

氏 名 津久井 崇史

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2299 号

学位授与の日付 2022 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 Formation and Evolution of Galactic Structures Using Gas
and Stellar Kinematics

論文審査委員 主 査 田中 賢幸
天文科学専攻 准教授
大内 正己
天文科学専攻 教授
馬場 淳一
天文科学専攻 助教
河野 孝太郎
東京大学 大学院理学系研究科 教授
長峯 健太郎
大阪大学 大学院理学研究科 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 津久井 崇史

論文題目 Formation and Evolution of Galactic Structures Using Gas and Stellar Kinematics

Galaxies have internal structures such as a central black hole, bulge, disk, and stellar and dark matter halos. Identifying these structures across cosmic history and measuring their physical parameters (e.g., size, and detailed mass distribution) are crucial in revealing galaxies' past formation and evolution history, as each structure is suggested to drive and regulate the galaxy evolution dynamically. To accurately derive the mass distribution of galaxies, it is essential to have both (1) high-resolution observations required to derive central mass distribution and (2) wide-field observations covering the radius where dark matter starts to dominate. The recent development of ALMA allows us to obtain gas kinematics with sufficient angular resolution to measure the central black hole mass and stellar mass distribution separately in nearby galaxies and mass distribution of galaxies at high redshift galaxies at a redshift z of >4 .

No spectroscopic imaging instrument can simultaneously archive such a high resolution and wide field of view for a nearby galaxy (i.e., $z \sim 0$). NGC 1380 has a wealthy data set that includes: stellar kinematics measured from the atomic absorption features in a stellar continuum obtained by Multi-Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) on the Very Large Telescope (VLT); and stellar surface brightness distribution obtained by Advanced Camera for Survey (ACS) on Hubble Space Telescope (HST); and high-resolution CO(2-1) molecular gas kinematics by Band 6 receiver on ALMA. The stellar kinematics and surface brightness data cover the large area of the galaxy out to 120 arcsec. In contrast, the high-resolution molecular gas kinematics allows us to accurately trace the central mass distribution. We identified galactic structures: a central black hole, bulge, disk, stellar, and dark matter halos in the early-type galaxy NGC 1380 and accurately measured these mass distributions, exploiting and combining these archival data. We first directly measured the black hole mass in NGC1380, which was consistent with the known black hole and host galaxies scaling relations. Our measurements of each galactic structure in NGC 1380 locate the galaxy's disk in the stable regime in the bar-like instability, which may explain the absence of significant substructure in the disk in NGC 1380.

With the developed methods and experiences, we also investigated galactic structures more than 12 billion years ago, which was an unexplored epoch for detailed galactic structure. The luminous [CII] emission from an extreme star formation and ALMA's high sensitivity allow us to obtain the most detailed [CII] gas kinematics for an unlensed,

hyper luminous infrared galaxy (HyLIRG) at redshift 4.4, BRI 1335-0417. Analyzing the spatially resolved [CII] gas and dust kinematics, we have identified a rotating disk, a central compact structure like a bulge, and spiral structures on the disk in BRI 1335-0417. HyLIRGs are thought to be formed mainly through major mergers, in which we expect the presence of highly disturbed structures. But surprisingly, the dust-obscured internal structures revealed in this study are similar to those of a spiral disk galaxy. This may give us a clue to the detailed formation scenario of HyLIRGs and massive galaxies in cosmic history.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 津久井 崇史Title
論文題目 Formation and Evolution of Galactic Structures Using Gas and Stellar Kinematics

近傍銀河はバルジ、ディスク、渦巻腕といった特徴的な構造を示すことが知られている。これらの構造を体系づけたのがハッブル分類であり、これは現在でも銀河研究で広く用いられる分類方法となっている。銀河の構造的特徴は銀河の星形成率や星質量といった基本的性質とよく相関を示し、銀河の多様性を表す一つの要素となっている。それらの構造に加えて、巨大銀河の中心にしばしば観測される超巨大ブラックホールや、銀河の総質量の大部分を占めると考えられる暗黒物質も、銀河を構成する基本要素と考えることができるだろう。こういった銀河構造がいつどのように形成されたのかを包括的に明らかにすることは、銀河進化を理解する上で極めて重要である。

本論文はこの問いに対して、高品質かつ高空間分解能データの存在する近傍銀河と遠方銀河の 1 天体ずつに着目し、銀河の構造を詳細に調べた。まず、近傍銀河 NGC1380 の力学構造に注目している。この銀河にはハッブル宇宙望遠鏡による高空間分解能の I-band データ、VLT/MUSE による広域の 3 次元分光データ、さらに ALMA band-6 による CO(2-1) と dust continuum のデータが存在する。これほどデータの豊かな天体は稀である。まずは測光データをもとに multi-Gaussian expansion から銀河の構造を調べ、バルジ構造やディスク構造を同定した。撮像データにガスと星の力学情報を組み合わせることで、銀河をブラックホール、バルジ+ハロー、ディスク、暗黒物質に分離し、それぞれの質量分布を明らかにした。得られたブラックホール質量は、いわゆる $M-\sigma$ 関係と整合的である。また、銀河の質量分布は星が卓越している部分では、星種族の質量光度比が質量推定の大きな不定性になるが、そこを回避するために力学的情報のみで推定するという手法を開発している。さらに、一連の解析から得られた銀河の力学的性質から、星の orbital anisotropy やディスク(不)安定性の議論を展開している。

次に、遠方銀河に焦点を当て、BRI1335-0417 という ALMA band-7 の高空間分解能データのある、赤方偏移 4.4 の超高輝度赤外銀河を調べた。ALMA データでは[CII]輝線を検出することができ、その空間構造を調べると中心のバルジ構造に加え、回転する円盤成分が認められた。その円盤には渦巻構造が見られ、フーリエ解析からピッチ角約 27 度の 2 本腕と考えられる。遠方銀河の渦巻構造は銀河衝突によるものと区別が難しいが、速度構造の対称性から渦巻構造と解釈することが好ましいと議論している。さらに、ディスク構造の安定性も調べると、不安定なディスクであることが示唆され、渦巻構造の存在とも整合

的であった。総合して、赤方偏移 4.4 ですでに渦巻構造が出現していたことを強く示唆する結果を得た。

論文では以上の結果を受けて、銀河構造に関するまとめの議論につづき、今後への展望が示されている。今後も高空間分解能観測による銀河構造の詳細な観測データは ALMA や JWST から出てくることから、新しいデータを用いた研究のさらなる発展が期待される。

本論文で着目した二つの銀河の解析は出願者が主体的に行い、独自性のある結果を導き出すことができた。これにより審査委員会は、本論文が学位授与に値すると認めた。