

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14252

研究課題名(和文) 可視面分光とアルマ望遠鏡で探る銀河と銀河間物質の相互作用

研究課題名(英文) Interaction between galaxies and intergalactic medium uncovered by IFU and ALMA

研究代表者

梅畑 豪紀(Umehata, Hideki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・基礎科学特別研究員

研究者番号：60783678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、この水素ライマンアルファ輝線を放つガスネットワークとして銀河間物質を捉えること、そして銀河と銀河間物質の関係を明らかにすることを目指した。2017年度から2018年度にかけて行った可視面分光装置による初期宇宙の水素ガス観測、そしてサブミリ波銀河や活動銀河核についての分子ガス観測に基づき、2019年度に主たる成果の論文を出版した。115億光年先の原始銀河団中心部において、多くの銀河や超巨大ブラックホールをつなぐ水素ガスのネットワークとして宇宙網の検出に成功し、本成果はサイエンス誌より2019年10月に出版され、世界に向けてプレスリリースが行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙においてバリオンはその大部分が銀河ではなく銀河間物質として存在しているとされる。現在の標準的な宇宙モデルでは、バリオンの大部分は銀河ではなく宇宙網(Cosmic Web)と呼ばれる蜘蛛の巣状の構造に沿って分布していると予想されている。したがって、これらの銀河と銀河を繋ぐ銀河間物質は、宇宙の構造形成、あるいは銀河進化を理解する上で欠かせない要素である。水素ライマンアルファ線をプローブとして宇宙網の観測が可能であることを立証した本研究は、今後の本格的な宇宙網探査の時代を切り拓くものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In this work, our purpose was to uncover gaseous network, so called cosmic web, using Lyman-alpha emission as a probe, and to investigate the relation between cosmic web and galaxies. We carried out observations using VLT/MUSE, which is a sensitive optical integral field unit with a large format in FY2017 and FY 2018. ALMA was also utilized to investigate ISMs in galaxies. Finally we published a paper in Science in 2019 to report the first identification of cosmic web filaments connecting a number of galaxies and super-massive black holes. International press release was made, too.

研究分野：銀河天文学

キーワード：宇宙網 サブミリ波銀河 活動銀河核 分子ガス 原始銀河団

## 1. 研究開始当初の背景

銀河は宇宙における最も基本的な構成要素の一つである。一方で、宇宙の全物質の中で銀河の占める質量比はわずか 1%以下であり、バリオンに占める割合だけを見ても 10-20%に過ぎない。ではバリオンはどこに存在するのか。冷たい暗黒物質に基づく構造形成モデルでは、暗黒物質やバリオンは重力進化の結果として宇宙網(Cosmic Web)と呼ばれる蜘蛛の巣状のネットワーク構造を成していると考えられている[1](図 1)。バリオンの大部分は銀河ではなく、この宇宙網に存在しているらしい。これまで、このような宇宙網の結節点でガスの流入、凝集が進み銀河や超大質量ブラックホールが形成されるとの理論的描像が広く受け入れられてきた。したがって銀河形成史を解き明かす上で銀河だけでなく、宇宙網の理解が必要不可欠である。宇宙網の研究においては、長年、クエーサー等の明るい背景光源を使った吸収線による探査がその一翼を担ってきた。ただ、背景光源の表面密度は非常に小さく、視線上の 1 点については情報を得られるものの宇宙網の広がり、構造を知ることができない。

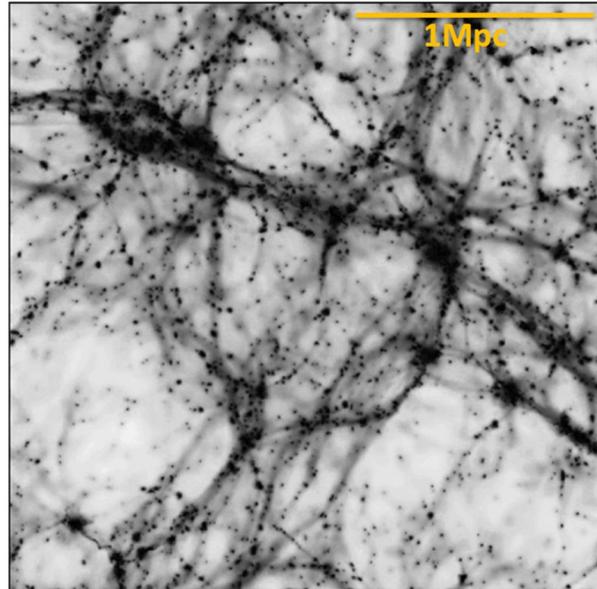


図 1: シミュレーションで予想される銀河形成期の宇宙網(Vogelsberger et al. 2014, 2.5 Mpc(または 800 万光年)四方の範囲)。ネットワークの結節点でガス密度の高い場所(濃い部分)で銀河が形成されるとされる。

## 2. 研究の目的

上述の吸収線による探査の弱点を克服し宇宙網の直接検出を可能にする期待された方法がバリオンの大部分を構成する水素の Ly 輝線の観測である。銀河間物質の大半を構成する中性水素の電離、蛍光が起きると広がった水素ライマン 輝線(以後、Ly 輝線)が放射される。そこで、この Ly 輝線を放つガスネットワークとして銀河間物質を捉えることができると期待されてきた。本研究の目的は、輝線によって宇宙網を実際に観測し、その性質を明らかにするとともに、銀河形成シナリオを観測的に検証することである。

## 3. 研究の方法

克服すべき点として、大部分の宇宙網は極めて淡い構造であり、現在の 10m 級光赤外望遠鏡ではその観測は困難であった。そこで本研究では、特に明るく輝いていると思われる宇宙網に注目する。対象領域は赤方偏移 3.1 の原始銀河団 SSA22 の中心部である。アルマ望遠鏡による深宇宙探査(アルマディープフィールド)が進められており、爆発的星形成銀河や活動銀河核がおよそ 1000 倍という極めて高い密度超過を示していることがわかった。この領域は原始銀河団の中心に位置し最も重力ポテンシャルが高く銀河間物質ガスの流入が進みやすく、また爆発的星形成銀河に含まれる大質量星や活動銀河核が紫外光を供給し、電離、蛍光によって周囲の銀河間物質ガスからの Ly 輝線を大幅に増幅させる、ことから宇宙網を調べる上で絶好な環境だと考えられる。

赤方偏移した Ly 輝線を三次元的に捉えるため、可視光面分光観測を行う。具体的には欧州南天天文台の持つ VLT 望遠鏡に搭載された MUSE を用いる。同時に、広視野に強みのあるすばる望遠鏡 Suprime-Cam のデータも活用する。銀河の赤方偏移の決定にはサブミリ波のアルマ望遠鏡や近赤外線のカック望遠鏡による観測を行う。

#### 4. 研究成果

本研究の主たる成果は2019年にサイエンス誌にて出版された[2]。赤方偏移3.1のSSA22原始銀河団領域において、1Mpc以上の範囲にわたって数多くの銀河をつなぐ水素Ly $\alpha$ 輝線フィラメントが初めて検出されたのである。さらに、アルマ望遠鏡やケック望遠鏡の観測から、多くの爆発的星形成銀河やX線で明るい活動銀河核が(見かけ上だけでなく)3次元的にこのガスネットワーク構造に付随していることも明らかになった。

これらの結果から、宇宙網を構成する水素ガスが銀河や活動銀河核の紫外線放射を受けて電離、蛍光によって水素Ly $\alpha$ 輝線を放射したと考えられる。原始銀河団は銀河形成期の宇宙の中でも最も活発に銀河形成の進む領域であり、まさに宇宙網からのガス供給によって銀河が生まれ、成長している現場を捉えた可能性が高い。この成果は宇宙網の撮像観測が可能であることを実証したものであり、銀河形成史の解明に向けて強力な道具がもたらされたことになる。

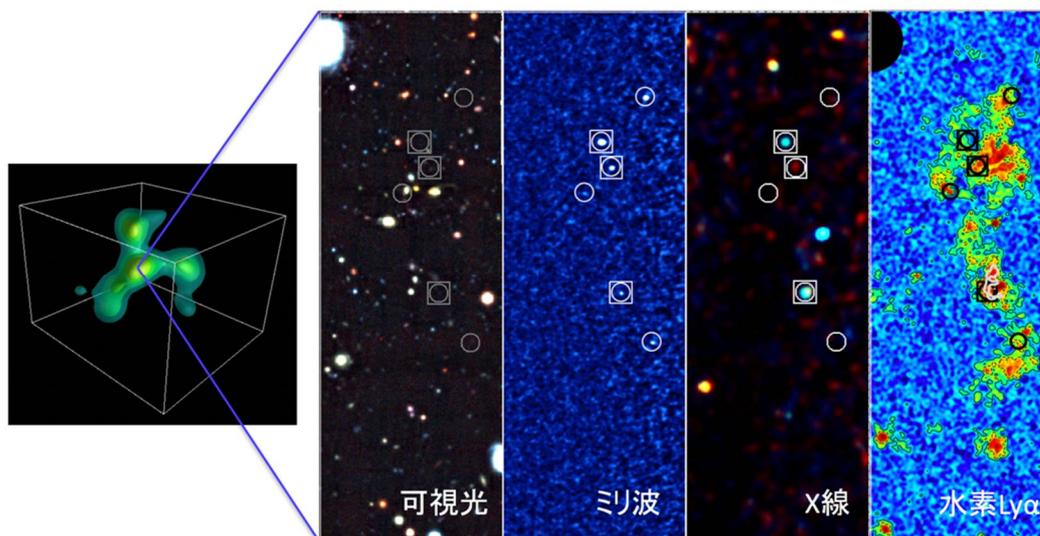


図2: (左)赤方偏移3の宇宙に発見された原始銀河団。3次元の大規模構造が見つまっている。(右)中心部に対して得られた多波長画像(一部, 0.45x1.3 Mpc)。ミリ波のALMA深宇宙探査の画像では、可視光では見逃されてきた原始銀河団に属する爆発的星形成銀河が多数確認できる。中にはX線で明るい、大質量ブラックホールへの質量降着で輝く活動銀河核(AGN)を持つものも確認できる。最近得られた水素ガスの観測から、薄いガスネットワークが銀河を繋ぐように検出された (Umehata et al. 2019)。

#### <引用文献>

[1] Vogelsberger et al. 2014, Nature, 509, 177

[2] Umehata et al. Science, 2019, 366, 97

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tamura Yoichi, Mawatari Ken, Hashimoto Takuya, Inoue Akio K., Umehata Hideki et al	4. 巻 874
2. 論文標題 Detection of the Far-infrared [O iii] and Dust Emission in a Galaxy at Redshift 8.312: Early Metal Enrichment in the Heart of the Reionization Era	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 27~39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Umehata Hideki, Hatsukade Bunyo, Smail Ian, Alexander David M, Ivison Rob J, Matsuda Yuichi, Tamura Yoichi, Kohno Kotaro, Kato Yuta, Hayatsu Natsuki H, Kubo Mariko, Ikarashi Soh	4. 巻 70
2. 論文標題 ALMA deep field in SSA22: Survey design and source catalog of a 20arcmin <sup>2</sup> survey at 1.1mm	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 65-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hashimoto Takuya, Laporte Nicolas, Mawatari Ken, Umehata Hideki et al	4. 巻 557
2. 論文標題 The onset of star formation 250 million years after the Big Bang	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 392~395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0117-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hatsukade Bunyo, Kohno Kotaro, Yamaguchi Yuki, Umehata Hideki et al	4. 巻 70
2. 論文標題 ALMA twenty-six arcmin <sup>2</sup> survey of GOODS-S at one millimeter (ASAGAO): Source catalog and number counts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 105-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato Yuta, Matsuda Yuichi, Iono Daisuke, Hatsukade Bunyo, Umehata Hideki, Kohno Kotaro, Alexander David M, Ao Yiping, Chapman Scott C, Hayes Matthew, Kubo Mariko, Lehmer Bret D, Malkan Matthew A, Michiyama Tomonari, Nagao Tohru, Saito Tomoki, Tanaka Ichi, Taniguchi Yoshiaki	4. 巻 70
2. 論文標題 A high dust emissivity index for a CO-faint galaxy in a filamentary Ly nebula at $z = 3.1$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 6-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Umehata H., Fumagalli M., Smail I., Matsuda Y., Swinbank A. M., Cantalupo S., Sykes C., Ivison R. J., Steidel C. C., Shapley A. E., Vernet J., Yamada T., Tamura Y., Kubo M., Nakanishi K., Kajisawa M., Hatsukade B., Kohno K.	4. 巻 366
2. 論文標題 Gas filaments of the cosmic web located around active galaxies in a protocluster	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 97 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw5949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tamura Yoichi, Mawatari Ken, Hashimoto Takuya, Umehata Hideki, et al	4. 巻 874
2. 論文標題 Detection of the Far-infrared [O iii] and Dust Emission in a Galaxy at Redshift 8.312: Early Metal Enrichment in the Heart of the Reionization Era	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 27 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hashimoto Takuya, Inoue Akio K, Umehata Hideki, et al.	4. 巻 71
2. 論文標題 Big Three Dragons: A $z = 7.15$ Lyman-break galaxy detected in [Oiii] 88 $\mu\text{m}$ , [Cii] 158 $\mu\text{m}$ , and dust continuum with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 71-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Massive Galaxy Formation at a z=3 proto-cluster revealed by ALMA and Subaru
3. 学会等名 Subaru Seminar (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ALMA deep survey in a z=3 proto-cluster field
3. 学会等名 IAU General Assembly, Build-up of Galaxy Clusters (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Massive Galaxies and surrounding matters at a z=3 proto-cluster
3. 学会等名 輝線 Intensity Mapping 研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ALMA Observations of LABs
3. 学会等名 Cosmic Shadow 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Extended Lyman-alpha emission around SMGs
3. 学会等名 What Matter(s) Around Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 An extremely rich group of starbursts and AGNs at a z=3.1 proto-cluster core
3. 学会等名 GALAXY EVOLUTION ACROSS TIME (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ADF22: ALMA Deep Field in SSA22
3. 学会等名 The galaxy ecosystem: Flow of baryons through galaxies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ADF22: ALMA Deep Field in SSA22
3. 学会等名 SMG20 - Twenty years of Submillimetre Galaxies: Star-forming galaxies at high redshifts. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ALMA Deep Field in SSA22
3. 学会等名 Sharp Views of Galaxy Formation and Evolution: Japan-German (JSPS-DAAD) Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ALMA deep survey in a proto-cluster field
3. 学会等名 Distant Galaxies from the Far South (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Galaxy formation and evolution seen by ALMA and Subaru
3. 学会等名 2020年日本天文学会春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅畑豪紀
2. 発表標題 赤方偏移3の宇宙網における銀河形成研究の現在地
3. 学会等名 12月つくば宇宙フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Gas filaments connecting galaxies and supermassive black holes in a proto-cluster
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅畑豪紀
2. 発表標題 gas filaments at z=3 revealed by MUSE
3. 学会等名 面分光研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 ngVLA and galaxy formation in proto-clusters
3. 学会等名 ngVLA Workshop ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Umehata
2. 発表標題 Active dust-obscured star-formation at a z=3 proto-cluster
3. 学会等名 IAU Symposium 352 Uncovering early galaxy evolution in the ALMA and JWST era ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----