

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17617

研究課題名(和文) 初期宇宙における巨大銀河の形成と進化

研究課題名(英文) Formation and evolution of massive galaxies in the early Universe

研究代表者

田中 賢幸 (Tanaka, Masayuki)

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：50589207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は遠方宇宙における大質量銀河の形成・進化を観測的に調べることを主眼とした研究である。本研究の主な成果は(1)赤方偏移4という初期宇宙ですでに星形成をやめたと思われる大質量銀河を発見したこと、(2)それらの物理的な大きさが非常に小さく、銀河のサイズ進化をこの遠方宇宙で明らかにしたこと、そして(3)深い分光フォローアップ観測によりそれらの銀河の一つが、実際に赤方偏移3.87という遠方宇宙にいる可能性が高いことがわかったことである。この赤方偏移はまだ多少の不確定さを持っているが、今後確認されれば最遠方の分光確認された大質量銀河となる。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the formation and evolution of massive galaxies in the early Universe. The main results of the work include (1) discovery of massive galaxies with suppressed star formation activities in the distance universe of redshift of 4, (2) high-resolution imaging reveals that they are physically very compact and we traced the evolution of galaxy sizes back to redshift-4 in the rest-frame optical wavelengths for the first time, and (3) deep follow-up spectroscopy shows that one of these galaxies is likely located at a redshift of 3.87. Further spectroscopy is scheduled and if we fully confirm its redshift, the object will be the most distant spectroscopically confirmed massive quiescent galaxy.

研究分野：銀河進化

キーワード：光赤外天文学 銀河形成進化 大質量銀河

1. 研究開始当初の背景

初期宇宙で生まれた小さな銀河は、時間とともに衝突合体を繰り返し徐々に大きな銀河へと成長する。これが現在の銀河形成進化モデルである。このモデルは銀河の大局的な性質を再現するが、まだ十分な観測的検証を経たとは言いがたい。衝突合体を繰り返す銀河の「食物連鎖」の頂点にいる大質量銀河が特に重要な銀河種族となるが、これらの大質量銀河は実は我々はよく理解できていない。銀河はその成長段階では星形成活動が活発であるものの、一部はある時に何かしらの原因で星形成をやめ、赤い銀河へと進化してしまう。この傾向は重い銀河ほど強く、最近の研究では遠方宇宙でも星形成をしていない大質量銀河があるようである(Stefanon et al. 2015, ApJ, 803, 11)。この星形成の止まる原因が、いくつかのアイデア(例えば、大質量銀河の中心にしばしば存在する超巨大ブラックホールが影響を与えているというもの)は提案されているものの直接的な証拠に乏しく、いつどのようにして星形成が止まるのかは依然全くの謎である。これはハッブル系列の起源、すなわち銀河の多様性の起源に直結する極めて重要な問題で、銀河天文学の最大の謎の一つである。しかしながら、問題解決の糸口すらつかめていないのが現状である。

2. 研究の目的

重要問題の現状を打破することを試みるのが本研究である。遠方宇宙での大質量銀河探査は選択効果の少ない手法で探す必要があり、それには測光的赤方偏移という一般的な手法を用いるのが最も良い。これは、測光データから得られる銀河の見た目の色を使って、赤方偏移を推測するというもので、申請者は前回の科研費採択課題(課題研究番号 23740144)の一環で画期的なアイデアを用いた測光的赤方偏移コードを開発した。既存のコードと比較をすると、申請者のものが非常に良い精度を出すことがわかり、遠方の銀河まで強い選択効果を入れずに高精度で探査することができる。これは本研究の強力な武器である。この手法で遠方銀河を捉え、距離を推定し、そこから銀河の星質量を測る。さらに、銀河の星形成率を多波長データより推定し、初期宇宙において星形成をすでにやめてしまった銀河の割合が時間とともにどのように増えてきたのかを、未だかつてない統計精度で明らかにする。さらにそういった宇宙初期に星形成をやめた銀河の物理的性質を詳細に調べる。それは星形成活動を抑制する物理機構を探る上で極めて重要な手がかりを与えてくれるだろう。これが本研究の科学目標である。

3. 研究の方法

本研究はこの問題に対して複数のアプローチで挑んでいる。(1)赤方偏移2の原始銀河団の詳細解析、(2)広くて深い多波長撮像データを用いた統計解析、さらに(3)Hyper Suprime-Cam(HSC)のさらに広いデータを用いたより統計精度の高い解析の3つのアプローチである。複数のアプローチを取ることで、確実に成果を得ることを期待している。

一つ目のアプローチは研究開始時にすでに取得できていた、赤方偏移2の原始銀河団における大質量銀河の近赤外データを用いた解析で、この時代の銀河の形成タイムスケールを詳細に調べることで、巨大銀河の形成時期を探ることを目標としている。二つ目は、UDS(またはSXDS)と呼ばれる領域ですでに公開されている様々なデータを組み合わせ、約1平方度に渡って深い多色データを作成し、そこに自前の測光的赤方偏移コードを適用し、遠方での星形成を止めた大質量銀河の検出を試みる、というものである。最後の3つ目は、現在進行中のHyper Suprime-Cam(HSC)によるすばる戦略枠プログラムのデータを用いて探査領域をさらに広げ、公開されている外部データと組み合わせることで、稀な種族である大質量銀河の統計的性質を探るというものである。

これらのうち最も成果を出せたのがふたつ目のアプローチであるが、以下、全てのアプローチの結果をまとめたい。

4. 研究成果

(1) $z=2$ の原始銀河団

Keck MOSFIRE を用いて、赤方偏移2にある原始銀河団にいる星形成を止めた巨大銀河の深い近赤外線スペクトルを取得した。これはこれらの銀河の静止系可視光を捉える観測で、特に4000Åブレイクを詳細に調べ、銀河の形成時期等を探ることが主な目的である。深いデータにかかわらず、赤方偏移が測定できるような質のよいスペクトルが2天体についてしか得られなかったが(そのうちの一つを図1に示す)、ハッブル宇宙望遠鏡によるサイズの測定を組み合わせ、これらの銀河の基本平面(fundamental plane)を調べた。これは高密度環境にいる銀河についての最遠方での測定となる。その結果、同様の赤方偏移にあるフィールド銀河と比べて、高密度領域の銀河は進化の進んだ段階にいることが示唆された。そしてそれは、より大きな物理サイズによることもわかった。これらの結果は複数の研究会で発表をし、成果報告をした。しかしながら、2天体という統計の悪さから論文と

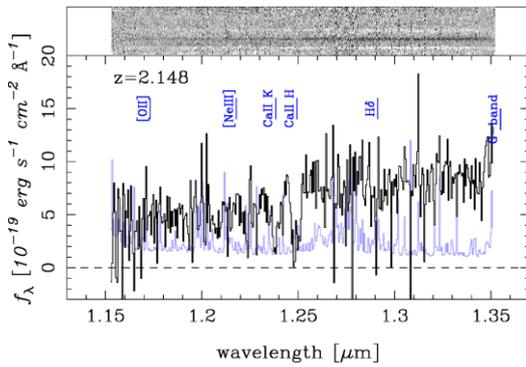


図 1: 取得した赤方偏移 2 の巨大銀河の静止系可視光のスペクトル。上に 2 次元スペクトル、下に 1 次元スペクトルがある。下では黒が測定、青がノイズである。いくつかの代表的な輝線・吸収線に印をつけてある。進化した銀河に特徴的な CaII H+K の強い吸収が見られる。

するには少々難しく、今後より多くの天体を観測をする必要があると考えている。

(2) UDS における赤方偏移 4 の星形成をやめた大質量銀河の探査

UDS (または SXDS) と呼ばれる空の領域は多くの深い多波長データがある非常に有用な領域である。ここで様々な公開データを組み合わせ、整合的な測光を行った広くて深い多波長カタログを作成した。そこに測光的赤方偏移コードを走らせ、赤方偏移 4 という遠方宇宙において多数の星形成をやめた大質量銀河の候補を発見した。これは非常に興味深い発見で、このような遠方にどのようにして星形成を止めた銀河が現れたのかを多角的に調べることにした。

赤方偏移 4 は測光的赤方偏移から非常にもっともらしいものの、分光による確認は必要不可欠である。そこで、Keck 望遠鏡の MOSFIRE を用いて 1 つの候補に対し深い分光観測を行った。残念ながら天気にはあまりめぐまらなかったが、赤方偏移 3.87 である可能性が非常に高いことがわかった。図 2 にそのスペクトルを示す。これが本当であれば、世界最遠方の分光確認された星形成をしていない銀河となる。しかしながら、天候不良もあってこの分光赤方偏移は 100% の信頼度を持って言える数字ではない。さらなる追観測が予定されていて、今後よりよいスペクトルを取得する予定である。正確な赤方偏移を測ることができれば、記録更新となるため、素

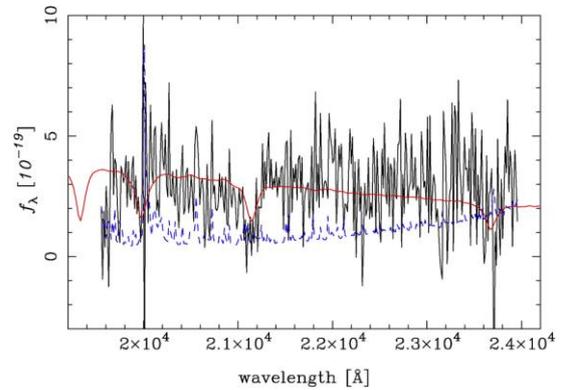


図 2: MOSFIRE による K-band スペクトル。黒が観測スペクトル、青がノイズスペクトル、赤が赤方偏移 3.87 のテンプレートである。いくつかの強い吸収線がよくフィットできている。

早く論文化をする予定である。また、他にも同様の星形成をやめた遠方銀河候補はいるため、より多くの天体に対しても同様の分光観測を行っていきたい。

こういった星形成を止めた大質量銀河は物理的に非常にコンパクトであることが、赤方偏移 2 前後の観測から知られている。そこで、今回新たに見つかった赤方偏移 4 の巨大銀河の物理サイズをすばる望遠鏡の IRCS を用いて測定した。地上望遠鏡では地球大気のゆらぎにより、これらの銀河の大きさを測ることは困難である。そこで、レーザーガイド補償光学を用いた高空間分解能観測を K-band で行った。この赤方偏移においてはこのバンドは静止系可視光を捉えるため、適切なバンドである。ハッブル宇宙望遠鏡はこの波長帯に感度がなく、静止系 UV を捉えることしかできない。逆に言うと、高空間分解能が売りのハッブル宇宙望遠鏡にはできない、非常にユニークな地上観測であると言える。

その結果、赤方偏移 4 の巨大銀河は有効半径が ~ 0.7 kpc と非常に小さく、より低赤方偏移の測定と比べても、小さいことがわかった。これは銀河のサイズ進化がこの遠方まで続いていることを表していて、静止系可視光における最遠方のサイズ測定となった。今までの低赤方偏移での研究結果を含む、サイズ進化を図 3 に示す。これは驚くほど急な進化で、この小さいサイズは当初の目的の一つである、銀河形成モデルを制限する上で非常に強力であり、シミュレーションとの比較を今後進めていきたい。

さらに並行して、これらの銀河が本当に星形成をしていないという確証を得るための、深い ALMA によるフォローアップ観測も計画している。星形

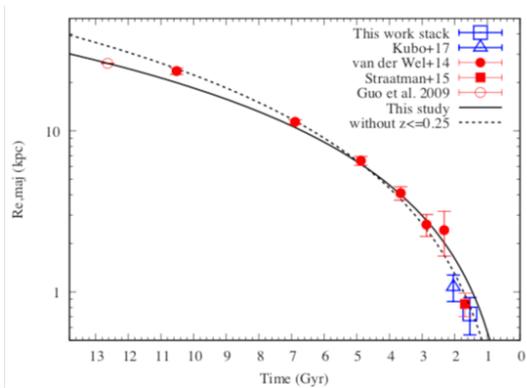


図3: 銀河のサイズ進化。横軸に時間、縦軸に有効半径を描いている。赤が文献から引いてきた低赤方偏移の測定で、赤方偏移4(~ 1.5 Gyr)の青い四角が今回の測定。赤方偏移 3.6(~ 1.7 Gyr)にあるのはハッブル宇宙望遠鏡による静止系 UV での測定で信頼性は低い。実線は今までのデータも含めたサイズ進化のフィットである。

成活動は測光データから調べた全体的なスペクトルの形で推定しているが、それと相補的な手法として、星形成銀河で強いダスト放射を調べること、隠された星形成がないことを確認するためである。すでにより低赤方偏移の赤方偏移 2 の銀河についてはプログラムが進行中で、データを集めているところである。解析はまだ行っていないが、今後非常に楽しみなデータが撮れている。

(3) HSC データを用いた統計解析

HSC を用いたすばる戦略観測の一環で 300 晩の巨大観測プロジェクトが進行している。これは実に様々なサイエンスができるデータを提供するが、サーベイ領域は他の多波長サーベイとかぶるように設定され、外部のデータと組み合わせることで広くて深い多波長データができるようになる。それを用いて遠方巨大銀河探査を行った。

HSC のデータは解析パイプラインで処理され、天体検出から測光までが統合的に行われる。しかし、外部のデータはパイプラインではそのまま処理できないので、処理できるようにするための下準備が必要である。そのためのコードを開発して、HSC のサーベイ領域の一つである ELAIS-N1 において UKIDSS という近赤外サーベイの J-band と K-band のデータを下処理し、HSC パイプラインを用いて統合的に天体の測光をしたカタログを生成した。測光精度の確認は様々な手法で行ったが、図 4 に示す gzK の 2 色図がこのカタログの信頼性を示している。

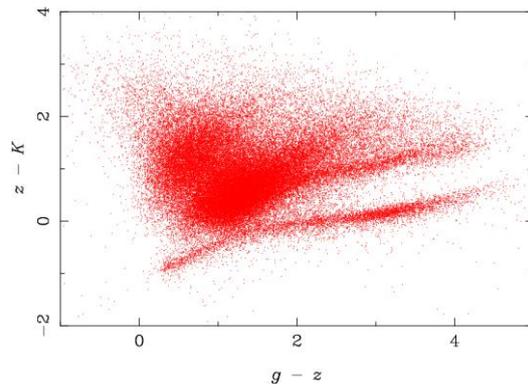


図 4: $g-z$ と $z-K$ の 2 色図。右下にある系列が星の系列で、それより左上にある銀河とはきれいに分離している。その銀河もいくつかの系列をなしているが、 $g-z > 2$ から伸びている系列が低赤方偏移の赤い銀河の系列で、 $g-z \sim 0.5$, $z-K \sim 1$ にある集団が赤方偏移 1.5 よりも遠くにいる銀河の集団である。こういった異なる赤方偏移にいる銀河の集団が、はっきりと分離して見えていることから、信頼性のあるカタログであると言える。

このカタログに対して測光的赤方偏移を走らせ、遠方の大質量銀河を探査した。まだ解析の半ばではあるが、今の所上で述べた UDS ほどいい候補は見つかっていない。しかし、解析手法は確立したので、他のフィールドに対しても適用して、さらに面積を広げたり、より新しい HSC のデータを使い深くまで探査するなど、今後も継続して進めていく必要がある。

以上のようにして、3 つのアプローチでそれぞれ進展があった。2 つめのものが最も進展し、面白い展開を迎えている。本研究課題は 29 年度が最後であったが、このままの流れで今後も研究を継続し、成果を発表していくつもりである。

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 8 件)

- (1) Tanaka, M., Coupon, J., et al. 2018, PASJ, 70, 9, “Photometric redshifts for Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program Data Release 1”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx077

- (2) Aihara, H., et al. 2018, PASJ, 80, 8, “First data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program” (Tanaka is the corresponding author), 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx081
- (3) Hayashi, M., Tanaka, M., et al. 2018, PASJ, 70, 17, “A 16 deg² survey of emission-line galaxies at $z < 1.5$ in HSC-SSP Public Data Release 1”, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx088
- (4) Ishikawa, S., Kashikawa, N., Toshikawa, J., Tanaka, M., Hamana, T., Niino, Y., Ichikawa, K., Uchiyama, H., 2017, ApJ, 841, 8, “The Galaxy-Halo Connection in High-redshift Universe: Details and Evolution of Stellar-to-halo Mass Ratios of Lyman Break Galaxies on CFHTLS Deep Fields”, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aa6d64
- (5) Brammer, G., Marchesini, D., Labbe, I., Spitler, L., Lange-Vagle, D., Barker, E., Tanaka, M., et al. 2016, ApJS, 226, 6, “Ultra-deep K s-band Imaging of the Hubble Frontier Fields”, 査読有, DOI: 10.3847/0067-0049/226/1/6
- (6) Tanaka, M., Wong, C, K., et al. 2016, ApJ, 826, L19, “A Spectroscopically Confirmed Double Source Plane Lens System in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program”, 査読有, DOI: 10.3847/2041-8205/826/2/L19
- (7) Toshikawa, J, Kashikawa, N., Overzier, R., Malkan, M., Furusawa, H., Ishikawa, S., Onoue, M., Ota, K., Tanaka, M., et al. 2016, ApJ, 826, 114, “A Systematic Survey of Protoclusters at $z \sim 3-6$ in the CFHTLS Deep Fields”, 査読有, DOI:10.3847/0004-637X/826/2/114
- (8) Miyazaki, S., Oguri, M., Hamana, T., Tanaka, M., et al. 2015, ApJ, 807, 22, “Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam’s 2.3 deg² field”, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/22

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 「HSC-SSP + formation and evolution of massive galaxies」 田中賢幸、天文天体物理若手の会夏の学校、ホテル圓山荘、2017年7月26日
- (2) 「HSC-SSP の教訓」 田中賢幸、光赤天連シンポジウム 2017、国立天文台、2017年7月24日
- (3) “Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program” Tanaka, M., COSMOS team meeting 2017, Kyoto University, 5 July 2017
- (4) 「Deep Near-IR Spectroscopy of Massive Galaxies in Proto-clusters」 田中賢幸、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学、2017 年 3 月 17 日
- (5) “First Data Release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program” Tanaka, M., Why does the Universe accelerate, KEK, 9 March 2017
- (6) “Deep Near-IR Spectroscopy of Massive Galaxies in Proto-clusters” Tanaka, M., Subaru Users’ Meeting FY2016, 12 January 2017
- (7) 「Subaru Strategic Surveys with HSC and PFS」 田中賢幸、SKA 研究会「銀河進化と遠方宇宙」、アーデンホテル阿蘇、2017 年 1 月 7 日
- (8) 「Photometric Redshifts」 田中賢幸、理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布、国立天文台、2016 年 11 月 11 日
- (9) 「A spectroscopically confirmed double source-plane lens system in HSC-SSP」 田中賢幸、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学、2016 年 9 月 15 日
- (10) “Galaxy evolution science with HSC, PFS and ULTIMATE” Tanaka, M., Ultimate-Subaru workshop, NAOJ, 16 June 2016
- (11) “Some thoughts on the PFS-SSP galaxy survey” Tanaka, M., PFS-SSP galaxy survey workshop 2015, IPMU, 13 Nov. 2015
- (12) 「Photometric Redshifts」 Tanaka, M., 新学術領域「なぜ宇宙は加速するの

か? - 徹底的究明と将来への挑戦-」発足
シンポジウム、IPMU、 20 September
2015

- (13) 「銀河進化と構造形成」 田中賢幸、
光赤天連シンポジウム 2015、 国立天文
台、2015年9月15日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 賢幸 (TANAKA, Masayuki)
自然科学研究機構・国立天文台・ハワイ観
測所・准教授
研究者番号：50589207

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()