

氏 名 菊田 智史

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2134 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Galaxy Formation at Cosmic Noon Probed with Lyman-Alpha
Emission

論文審査委員 主 査 准教授 高田 唯史
助教 小山 佑世
助教 秦 和弘
准教授 嶋作 一大
東京大学大学院理学系研究科
准教授 矢島 秀伸
筑波大学計算科学研究センター

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 菊田智史

論文題目 Galaxy Formation at Cosmic Noon Probed with Lyman-Alpha Emission

In the current framework of galaxy formation, cold gas accretion from the cosmic web which forms the backbone of the Universe with dark matter, fuels star formation and active galactic nucleus (AGN) activity in galaxies. After star formation proceeds, accreted gas from the intergalactic medium (IGM) interacts with gas ejected from galaxies via various feedback mechanisms in the circumgalactic medium (CGM, roughly referring to gas within a few times the virial radii of galaxies), regulating the galactic gas supply. Thus, the IGM and CGM are crucial components to reveal galaxy formation and evolution, and extensively studied for decades. Despite many efforts, however, there remains so much mystery about them, e.g., if the cosmic web filaments really exist at high redshift in the first place, how much the gas distribution is affected by their large-scale environments, and so forth.

In this thesis, we tackle these issues mainly using the Ly α emission line. Our goal is to detect the IGM in Ly α emission, which will lead to further investigation with spectrographs to constrain detailed physical properties of the IGM. At the same time, we aim to characterize the CGM around LAEs at $z\sim 3$, through stacking analyses. We especially focus on “protoclusters”, which are ancestors of today's galaxy clusters, since they are the site of the most active, massive galaxy formation within which various important processes are at work. We present our results of successful wide-field observations with the Hyper Suprime-Cam (HSC) on the Subaru Telescope targeted at a massive protocluster at $z=2.85$, at the center of which a “hyperluminous” QSO (HLQSO) resides. Using a narrow-band filter, we can detect redshifted Ly α emission from that redshift, and probe the IGM and CGM around the protocluster and other normal density fields at the same time, thanks to the wide field of view of the HSC.

In Chapter 2, we focus on the large- and small-scale Ly α structure around the QSO. As we took wide-field images centered at the protocluster and the QSO, we can probe diverse environments from a protocluster to void regions simultaneously. Ly α emitters (LAEs, young star-forming galaxies) are used to trace the large-scale structure at $z=2.85$ and the distribution of Ly α blobs (LABs, galaxies with extended Ly α emission) is studied. We revealed the large-scale filamentary structure extending from the protocluster. LABs are basically distributed along the structure, with larger ones particularly clustering around the HLQSO, confirming a previously noted tendency of

LABs to prefer denser environments. We then describe diffuse Ly α emission detected around the QSO revealed with our deep imaging observations. One diffuse nebula has no luminous UV/sub-mm counterpart within it and has a filamentary shape pointing toward the HLQSO. We propose a few explanations for this nebula; one interesting possibility is that the nebula may represent a cold filament which is predicted in simulations but remains observationally elusive until very recently.

With the same datasets, we can probe the CGM of LAEs through stacking analysis. Chapter 3 will focus on diffuse Ly α emission around LAEs, or Ly α halos (LAHs). The depth and wide field coverage of our data enable us to argue the dependence of LAHs on various galaxy properties, especially on Mpc-scale environments with unprecedented depth and sample size at $z\sim 3$. With 3490 LAEs within the field, we probe LAHs of various subsamples through stacking of their Ly α images. Subsamples are constructed with 5 quantity: UV magnitude, Ly α luminosity, Ly α equivalent width, local environment, and distance from the HLQSO. We succeeded to detect more extended Ly α emission compared to UV continuum emission in all subsample. UV-bright/Ly α -bright/low-Ly α equivalent width LAEs have more extended LAHs, while the distance from the QSO seems not to make a large difference in LAHs. Finally, combining our results and those in literature, we conclude that the dependence of LAH shapes of LAEs on large-scale environments is only evident in the densest parts of the Universe, i.e., in protoclusters. These results suggest that the CGM distribution around star-forming galaxies at $z\sim 3$ in normal environments is mainly determined by their own properties such as halo masses instead of their external conditions.

Our goal of detecting the IGM in Ly α emission is partially achieved in this thesis - we discovered a promising candidate and further characterization is still ongoing. At last in Chapter 4, we highlight key results and present our future directions to further approach the ultimate goal of understanding the galaxy formation at high redshift.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 菊田 智史

Title
論文題目 Galaxy Formation at Cosmic Noon Probed with Lyman-Alpha Emission

現在の銀河形成論の枠組みとして、“the cosmic web”(宇宙の蜘蛛の巣)と呼ばれる、「暗黒物質が骨格を形成するフィラメント状の構造」から冷たいガスの降着が起こり、その結果、星形成や活動銀河中心核の形成や進化が起こるとい説が支持されている。星形成の段階が進むと、銀河間物質(intergalactic medium:IGM)から降着するガスと、銀河周辺物質(circumgalactic medium:CGM)中で起こる様々なフィードバック機構によって銀河から噴出したガスとが相互作用し、銀河に対するガスの供給を制御するようになると考えられている。従って、IGMやCGMは銀河の形成進化を語る上で欠かせない要素であり、ここ数十年の間、盛んに研究が進められ、それらの特徴の理解も進んできている。しかしながら、宇宙の蜘蛛の巣と呼べるようなフィラメント状の構造が、高赤方偏移到実在するのか、また、どの程度のガスが降着したり、放出されたりしているのかはよくわかっていない。これらの疑問に答えるためには、高赤方偏移到におけるIGMやCGMの特徴を詳細に調べる必要がある。

本論文の目的は、

- (1) 高赤方偏移到に存在するIGMをライマンアルファ輝線を用いることで検出し、その物理的な特徴を詳細に調べるための分光観測につなげられるようにすること。
- (2) 赤方偏移到3近辺のライマンアルファ輝線天体(Lyman Alpha Emitter:LAE)周辺のCGMの特徴を、多くのLAEの情報を重ね合わせることで詳細に調べること。

の2つである。

この目的のために、出願者は特に原始銀河団という、現在の銀河団の祖先にあたる領域に着目した。その理由は、これが宇宙の中でもっとも活発に質量の大きな銀河が形成されている場所であると考えられ、様々かつ重要な物理過程がまさに起こっている事が考えられるからであった。

出願者は、まず、すばる望遠鏡の超広視野カメラである Hyper Suprime-Cam(HSC)を用いた赤方偏移到2.85に存在する大質量原始銀河団の観測を行った。この原始銀河団の中心には非常に明るいQSO(Quasi Stellar Object)が存在しているのが特徴である。狭帯域フィルターを用いることにより、赤方偏移到したライマンアルファ輝線を検出し、広視野を生かして、原始銀河団及びその周辺の銀河密度の高くない領域について同時に観測することで、赤方偏移到2.85におけるIGMとCGMについて統計的な調査を行った。

その結果、出願者は若い星形成銀河と思われるLAEの大局的な分布を調べることで、原始銀河団から延びる大規模なフィラメント状の構造の存在を明らかにした。それに加えて、ライマンアルファブロッブ(Lyman Alpha Blob:LAB)と呼ばれる、空間的に広がったライマンアルファ輝線領域を持つ天体の分布も明らかにした。LABはこのフィラメ

ント構造に沿う形で存在し、より大きなLABについては、原始銀河団中心部のQSO近辺に集中していることも判明した。QSO周辺の薄く広がった構造について詳しく調べたところ、その一つは明るい紫外光やサブミリ波で検出されるような対応天体を持たず、QSO方向にフィラメント状に伸びている事が判明した。様々な考察の結果、出願者は、この構造が冷たいガスの降着を起こしている宇宙の大規模フィラメント構造である可能性を示した。もしこの解釈が正しいことが今後の研究で明らかになれば、現在の銀河形成論において重要な要素である、冷たいガス降着に対して示唆を与えるユニークな例となる。申請者は既に追観測として、このフィラメント構造の正体を明らかにするための分光観測用の時間を獲得しており、今後の研究の発展も十分期待できる。

また、この観測によって検出された3450個の赤方偏移2.85のLAEについて、天体画像を重ね合わせ、その1次元プロファイルについての解析を行うことで、LAE周辺のライマンアルファ輝線の広がった成分 (Lyman Alpha Halo: LAH) について詳細に調査した。出願者は、紫外光等級、ライマンアルファ輝線の光度、ライマンアルファ輝線の等価幅、LAE周辺の密度超過度、QSOからの距離という5つの特徴量についてサブサンプルを作成して調査を進めた。その結果、紫外光等級が明るいもの、ライマンアルファ光度が大きいもの、ライマンアルファの等価幅が小さいものほどLAHはより広がっていることを明らかにした。また、原始銀河団の中心部についてのみ、LAHの大きさが他の領域に比べて大きいことも示した。原始銀河団中心部でLAHがより大きいという結果の原因の一つの可能性として、出願者は、原始銀河団の中心部に付随する非常に大きく広がったライマンアルファ輝線を発する構造の存在を主張している。本観測データだけでその解釈を確定することは困難ではあるものの、本研究で得られたLAEの数は類似の先行研究のものに比べて非常に多く、結果として説得力のあるものとなっている。この結果から、申請者は赤方偏移3近辺の星形成銀河の周りのCGMについて、その形や広がりを決めているのは、その銀河固有の特徴（例えばハローの質量）であり、宇宙大規模構造スケールでの環境による影響は少ない可能性を示した。

非常に明るいQSOを中心部に持つ原始銀河団はそれ自体大変貴重な存在であり、そのような領域を選んで、銀河形成論の中で示唆される冷たいガス降着の現場を探索した本研究結果は、非常に価値の高いものであると言える。

本研究において、データ取得から解析は、出願者が中心になって遂行したものである。結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、その内容は銀河形成の理解について大きく貢献するものである。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。