

DISS. ETH No. 20697

A Continuity Approach to Galaxy Evolution

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Yingjie Peng

M.Sc. in Astrophysics, Université Paul Sabatier Toulouse III, France

M.Sc. in Space Technology, Luleå University of Technology, Sweden

Born July 3th 1982 in Sichuan

Citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon J. Lilly, examiner

Prof. Dr. Alvio Renzini, co-examiner

Zürich, 2012

Abstract

Understanding galaxy evolution is one of the most important issues in modern cosmology. The cosmological framework is well established and dark matter simulations of large-scale structure have met with great success. In order to produce realistic galaxies, baryon physics must be added onto the framework of dark matter haloes. However, due to the complexity of baryon physics such as star formation and feedback etc., these simulations usually fail to reproduce many of the observed properties of galaxies and also cannot clearly establish the relative importance of different processes in controlling the evolution of galaxy population.

Observationally, new technology and more powerful telescope have enabled the observation of $z > 7$ galaxies. Recent large multi-wavelength galaxies surveys such as the SDSS locally, COSMOS, GOODS and other deep surveys at high redshift, are delivering an unprecedented wealth of high quality data, which enable detailed or even precise study of various galaxy properties and their evolution over broad range of cosmic time. This makes the fully empirical and phenomenological approach become possible.

Although galaxy population may seem to be complicated and confusing, as it appears to be composed of infinitely complex different types and properties at first sight, when large samples of galaxies are studied, it appears that the majority of galaxies just follow simple scaling relations while the outliers represent some minority. We demonstrate the astonishing underlying simplicities of the galaxy population emerged from large surveys and take a new approach to the topic of galaxy evolution and derive the *analytical* forms for the dominant evolutionary processes that control the galaxy evolution through *continuity equations*. The goal is to use the observational material as directly as possible in order to identify the simplest things that are apparently demanded by the data and to define empirically based "laws" for the evolution of the population.

Our simple approach based on the continuity equations successfully explained the observed evolution of the galaxy stellar mass function (GSMF) and the origin of the Schechter form of the GSMF. All of these detailed quantitative relationships of the GSMF of different galaxy populations, which were not implicitly used in their construction, are indeed seen to very high precision in SDSS, leading strong support to our simple empirically-based approach. This approach has reproduced the essential features of the evolving galaxy population over cosmic time, such as the star formation history, star formation quenching history, galaxy merging history, galaxy stellar mass assembly history, the "anti-hierarchical" age-mass relation and the α -enrichment patterns for passive galaxies etc. This approach also makes many other interesting testable predictions, such as the inevitability and universality of the shape of the GSMF of star-forming galaxies and of all galaxies.

Most importantly, this approach has established a complete and self-consistent analytical

framework to study galaxy evolution and to understand the underlying physics. As although still phenomenological, this approach makes clear what the essential evolutionary characteristics of the relevant physical processes must in fact be.

Zusammenfassung

Das Verstehen der Evolution von Galaxien ist eines der wichtigsten Ziele der modernen Kosmologie. Der zugrundeliegende kosmologische Rahmen ist allgemein etabliert und Simulationen der dunklen Materie sind über weite Strecken sehr erfolgreich. Um jedoch realistische Galaxien zu erzeugen, muss die baryonische Physik den Halos dunkler Materie beigefügt werden. Aufgrund der Komplexität der baryonischen Physik wie z.B. Sternbildung oder Feedback scheitern entsprechende Simulationen unglücklicherweise gewöhnlich darin, viele der beobachteten Eigenschaften von Galaxien zu reproduzieren, und können nur schwerlich die relative Wichtigkeit verschiedener Kontrollprozesse für die Evolution der Galaxienpopulation eruieren.

Neue Technologien und leistungsfähige Teleskope haben es ermöglicht, Galaxien bei Rotverschiebung $z > 7$ zu beobachten. Neuere, grosse multi-Wellenlängen Galaxien Surveys wie die lokale SDSS, COSMOS, GOODS und andere tiefe Surveys bei hoher Rotverschiebung haben für eine nie da gewesenen Flut an qualitativ hochstehenden Daten geführt, die das präzise Studium verschiedener Galaxieneigenschaften und ihrer Evolution über weite Strecken kosmischer Zeit möglich macht. Damit geht die Möglichkeit gänzlich empirischer und phänomenologischer Zugänge einher.

Obwohl die Galaxienpopulation auf den ersten Blick kompliziert und verwirrend scheint, da sie scheinbar aus vielen verschiedenen Typen und Eigenschaften besteht, so zeigt sich jedoch, dass die Galaxien, wenn man grosse Datenmengen betrachtet, einfachen Relationen genügen, wobei Ausreisser lediglich eine Minderheit darstellen. Wir demonstrieren die erstaunliche zugrundeliegende Einfachheit der Galaxienpopulation, die sich aus der Betrachtung grosser Surveys ergibt, und nehmen einen neuen Zugang für die Evolution der Galaxien in Angriff, analytische Gestzmässigkeiten, die auf der Kontinuumsgleichung für Galaxien beruhen, für die dominanten evolutionären Prozesse herzuleiten. Das Ziel ist, diese einfachen Zusammenhänge so direkt wie möglich anhand der Beobachtungsdaten zu identifizieren und damit empirische "Gesetze" für die Evolution der Galaxienpopulation herzuleiten, die offenbar von den Daten gefordert werden.

Dieser simple Zugang, welcher auf der Kontinuumsgleichung basiert, erklärt erfolgreich die beobachtete Evolution der stellaren Massenfunktion der Galaxien (GSMF) und den Ursprung der Schechter-Form der GSMF. Zudem können wir die GSMF verschiedener Subpopulationen zu einander in Beziehung setzen wie zum Beispiel zwischen Zentral- und Satellitengalaxien oder zwischen roten und blauen Galaxien. Alle diese quantitativen Beziehungen der GSMF zwischen verschiedenen Galaxiepopulationen, die für die Herleitung nicht verwendet wurden, sind in SDSS in der Tat mit hoher Genauigkeit erfüllt, was eine starke Stütze für unseren einfachen empirisch-basierten Zugang darstellt. Dieser Zugang kann die wesentlichen Merkmale der Evolution der Galaxienpopulation wie Sternbildungsgeschichte, die Geschichte

der Anhäufung der stellaren Masse, die "anti-hierarchische" Alter-Masse Relation und die alpha-Anreicherungsmuster für passive Galaxien etc. über kosmische Zeiträume reproduzieren. Unser Zugang macht überdies noch viele weitere interessante, testbare Voraussagen wie die Unvermeidbarkeit und Universalität der GSMF Form von sternbildenden und von allen Galaxien.

Am wichtigsten ist jedoch, dass dieser Zugang einen kompletten und selbst-konsistenten analytischen Rahmen etabliert, mit welchem die Evolution von Galaxien studiert und die zugrundeliegende Physik verstanden werden kann. Obwohl rein phänomenologisch, dieser Zugang verdeutlicht, was die wesentlichen evolutionären Charakteristiken der relevanten physikalischen Prozesse sein müssen.