

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540224

研究課題名（和文）広域および深宇宙探査による銀河形成の研究

研究課題名（英文）Studying Galaxy Formation by Deep and Wide-field Surveys

研究代表者

山田 亨 (Toru Yamada)

東北大学大学院理学研究科・教授

研究者番号：90271519

研究成果の概要（和文）：

すばる 8.2m 望遠鏡、マゼラン望遠鏡などにより自ら取得した広視野深宇宙撮像データを他波長観測データと組み合わせ、宇宙の高密度領域における銀河の形成と進化の研究を行った。まず、狭帯域データに基づき $z=3.1$ の非常に顕著な原始銀河団を明確に同定することに成功し、その有為度を定量的に議論するとともに、原始銀河団における銀河形成の解明を進めた。とくにハイライトの一つとして、複数の銀河が衝突合体して成長する大質量銀河の形成過程を観測的にとらえたことが挙げられる。また、SCDXT サーベイデータに基づき、赤方偏移 1-2 の原始銀河団／銀河団 候補 100 個以上の同定を行い、大規模構造の進化と銀河形成の関連についての研究を進めた

研究成果の概要（英文）：

Based on the deep and wide-field observational data taken by Subaru 8.2m Telescope and Magellan 6.5m telescope, combined with multi-wavelength data sets, we investigated the formation of the galaxies in dense environment in the universe. We clearly identified and evaluated the significance of the conspicuous protocluster at $z=3.1$ and studied the properties of the galaxies there. We discovered that there appears a process of multiple merging in formation of massive galaxies. We also succeeded to identify more than 100 cluster/protocluster candidates at $z=1-2$ based on the SCDXT survey data, which is utilized in studying the relationship between large-scale structure evolution and formation of massive galaxies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	2,300,000	690,000	2,990,000
平成21年度	800,000	240,000	1,040,000
平成22年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：銀河、宇宙論、銀河形成、銀河進化、すばる望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

(1) 1990年代より、ハッブルや Spitzer

などの宇宙望遠鏡、そしてすばる望遠鏡などの地上大望遠鏡の登場によって、銀河の形成

および進化についての観測的研究は非常に大きな進歩を遂げてきた。これまでの研究により、宇宙の大局的構造をふまえ、そして宇宙年齢の大半にわたっての「包括的」な、銀河形成の理解が次第に進んできたとも言えるだろう。もちろん、これには、「WMAP」衛星の成果に代表されるように、宇宙論パラメータの評価が進み、宇宙の発展・幾何学の決定精度が大きく改善されたことも、その主要因のひとつになっている。(2)これらの進展の結果、我々は、銀河の形成と進化を俯瞰する視点を得ることができており、現在の主要な課題は、観測・理論を問わず、実際に、どのようにして銀河の形成が行われてきたのかをより具体的に、詳細にわたって理解する研究を中心とする段階に進んできている。

(3)これをふまえて、申請者が特に重点的に進めることを目指したが、とくに赤方偏移 $z=1-3$ の時代における「宇宙構造の発展と銀河形成との因果関係の解明」である。

2. 研究の目的

(1)今回の研究では、まず、これまで申請者が主たる研究者となって取得したすばる望遠鏡による最も深く広視野を網羅した主に2種類のデータに基づき、高赤方偏移高密度領域の探査及びそのような領域における銀河形成現象の詳細な調査を行う。研究期間内には、大規模な広域・深探査データを効率よく解析し、視覚化できるシステムの開発、これまで得られたデータの本格的な解析、さらなる探査データ、探査に基づく詳細研究のためのデータの取得を適宜平行して行ってゆくことを目指した。

(2)申請者は、主にすばる望遠鏡を用いて非常にユニークな2種類の広域深探査観測を行って、まとまったデータの取得に成功していた。「Suprime Cam/UKIDSS-DXS 10平方

度深銀河探査」(SCDXT サーベイ)、および、「SSA22 天域における広域 $L\gamma\alpha$ 輝線銀河探査」(SSA22-NB サーベイ)のふたつである。(3) SCDXT サーベイでは、赤方偏移 $z=1$ から $z=3$ 程度の宇宙において、様々な進化段階にある銀河分布構造をしらべ、これら高赤方偏移の銀河団・原始銀河団候補を多数(100個程度)検出することを目的とする。そして、今後すばる望遠鏡を中心に、さらに多色におよぶ撮像、観測装置 MOIRCS, FMOS による近赤外線多天体分光観測によって、高密度領域の存在を確立し、そこで様々な銀河が、どのような形成・進化の段階にあるのかをより定量的かつ統計的に解明することを目指した。

(4)一方、SSA22-NB サーベイでは、現在活発に星形成を行っている高赤方偏移輝線銀河の分布構造・性質を詳細に調べる。とくに $z=3$ の星形成銀河高密度領域において多数発見されてきた、非常に若く、また、恒星の初期質量関数が太陽系近傍とは大きく異なるとされる非常に強い輝線を示す輝線銀河について、これまでの画像解析とともに Spitzer 衛星、Chandra 衛星のデータと併せて解析するとともに、今後すばる望遠鏡による詳細な分光観測を行って、その分布、活動性、星質量、など諸性質の詳細な調査を行う。

3. 研究の方法

(1)まず、SCDXT サーベイでは、すばる望遠鏡で得られている約10平方度にわたる I'-band データを、すでに公開されている Spitzer 衛星による Spitzer Wide-Area Infra-Red Extra-galaxy Survey (SWIRE) データおよび UKIRT 望遠鏡による UKIDSS Deep Extragalactic Survey (DXS) データと併せて解析する。Spitzer 望遠鏡による $3.6\mu\text{m}$ で検出された銀河について、すばる可視光および UKIDSS-DXS 近赤外線

とあわせることで、 $z=1-3$ において、この時代の最も密な銀河団および原始銀河団の候補を多色 SED 解析を援用して、より信頼度高く銀河団・原始銀河団候補を同定する。また、とくに、最も明るく発達した $z=1-3$ 銀河のまとまったサンプルも構築し、宇宙で最も大質量の銀河がどのように形成され、進化し、それが銀河分布構造とどのように関係しているのかも調べた。

(2) SSA22-NB サーベイでは、これまでに取得した広視野狭帯域撮像に基づく輝線銀河サンプルの性質を詳細に解析する。また、SSA22-NB サーベイ中の輝線銀河高密度領域においては、国際協力によって、約 $20' \times 20'$ 視野で 1.7 時間積分の非常に深い Spitzer 衛星 IRAC/MIPS データを取得した。また、現在、約 400ksec におよび非常に深い Chandra 衛星のデータ取得も進行中である。同天域はさきに SCDXT の項で述べた UKIDSS DXS や、共同研究ですばる望遠鏡で観測申請中の zR (Y) バンドや観測中の MOIRCS 近赤外探査領域にも含まれている。SSA22-NB 領域でもこれら多波長データを併せて、輝線銀河の星質量、高密度領域における発達した銀河分布、若い銀河と AGN 活動性の関係の研究を進める。

4. 研究成果

(1) まず、赤方偏移 $z=3.1$ の原始銀河団を明確に同定し、その有為度、規模を定量的に議論する解析を行った。この成果は研究論文として出版した。

(2) さらに、星形成銀河高密度領域における輝線銀河について詳細な解析を行い、Lyman Alpha Blobs と呼ばれる大きく広がった輝線天体について、その星質量、活動銀河核の活動性などの関連を幅広く調べた。これらの天体には大きな星質量の対応天体が存在し、その輝線強度が星質量に比例することを見いだしたほか、少なくとも 15% 程度の天体については活動銀河核の兆候が存在することを突き止めることができた。これらの結果も研究論文として出版した。

(3) 同領域の輝線銀河の輝線強度について詳

細に調べ、非常に輝線強度が強い天体に注目して宇宙初期の活発な星形成との関連を調べた。この領域には一般領域と比べて非常に輝線が強い銀河が数多く存在し、非常に若く活発な星形成の存在を裏付ける結果が得られた。この成果は研究論文のほか、国際研究集会での報告を行った。

(4) 強い輝線銀河の分光観測から、観測された銀河の約反芻にライマン α 輝線の分光プロフィールに、長波長側が強いダブルピークの特徴的なプロフィールが観測されること、これらはガスの流出に伴う膨張シェルによる散乱の吸収・効果が原因として考えられることを明らかにした。また、とくに輝線強度の大きい銀河に注目し、輝線銀河等価幅分布の詳しい解析を行い、非常に等価幅の大きい天体の存在を明らかにするとともに、銀河密度との相関を調べて、銀河高密度領域に特に強い輝線を示す銀河が多いことも突き止めた。これも研究論文として出版した。

(5) 近赤外線深探査からは、Ly α Blobs の対応天体として、それぞれの天体に 109-1011 太陽質量を持つ 3~7 個の恒星成分が付随し、初期銀河形成における重要な段階として理論的に予想されていたマルチプル・マーキングの段階を観測的に顕著にとらえることに成功した。この結果も研究論文として出版した。

(6) 関連する研究として、赤方偏移 $z=2.4$ の電波銀河 53W002 を含む領域での輝線銀河探査の結果を解析し、密度超過領域が存在することを確認するとともに、非常に興味深い天体 53W002 No18 が示す広がった輝線領域の詳細な構造を明らかにする研究も行った。

(7) 遠方銀河の星質量と活動銀河核の存在比の研究も進め、赤方偏移 2-4 の宇宙では、太陽の 300 億倍の質量を超える大質量銀河にのみ明るい活動銀河核現象が観測されること、大質量銀河の内、活動銀河核を持つものの割合が 4 割に昇ることを明らかにした。これも研究論文が出版された。

(8) 一方、SCDXT データに基づく広域銀河分布研究からは、古い銀河からなる赤方偏移 1-2 の密な銀河団候補の同定に成功し、これを元にする望遠鏡観測などを行うとともに、銀河団中の銀河の性質がどのように変遷していくのかを調べた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

以下、査読有り

① "Diffuse Lyman Alpha Haloes around Lyman Alpha Emitters at $z=3$: Do Dark

- Matter Distributions Determine the Lyman Alpha Spatial Extents?" Matsuda, Y., Yamada, T., 他 8 名, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 掲載決定済み
- ② "Profiles of Ly α Emission Lines of the Emitters at $z = 3.1$ " Yamada, T., Matsuda, Y., 他 4 名, 2012, The Astrophysical Journal, 751, 29-41
- ③ "Assembly of Massive Galaxies in a High- z Protocluster" Uchimoto, Y.K., Yamada, T., Kajisawa, M., 他 1 2 名, 2012, The Astrophysical Journal, 750, 116-131
- ④ "Panoramic Survey of Ly α Emitters at $z = 3.1$ " Yamada, T., Nakamura, Y. 他 6 名, 2012, The Astronomical Journal, 143, 79-92
- ⑤ "Constraining Dust and Molecular Gas Properties in Ly α Blobs at $z \sim 3$ " Yang, Y., Decarli, R., 他 1 5 名、内 1 2 番目 2012, The Astrophysical Journal, 744, 178-186
- ⑥ "An H α search for overdense regions at $z = 2.23$ " Matsuda, Y., 他 1 7 名 内 1 5 番目, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 416, 2041-2059
- ⑦ "UV-to-FIR Analysis of Spitzer/IRAC Sources in the Extended Groth Strip. II. Photometric Redshifts, Stellar Masses, and Star Formation Rates" Barro, G., Perez-Gonzalez, 他 7 名、うち 6 番目, 2011, The Astrophysical Journal Supplement Series, 193, 30-63
- ⑧ "MOIRCS Deep Survey. X. Evolution of Quiescent Galaxies as a Function of Stellar Mass at $0.5 < z < 2.5$ " Kajisawa, M., Ichikawa, T., Yoshikawa, T., Yamada, T., 他 3 名 2011, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 403-414
- ⑨ "MOIRCS Deep Survey. IX. Deep Near-Infrared Imaging Data and Source Catalog" Kajisawa, M., Ichikawa, T., Tanaka, I., Yamada, T., 他 1 3 名, 2011, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 379-401
- ⑩ "UV-to-FIR Analysis of Spitzer/IRAC Sources in the Extended Groth Strip. I. Multi-wavelength Photometry and Spectral Energy Distributions", Barro, G., Perez-Gonzalez, P.G., 他 7 名、うち 6 番目 2011, The Astrophysical Journal Supplement Series, 193, 13-36
- ⑪ "The Subaru Ly α blob survey: a sample of 100-kpc Ly α blobs at $z = 3$ " Matsuda, Y., Yamada, T., 他 1 2 名, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 410, L13-L17
- ⑫ "Submillimeter Array Identification of the Millimeter-selected Galaxy SA22-AzTEC1: A Protoquasar in a Protocluster?" Tamura, Y., Iono, D., Wilner, D.~J., Kajisawa, M., 他 1 7 名 うち 1 6 番, 2010, The Astrophysical Journal, 724, 1270-1282
- ⑬ "MOIRCS Deep Survey. VIII. Evolution of Star Formation Activity as a Function of Stellar Mass in Galaxies Since $z \sim 3$ " Kajisawa, M., Ichikawa, T., Yamada, T., 他 4 名, 2010, The Astrophysical Journal, 723, 129-145
- ⑭ "MOIRCS Deep Survey. VII: NIR Morphologies of Star-forming Galaxies at Redshift $z \sim 1$ ", Konishi, M., 他 1 3 名 うち 1 4 番目 2010, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 363-377
- ⑮ "WISH: wide-field imaging surveyor at high redshift", Yamada, T., 他 2 5 名 2010, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 773
- ⑯ "Statistics of 207 Ly α Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on Reionization and Galaxy Formation Models", Ouchi, M., and 他 1 4 名 うち 8 番目 2010, The Astrophysical Journal, 723, 869-894
- ⑰ "MOIRCS Deep Survey. VI. Near-infrared Spectroscopy of K-Selected Star-forming Galaxies at $z \sim 2$ ", Yoshikawa, T., 他 1 5 名 うち 9 番目 2010, The Astrophysical Journal, 718, 112-132
- ⑱ "A search for galaxies in and around an HI overdense region at $z = 5$ ", Matsuda, Y., 他 9 名 うち 7 番目 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 403, L54-L58
- ⑲ "Unveiling the Nature of Submillimeter Galaxy SXDF 850.6", Hatsukade, B., 他 2 4 名 うち 2 3 番目 2010, The Astrophysical Journal, 711, 974-979
- ⑳ "MOIRCS Deep Survey. V. A Universal Relation for Stellar Mass and Surface Brightness of Galaxies", Ichikawa, T., 他 6 名 うち 3 番目 2010, The Astrophysical Journal, 709, 741-748
- ㉑ "Ly α : blobs like company: the discovery of a candidate 100kpc

- Lyalpha blob near to a radio galaxy with a giant Lyalpha; halo B3J2330+3927 at $z = 3.1$ ", Matsuda, Y., 他 17 名 うち 13 番目 2009, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 400, L66-L70
- ② "A Massive Disk Galaxy at $z \approx 3$ along the Line of Sight of QSO 1508+5714", Wang, Y., Yamada, T., Tanaka, I., and Iye, M. 2009, Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 1179-1184
- ③ "MOIRCS Deep Survey. IV. Evolution of Galaxy Stellar Mass Function Back to $z \sim 3$ ", Kajisawa, M., 他 13 名 うち 5 番目 2009, The Astrophysical Journal, 702, 1393-1412
- ④ "The Chandra Deep Protocluster Survey: Lyalpha; Blobs are Powered by Heating, Not Cooling", Geach, J.~E., 他 13 名 うち 8 番目 2009, The Astrophysical Journal, 700, 1-9
- ⑤ "Moircs Deep Survey. III. Active Galactic Nuclei in Massive Galaxies at $z = 2-4$ ", Yamada, T., 他 11 名 2009, The Astrophysical Journal, 699, 1354-1364
- ⑥ "Lyman-alpha; Blobs: Discussions in Heidelberg", Yamada, T. 2009, New Astronomy Review, 53, 54-56
- ⑦ "Discovery of a Giant Lyalpha; Emitter Near the Reionization Epoch", Ouchi, M., 他 26 名 うち 26 番目 2009, The Astrophysical Journal, 696, 1164-1175
- ⑧ "Spitzer Observations of Extended Lyman-alpha; Clouds in the SSA22 Field", Webb, T.M.A., Yamada, T. 他 6 名 2009, The Astrophysical Journal, 692, 1561-1570
- ⑨ "Detections of Lyman Continuum from Star-Forming Galaxies at $z \sim 3$ through Subaru/Suprime-Cam Narrow-Band Imaging", Iwata, I., 他 9 名 うち 8 番目 2009, The Astrophysical Journal, 692, 1287-1293
- ⑩ "The Chandra Deep Protocluster Survey: Evidence for an Enhancement of AGN Activity in the SSA22 Protocluster at $z = 3.09$ ", Lehmer, B.D., 他 10 名 うち 11 番目 2009, The Astrophysical Journal, 691, 687-695
- ⑪ "Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph (MOIRCS) for the Subaru Telescope I. Imaging", Suzuki, R., 他 9 名 うち 8 番目 2008, Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 1347-1362
- ⑫ "The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). III. X-Ray Data", Ueda, Y., 他 12 名 うち 10 番目 2008, The Astrophysical Journal Supplement Series, 179, 124-141
- ⑬ "SubaruMOIRCS Near-Infrared Imaging in the Proto-Cluster Region at $z = 3.1$ ", Uchimoto, Y.K., 他 14 名 うち 9 番目 2008, Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 683-693
- ⑭ "The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Lyalpha; Emitters from $z=3.1$ to 5.7 in the 1 deg² Field: Luminosity Functions and AGN", Ouchi, M., 他 15 名 うち 9 番目 2008, The Astrophysical Journal Supplement Series, 176, 301-330
- ⑮ "The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). II. Optical Imaging and Photometric Catalogs", Furusawa, H., 他 35 名 うち 14 番目 2008, The Astrophysical Journal Supplement Series, 176, 1-18
- [学会発表] (計 9 件)
国際学会
- ① 馬渡健、赤方偏移 $z=2.39$ の原始銀河団候補 53W002 領域における輝線銀河探査” 2011/03/17 筑波
- ② 山田亨、”赤方偏移 $z \sim 3$ ライマン α 輝線銀河の輝線プロファイルについて” , 2009/09/15、山口
- ③ 山田亨、”WISH: Wide-field Imaging Surveyor for High redshift” , in Reionization with Multi-frequency Datasets, 2009/08/17-21 Stockholm, Sweden
- ④ 山田亨、”Relation between Lyman alpha Blobs and their connection with sub-mm sources and AGNs” , in “Ly Alpha Universe” , 2009/07/06-10, Paris, France
- ⑤ 山田亨、高赤方偏移星形成銀河における活動銀河核現象” 2009/03/26、大阪府立大学
- ⑥ 山田亨、”High-redshift protocluster as the site of galaxy formation”, in “When the Universe formed Stars, 2008/11/17-21 La Martinique Island, France
- ⑦ 山田亨”AGN Activities Among the Star forming Galaxies at High Redshift” in “The Starburst AGN Connection Conference, 2008/10/27-31, Shanghai, China
- ⑧ 山田亨、”High-redshift protocluster as the site of galaxy formation”, in “Understanding Lyman Alpha Emitters” ,

2008/10/6-10, Heiderberg, Germany

- ⑨ 森本奈々、SSA22 $z\sim 3$ における形成期
銀河の変光探索 II” 日本天文学会、
2008/09/12、岡山理科大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 亨 (TORU YAMADA)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90271519

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者