray sources and Middle Weight Black Holes (May 23-25, 2010, Madrid)
- 6) Kawakatu, N., Wada K, What determines AGN activity?: Important of circumnuclear disk, Central Massive Objects: The Stellar Nuclei-Black Hole Connection (Jun.22-25, 2010, Munich, Germany)
- 7) Mori, M., Chemical and dynamical evolution of high-z galaxies, Probing the High Redshift Universe in COSPAR Scientific Assembly (18-25 July 2010, Bremen, Germany)
- 8) Mori, M., Chemical and dynamical evolution of Lyman alpha emitters and Lyman break galaxies, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (19-23 July 2010, Heidelberg, Germany)
- 9) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th Japan-Korea Young Astronomers Meeting 2010 (26-28 August 2010, Kanagawa, Japan)
- 10) Umemura, M. Yoshikawa, K., Hasegawa, K. and FIRST Project Team, 6-Dimensional Numerical Astrophysics by Next Generation Supercomputing, 4<sup>th</sup> East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 11) Tanikawa, A. and Umemura M., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, 4<sup>th</sup> East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 12) Ogiya, G., and Mori, M., Dynamical response of CDM halo to mass-loss driven by supernova feedback, 4<sup>th</sup> East Asia Numerical, Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 13) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 14) Umemura, M., Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator "FIRST", Collaboration Meeting Lawrence Berkeley National Laboratory and University of Tsukuba, Japan (Feb. 24-25, 2011, Berkeley, USA) (Invited)

## <国内講演>

### 招待講演

1. 梅村雅之, 「6次元計算宇宙物理学」, 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010年5月23日～5月28日, 千葉市幕張メッセ国際会議場)
2. 谷川衝, 「球状星団で形成されたコンパクト天体からなる連星の合体率」, 国立天文台理論研究部高エネルギーセミナー (2010年5月27日, 国立天文台, 三鷹市)
3. 川勝望, 「銀河中心に潜む超巨大ブラックホール形成はどこまで分かったのか?」, 第40回天文天体物理若手夏の学校, (2010年8月2日～5日, ホテル日航豊橋, 豊橋市)
4. 川勝望, 「ALMA-AGN サイエンス」, ALMA-近傍AGN観測検討会, (2010年8月23日, 国立天文台, 三鷹)
5. 梅村雅之, 「今後の共進化研究の戦略」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀河の共進化: 理論モデルと観測戦略 (2010年9月6日～9月8日, 東北大学, 仙台市)
6. 岡本崇, 「AGN フィードバックと銀河形成」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀河の共進化: 理論モデルと観測戦略 (2010年9月6日～9月8日, 東北大学, 仙台市)
7. 梅村雅之, 「銀河と巨大ブラックホールの形成史」, ALMA-Subaru Workshop 2010 (2010年9月29日～10月1日, 国立天文台, 三鷹)
8. 川口俊宏, 「活動銀河核中心100pc領域に迫る」, "TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学"研究会 (2010年10月4-5日, 国立天文台, 三鷹市)
9. 梅村雅之, 「ダークマター問題と初代星の誕生」, 金沢大学物理教室コロキウム (2010年10月22日, 金沢大学, 金沢市)
10. 谷川衝, 「Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy」, 国立天文台光赤外研究部 Galaxy Workshop Subaru (galshop) (2010年10月27日)
11. 梅村雅之, 「初代天体・銀河形成論」, 2010年度理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」 (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
12. 梅村雅之, 「初代星形成における輻射流体力学過程」, 恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで (2011年3月2日～4日, 北海道大学, 札幌市)
13. 岡本崇, 「Formation of the Local Groups satellite galaxies」, 恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで (2011年3月2日～4日, 北海道大学, 札幌市)
14. 川勝望, 「ガス降着による超巨大ブラックホール形成理論の現状と今後の課題」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)



## 一般講演

- 1) 梅村雅之, 「多成分自己重力系の緩和過程」, 第一回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム～ポストペタスケールコンピューティングへの学際計算科学の展開～ (2010年5月7日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)
- 2) 川口俊宏, 森正夫, 「降着円盤の非等方性放射が活動銀河核ダストトーラス内縁構造に与える影響」, Grain Formation Workshop・銀河のダスト研究会 (2010年9月2-4日, 神戸大学, 神戸市)
- 3) 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich, 「N体シミュレーションによるアンドロメダ・ストリームの解析:矮小銀河の金属量分布」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 4) 吉川耕司, 吉田直紀, 梅村雅之, 「6次元位相空間上でのVlasov方程式の直接計算による自己重力系の数値シミュレーション」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 5) 岡本崇, 「ハロー星の性質と起源」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 6) 扇谷豪, 森正夫, 「断熱的重力場変動に対するダークマターハローの力学応答」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 7) 川口俊宏, 森正夫, 「降着円盤の放射の非等方性がダストトーラス内縁構造に与える影響」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 8) 川勝望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり, 「筑波大学「理数学生応援プロジェクト」における最先端研究体験企画」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 9) 谷川衝, 関口雄一郎, 牧野淳一郎, 「球状星団中で形成された連星中性子星の合体率」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 10) 川勝望, 平下博之, 梅村雅之, 「Blue Compact矮小銀河中心の巨大ブラックホール探査」, ALMA-Subaru Workshop 2010 (2010年9月29日～10月1日, 国立天文台, 三鷹)
- 11) 谷川衝, 「恒星の軌道運動の観測による球状星団中心の中間質量ブラックホール検出」, TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学 (2010年10月4日～5日, 国立天文台, 三鷹市)
- 12) 川口俊宏, 「JASMINEによるCyg X-1の軌道測定」, JASMINEサイエンスワークショップ-10uasで切り拓く天文学新時代-研究会 (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
- 13) 谷川衝, 「大質量ブラックホール多体系でのブラックホール合体成長に伴う銀河の構造進化」, JASMINEサイエンスワークショップ-10 $\mu$ asで切り拓く天文学新時代- (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
- 14) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 宇宙科学研究所 コロキウム (2010年12月3日, 宇宙科学研究所, 相模原市)
- 15) 岡本崇, 吉川耕司, 梅村雅之, 「スーパーメッシュを用いた高速輻射輸送法」, 理論

- 懇シンポジウム (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
- 16) 扇谷豪, 森正夫, 「質量放出による重力場変動のDMハロー中心密度分布への影響」, 第23回理論懇シンポジウム, (2010年12月20日～22日, 京都大学, 京都市)
  - 17) 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich, 「Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream」, 第23回理論懇シンポジウム (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
  - 18) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 京都大学宇宙物理学教室 談話会 (2011年1月7日, 京都大学, 京都市)
  - 19) 谷川衝, 「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長ー相対論的効果の影響ー」, 初代星・初代銀河研究会2011 (2011年1月26日～28日, 松山市)
  - 20) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 東京大学天文学教育研究センター 談話会 (2011年, 2月10日, 東京大学, 三鷹市)
  - 21) 谷川衝, 梅村雅之, 「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの成長と銀河の進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 22) 横山貴士, 梅村雅之, 「非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 23) 森正夫, 「アンドロメダ銀河と矮小銀河の衝突シミュレーション」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 24) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「銀河衝突による活動銀河中心核への影響」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 25) 濟藤祐理子, 三木洋平, 川口俊宏, 森正夫, 「Wandering Blackhole and Andromeda Stellar Stream」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 26) 岡本崇, 吉川耕司, 「スーパーメッシュを用いた輻射輸送計算の加速法」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 27) 扇谷豪, 森正夫, 「バリオン重力場変動へのダークマターハローの力学応答」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 28) 川口俊宏, 森正夫, 「活動銀河核からの近赤外線放射の時間変動モデル」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 29) 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 小坂文, 川勝望, 川口俊宏, 長尾透, 松岡健太, 今西昌俊, 美濃和陽典, 大井渚, 今瀬佳介, 「赤方偏移3のSDSSクェーサーで探る超巨大ブラックホール・バルジ関係の宇宙論的進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 30) 土屋聖海, 森正夫, 新田伸也「球対称定常銀河風の解析: 遷音速解の発見とその条件」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
  - 31) 中村繁幸, 森正夫「銀河風と矮小銀河の形状の関係について」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

- 32) 桐原崇直, 三木洋平, 森正夫「アンドロメダストリームとダークマターハローの構造」,  
日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

<社会・国民への発信>

1. 梅村雅之, 「宇宙に生まれる最初の星」, 全国同時七夕講演会 (2010年7月3日, 筑波大学, つくば市)
2. 川口 俊宏, 書評 (「巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて」, 丸善), 天文月報, 2011年1月号
3. 川口 俊宏, 寄稿 (「私の研究」), 青山学院大学 総合研究所 News SOKEN, 2010年10月号, Vol.10-1, p15