

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287043

研究課題名(和文) 形成期の銀河を取り巻くガスフィラメント構造の研究

研究課題名(英文) Gaseous filaments around star-forming galaxies in the early Universe

研究代表者

松田 有一 (Matsuda, Yuichi)

国立天文台・チリ観測所・助教

研究者番号：20647268

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：銀河形成の理論研究によると、銀河は無数に張り巡らされた暗黒物質のフィラメント構造の結節点で形成され、フィラメント構造を伝って流れ込む銀河間ガスが形成期の銀河の活発な星形成活動を支えていると考えられている。この理論予想をテストするため、すばるの広視野カメラ専用、銀河形成期の淡い水素ライマンアルファ輝線を捉えるための専用狭帯域フィルターを製作した。すばる望遠鏡S16A期共同利用で完成したフィルターを用いた観測提案が採択された。密接に関連する研究として、銀河形成期の星形成銀河の観測成果をまとめた学術論文を8編出版した。

研究成果の概要(英文)：Galaxy formation models predict that galaxies form at the intersections of dark matter filaments and gas inflows along the filaments maintain the intense star-formation activities in the early Universe. To test this prediction, we made a custom narrow-band filter, NB468, for Subaru Hyper-Suprime Cam to detect Lyman alpha emitting gas filaments. Our observing program with the NB468 was approved in Subaru open use time (S16A). We have published 8 refereed papers on closely related scientific topic of this program.

研究分野：観測天文学

キーワード：銀河形成 大規模構造

## 1. 研究開始当初の背景

銀河形成研究の目標は「銀河がいつ、どのように形成されたのか」を明らかにすることである。現在、銀河の統計的研究は過去 130 億年(宇宙年齢の95%)まで遡れるようになり、銀河の形成時期に関して大まかな描像が見えてきた。特に、宇宙の星形成史の研究から、銀河の成長は約100億年前(赤方偏移 $z \sim 2$ )の時代に最も活発であったことが明らかになった(銀河形成期)。その後、銀河は星形成活動を徐々に弱め、現在に至ったということがわかってきている。

形成期( $z \sim 2$ )の銀河の典型的な星形成率は近傍銀河の10倍以上である。この激しい星形成活動を維持するためには星の元となる冷たいガスを周囲から銀河に絶えず供給する必要があると考えられている。従来、周囲から重力に引かれ銀河ハローに落ちて来たガスは衝撃波加熱でピリアル温度まで加熱され高温ガスハローを形成し、その後、放射冷却により、徐々に中心部に降着すると考えられてきた。

しかし、最近の数値シミュレーションを用いた理論的研究によると、初期宇宙( $z \geq 2$ )では、銀河は暗黒物質フィラメント構造の結節点の密度ピークで形成されるため、暗黒物質ハローの平均密度よりも周囲から突き刺さるフィラメント構造の密度のほうが高く、ガスはそのフィラメント構造に沿ってジーンズ長程度の幅の流れを作り、加熱されずに中心部まで自由落下できると予想されている。

形成期の銀河がガスを周囲からどのように取り込むのかを観測的に明らかにすることは現在の銀河形成研究の大きな目標になっている。しかし、形成期の銀河周囲のガスは、星が主体の銀河本体に比べ表面輝度が一桁以上低いため、調べるのが難しい。このため、観測的にはまだ非常に限られた情報しか得られていない。

銀河形成の理論研究によると、銀河は無数に張り巡らされた暗黒物質のフィラメント構造の結節点で形成され、フィラメント構造を伝って流れ込む銀河間ガスが形成期の銀河の活発な星形成活動を支えていると考えられている。しかし、このような銀河形成期におけるガスフィラメント構造は非常に淡いため、これまで観測的に捉えることは難しかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、形成期の銀河がその激しい星形成活動に必要なガスを周囲からどのように取り込むのかを明らかにすることを目標としている。その第一歩として、まずは、形成期の銀河周囲のガス構造をはっきりと捉え、その物理的性質を定量化する必要がある。

形成期の銀河周囲のガスフィラメント構造を調べるためには、水素 Ly $\alpha$  輝線撮像が適している。他の方法としては背景光源への吸収線を用いた観測もあるが、これはガス構造の1次元情報しか得る事ができない。水素 Ly $\alpha$  線は共鳴線であり、中心銀河の電離領域から放出された Ly $\alpha$  光子は周囲の中性水素ガス構造の中で(観測者の視線方向への)光学的厚みが1になるまで散乱を繰り返す。そのため、水素 Ly $\alpha$  輝線表面輝度分布から、銀河周囲のガス構造の2次元情報を得ることができる。

我々はこれまですばる主焦点カメラ(S-Cam)を用いて  $z = 3.1$  SSA22 原始銀河団とその周辺領域、および、一般天域で水素 Ly $\alpha$  輝線撮像観測を進め、形成期の銀河の研究で国際的にも高い評価を得る成果を上げて来た。最新の結果では、銀河周囲のガス構造は丸いものから、フィラメント的なものまで様々な形態を持ち、さらに、それが周囲の環境(ここでは数 Mpc スケールで見た場合の銀河数密度)と関連しているらしいことを明らかにした。

しかしながら、S-Cam による観測でようやく見えて来たガス構造の水素 Ly $\alpha$  輝線表面輝度は検出限界ぎりぎりであり、フィラメントの幅などの定量的な性質を調べるのは難しかった。

## 3. 研究の方法

そこで、比較的の水素 Ly 輝線表面輝度の高いガス構造を示す銀河が複数見ついている、より低赤方偏移の原始銀河団が良い観測ターゲットになる。本研究では、視野直径 1.4 度角を持つ、すばる 8.2m 望遠鏡新広視野カメラ(ハイパーシュプリームカム、HSC)を用いて、 $z = 2.8$  の HS1549 原始銀河団に対して、より深く、より広い視野で水素 Ly 輝線撮像観測を行う。

$z = 2.85$  HS1549 原始銀河団は、ひろがったガス構造の兆候を示す銀河が複数見ついている領域である。そこで本研究では、2013 年よりすばる 8.2m 望遠鏡に搭載される新広視野カメラ(HSC)を用いて、この原始銀河団とその周辺領域を 2 倍深く、200 倍広く観測することで、(1)これらのガス構造を伴う銀河をより表面輝度の低いレベルまで観測した場合に銀河の大規模構造に沿ったガスフィラメント構造が見えてくるのか、(2)もし見えた場合、そのフィラメントの幅や長さはどうくらいか、(3)さらに、原始銀河団中心部から周囲の低密度領域に向かって、他にも顕著なガス構造を示す銀河が存在するのか、(4)もし存在する場合、それらのガス構造もやはり周囲の大規模構造と同じ方向に伸びているのか、を調べる。

これにより、形成期の銀河周囲のガス構造の物理的性質(フィラメントの幅、長さ、本数、方向等)を観測的に明らかにし、銀河形成理論の検証を行う。ガスが形成期の銀河に向かって流れ込む際にできると予想される、特徴的な幅を持つフィラメント構造を捉え、銀河形成理論の検証を行う。

#### 4 . 研究成果

すばる広視野カメラ(ハイパーシュプリームカム、HSC)専用、銀河形成期の淡い水素ライマンアルファ輝線を捉えるための狭帯域フィルターを製作した。すばる望遠鏡 S16A 期共同利用観測募集に対し、完成した HSC 用 NB468 フィルターを用いた観測提案を行った。本観測提案は S16A 期の共同利用プログラムの一つとして採択され、2016 年 6 月に 2 晩の観測時間割当が決まった。

NB468 フィルター製作時において、国内外の研究の現状をふまえた計画の見直しを行った影響、および、製作時の技術的な困難による遅れの影響もあり、当初計画していたすばる HSC による観測研究については、観測プログラムの採択という段階に留まった。しかし、本研究に密接に関連する研究として、ガスフィラメントによる冷たいガスの供給が卓越していると考えられている銀河形成期の星形成銀河の観測成果をまとめた学術論文を 8 編出版した。

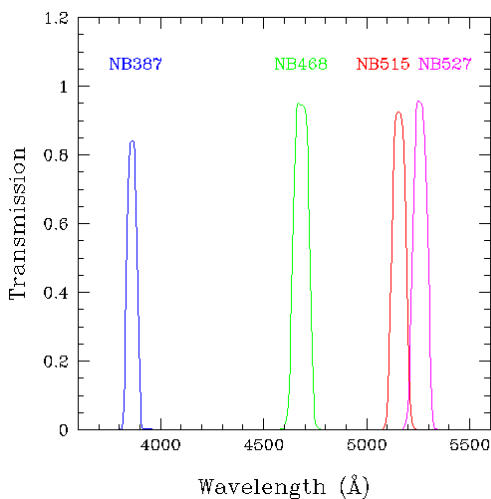


図 1: 2016 年から公開されているすばる望遠鏡 HSC で利用可能な狭帯域フィルターの例 (<http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/HSC/sensitivity.html>)。緑色が本研究課題で製作した NB468 フィルター。

#### 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) Kubo, M.; Yamada, T.; Ichikawa, T.; Kajisawa, M.; Matsuda, Y.; Tanaka, I.; Umehata, H., “An extremely dense group of massive galaxies at the centre of the protocluster at  $z = 3.09$  in the SSA22 field”, 2016, MNRAS, 455, 3333, 10.1093/mnras/stv2392, 査読有

(2) Hine, N. K.; Geach, J. E.; Alexander, D. M.; Lehmer, B. D.; Chapman, S. C.; Matsuda, Y., “An enhanced merger fraction within the galaxy population of the SSA22 protocluster at  $z = 3.1$ ”, 2016, MNRAS, 455, 2363, 10.1093/mnras/stv2448, 査読有

(3) Umehata, H.; Tamura, Y.; Kohno, K.; Ivison, R. J.; Alexander, D. M.; Geach, J. E.; Hatsukade, B.; Hughes, D. H.; Ikarashi, S.; Kato, Y.; Izumi, T.; Kawabe, R.; Kubo, M.; Lee, M.; Lehmer, B.; Makiya, R.; Matsuda, Y.; Nakanishi, K.; Saito, T.; Smail, I.; Yamada, T.; Yamaguchi, Y.; Yun, M., “ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a  $z = 3.09$  Protocluster Core”, 2016, ApJ, 815, L8, 10.1088/2041-8205/815/1/L8, 査読有

(4) Hatsukade, Bunyo; Tamura, Yoichi; Iono, Daisuke; Matsuda, Yuichi; Hayashi, Masao; Oguri, Masamune, “High-resolution ALMA observations of SDP.81. II. Molecular clump properties of a lensed submillimeter galaxy at  $z = 3.042$ ”, 2015, PASJ, 67, 93, 10.1093/pasj/psv061, 査読有

(5) Ao, Y.; Matsuda, Y.; Beelen, A.; Henkel, C.; Cen, R.; De Breuck, C.; Francis, P. J.; Kovacs, A.; Lagache, G.; Lehnert, M.; Mao, M. Y.; Menten, K. M.; Norris, R. P.; Omont, A.; Tatemastu, K.; Weiss, A.; Zheng, Z., “What powers Ly $\alpha$  blobs?”, 2015, A&A, 581, 132, 10.1051/0004-6361/201424165, 査読有

(6) Tamura, Yoichi; Oguri, Masamune; Iono, Daisuke; Hatsukade, Bunyo; Matsuda, Yuichi; Hayashi, Masao, “High-resolution ALMA observations of SDP.81. I. The innermost mass profile of the lensing elliptical galaxy probed by 30 milliarcsecond images”, 2015, PASJ, 67, 72, 10.1093/pasj/psv040, 査読有

(7) Matsuda, Y.; Nagao, T.; Iono, D.; Hatsukade, B.; Kohno, K.; Tamura, Y.

Yamaguchi, Y.; Shimizu, I., “The ALMA Patchy Deep Survey: a blind search for [C II] emitters at  $z\sim 4.5$ ”, 2015, MNRAS, 451, 1141, 10.1093/mnras/stv1044, 査読有

(8) Arrigoni Battaia, Fabrizio; Yang, Yujin; Hennawi, Joseph F.; Prochaska, J. Xavier; Matsuda, Yuichi; Yamada, Toru; Hayashino, Tomoki, “A Deep Narrowband Imaging Search for C IV and He II Emission from Ly $\alpha$  Blobs”, 2015, ApJ, 804, 26, 10.1088/0004-637X/804/1/26, 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

(1) Yuichi Matsuda, “ALMA 860 $\mu$ m continuum observations of 100kpc-scale Ly $\alpha$  Blobs at  $z=3.1$ ”, East Asian ALMA Science Workshop 2015 (国際学会), 2015年12月08日~2015年12月11日, 大阪府立大学 I-site なんば(大阪府大阪市)

(2) 松田有二, 「アルマによる  $z=3$  ライマンアルファ輝線ガス雲の観測」, 初代星初代銀河研究会 2015, 2015年11月30日~2015年12月02日, 群馬大学草津セミナーハウス (群馬県吾妻郡)

(3) 松田有二, APDSチーム, 「The ALMA Patchy Deep Survey: A blind search for [CII] emitters at  $z\sim 4.5$ 」日本天文学会秋季年会, 2015年09月09日~2015年09月11日, 甲南大学 (兵庫県神戸市)

(4) Yuichi Matsuda, MIAPP workshop (招待講演)(国際学会), “Lyman- $\alpha$  blobs”, 2015年08月03日~2015年08月21日, Garching, Germany

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

松田 有二 (Matsuda, Yuichi)  
国立天文台・チリ観測所・助教  
研究者番号 : 20647268

### (2)研究分担者

山田 亨 (Yamada, Toru)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙物理学研究系・教授  
研究者番号 : 90271519