

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244031

研究課題名(和文) ウルトラ・ピスタによる初代銀河と宇宙再電離の観測的研究

研究課題名(英文) Observational Study of both Forming Galaxies and Cosmic Reionization by UltraVISTA

研究代表者

谷口 義明 (Taniguchi, Yoshiaki)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授

研究者番号：40192637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,900,000円

研究成果の概要(和文)：UltraVISTAプロジェクトはVISTA望遠鏡(VISTA=Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)はチリ共和国にあるVery Large Telescopeのサイトに設置された口径4mのサーベイ専用の望遠鏡である。我々はハッブル宇宙望遠鏡のトレジャリー・プログラムで観測された宇宙進化サーベイの天域の近赤外線撮像探査を行い、赤方偏移  $z=7$  の銀河を多数発見した。広視野サーベイのおかげで、従来想定されていなかった明るい光度の銀河が発見され、銀河の初期進化及び宇宙再電離源の研究に大きな貢献をした。

研究成果の概要(英文)：UltraVISTA is one of public surveys promoted by using the 4m infrared survey telescope, VISTA, located at ESO/VLT site in Chile. We have carried out wide-field imaging survey in the HST COSMOS field. Thanks to the wide-field survey, we have discovered a number of luminous star forming galaxies at  $z = 7$ . Our results give important insights on the early evolution of galaxies and the origin of cosmic reionization.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：銀河形成 銀河進化 宇宙再電離 観測的宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 銀河形成、銀河の初期進化、および宇宙空間の再電離の研究は今世紀に入ってから、ようやく進展を見せ始めた。しかしながら、研究開始前夜の頃は、分光観測で確認されている最遠の銀河の距離は 129 億光年 ( $z \sim 7$ ) であり、宇宙年齢にして 8 億年経過した時代である。初代星を探索するのであれば少なくとも 130 億光年彼方 ( $z > 8$ ) の銀河を詳細に観測する必要があることが要請されていた。

(2) ハッブル宇宙望遠鏡に搭載された赤外線カメラ WFC3 によるハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドの近赤外撮像が行われ、 $z \sim 8$  の銀河の候補が複数発見された。申請者らはそれらの候補の内、8 個が確実な  $z \sim 8$  の銀河であることを突き止め、宇宙再電離の可能性を検討したところ、少なくとも生成されている星の重元素量は太陽重元素量の 1/2000 程度でなければならないことを明らかにした。このような状況に鑑み、あらたな近赤外線サーベイの必要性が認識され始めていた。

## 2. 研究の目的

(1) 申請者はハッブル宇宙望遠鏡の基幹プロジェクトである“宇宙進化サーベイ (COSMOS プロジェクト)”を 2003 年より国際共同研究として推進してきている。その後、このプロジェクトから派生した、ヨーロッパ南天天文台の赤外線サーベイ望遠鏡 (VISTA Telescope) の近赤外線広域サーベイプロジェクトである“UltraVISTA (ウルトラ・ビスタ)”による観測的研究を推進している。

(2) UltraVISTA プロジェクトでは高赤方偏移宇宙 (赤方偏移  $z \sim 7-10$ ) の銀河探索を行い、銀河形成の初期段階の系統的な研究を行う。

(3) 重要な点は、これらの初期銀河には第一世代星と近い性質 (重元素量が極端に少ない) を持つ星々が含まれていることである。高赤方偏移宇宙 (赤方偏移  $z < 10$ ) では、宇宙空間が完全電離されていることがわかっているが (宇宙再電離と呼ばれる現象)、本研究で得られる銀河サンプルによる宇宙再電離の物理過程を探求することが可能になる。

(4) 以上のことから、UltraVISTA プロジェクトを推進することで、初期銀河、第一世代星、そして宇宙再電離という 3 つの重要な課題を同時に研究することが可能となる。このような観測的研究は世界初の試みである。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究計画で取得している、或いは取得しようとしている観測データをまとめると、以下の 4 種類に分類できる。

[1] UltraVISTA による近赤外線撮像データ (広帯域 Y, J, H, Ks 及び狭帯域 NB1185) : 平成 25 年度内に全データが取得される予定。

[2] ULTRA VISTA 天域の可視光  $z$  バンドの撮像データ : すばる望遠鏡の主焦点カメラで取得済み (限界等級 = 27AB @ 2 arcsec  $\phi$  & 5  $\sigma$ ) 。

[3] COSMOS 可視光データ ; ハッブル宇宙望遠鏡 ACS カメラによる  $I_{814}$  撮像と、すばる望遠鏡による可視光 20 バンドのデータ。

[4] COSMOS 多波長データ ; X 線 (Chandra 及び XMM-Newton)、紫外線 (GALEX 衛星)、中間赤外線 (スピッツァー赤外線天文台)、及び電波 (VLA 波長 20cm) まで完備。

(2) 本研究計画ではこれらのデータセットを有機的に組み合わせ、以下の研究を行った。

[A] 平成 23 年度は上記データセットの [2][3][4] の整備を行い、平成 24 年度以降の研究の準備を行った。

[B] : 平成 24 年度以降は赤方偏移  $z > 7$  の銀河の系統的な探索を行った。この研究は UltraVISTA collaboration の枠組みで行われた。広帯域フィルターによるドロップアウト天体として検出される高赤方偏移銀河の期待数は以下のとおりである :

- (a) 540 galaxies @  $z = 6.3$ ,
- (b) 450 galaxies @  $z = 7.5$ ,
- (c) 180 galaxies @  $z = 8.5$ , 及び
- (d) 6 galaxies @  $z = 10$ .

また NB1185 excess 天体として

- (e) 30 LAEs @  $z = 8.8$

の発見を試みる (ここで LAE はライマン  $\alpha$  輝線銀河を意味する)。申請者らは既に初代星あるいはそれに準ずる低重元素量星の効果による宇宙再電離の評価基準を確立していたので、これらのサンプルの取得に基づき、初代銀河、初代星、及び宇宙再電離の系統的な研究を行うことができた。

(3) 一方、申請者は COSMOS プロジェクトのオフィシャルメンバーであるため、COSMOS の多波長データセットに全てアクセスすることができる。このメリットを生かして、UltraVISTA で検出された高赤方偏移銀河の中に活動銀河中心核の兆候を示すものがない

いかどうか吟味することができた。これらの研究成果を有機的に結び付けることで、高赤方偏移宇宙における宇宙最電離源の系統的な観測的研究を世界に先駆けて実行することができた。

#### 4. 研究成果

(1) UltraVISTAプロジェクトによる広域近赤外線撮像サーベイを遂行し、研究期間内に3回のデータリリースを行った。このデータリリースはパブリックに行われたものであり、当該分野の研究に大きな進展をもたらした。

(2) 本研究ではハッブル宇宙望遠鏡の基幹プログラムである宇宙進化サーベイ (COSMOSプロジェクト) とタイアップし、COSMOS天域の近赤外線撮像探査を行ったおかげで、赤方偏移  $z=7$  の銀河を多数発見することに成功した。特に重要な発見は、従来想定されていなかった明るい光度の若い銀河が発見されたことである (図1)。銀河の初期進化は質量の大きな銀河の方が早く星生成を経験し、進化する描像は得られていたが、赤方偏移  $z=7$  の段階でその傾向が確認されたのは初めてのことである。

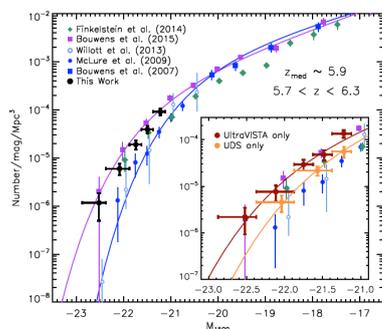


図1: UltraVISTAで得られた高赤方偏移宇宙にある銀河の光度関数。横軸で左に行くほど銀河の光度は明るくなるが、まさにその領域での銀河の個数密度の超過が観測される (Bowler et al. 2015)。

(3) UltraVISTAで得られた高赤方偏移宇宙にある銀河の光度関数の研究から、光度の明るい若い銀河が多数あることが発見された。この観測事実は、宇宙空間の再電離源は若い銀河で誕生した大質量星の放射する電離光による光電離が有力であることを強く示唆した (図2; Furusawa et al. 2016)。

以上のように本研究は銀河形成期における星生成の性質や宇宙再電離の研究に大きな貢献をした。

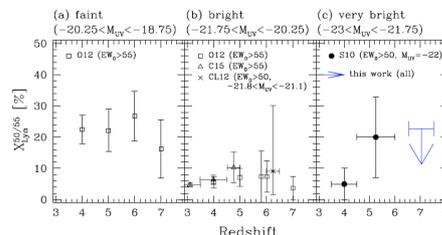


図2: ライマン $\alpha$ 輝線を示す銀河の割合が高赤方偏移宇宙で多いことを示す図 (右のパネル)

#### <引用文献>

- ① Bowler, R. A. A.、谷口義明 他、The Galaxy Luminosity Function at  $z=6$  and evidence for Rapid Evolution in the Bright End from  $z=7$  to 5, MNRAS, 452, 2015, 1817-1840
- ② Furusawa, H., 谷口義明 他、A New Constraint on the Ly $\alpha$  Fraction of UV Very Bright Galaxies at  $z=7$ , ApJ, 822, 2016, id. 46, 14 pages

#### 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)

6 6件中、8件について記す

- ① Laigle, C、谷口義明 他、The COSMOS2015 Catalog: Exploring the  $1 < z < 6$  Universe with Half a Million Galaxies, ApJS, 224, 2016, id.24 20 pages (査読有り)  
DOI: 10.3847/0067-0049/224/2/24
- ② Furusawa, H., 谷口義明 他、A New Constraint on the Ly $\alpha$  Fraction of UV Very Bright Galaxies at  $z=7$ , ApJ, 822, 2016, id. 46, 14 pages (査読有り)  
DOI:10.3847/0004-637X/822/1/46
- ③ 谷口義明 他、The Subaru COSMOS20: Subaru Optical Imaging of the HST COSMOS Field with 20 Filters, PASJ, 67, 2015, id.10104, 14 pages (査読有り)  
DOI:10.1093/pasj/psv106
- ④ 谷口義明 他、Discovery of Massive, Mostly Star Formation Quenched Galaxies with Extremely Large Equivalent Widths at  $z=3$ , ApJ, 809, 2015, id.L7, 7 pages (査読有り)  
DOI:10.1088/2041-8205/809/1/L7
- ⑤ Bowler, R. A. A.、谷口義明 他、The Galaxy Luminosity Function at  $z=6$  and evidence for Rapid Evolution in the Bright End from  $z=7$  to 5, MNRAS, 452, 2015, 1817-1840 (査読有り)  
DOI:10.1093/mnras/stv1403
- ⑥ Ilbert, O., 谷口義明 他、Mass assembly in quiescent and

star-forming galaxies since  $z \approx 4$  from UltraVISTA, AA, 2014, 556, id.A56, 24 pages (査読有り)

DOI:10.1051/0004-6361/201321100

- ⑦ Kajisawa, M., 谷口義明 他、Environmental Effects on Star Formation Activity at  $z \sim 0.9$  in the COSMOS Field, ApJ, 768, 2014, id.51, 13 pages (査読有り)  
DOI:10.1088/0004-637X/768/1/51
- ⑧ Bowler, R. A. A., 谷口義明 他、The Discovery of Bright  $z=7$  Galaxies from the UltraVISTA Survey, MNRAS, 426, 2012, 2772-2788 (査読有り)  
DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21904.x

[学会発表] (計 5 件)

31 件中、5 件について記す

- ① 谷口義明 他、100 億光年かなたの宇宙に死にゆく銀河を発見、日本天文学会 2014 年秋季年会、甲南大学 (兵庫県、神戸市)
- ② 谷口義明 他、UltraVISTA DR2、日本天文学会 2013 年秋季年会、山形大学 (山形県、山形市)
- ③ 市川あき江、谷口義明、他、UltraVISTA を用いた赤方偏移  $z \sim 2$  における passive 銀河の星質量関数、日本天文学会 2013 年秋季年会、山形大学 (山形県、山形市)
- ④ 谷口義明、巨大ブラックホールの誕生と進化は観測できるか、日本天文学会 2013 年春季年会、埼玉大学 (埼玉県、さいたま市)
- ⑤ 谷口義明、活動銀河核形成の統一モデルはあるか?、日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学 (京都府、京都市)

[図書] (計 11 件)

- ① 谷口義明、丸善、宇宙探査の歴史、2016、132
- ② 谷口義明、創風社出版、続・天文学者の日々、2016、196
- ③ 谷口義明、海鳴社、谷口少年、天文学者になる、2015、217
- ④ 谷口義明、ソフトバンク・クリエイティブ、マンガでわかる宇宙「超」入門、2014、238
- ⑤ 谷口義明、メディア・ファクトリー、宇宙の始まりの星はどこにあるのか、2013、128
- ⑥ 谷口義明 他、講談社、新・天文学事典、2013、776
- ⑦ 谷口義明、ソフトバンク・クリエイティブ、重力はなぜ生まれたのか、2012、344
- ⑧ 谷口義明、創風社出版、天文学者の日々、

2012、219

- ⑨ 谷口義明 他、丸善、巨大ブラックホールと宇宙、2012、182
- ⑩ 谷口義明、丸善、宇宙の一番星を探して、2011、151
- ⑪ 谷口義明、ソフトバンク・クリエイティブ、4%の宇宙、2011、376

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

該当なし

○取得状況 (計 0 件)

該当なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.cosmos.ehime-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷口義明 (TANIGUCHI, Yoshiaki)  
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授  
研究者番号: 40192637

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし