

氏 名 竝木 茂朗

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2300 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 Origin of the Relation between Galaxy Morphology and its
Gas Content

論文審査委員 主 査 中西 康一郎
天文科学専攻 准教授
松田 有一
天文科学専攻 助教
本原 謙太郎
天文科学専攻 教授
嶋作 一大
東京大学 大学院理学系研究科 准教授
太田 耕司
京都大学 大学院理学研究科 教授

博士論文の要旨

氏名 竝木 茂朗

論文題目 Origin of the Relation between Galaxy Morphology and its Gas Content

The morphology of galaxies---the distribution of stellar components inside the galaxies---has long been believed to represent the evolutionary stages of galaxies. Many studies over the past decades demonstrated the relationship between the galaxy morphology and other physical parameters of galaxies, such as stellar mass (M^*), color, and star-formation rate (SFR). In this thesis, we focus on the amount of atomic hydrogen (HI) in the galaxies---a representative of the total gas content of galaxies available for their future star formation---and their morphology.

We perform a stacking analysis of the HI 21 cm spectra from the Arecibo Legacy First ALFA (ALFALFA) survey for the optically selected local galaxies ($0.01 < z < 0.05$) drawn from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS),

to study the average gas fraction of galaxies at fixed M^* and SFR.

The focus of this study is to investigate the morphological dependence of the HI gas mass fraction at fixed M^* and SFR, to minimize the effects of these parameters. We first confirm that the average gas fraction strongly depends on the stellar mass and SFR of host galaxies. Massive galaxies tend to have a lower gas fraction, and actively star-forming galaxies show higher gas fractions, consistent with many previous studies. We use three morphological classifications based on parametric indicator (Sersic index), non-parametric indicator (C-index), and visual inspection (smoothness from the Galaxy Zoo 2 project) measured on the optical images.

We find that there is no significant morphological dependence of the HI gas mass fraction at fixed M^* and SFR when we use C-index for the morphological classification. We confirm a similar result in the case that we use the Sersic index for the morphological classification. However, unfortunately, we cannot draw a firm conclusion due to the small number of samples for the statistical discussion when using the Sersic index. In contrast, interestingly, we demonstrate that the HI gas mass fraction for visually “smooth” galaxies is on average $0.71^{±0.11}$ dex lower than that of “non-smooth” galaxies with the same M^* and SFR. By comparing the visual morphology with other morphological indicators and inspecting the optical images of “smooth” and “non-smooth” galaxies, we find that the visual smoothness is sensitive to small-scale structures within the galaxies (spiral arms, barred bulges, and clumps). Our result suggests that even at fixed M^* and SFR, the presence of such small-scale structures (seen in the optical images) is linked to their total HI gas content.

Motivated by the significant difference in the HI gas fraction between smooth and non-

smooth galaxies at fixed M^* and SFR verified by the observations, we use the recent cosmological simulation (Illustris) to identify the physics behind relationship between galaxy morphology and its HI gas fraction. By tracking down the formation history of galaxies in the simulated universe, we find that smooth and non-smooth galaxies have similar stellar mass growth and star formation histories. At the same time, they show a significant difference in the gas mass growth and their past merger histories in the stellar mass range of $M^* < 10^{11} M_{\text{su}}$. We argue that the consecutive merger events to the gas-rich disk would cause gravitational instability and structure formation inside the galaxies, resulting in different appearances at $z=0$.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 竝木 茂朗

Title
論文題目 Origin of the Relation between Galaxy Morphology and its Gas Content

銀河進化の解明は現代天文学において非常に重要な研究課題となっている。銀河をガスと星からなる系であると考えその変換過程を進化と捉えれば、銀河の中でのガスや星の量の進化を明らかにすることは銀河進化解明に必須である。一方、銀河はそれぞれが特徴的な形態を持ち、その進化を明らかにすることも銀河進化を解明する上で重要なポイントである。このような観点から銀河形態と銀河を構成する物質質量との関係を探ることは、銀河進化の解明に向けた重要なアプローチである。銀河の形態(星の分布)とその物理量(星質量、星形成率など)との関係については、過去多くの研究がなされており、例えば形態と星形成率の間には明確な関連があることが判明している。これに対して、銀河の形態と中性水素ガス質量の関連についてもいくつかの先行研究はあるものの、関連の有無を含めて統一的な見解が得られているとは言い難かった。

出願者は、銀河の形態以外に中性水素ガス質量に影響を与えうる要因である星質量と星形成率の影響が先行研究においては取り除かれていないことに注目し、それらの影響を取り除いた上で銀河の形態と中性水素ガス質量の関連を明らかにしようとした。大規模サーベイ観測に基づく公開データを用いることで、星質量・星形成率および形態でサンプルを分割しても、有意な比較が可能な多数の銀河からなるサンプルを構築した。出願者は中性水素ガス質量と比較すべき銀河形態の分類指標として、**Sérsic index**(表面輝度のプロファイル、銀河の早期型・晩期型の指標)、**C-index**(表面輝度の中心集中度、バルジ・円盤の割合の指標)に基づいた分類に加えて、表面輝度分布が滑らかか滑らかではないか(以下「滑らかさ」と表記)による分類を採用した。

出願者は、銀河を同程度の星質量と星形成率を持つサブサンプルに分割して、それぞれのサブサンプルにおいて、銀河形態の違いと中性水素ガス質量(星質量に対する中性水素ガス質量の割合)を比較した。**Sérsic index** や **C-index** に基づいた形態分類に依存した中性水素ガス質量の違いは見られなかった。これに対して「滑らかさ」の違いによる分類では、「滑らかではない」銀河の方が「滑らかな」銀河よりも、より多くの中性水素ガス質量をもつことを発見した。

銀河形態のどのような差異が「滑らかさ」の違いの要因であるか、出願者は他の形態指標(**Sérsic index**、**C-index** や対称性など)との比較や「滑らかな」銀河と「滑らかではない」銀河の画像の比較を行った。出願者は銀河内部に渦状腕、棒状構造、塊状構造が存在すると「滑らかではない」と分類されることを指摘した。ここまでの観測データに基づく結果は、出願者を筆頭著者とした欧文査読論文としてすでに出版されている。

さらに、出願者は観測データの解析から見出された形態と中性水素ガス質量の関係がいかなる物理機構によってもたらされたのかを探るため、大規模宇宙論的シミュレーション

(Illustris シミュレーション)の結果を解析した。観測データと同じ手法で「滑らかさ」が決められたシミュレーション結果中の銀河について、シミュレーションの中での進化過程を追跡することで、形態によるガス質量の違いを生み出す要因に迫ろうとしたのである。出願者はまず、シミュレーション結果においても観測と同様に、「滑らかではない」銀河の方が「滑らかな」銀河よりも、より多くのガス質量をもつことを確かめた。出願者は、「滑らかではない」銀河が「滑らかな」銀河よりもガス質量が多い状況が、約 40~60 億年の過去に始まり現在まで続いていることを見出した。また、「滑らかではない」銀河が、非常に小規模な銀河合体(合体銀河同士の質量比率が 10 対 1 未満)をより多回数かつより高い頻度で経験していることを発見した。一方で、星形成率や銀河合体(銀河質量比率 10 対 1 以上)の過去の履歴にはいずれも、銀河形態による違いが無いことを見出した。「滑らかではない」銀河においては、過去から現在まで数 10 億年にわたってガス量の多い円盤構造が維持され、円盤不安定性が塊状構造等の内部構造の生成を誘発し、現在にいたるまで「滑らかではない」形態を維持する主な要因となったと結論付けている。また、絶え間ない高頻度の非常に小規模な銀河合体がガスの多い円盤の擾乱とそれに伴う内部構造の形成に寄与した可能性を示唆した。

出願者は、研究実施の時点で利用可能な各種の大規模サーベイデータを活用して、できる限り最大数の銀河サンプルを構築し研究を行い、銀河の中性水素ガス質量が銀河の「滑らかさ」という形態指標と関連があることを初めて明らかにした。中性水素輝線観測データに対しては自らスタッキング解析を実施し、大規模宇宙論シミュレーションデータの利用において銀河合体の履歴を解析するなど、独自の解析を実施している点も研究結果の新規性と独自性に結び付いている。

以上により、出願者の研究は、銀河進化の解明に向けた新たな知見を与えたと認められ、審査委員会は一致して本論文が学位の授与に値すると判断した。