

## 平成25年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成25年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成25年4月26日現在

|                           |   |                         |                      |
|---------------------------|---|-------------------------|----------------------|
| <b>研究代表者<br/>氏名</b>       | 梅村 雅之   | <b>所属研究機関・<br/>部局・職</b> | 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授 |
| <b>研究課題名</b>              | 融合型並列計算機による宇宙第一世代天体の起源の解明   |                         |                      |
| <b>課題番号</b>               | 16002003  |                         |                      |
| <b>研究組織<br/>(研究期間終了時)</b> | 研究代表者 梅村 雅之（筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授）<br><br>研究分担者 中本 泰史（東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授）<br>朴 泰祐（筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授）<br>高橋 大介（筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授）<br>須佐 元（甲南大学・理工学部・准教授）<br>森 正夫（専修大学・法学部・准教授） |                         |                      |

### 【補助金交付額】

| 年度     | 直接経費       |
|--------|------------|
| 平成16年度 | 22,000 千円  |
| 平成17年度 | 158,300 千円 |
| 平成18年度 | 140,876 千円 |
| 平成19年度 | 8,300 千円   |
| 総計     | 329,476 千円 |

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

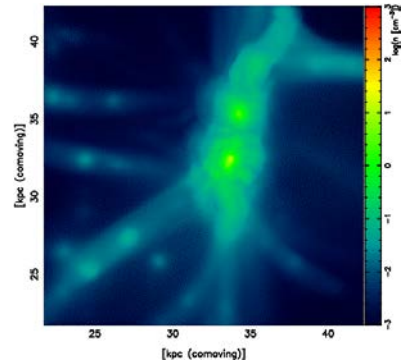
特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

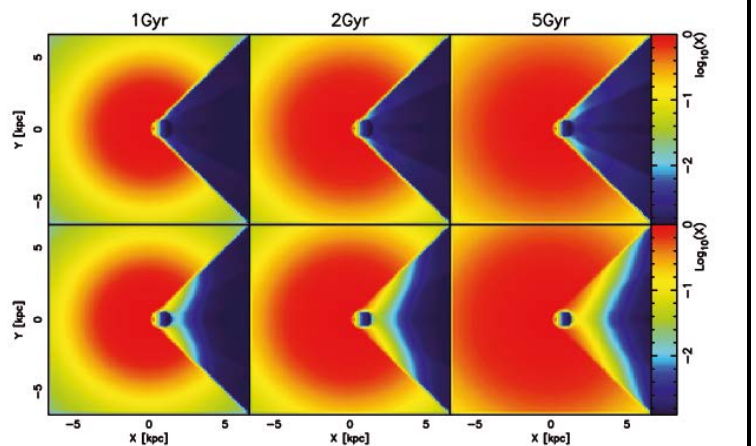
(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

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)。



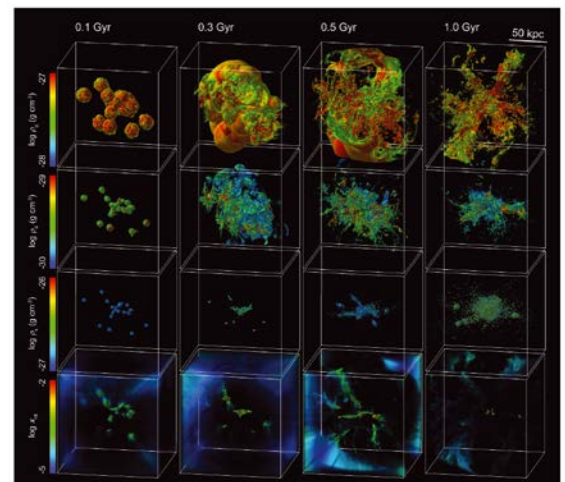
第一世代星は強い紫外線を放射するため、第一世代星近傍のガスは光電離や水素分子の光解離などの紫外線フィードバックがかかる。この効果を調べるために、紫外線輻射輸送と流体計算を結合した 3 次元輻射流体シミュレーションを行った結果、電離波面後方に水素分子のシェルが形成され、そのシェルが解離光子を遮蔽することで連続的星形成が可能になる事を見いだした。さらに星質量依存性について調べ、星質量が 25-40 太陽質量以下では、電離光子による星形成阻害を緩和できない事を明らかにした (Hasegawa et al. 2009)。また、電離波面の伝播によって、ガス雲がはぎ取られると、第二世代の星質量は  $20 M_{\odot}$  近くまで減少することを発見した (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。上図は、ガス雲周辺の電離構造。上段がこれまでの近似的な方法、下段が START で散乱光子を正確に解いた結果である。

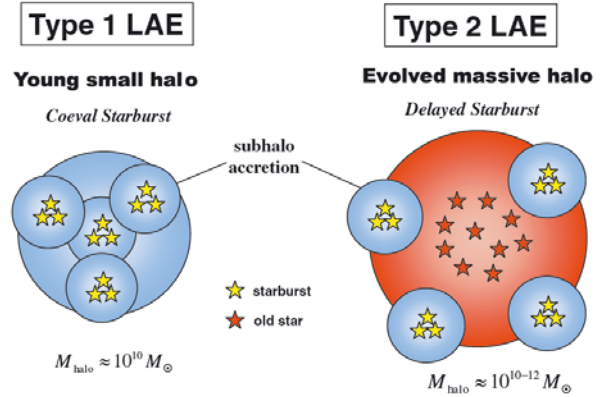
2) 原始銀河形成と紫外線輻射輸送計算

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+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)。



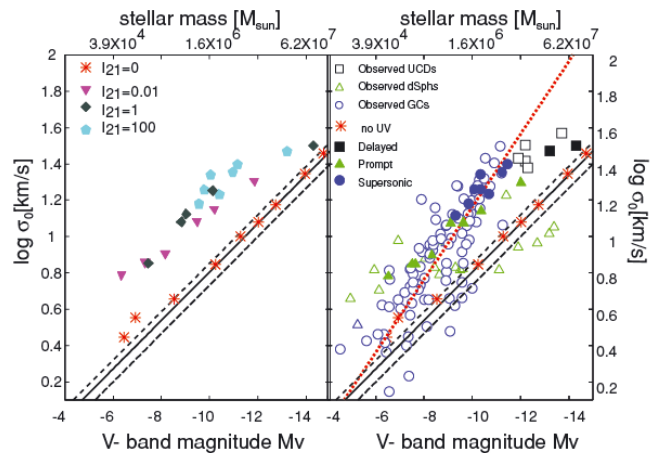
### 3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築

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)。



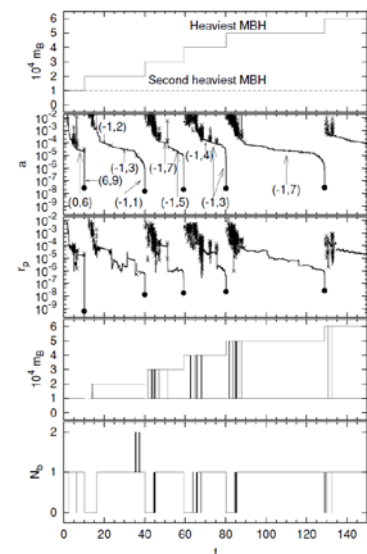
### 4) 紫外線輻射場内の球状星団形成

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。このようなメカニズムで星団形成が起こった場合、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 (上図, 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、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 (右図, Tanikawa & Umemura 2011)。



### 6) 遠方宇宙の観測的研究との共同研究

特別推進の研究成果として、さらに特筆すべき点として、この課題研究で行った初代銀河形成と宇宙再電離の研究が、観測との重要な共同研究に発展したことが挙げられる。下記、2(2)で示すように、観測との共同研究論文は、引用回数も多く、世界的に高い評価を受けた研究成果となった。これらは、遠方宇宙のライマン  $\alpha$  輝線天体の観測によって、銀河の初期進化ならびに WMAP と独立な宇宙再電離過程についての制限を求めたものである。この共同研究は、特別推進の期間終了後も継続されており、観測と理論の協働による重要な成果となっている。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

<論文発表>

- 1) Wagner, A. Y., Umemura, M., Bicknell, G. V., Ultrafast Outflows: Galaxy-scale Active Galactic Nucleus Feedback, *The Astronomical Journal Letters*, 763, L18 (2013)
- 2) Yoshikawa, K., Yoshida, N., Umemura, M., Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation in Six-dimensional Phase Space: Self-gravitating Systems, *The Astrophysical Journal*, 762, 116 (2013)
- 3) Umemura, M., Susa, H., Hasegawa, K., Suwa, T., Semelin, B., Formation and Radiative Feedback of First Objects and First Galaxies, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 01A306 (23pp) (2012)
- 4) Wagner, A. Y., Bicknell, G. V., Umemura, M., Driving Outflows with Relativistic Jets and the Dependence of Active Galactic Nucleus Feedback Efficiency on Interstellar Medium Inhomogeneity, *The Astronomical Journal*, 757, 136 (2012)
- 5) Okamoto, T., Yoshikawa, K., and Umemura, M., ARGOT: accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 2855-2866 (2012)
- 6) Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Umemura, M., Mori, M., Diffuse Ly $\alpha$  haloes around Ly $\alpha$  emitters at  $z=3$ : do dark matter distributions determine the Ly $\alpha$  spatial extents?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425, 878-883 (2012)
- 7) Yamada, T., Matsuda, Y., Kousai, K., Hayashino, T., Morimoto, N., Umemura, M., Profiles of Lyman  $\alpha$  Emission Lines, *The Astronomical Journal*, 751, 29-41 (2012)
- 8) Yamada, T., Nakamura, Y., Matsuda, Y., Hayashino, T., Yamauchi, R., Morimoto, N., Kousai, K., Umemura, M., Panoramic Survey of Ly $\alpha$  Emitters at  $z = 3.1$ , *The Astronomical Journal*, 143, 79-92 (2012)
- 9) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Sub-millimetre brightness of early star-forming galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420, 3381-3388 (2012)
- 10) Tanikawa, A., Umemura, M., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings*, 1480, 430-432 (2012)
- 11) Tanikawa, A., Umemura, M., Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *Astrophysical Journal*, 728, L31-L35 (2011)
- 12) 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., The Subaru Ly $\alpha$  blob survey: a sample of 100-kpc Ly $\alpha$  blobs at  $z = 3$ , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 410, L13-L17 (2011)
- 13) Hasegawa, K., Umemura, M., START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 2632-2644 (2010)
- 14) Shimizu, I., Umemura, M., Two types of Lyman-alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 913-921 (2010)
- 15) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Ultraviolet and Infrared Radiation from Protogalaxies, *American Institute of Physics Conference Series*, 1294, 295-296 (2010)
- 16) Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., The Impact of Ultraviolet Radiation on Secondary Pop III Star Formation, *American Institute of Physics Conference Series*, 1294, 262-263 (2010)
- 17) Tanikawa, A., Umemura, M., Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *American Institute of Physics Conference Series*, 1294, 242-245 (2010)
- 18) Umemura, M., First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, *American Institute of Physics Conference Series*, 1279, 97-102 (2010)
- 19) Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., Metal enrichment in supernova-dominated high- $z$  galaxies, *American Institute of Physics Conference Series*, 1279, 52-59 (2010)
- 20) 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)
- 21) Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, *American Institute of Physics Conference Series*, 1238, 107-110 (2010)
- 22) Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *American Institute of Physics Conference Series*, 1238, 101-106 (2010)
- 23) Iliev, I., Susa, H., Umemura, M., 他11名, Cosmological Radiative Transfer Comparison Project II: The

- Radiation-Hydrodynamic Tests, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 400, 1283-1316 (2009)
- 24) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 398, 715-721 (2009)
  - 25) Susa, H., Umemura, M., Hasegawa, K., Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, The Astrophysical Journal, 702, 480-488 (2009)
  - 26) Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., Radiative regulation of Population III star formation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 395, 1280-1286 (2009)
  - 27) Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, Hasegawa, K., Umemura, M., Kitayama, T., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 397, 1338-1347 (2009)
  - 28) Umemura, M., Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator FIRST, Association of Asia Pacific Physical Societies, Research Activities on Astronomy and Astrophysics in Japan, 19, 36-42 (2009)
  - 29) Sato, J., Umemura, M., Sawada, K., The impact of a supernova explosion in a very massive binary, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 387, 1517-1524 (2008)
  - 30) Evolution of Lyman- $\alpha$  Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, Mori, M., Umemura, M., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 288 (2008)
  - 31) Nakamura, Y., Hayashino, T., Yamada, T., Matsuda, Y., Yamauchi, R., Kousai, K., Morimoto, N., Umemura, M., Large Scale Structure of Lyman-Alpha Absorbers in the SSA22 Region at  $z=3.1$ , Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 135 (2008)
  - 32) Shimizu, I., Umemura, M., Novel Picture for Lyman-Alpha Emitters, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 129 (2008)
  - 33) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., Escape Fraction of Ionizing Photons from High- $z$  Proto-Galaxy, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 70 (2008)
  - 34) 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)
  - 35) Suwa, T., Umemura, M., Sato, D., Susa, H., High Resolution P<sup>3</sup>M-GRAPe-SPH Simulations of PopIII Star Formation, First Stars III, 990, 390-392 (2008)
  - 36) Umemura, M., Susa, H., Suwa, T., Sato, D., FIRST Project: Formation and Feedback of the First Stars, First Stars III, 990, 386-389 (2008)
  - 37) Umemura, M., Coevolution and Downsizing of Supermassive Black Holes and Galactic Bulges, Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies, 283-289 (2008)
  - 38) Watabe, Y., Umemura, M., Beyond the Unified Theory: Evolution of Active Galactic Nuclei Driven by Starburst Events, Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies, 384 (2008)

<国際会議発表>

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., Theoretical study of dust emission from high- $z$  starforming galaxies, Infrared Emission, ISM and Star Formation, (February 22-24, 2010, Heidelberg, Germany)
- 4) Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., The Impacts of Ultraviolet Radiation on Secondary Population III Star Formation, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
- 5) Tanikawa A., Umemura, M., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
- 6) Mori, M., Umemura, M., Evolution of Lyman-alpha Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, OPEN PROBLEMS IN GALAXY FORMATION, (May 12-15, 2009, Potsdam, Germany)
- 7) Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., Formation and Evolution of Lyman-alpha Emitters, The Lyman alpha universe, (July 6-10, 2009, Paris, French)
- 8) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., The escape of ionizing photons from high- $z$  Lyman alpha emitters, The Lyman alpha universe, (July 6-10, 2009, Paris, French)
- 9) Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)
- 10) Hasegawa K., Umemura, M., Suwa T., Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)



- 11) Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, (March 8-10, 2009, Osaka, Japan)
- 12) Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., First Star Simulations down to CDM Damping Scales IAU Symposium 255: Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies (June 16-20, 2008, Rapallo, Genova - Liguria, Italy)
- 13) Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., Secondary star formation in a Pop III object: Dependence of UV feedback on the mass of source star IAU Symposium 255: Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies (June 16-20, 2008, Rapallo, Genova - Liguria, Italy)
- 14) Sese, R. M., Nakamoto, T., Umemura, M., Radiative Transfer in Massive Circumstellar Disks, The East Asian Young Astronomers Meeting 2008 (EAYAM2008) (July 27-Aug. 1, 2008, Jiayuguan, China)
- 15) Umemura, M., Computational Astrophysics with a Novel Hybrid Simulator "FIRST" (Invited) International Workshop on Hybrid Architecture Computing 2008 (Oct 1, 2008, Tsukuba, Japan)
- 16) Shimizu, I., Umemura, M., Theoretical Model of Lyman alpha Emitters and the Relation to Multi-Wavelength Observations Understanding Lyman-alpha Emitters (Oct. 6-10, 2008, MPIA, Heidelberg, Germany)
- 17) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., Escape fraction of ionizing photons from high-z Lyman alpha emitters and Lyman break galaxies Understanding Lyman-alpha Emitters (Oct. 6-10, 2008, MPIA, Heidelberg, Germany)
- 18) Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., Secondary star formation in a PopIII object: Dependence of UV feedback on the mass of source star, The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
- 19) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., Escape fraction of ionizing photons from a LAE and LBG, The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
- 20) Umemura, M., Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator "FIRST" (Invited), Special Astronomy Colloquium, The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
- 21) Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., Application of 3D-RSPH Scheme to the Radiative Feedback by Population III Stars, The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
- 22) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., 3D RT Calculation on the Escape of Ionizing Photons from Forming Galaxies, The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
- 23) Sato, D., Umemura, M., Chiba, M., The Effect of Partial Redistribution on Lyman alpha Photons Escaping from a Primordial Galaxy The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
- 24) Akizuki, C., Umemura, M., Kato, Y., Three-Dimensional Radiation Transfer Calculation for Magnetic Jets, The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
- 25) Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., "The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps" Astrophysics Colloquium, Univ. of Texas, Austin (Dec. 11, 2008, Austin, USA)
- 26) Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., Radiative Regulation of Population III Star Formation, Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
- 27) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., The Contribution of Lyman alpha Emitters and Lyman Break Galaxies to the IGM Ionization at High Redshifts, Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
- 28) Shimizu, I., Umemura, M., Theoretical Model of Lyman Alpha Emitters and the Relation to Multi-Wavelength Observations, Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
- 29) Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
- 30) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., The Contribution of Lyman alpha Emitters and Lyman Break Galaxies to the IGM Ionization at High Redshifts, The Cosmic Evolution of Helium and Hydrogen (March 24-27, 2009, Ringberg Castle, Germany)

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

## (3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

## ◆ 基盤研究（S），平成20年度～24年度，研究代表者

「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」

|               |             |
|---------------|-------------|
| H20年度(2008年度) | 10,900,000円 |
| H21年度(2009年度) | 27,000,000円 |
| H22年度(2010年度) | 11,200,000円 |
| H23年度(2011年度) | 12,400,000円 |
| H24年度(2012年度) | 14,400,000円 |
| 合計            | 75,900,000円 |

この基盤（S）によって、特別推進で開発した**宇宙シミュレータ FIRST**（右写真）を運用。



宇宙シミュレータ FIRST（上）と、その中に組み込まれている Blade-GRAPE（下）

## (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

## 1) 第一世代天体形成に関する新たな知見

**宇宙シミュレータ FIRST** を用いた高精度大規模シミュレーションにより、宇宙第一世代天体の起源について、いくつかの重要な知見が生み出されたが、特筆すべきは、ダークマターカスプの重力ポテンシャルの効果により、宇宙第一世代天体の質量がこれまでの理解よりも2桁近く小さくなることを示したことである。また、2次の星形成に関する3次元輻射流体計算によって、第一世代星の紫外線輻射が、その後の星形成を阻害せず、むしろ連続的星形成を誘発することができることを示した。これらは、宇宙初期の星形成率が大幅に大きくなることを意味し、その後の銀河形成史に多大な影響を与えることを意味する。

## 2) 巨大ブラックホールの起源に関する新たな知見

宇宙シミュレータ FIRST に搭載された Blade-GRAPE の高精度重力計算機能を最大限に利用し、ブラックホールと星の多体系をこれまでにない精度で解き上げることによって、原始銀河における巨大ブラックホールの合体過程の研究にブレークスルーがあった。この研究は、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、ブラックホールの連続的合体により銀河中心に巨大ブラックホールが形成されることを世界で初めて明らかにしたものであり、銀河中心の巨大ブラックホールの起源を明らかにする上で、マイルストーンとなる研究成果である。

## 3) 3次元輻射流体力学の実現

筑波大宇宙理論グループでは、1990年代後期より、宇宙論的な3次元輻射輸送の取り組みを開始し、2000年初めには、3+3次元の輻射輸送計算を実現させた。その後、3+3次元輻射輸送と3次元流体力学を結合した3次元輻射流体力学の取り組みを開始し、特別推進によって3次元輻射流体力学を世界に先駆けて実現した。この方法によって、上記の初代天体形成に対する理解が格段に深まった。さらに、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輸送部分をツリー構造によって大幅な加速を行うことに成功し、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。これにより、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り、原始銀河形成、宇宙再電離研究に革新的な進展をもたらすことが可能になった。

## 4) 融合型計算機の発展

宇宙分野における専用計算機の取り組みは、1990年代初頭より我が国の GRAPE プロジェクトの先駆的な取り組みによって発展してきたが、専用計算機と汎用計算機を完全に融合させた計算機は、特別推進で開発・製作した**宇宙シミュレータ FIRST**（上写真）がさきがけとなった。現在 GPU 演算加速器を搭載した計算機が急速に普及しているが、演算加速器を用いたオフローディングの方法は、**FIRST** の基本思想と同じくする。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

特別推進の研究業績（査読付論文数 48 編）に対する総引用数は 1506 回である。特別推進の研究のインパクトは、**第一世代天体形成に関するサイエンスのインパクト**、**輻射流体力学の推進という研究手法のインパクト**、**融合型計算機の開発という装置開発のインパクト**、**高赤方偏移宇宙天体観測への影響という観測分野へのインパクト**に集約される。

#### A) 第一世代天体形成の新たな知見によるインパクト

特別推進で行った第一世代天体の高精度大規模シミュレーションは、宇宙第一世代天体の質量がこれまでの理解よりも 2 桁近く小さくなることを示した。さらに、第一世代星の紫外線輻射が、連続的星形成を誘発することを示した。これらの研究は、それまで学界で信じられてきた第一世代天体と初代星の質量の見直しにつながった。2012 年に主催した国際会議「FIRST STARS IV」には、世界第一線の研究者が集まり、初代天体／初代星の質量が中心課題の一つになった。

#### B) 輻射流体力学の推進のインパクト

特別推進によって 3+3 次元輻射輸送と 3 次元流体力学を結合した 3 次元輻射流体力学を世界に先駆けて実現したが、宇宙論的な 3 次元輻射輸送と輻射流体力学は、国際プロジェクトに発展し、世界 10 数グループが参加する Comparison Project が行われた。このプロジェクトの成果は、次の 2 つの論文にまとめられ、輻射流体力学の世界的な発展に貢献した。

- ・ Cosmological radiative transfer codes comparison project- I. The static density field tests.  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 371, 1057-1086 (2006)
- ・ Cosmological radiative transfer comparison project - II. The radiation-hydrodynamic tests.  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 400, 1283-1316 (2009)

さらに、粒子法流体力学 (SPH 法) とツリー化された輻射輸送を組み合わせた高速輻射流体力学コード START 開発は、格子法を用いた高速輻射流体力学の実現につながり、3 次元輻射流体力学のポテンシャルが一気に高まった。

#### C) 融合型計算機の開発によるコンピュータサイエンスへのインパクト

**宇宙シミュレータ FIRST** の開発は、演算加速器をもつ融合型計算機のさきがけとなり、**FIRST** 完成後、メーカーや計算機工学の分野から招待講演の依頼があり、**FIRST** の設計思想は、コンピュータサイエンスの分野で注目を浴びた。現在、京コンピュータの次の世代のエクサスケール・コンピュータの基本設計に関する検討が進められているが、その中でも演算加速器をもつ融合型計算機の設計思想は重要事項となっている。よって、**FIRST** の開発は、コンピュータサイエンスの発展に対しても重要な影響を与えたといえる。

#### D) 観測分野に対するインパクト

特別推進の研究で行った初代天体と宇宙再電離の研究は、高赤方偏移宇宙観測にも大きな影響を与えた。原始銀河の形成過程の研究や、原始電離からの電離光子の脱出の研究は、観測分野から注目を集め、高い論文引用数となっている。また、遠方宇宙のライマン  $\alpha$  輝線天体の観測による宇宙再電離時期の制限といった観測との共同研究も進展した。



## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

## (2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

## 【研究期間中に発表した論文】

| No | 論文名   | 日本語による簡潔な内容紹介   | 引用数 |
|----|---|---|-----|
| 1  | The End of the Reionization Epoch Probed by Ly $\alpha$ Emitters at $z = 6.5$ in the Subaru Deep Field.<br>The Astrophysical Journal 648, 7-22 (2006)                                     | 高赤方偏移ライマン $\alpha$ 輝線天体の光度関数変化から宇宙再電離の終了時期に対して制限を付けた研究。 | 246 |
| 2  | The SUBARU Deep Field Project: Lyman $\alpha$ Emitters at a Redshift of 6.6.<br>Publications of the Astronomical Society of Japan 57, 165-182 (2005)                                      | すばるディープフィールドにおける赤方偏移6.6のライマン $\alpha$ 輝線天体の観測。          | 190 |
| 3  | The Structure and Evolution of Early Cosmological H II Regions.<br>The Astrophysical Journal 613, 631-645 (2004)  | 初代天体からの紫外線輻射による電離領域の形成についての輻射流体計算。                      | 126 |
| 4  | Cosmological radiative transfer codes comparison project- I. The static density field tests.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 371, 1057-1086 (2006)                   | 宇宙論的輻射輸送コードの世界10数グループによる比較プロジェクトに関する論文。                 | 105 |
| 5  | The Subaru Deep Field: The Optical Imaging Data.<br>Publications of the Astronomical Society of Japan 56, 1011-1023 (2004)  | すばるディープフィールドにおける光学撮像データ。                                | 103 |
| 6  | Luminosity Functions of Lyman Break Galaxies at $z \sim 4$ and $z \sim 5$ in the Subaru Deep Field.<br>The Astrophysical Journal 653, 988-1003 (2006)                                     | すばるディープフィールドにおけるライマンブレイク銀河の光度関数の研究。                     | 92  |
| 7  | Secondary Star Formation in a Population III Object.<br>The Astrophysical Journal 645, L93-L96 (2006)   | 初代天体における第2世代星形成の3次元輻射流体力学計算。                            | 74  |
| 8  | Clustering of Lyman Break Galaxies at $z = 4$ and $5$ in the Subaru Deep Field: Luminosity Dependence of the Correlation Function Slope.<br>The Astrophysical Journal 637, 631-647 (2006) | すばるディープフィールドにおけるライマンブレイク銀河の空間集中度の光度依存性に関する研究。           | 56  |
| 9  | Formation of Dwarf Galaxies during the Cosmic Reionization.<br>The Astrophysical Journal 600, 1-16 (2004)   | 宇宙再電離期の矮小銀河形成に関する3次元輻射流体計算。                             | 55  |
| 10 | The evolution of galaxies from primeval irregulars to present-day ellipticals.<br>Nature 440, 644-647 (2006)  | 原始銀河形成とその力学進化に関する高精度流体力学計算。                             | 47  |

| <b>【研究期間終了後に発表した論文】</b> |  |   |     |
|-------------------------|--|---|-----|
| No                      | 論文名  | 日本語による簡潔な内容紹介   | 引用数 |
| 1                       | Cosmological radiative transfer comparison project - II. The radiation-hydrodynamic tests.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 400, 1283-1316 (2009)  | 宇宙論的輻射流体力学コードの世界 10 数グループによる比較プロジェクトに関する論文。             | 34  |
| 2                       | The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 398, 715-721 (2009)  | 原始銀河からの紫外線電離光子脱出に関する 3+3 次元輻射輸送計算。                      | 30  |
| 3                       | The Subaru Ly $\alpha$ blob survey: a sample of 100-kpc Ly $\alpha$ blobs at $z=3$ .<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 410, L13-L17 (2011)  | 赤方偏移 3 におけるすばるライマン $\alpha$ ブロップの広領域探査観測。               | 23  |
| 4                       | Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars.<br>The Astrophysical Journal 702, 480-488 (2009)  | 初代天体における第 2 世代星形成条件と質量に関する 3 次元輻射流体力学計算。                | 10  |
| 5                       | Radiative regulation of Population III star formation.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 395, 1280-1286 (2009)  | 初代星からの紫外線輻射場中の第 2 世代星形成に関する 3 次元輻射流体力学計算。               | 10  |
| 6                       | Two types of Lyman $\alpha$ emitters envisaged from hierarchical galaxy formation.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 406, 913-921 (2010)  | 階層的銀河形成に基づく 2 種類のライマン $\alpha$ 輝線天体の形成に関する研究。           | 7   |
| 7                       | Diffuse Ly $\alpha$ haloes around Ly $\alpha$ emitters at $z=3$ : do dark matter distributions determine the Ly $\alpha$ spatial extents?<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 425, 878-883 (2012) | 赤方偏移 3 のライマン $\alpha$ 輝線天体の周りの広がったライマン $\alpha$ ハローの観測。 | 7   |
| 8                       | Panoramic Survey of Ly $\alpha$ Emitters at $z = 3.1$ .<br>The Astronomical Journal 143, 79 (2012)   | 赤方偏移 3.1 のライマン $\alpha$ 輝線天体の広領域サーベイ観測。                 | 7   |
| 9                       | Driving Outflows with Relativistic Jets and the Dependence of Active Galactic Nucleus Feedback Efficiency on Interstellar Medium Inhomogeneity.<br>The Astrophysical Journal 757, 136 (2012)                       | 活動銀河中心核からのジェットが引き起こす広がったアウトフローの高精度シミュレーション。             | 6   |
| 10                      | START: smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer.<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 407, 2632-2644 (2010)  | SPH 法とツリー化された輻射輸送を組み合わせた高速輻射流体力学コード START 開発            | 6   |

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

##### 【FIRST 1号機完成記者会見】

2005年4月13日（水）15:30-17:00

筑波大学計算科学研究センター

##### <報道>

##### テレビニュース

NHK（水戸放送）ニュース（2005年4月13日夕）、NHK首都圏ニュース（2005年4月17日朝）

##### Webニュース

共同通信2005/4/13

##### 新聞

読売新聞（2005年4月14日）、朝日新聞（2005年4月15日）、東京新聞（2005年4月14日）、茨城新聞（2005年4月14日）、日刊工業新聞（2005年4月14日）、日経産業新聞（2005年4月14日）、常陽新聞（2005年4月17日）、京都新聞（2005年4月14日）

##### <TVインタビュー>

2005年5月17日（火） 18:15-18:25 NHK（水戸放送）ニュース番組インタビュー

2005年5月20日（金） 15:00-17:00 月刊アスキーインタビュー

##### <紹介記事>

科学技術広報財団「科学技術ジャーナル」（文部科学省月刊誌）

月刊アスキー2005年7月号（Check it out）

ニュートン2007年12月号（第一世代天体形成）

##### <ひらめき☆ときめきサイエンス>

「超高速コンピュータで解き明かす宇宙暗黒時代」2005年12月3日 筑波大学にて

##### 【巨大ブラックホールの合体シミュレーション】

##### <日本天文学会記者会見>

「合体で巨大化するブラックホール—高精度シミュレーションが解き明かす巨大ブラックホールの謎—」

2011年6月13日 14:00-15:00

##### 新聞

毎日新聞、日本経済新聞

##### Web ニュース

アストロアーツ

##### <TVインタビュー>

コズミック・フロント(NHK BSプレミアム) 2012年6月14日

##### 【一般講演会】

・「宇宙の旅をして宇宙の大きさを知ろう」竹園東小学校講演会

2007年1月23日、2007年12月13日、2008年12月2日、2009年11月25日、

2010年12月9日、2011年12月15日、2012年12月11日

・「宇宙の歴史を紐解く」第7回専修大学公開講演会「深宇宙の謎に迫る—原始の宇宙から現在の宇宙へ—」

2006年7月1日、専修大学、神奈川

・「宇宙の果てに挑む」第9回ALMA公開講演会「アンデスの巨大電波望遠鏡でさぐる宇宙」

2006年8月5日、日立シビックセンター、茨城、2006年8月12日、つくば文化会館アルス、茨城

・「宇宙のなりたち」茨城県高等学校文化連盟天文科学部講演会

2007年12月1日、プラトーさとみ、常陸太田市、茨城



**3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）****(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）**

筑波大学・物理学系・助手

→現在 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

立教大学・理学部・専任講師

→現在 甲南大学・理工学部・教授

筑波大学・電子・情報工学系・講師

→現在 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

→現在 国立天文台・研究員

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

→現在 プロメテック・ソフトウェア(株)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

→現在 富士通（株）次世代テクニカルコンピューティング開発本部

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

→現在 Sydney Institute for Astronomy (SIfA), Australia・研究員