

DISS. ETH NO. 17594

The Evolution of Disk Galaxies in the COSMOS Survey

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

MARK THOMAS SARGENT

Dipl. phys. ETH Zürich

born on September 17th, 1979

citizen of Lüterswil-Gächliwil (SO), Switzerland and Canada

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. C. Marcella Carollo, examiner

Prof. Dr. Arnold Benz, co-examiner

Prof. Dr. Lucio Mayer, co-examiner

2007

Abstract

In this Ph.D. thesis we study the evolution of the disk galaxy population since redshift $z \sim 1$, i.e., during the last eight billion years. To this purpose we use data from the Cosmic Evolution Survey (COSMOS). COSMOS is currently the largest look-back survey with data from the radio wave band to X-rays acquired in a 2 deg^2 equatorial field (about ten times the area of the moon) in order to study the evolution of the galaxies as a function of environment since $z \sim 3$. The program includes the largest single observational Hubble Space Telescope (HST) project ever carried out. Thanks to the high resolution and the depth of the *I*-band HST images – the pixel scale of the space-based exposures is 0.4 kpc at $z \sim 1$ – the morphological properties of galaxies at optical wavelengths can be measured for galaxies observed when the universe was less than half as old as it is today.

Two techniques to measure galactic structure for intermediate redshift galaxies imaged with HST are adopted (cf. Chapter 2). Following the so-called “parametric” approach to quantify morphology, an analytic law – the Sérsic [114] profile – is fit to the projected two-dimensional surface brightness distribution of COSMOS galaxies. This is complemented by a “non-parametric” classification scheme, The Zurich Estimator of Structural Types (ZEST), in which measures of concentration, asymmetry, clumpiness, etc. are used to separate early-type from disk and irregular galaxies. Disk galaxies are further split into three categories according to the bulge-to-disk (B/D) ratio.

The COSMOS survey makes it possible to address unresolved questions concerning the evolution of disk galaxies (i.e., evolution of surface brightness, size, etc.) with a data set that is significantly larger – and suffers significantly less from cosmic sampling variance – than any sample employed in previous reports. Furthermore, the large statistical sample provided by COSMOS, and the large volumes of the survey, covering all scales of the large scale structure at all redshifts of relevance for our work, allow us to investigate the dependence of evolutionary trends in the disk galaxy population on (1) bulge-to-disk ratio B/D , and (2) environmental density.

In Chapter 3 we study the evolution of the size function of large disk galaxies between $z \sim 1$ and the present using a sample of $>11,000$ disk galaxies with $I \leq 22.5$, extracted from the central 38% of the COSMOS field. Chapter 4 is dedicated to the evolution of the bivariate size-luminosity function and of the opacity and surface brightness of large disk galaxies at $z < 1$. This analysis is based on the complete sample of $>27,500$ disk galaxies present over the entire area of the COSMOS field. In the same chapter we also investigate the history of star formation in disk galaxies, as well as the effects of environment on the detected evolutionary trends. The thesis ends with a summary of the presented analyses in Chapter 5. The Appendix provides a brief overview of the COSMOS survey and of the properties of the comparison sample of local SDSS galaxies, used as a local reference sample to calibrate our COSMOS data.

The most important findings of this thesis are as follows: (1) On average, the bulk of the large disk galaxy population had completed its growth by $z \sim 1$. Specifically, however, bulgeless disks were more frequent at high redshift than nowadays, while the fraction of bulge-dominated disks has grown steadily since $z \sim 1$. Processes of secular evolution have built up – or at least added stellar mass to – the bulge components of disk galaxies over the same period. (2) The typical sizes of bulgeless disk galaxies have hardly changed over the past eight billion years; the typical sizes of bulge-dominated galaxies have increased by about 30% over this time span. The changes in the relative abundance of bulged and bulgeless disks conspire to produce a weaker evolution in surface brightness in the disk galaxy population as a whole in comparison with the individual B/D classes. (3) Environment affects the evolution of disk galaxies. In particular, the colour evolution of disks becomes progressively weaker the denser the environment. Surface brightness and luminosity evolution on the other hand are apparently independent of environment.

The implications of these results provide a strong stimulus for future work on this subject; suggestions are outlined in Chapter 5.

Kurzfassung

Die vorliegende Doktorarbeit ist der Evolution von Scheibengalaxien seit Rotverschiebung 1 gewidmet, d.h. während der vergangenen acht Milliarden Jahre. Der Datensatz, der hierzu verwendet wird stammt aus im Rahmen des Cosmic Evolution Survey (COSMOS) durchgeführten Beobachtungen in einem ca. 2 Quadratgrad großen äquatorialen Beobachtungsfeld (selbiges ist damit rund 10 Mal größer als der Mond). COSMOS ist die bisher ambitionierteste Studie mit dem Ziel die Evolution von Galaxien und deren Variation in unterschiedlichen kosmischen Umgebungen zu verstehen. Das bisher aufwändigste je durchgeführte Beobachtungsprogramm mit dem Hubble Weltraumteleskop (HST) ist ein essentieller Bestandteil der zahlreichen Messkampagnen im COSMOS-Feld, welche das elektromagnetische Spektrum vom Radio- bis in den Röntgenbereich abdecken. Dank des hohen Auflösungsvermögens der HST-Aufnahmen im *I*-Filter und dank der langen Belichtungszeit können die strukturellen Eigenschaften von Galaxien bei sichtbaren Wellenlängen sogar noch für Objekte, die wir zu einer Zeit beobachten, als das Universum erst halb so alt war wie heute, auf Skalen von 0.4 kpc vermessen werden.

Zwei Methoden zur Quantifizierung galaktischer Morphologie anhand der COSMOS HST-Aufnahmen werden vorgestellt (siehe Kapitel 2). Es ist dies einerseits der sogenannte „parametrische“ Ansatz, bei dem eine analytische Funktion – das Profil von Sérsic [114] – zur Beschreibung des radialen Verlaufs der Oberflächenhelligkeit an die (projizierte) zweidimensionale Helligkeitsverteilung einer Galaxie angepasst wird. In Ergänzung dazu wird der auf „nicht-parametrischen“ Strukturindikatoren (z.B. Asymmetrie, Konzentration oder Klumpigkeit der Helligkeitsverteilung) basierende ZEST-Algorithmus (der ‘Zurich Estimator of Structural Types’) verwendet, um elliptische Galaxien von Scheibengalaxien und irregulären Systemen zu unterscheiden. Die Scheibengalaxien werden zudem je nach der relativen Intensität ihrer Scheibe und zentralen sphäroidalen Komponente noch in vier Unterklassen eingeteilt.

Das COSMOS-Projekt ermöglicht es, ungeklärte Aspekte der Galaxienevolution (z.B.

die Entwicklung der Oberflächenhelligkeit, der Galaxiengrößen, etc.) mit einem weit grösseren Datensatz als bislang zur Verfügung stand zu untersuchen und daraus statistisch zuverlässige Schlüsse zu ziehen. Aufgrund der großen Datenmenge und des erheblichen kosmischen Volumens, welches mit COSMOS beobachtet wird, kann man Galaxienentwicklung auch gezielt für spezifische Galaxienklassen untersuchen, etwa für Scheibengalaxien mit unterschiedlich ausgeprägter Sphäroidkomponente oder Galaxien in dicht oder dünn besiedelten Regionen des Universums.

Im 3. Kapitel betrachten wir die Entwicklung der Grössenverteilung (die sog. ‘size function’) grosser Scheibengalaxien zwischen $z \sim 1$ und der Gegenwart. Wir verwenden dazu über 11'000 Scheibengalaxien aus dem inneren Bereich des COSMOS HST Feldes (38% des gesamten Beobachtungsgebiets). Kapitel 4 ist der Evolution der parallelen Entwicklung von Galaxiengrösse und -helligkeit gewidmet sowie der Evolution der Oberflächenhelligkeit grosser Scheibengalaxien. Die Analyse stützt sich hierzu auf 27'500 Scheibengalaxien welche, über das gesamte COSMOS Beobachtungsfeld verteilt, mit HST zwischen $z \sim 0.2$ und 1 detektiert wurden. Gleichzeitig untersuchen wir in diesem Kapitel auch den Verlauf der Sternbildungsaktivität und die optische Dicke von Scheibengalaxien sowie den Einfluss der Umgebung auf die Entwicklung von Scheibengalaxien. Die Disseration schliesst mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Doktorarbeit in Kapitel 5, gefolgt vom Anhang, in dem das COSMOS Projekt und der Satz lokaler SDSS Galaxien, der für Vergleiche mit den Galaxien bei mittlerer Rotverschiebung verwendet wurde, kurz vorgestellt werden.

Folgende Resultate zählen zu den wichtigsten Ergebnissen, die im Rahmen dieser Doktorarbeit gewonnen wurden: (1) Die Mehrzahl der großen Scheibengalaxien hat ihr Wachstum vor acht Milliarden Jahren vollendet. In derselben Zeit haben jedoch Prozesse, die im Fachjargon als ‘secular evolution’ bezeichnet werden, zum Aufbau oder gar zur Neubildung von Sphäroidkomponenten im Zentrum der Scheibengalaxien geführt. Als Folge davon ist der Anteil der Scheibengalaxien mit Sphäroidkomponente seit $z \sim 1$ stetig gestiegen, während reine Scheibengalaxien heute weniger zahlreich sind als früher. (2) Die Abmessungen von reinen Galaxienscheiben hat sich in den letzten acht Milliarden Jahren kaum geändert, wogegen die typische Größe einer Scheibengalaxie mit Sphäroidkomponente in derselben Zeit um ca. 30% zugenommen hat. Die Verschiebung der relativen Anteile von reinen und Sphäroid-dominierten Scheibengalaxien bewirkt, daß die für die gesamte Population gemessene Helligkeitsentwicklung (in Form einer Abnahme seit $z \sim 1$) kleiner ist als für die verschiedenen Kategorien von Scheibengalaxien einzeln betrachtet. (3) Die kosmische Umgebung beeinflusst die Entwicklung von Scheibengalaxien dahingehend, daß Galaxienfarben sich in Regionen geringer Dichte stärker entwickeln als in dichter besiedelten. Die Abnahme der Oberflächenhelligkeit andererseits hängt kaum von der Umgebung ab.

Diese Erkenntnisse werfen viele neue Fragen auf, die wir im Kapitel 5 kurz erläutern werden.