

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2013

課題番号：20224002

研究課題名(和文) 第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明

研究課題名(英文) Probing the Dark Age: From First Generation Objects to Primordial Galaxies

研究代表者

梅村 雅之 (UMEMURA, Masayuki)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：70183754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 73,100,000円、(間接経費) 21,930,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙シミュレータFIRSTを用い、宇宙第一世代天体形成から原始銀河形成に至る宇宙暗黒時代の宇宙史の研究を推進し、1) 第一世代天体形成と連続的星形成、2) 原始銀河形成と紫外線輻射輸送計算、3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築、4) 紫外線輻射場内の球状星団形成、5) 原始銀河における巨大ブラックホールの合体成長の研究について重要な進展があった。さらに、6次元無衝突ボルツマン方程式(ブラソフ方程式)を直接解く方法を世界に先駆けて開発した。また、理論的研究成果の知見に基づき、原始銀河の観測について、多くの共同研究を行い、当該分野の重要な進展につながった。

研究成果の概要(英文)：We have explored the history of the dark age in the universe from first objects to primordial galaxies by using the Cosmo Simulator FIRST, and then obtained significant results on 1) Formation of first-generation objects and successive star formation, 2) Formation of primordial galaxies and radiative transfer of UV radiation, 3) Cosmological modeling of Lyman alpha emitters, 4) Formation of globular clusters within UV radiation, 5) Merger of massive black holes in primordial galaxies. Besides, a novel method for direct integration of the collisionless Boltzmann equation in Six-dimensional phase space has been developed. In addition, based on the theoretical outcomes, a lot of collaborations on the observations of primeval galaxies have been made, resulting in significant progresses in the study of primordial galaxies.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：宇宙物理 第一世代天体 銀河形成 宇宙暗黒時代 専用並列計算機

1. 研究開始当初の背景

近年、遠方銀河の観測は、宇宙暗黒時代の終わりである宇宙再電離期に迫ろうとしており、またこれまでの理論的取り組みにより宇宙第一世代天体形成の物理について多くの理解が得られてきている。しかしながら、第一世代天体形成の後、どのような進化を経て原始銀河が誕生し、宇宙が再電離されるに至ったかという宇宙暗黒時代の宇宙史の多くはまだ謎に包まれたままである。

2. 研究の目的

本計画は、特別推進研究(H14-H19)により開発・製作した融合型並列計算機“宇宙シミュレータ FIRST”を用い、大規模輻射流体力学計算および高精度 N 体計算によって、第一世代天体形成に引き続いて起こる原始銀河形成までの物理過程を明らかにし、いまだ解明されていない宇宙暗黒時代の宇宙史の物理を探究することを目的とする。

3. 研究の方法

宇宙シミュレータ FIRST を用い、流体計算と輻射輸送計算を結合した輻射流体力学計算によって、宇宙第一世代天体形成に引き続いて起こる原始銀河形成をシミュレーションする。また、FIRST に搭載された重力計算加速装置 Blade-GRAPE の高精度計算機能を利用し、高精度 N 体計算によって、原始銀河における巨大ブラックホールの合体過程を調べる。

4. 研究成果

本研究課題によって、以下の 5 つの課題で重要な進展があった。1) 第一世代天体形成と連続的星形成、2) 原始銀河形成と紫外線輻射輸送計算、3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築、4) 紫外線輻射場内の球状星団形成、5) 原始銀河における巨大ブラックホールの合体成長。以下に概要を示す。

1) 第一世代天体形成と連続的星形成

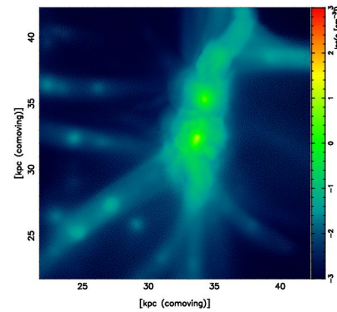
宇宙で最初に生まれた天体(第一世代天体)は、従来の計算では $\approx 10^6 M_{\odot}$ のダークマターハローに $\approx 10^5 M_{\odot}$ 程度のバリオンガスが蓄積されて形成されるとされてきた。しかしながら、従来の研究では、ダークマターの小スケールでの振る舞い、特にダークマター・カスプの成長についてはあまり注目されてこなかった。そこで、我々は計算領域の全体を可能な限り高解像度にした数値計算で、ダークマター・カスプの成長を分解できるようにし、第一世代天体の形成と進化を調べた。この計算では、ダークマターと流体粒子をそれぞれ約 1 億体(512^3 体)使い、計算領域の全体にわたってバリオンとダークマター質量解像度としてそれぞれ $0.046 M_{\odot}$ と $0.22 M_{\odot}$ を実現した(右図)。その結果、第一世代天体の質量は従来の計算で求められていた質量より 2 桁近く小さくなる($\approx 10^3 M_{\odot}$ 程度)ことがわかった。この結果の一部は、既に特

別推進研究で得られていたものであるが、その後の解析で、ダークマター・カスプの重力ポテンシャルが、ビリアル温度を上昇させ、その結果水素分子冷却の熱的不安定を引き起こすことで小質量の天体形成が可能になることを明らかにした(Umemura et al. 2012)。

また、第一世代星は強い紫外線を放射するため、第一世代星近傍のガスは光電離や水素分子の光解離などの紫外線フィードバックがかかる。この効果を調べるために、紫外線輻射輸送と流体計算を結合した輻射流体シミュレーションを行った結果、電離波面後方に水素分子のシェルが形成され、そのシェルが解離光子を遮蔽することで連続的星形成が可能になる事を見いだした。さらに星質量依存性について調べ、星質量が 25-40 太陽質量以下では、電離光子が解離光子による星形成阻害を緩和できない事を明らかにした(Hasegawa et al. 2009)。

また、電離波面の伝播によって、ガス雲がはぎ取られると、第二世代の星質量は $20 M_{\odot}$ 近くまで減少することを見出した(Susa et al. 2009)。

さらに、これまでの粒子法流体力学(SPH)をベースにした輻射流体力学コードをツリー構造で加速することに成功し、新たな輻射流体コード START を開発した(Hasegawa et al. 2010)。このコードによって、これまで正確に扱えなかった散乱光子を近似なく扱えるようになった。

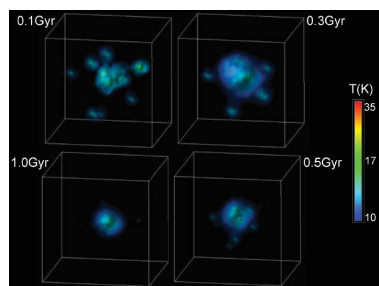


2) 原始銀河形成と紫外線輻射輸送計算

ライマン・アルファ輝線天体やライマンブレイク銀河はその宇宙再電離源の有力な候補である。我々はこれまで行った高精度流体計算による原始銀河のシミュレーション結果に対し、ダストの効果を入れた 3 次元輻射輸送計算を行うことによりこれらの高赤方偏移天体の光学的特性について調べ、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を計算した。さらに、この結果と観測により得られている星形成密度を用いて、ライマンアルファ輝線天体やライマンブレイク銀河の宇宙再電離への寄与を見積もった。結果として、ライマンブレイク銀河は $z=3-6$ において主要な電離源であることがわかった。また、現在までに観測されているライマン・アルファ輝線天体やライマンブレイク銀河のみでは $z>6$ において銀河間ガスを電離することが困難であることが分かった(Yajima et al. 2009)。

さらに、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

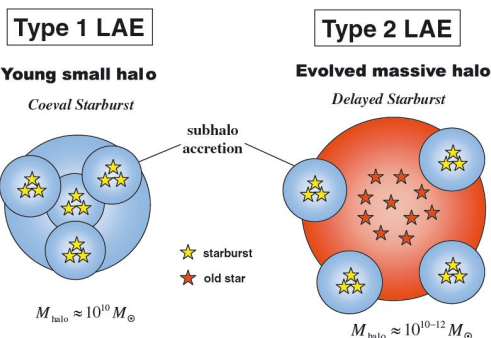
次元輻射
輸送計算
を行い、
ダスト温
度の正確
な決定と
サブミリ
波放射強
度計算を
行った。



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。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(上図, Yajima et al. 2012)。

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種類のものが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) 紫外線輻射場内の球状星団形成

球状星団は低質量星の非常に高密度な天体として知られているが、その形成過程は未解明である。また、多くの球状星団は宇宙再電離期以降に形成された事が示唆されている。これまでの研究では、球状星団程度の低質量天体では紫外線による電離と光加熱により、その形成が常に阻害されると考えられてきた。しかし、我々は背景紫外線の輻射輸送と流体を組み合わせた計算により、ガス雲の落下速度が電離ガスの音速を超えている場合には、ガス雲は収縮を続け、最終的には紫外線に対して光学的に厚くなることにより星団形成が起こることを明らかにした。この場合、ガスが中心付近まで収縮した後に星が形成されるため、高密度な星団が形成される。さらに、形成された天体と観測される球状星団との直接比較を行うため、上記の過程で形成された天体の力学進化をN体計算した。シミュレーションの結果、得られたコア半径、表面輝度、速度分散、明るさは観測される球状星団の特徴をよく再現できる事がわかった(Hasegawa et al. 2009)。

5) 原始銀河における巨大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(MBH)が一つ存在する。銀河はより小さな銀河の合体によって形成されるため、合体後の銀河には複数のMBHが存在することになるが、これは観測と合致しない。我々は、1つの銀河の中に取り込まれた複数のMBHがどのように進化するかを、一般相対論効果を入れた高精度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にした(Tanikawa & Umemura 2011, 2014)。

この他に、6次元無衝突ボルツマン方程式(ブラソフ方程式)を直接解く方法を世界に先駆けて開発し、宇宙初期のニュートリノ密度揺らぎの無衝突減衰を定量的に示した(Yoshikawa et al. 2013)。また、上記の理論的研究成果の知見に基づき、ライマンアルファ輝線天体やライマンブレイク銀河などの原始銀河の観測について、多くの共同研究を行い、当該分野の重要な進展につながった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計53件)

論文アクセス用URL

http://ads.nao.ac.jp/default_service.html

- 1) Merger criteria of multiple massive black holes and the impact on the host galaxy, Tanikawa, A., Umemura, M., MNRAS, 440, 652-662 (2014) 査読有
- 2) What is the Physical Origin of Strong

- $\text{Ly}\alpha$ Emission? I. Demographics of $\text{Ly}\alpha$ Emitter Structures, Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Yuma, S., Hashimoto, T., Shimasaku, K., Mori, M., Umemura, M., ApJ, 785, 64 (12pp) (2014) 査読有
- 3) First Systematic Search for Oxygen-line Blobs at High Redshift: Uncovering AGN Feedback and Star Formation Quenching, Yuma, S., Ouchi, M., Drake, A. B., Simpson, C., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., Momose, R., Akiyama, M., Mori, M., Umemura, M., ApJ, 779, 53 (12pp) (2013) 査読有
 - 4) Ultra Fast Outflows: Galaxy-Scale Active Galactic Nucleus Feedback, Wagner, A. Y., Umemura, M., Bicknell, G. V., ApJ, 763, L18 (5pp) (2013) 査読有
 - 5) Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation in Six-dimensional Phase Space: Self-gravitating Systems, Yoshikawa, K., Yoshida, N., Umemura, M., ApJ, 762, 116 (18pp) (2013) 査読有
 - 6) Formation and radiative feedback of first objects and first galaxies, Umemura, M., Susa, H., Hasegawa, K., Suwa, T., Semelin, B., PTEP, 2012, 01A306 (23pp) (2012) 査読有
 - 7) Driving Outflows with Relativistic Jets and the Dependence of Active Galactic Nucleus Feedback Efficiency on Interstellar Medium Inhomogeneity, Wagner, A.Y., Bicknell, G. V., Umemura, M., ApJ, 757, 136-169 (2012) 査読有
 - 8) Diffuse $\text{Ly}\alpha$ haloes around $\text{Ly}\alpha$ emitters at $z=3$: do dark matter distributions determine the $\text{Ly}\alpha$ spatial extents?, Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Umemura, M., Mori, M., MNRAS 425, 878-883 (2012) 査読有
 - 9) Profiles of Lyman α Emission Lines, Yamada, T., Matsuda, Y., Kousai, K., Hayashino, T., Morimoto, N., Umemura, M., AJ, 751, 29-41 (2012) 査読有
 - 10) Panoramic Survey of $\text{Ly}\alpha$ Emitters at $z = 3.1$, Yamada, T., Nakamura, Y., Matsuda, Y., Hayashino, T., Yamauchi, R., Morimoto, N., Kousai, K., Umemura, M., AJ, 143, 79-92 (2012) 査読有
 - 11) Sub-millimetre brightness of early star-forming galaxies, Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., MNRAS, 420, 3381-3388 (2012) 査読有
 - 12) ARGOT: Accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, Okamoto, T., Yoshikawa, K., Umemura, M., MNRAS, 419, 2855-2866 (2012) 査読有
 - 13) Successive merger of multiple massive black holes in a primordial galaxy and its effect on the galactic structure, Tanikawa, A., Umemura, M., American Institute of Physics Conference Series, 1480, 430-432 (2012) 査読無
 - 14) Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, Tanikawa, A., Umemura, M., ApJ, 728, L31-L35 (2011) 査読有
 - 15) The Subaru $\text{Ly}\alpha$ blob survey: a sample of 100-kpc $\text{Ly}\alpha$ blobs at $z = 3$, Matsuda, Y., Umemura, M., Mori, M., 他11名, MNRAS, 410, L13-L17 (2011) 査読有
 - 16) START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, Hasegawa, K., Umemura, M., MNRAS, 407, 2632-2644 (2010) 査読有
 - 17) Two types of Lyman-alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, Shimizu, I., Umemura, M., MNRAS, 406, 913-921 (2010) 査読有
 - 18) Hydrodynamic Simulations of Merging Galaxy Clusters: Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure, Akahori, T., Yoshikawa, K., PASJ, 62, 335-345, (2010) 査読有
 - 19) Ultraviolet and Infrared Radiation from Protogalaxies, Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., American Institute of Physics Conference Series, , 1294, 295-296 (2010) 査読無
 - 20) The Impact of Ultraviolet Radiation on Secondary Pop III Star Formation, Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., American Institute of Physics Conference Series, 1294, 262-263 (2010) 査読無
 - 21) Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, Tanikawa, A., Umemura, M., American Institute of Physics Conference Series, 1294, 242-245 (2010) 査読無
 - 22) First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, Umemura, M., American Institute of Physics Conference Series, 1279, 97-102

- (2010) 査読無
- 23) Metal enrichment in supernova-dominated high-z galaxies, Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., American Institute of Physics Conference Series, 1279, 52-59 (2010) 査読無
- 24) A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., American Institute of Physics Conference Series, 1269, 430-432 (2010) 査読無
- 25) Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient, Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., AIP Conference Proceedings, 1269, 400-402, 2010 査読無
- 26) The Core-Cusp Problem in CDM Halos and Supernova Feedback, Ogiya, G., Mori, M. American Institute of Physics Conference Series, 1269, 421-423 (2010) 査読無
- 27) Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., American Institute of Physics Conference Series, 1238, 107-110 (2010) 査読無
- 28) The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., American Institute of Physics Conference Series, 1238, 101-106 (2010) 査読無
- 29) Orientation Effects on the Inner Region of Dusty Torus of Active Galactic Nuclei, Kawaguchi, T. and Mori, M., ApJ, 724, L183-L187 (2010) 査読有
- 30) Generation of Seed Magnetic Field Around First Stars: Effects of Radiation Force, Ando, M., Doi, K., Susa, H. ApJ, 716, 1566-1572 (2010) 査読有
- 31) The properties of satellite galaxies in simulations of galaxy formation, Okamoto, T., Frenk, C. S., Jenkins, A., Theuns, T., MNRAS, 406, 208, 208-222 (2010) 査読有
- 32) The angular momentum of cold dark matter haloes with and without baryons, Bett, P., Eke, V., Frenk, C. S., Jenkins, A., Okamoto, T., MNRAS, 404, 1137 (2010) 査読有
- 33) Cosmological Radiative Transfer Comparison Project II: The Radiation-Hydrodynamic Tests, Iliev, I., Susa, H., Umemura, M., 他11名, MNRAS, 400, 1283-1316 (2009) 査読有
- 34) The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies, Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., MNRAS, 398, 715-721 (2009) 査読有
- 35) Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, Susa, H., Umemura, M., Hasegawa, K., ApJ, 702, 480-488 (2009) 査読有
- 36) Radiative regulation of Population III star formation, Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., MNRAS, 395, 1280-1286 (2009) 査読有
- 37) Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, Hasegawa, K., Umemura, M., Kitayama, T., MNRAS, 397, 1338-1347 (2009) 査読有
- 38) Global Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations of Black-Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three States, Ohsuga, K., Mineshige, S., Mori, M., Kato, Y., PASJ, 61, L7-L11 (2009) 査読有
- 39) The origin of failed subhaloes and the common mass scale of the Milky Way satellite galaxies, Okamoto, T., Frenk, C. S., MNRAS, 399, L174-L178 (2009) 査読有
- 40) Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: II. Shock-Induced Starburst at a Collision Interface during the First Encounter of Interacting Galaxies, Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., PASJ, 61, 481-486 (2009) 査読有
- 41) Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator FIRST, Umemura, M., Association of Asia Pacific Physical Societies, Research Activities on Astronomy and Astrophysics in Japan, 19, 36-42 (2009) 査読有
- 42) The impact of a supernova explosion in a very massive binary, Sato, J., Umemura, M., Sawada, K., MNRAS, 387, 1517-1524 (2008) 査読有
- 43) Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Linked Region of Abell 399 and Abell 401, Akahori, T., Yoshikawa, K., PASJ, 60, L19-L22 (2008) 査読有
- 44) Regulated star formation in forming disk galaxies exposed to the ultraviolet radiation background, Susa, H., ApJ, 684, 226-235 (2008) 査読有

読有

- 45) Evolution of Lyman- α Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, Mori, M., Umemura, M., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 288 (2008) 査読無
- 46) Large Scale Structure of Lyman-Alpha Absorbers in the SSA22 Region at $z=3.1$, Nakamura, Y., Hayashino, T., Yamada, T., Matsuda, Y., Yamauchi, R., Kousai, K., Morimoto, N., Umemura, M., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 135 (2008) 査読無
- 47) Novel Picture for Lyman-Alpha Emitters, Shimizu, I., Umemura, M., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 129 (2008) 査読無
- 48) Escape Fraction of Ionizing Photons from High- z Proto-Galaxy, Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 70 (2008) 査読無
- 49) Radiative Transfer SPH Simulations of UV Feedback on Pop III Star Formation, Sato, D., Umemura, M., Susa, H., Suwa, T., First Stars III, 990, 393-394 (2008) 査読無
- 50) Suwa, T., Umemura, M., Sato, D., Susa, H., High Resolution P³M-GRABE-SPH Simulations of PopIII Star Formation, First Stars III, 990, 390-392 (2008) 査読無
- 51) FIRST Project: Formation and Feedback of the First Stars, Umemura, M., Susa, H., Suwa, T., Sato, D., First Stars III, 990, 386-389 (2008) 査読無
- 52) Beyond the Unified Theory: Evolution of Active Galactic Nuclei Driven by Starburst Events, Watabe, Y., Umemura, M., Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies, 384 (2008) 査読無
- 53) Coevolution and Downsizing of Supermassive Black Holes and Galactic Bulges, Umemura, M., Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies, 283-289 (2008) 査読無

〔学会発表〕(計 114 件)

梅村雅之, ダークマター宇宙における超巨大ブラックホールの階層的成長過程, 日本天文学会春季年会, 2013 年 3 月 23

日, 埼玉大学, さいたま市

〔図書〕(計 5 件)

「宇宙流体力学の基礎」, シリーズ<宇宙物理学の基礎> 1, 日本評論社 (2014) [共著], 福江純, 和田桂一, 梅村雅之, 357 ページ

岩波講座 計算科学 第2巻「計算と宇宙」, 岩波書店 (2012), 宇川彰, 青木慎也, 初田哲男, 柴田大, 梅村雅之, 西村淳, 250 ページ (161 ページ - 203 ページ)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/PoM/pom.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅村 雅之 (UMEMURA, Masayuki)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 70183754

(2) 研究分担者

吉川 耕司 (YOSHIKAWA, Koji)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号: 70451672

(3) 連携研究者

須佐 元 (SUSA, Hajime)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号: 00323262

森 正夫 (MORI, Masao)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 10338585