

The formation and evolution of disk galaxies

Doctoral Thesis

Author(s):

Dutton, Aaron A.

Publication date:

2006

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005306453>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 16802

The Formation and Evolution of Disk Galaxies

A dissertation submitted to the

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Aaron A. Dutton

B.A., Cambridge University, 1998

M.Sc., The University of British Columbia, 2003

born 3rd June 1977

citizen of Canada and the United Kingdom

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. C. M. Carollo, examiner

Prof. Dr. G. Lake, co-examiner

2006

Abstract

The Cold Dark Matter (CDM) framework successfully explains the origin of large scale structure in the universe. However, on the scale of individual galaxies there are several unresolved issues. Chief amongst these is the origin of the exponential density profile of galactic disks, and the zero point of the Tully-Fisher relation. In this thesis we address these issues as well as the structural properties of dark matter haloes that host disk galaxies, and the evolution of the velocity-luminosity (VL) and size-luminosity (RL) relations.

By using analytic and semi-analytic models and observational constraints we single out a specific scenario of disk galaxy formation. As constraints we use the slopes, zero points and scatter of the VL and RL relations and the ratio of the observed velocity, $V_{2.2}$, to the virial velocity V_{vir} . Simultaneously applying these constraints rules out models with adiabatic contraction. Models with halo concentrations as found by Bullock et al. (2001a) require expansion of the halo. However, with the lower normalization to the power spectrum as favored by the 3rd year WMAP results, and our revised normalization to the Bullock et al. (2001a) model, we can reproduce all constraints in a model without adiabatic contraction. The absence of adiabatic contraction, and even the possibility of halo expansion, may result from non-spherical, clumpy gas accretion, where dynamical friction transfers energy from the gas to the dark matter. These models require relatively low galaxy spin parameters, λ_{gal} , and galaxy mass fractions, m_{gal} , contrary to naive expectations. However, the low λ_{gal} is consistent with the notion that disk galaxies predominantly survive in halos with a quiet merger history, while a low m_{gal} is also indicated by galaxy-galaxy lensing. The smaller than expected scatter in the RL relation, and the lack of correlation between the residuals of the VL and RL relations, respectively, imply that the scatter in λ_{gal} and in c need to be smaller than predicted for the full set of Λ CDM halos, again consistent with the idea that disk galaxies preferentially reside in halos with a quiet merger history.

We use a series of cosmological N-body simulations for a flat Λ CDM cosmology to investigate the structural properties of dark matter haloes, at redshift zero, in the mass range $3 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot} \lesssim M_{\text{vir}} \lesssim 3 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$. The lower mass limit extends previous studies at redshift zero by at least an order of magnitude. These properties include the concentration parameter, c , the spin parameter, λ , and the mean axis ratio, \bar{q} . For the concentration-mass relation we find $c \propto M_{\text{vir}}^{-0.11}$ in agreement with the model proposed by Bullock et al. (2001a), but inconsistent with the alternative model of Eke, Navarro & Steinmetz (2001). The normalization of the $c - M_{\text{vir}}$ relation, however, is 15 percent lower than suggested by Bullock et al. (2001a). We find significant correlations between c , λ , and \bar{q} , such that haloes with lower c have higher λ and lower \bar{q} . However, the strength of these correlations is significantly reduced when we remove haloes with large offsets, x_{off} , between the most bound particle and the center of mass. Haloes with large x_{off} are likely

to be unrelaxed, and thus unlikely to host disk galaxies.

We use a semi-analytic disk galaxy evolution model to investigate the origin of the exponential density profiles of disk galaxies, and the evolution of disk galaxy scaling relations. Our model follows the detailed accretion, cooling, and ejection of baryonic mass inside growing dark matter haloes. We include star formation based on a Schmidt law, chemical evolution and stellar population synthesis. In our model the surface density profile of the disk is determined by detailed angular momentum conservation, starting from the distribution of specific angular momentum as found in cosmological simulations. Without feedback the surface density profiles of the baryonic disk have a mean sersic index of $n \simeq 3.5$. However, the sersic index of the stellar disk is lower than that of the baryonic disk because star formation is suppressed at large radii. Feedback preferentially removes material at small radii, lowering the sersic index to $n \simeq 1$. The preferential removal of low angular momentum material also results in galaxy spin parameters that increase with decreasing halo mass, and that are larger than the spin parameter of the halo.

We find that the slope of the VL and RL relations is approximately independent of redshift, but the evolution of the zero point is strongly pass-band dependent. Between redshift $z = 1$ and $z = 0$ galaxies increase their B -band sizes by $\simeq 60\%$ at constant B -band luminosity (equivalent to $1 \text{ mag. arcsec}^{-2}$ in surface brightness), whereas the stellar sizes increase by only $\simeq 15\%$ at constant stellar mass. The zero points of the stellar mass VM and RM relations follow the same trends as the virial mass VM and RM relations, but with $\simeq 4$ times less evolution. This difference is related to the different times scales of mass accretion, gas cooling and star formation.

Kurzfassung

Das Kalte Dunkle Materie (CDM) Rahmenwerk erklärt erfolgreich die Entstehung der grossräumigen Struktur im Universum. Auf der Grössenskala von einzelnen Galaxien gibt es jedoch einige ungelöste Probleme. Allen voran die Entstehung des exponentiellen Dichteprofiles von Galaxienscheiben und der Nullpunkt der Tully-Fischer Relation. In dieser Arbeit werden sowohl diese Punkte behandelt, wie auch die strukturellen Eigenschaften von Dunkle Materie Halos, welche die Scheibengalaxien beherbergen, und die Entwicklung der Geschwindigkeit-Leuchtkraft (VL) und Grösse-Leuchtkraft (RL) Beziehungen.

Durch den Gebrauch von analytischen und semi-analytischen Modellen und Beobachtungsrandbedingungen haben wir ein spezifisches Entstehungsszenario von Scheibengalaxien herausgearbeitet. Als Randbedingungen verwenden wir die Steigungen, Nullpunkte und Streuungen der VL und RL Relationen und das Verhältnis der beobachteten Geschwindigkeit, $V_{2,2}$, zur Virialgeschwindigkeit V_{vir} . Gleichzeitige Anwendung dieser Randbedingungen schliesst Modelle mit adiabatischer Kontraktion aus. Modelle mit Halo Konzentrationen, wie sie von Bullock et al. (2001a) gefunden wurden, fordern eine Ausdehnung des Halos. Mit der niedrigeren Normalisierung des Power Spektrums, wie durch die 3. Jahr WMAP Ergebnisse bevorzugt, und unserer revidierten Normalisierung für das Bullock et al. (2001a) Modell, können wir alle Randbedingungen in einem Modell ohne adiabatische Kontraktion reproduzieren. Das Fehlen von adiabatischer Kontraktion, und sogar die Möglichkeit einer Halo Ausdehnung, könnte von einer nicht-sphärischen, klumpigen Gasanhäufung resultieren, wobei dynamische Reibung Energie vom Gas auf die Dunkle Materie Überträgt. Diese Modelle fordern einen relativ niedrigen Galaxien Spin Parameter, λ_{gal} , und Bruchteil der Galaxienmasse, m_{gal} , entgegen naiven Erwartungen. Ein niedriges λ_{gal} ist jedoch konsistent mit der Auffassung, dass Scheibengalaxien Überwiegend in Halos mit ruhiger Mergeschichte Überleben, während ein niedriges m_{gal} auch durch Galaxien-Galaxien Linsen nahe gelegt wird. Die Streuung in der RL Relation, die kleiner ist als erwartet, und das Fehlen einer Korrelation zwischen den Residua der VL und RL Relationen implizieren, dass die Streuung in λ_{gal} und in c kleiner sein muss als für die ganze Palette von Λ CDM Halos. Das ist wiederum konsistent mit der Vorstellung, dass sich Scheibengalaxien vorzugsweise in Halos mit einer ruhigen Mergeschichte befinden.

Wir machen Gebrauch von einer Reihe von kosmologischen N-Body Simulationen für eine flache Λ CDM Kosmologie, um die strukturellen Eigenschaften von Dunkle Materie Halos bei der Rotverschiebung Null im Massebereich $3 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot} \lesssim M_{\text{vir}} \lesssim 3 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$ zu untersuchen. Der niedrige Massewert erweitert vorhergehende Arbeiten bei der Rotverschiebung Null um mindestens eine Grössenordnung. Diese Eigenschaften beinhalten den Konzentrationsparameter, c , den Spinparameter, λ , und das mittlere Achsenverhältnis, \bar{q} . Für die Konzentrations-Masse Relation finden wir $c \propto M_{\text{vir}}^{-0.11}$ in Übereinstimmung mit dem

von Bullock et al. (2001a) vorgeschlagenen Modell, aber inkonsistent mit dem alternativen Modell von Eke, Navarro & Steinmetz (2001). Die Normalisierung der $c - M_{\text{vir}}$ Relation ist jedoch um 15 Prozent niedriger als von Bullock et al. (2001a) vorgeschlagen. Wir finden signifikante Korrelationen zwischen c , λ , und \bar{q} , so dass Halos mit niedrigeren c höhere λ und niedrigere \bar{q} haben. Die Stärke dieser Korrelationen wird jedoch signifikant reduziert, wenn wir die Halos mit grossen Offsets, x_{off} , zwischen den am meisten gebundenen Teilchen und dem Massenschwerpunkt weglassen. Halos mit hohem x_{off} sind wahrscheinlich nicht entspannt und darum ist es unwahrscheinlich, dass sie Scheibengalaxien beherbergen.

Wir verwenden ein semi-analytisches Evolutionsmodell von Scheibengalaxien, um die Entstehung des exponentiellen Dichteprofiles und die Entwicklung der Skalierungsrelationen von Scheibengalaxien zu untersuchen. Unser Modell verfolgt die detaillierte Ansammlung, Kühlung und den Auswurf von barionischer Materie in wachsenden Dunkle Materie Halos. Wir beziehen Sternbildung basierend auf einem Schmidt Gesetz, chemische Evolution und Entstehung von Sternpopulationen mit ein. Das Oberflächendichteprofil in unserem Modell ist durch detaillierte Drehimpulserhaltung gegeben mit einer anfänglichen Verteilung des spezifischen Drehimpulses, wie sie in kosmologischen Simulationen gefunden wird. Die Oberflächendichte der baryonischen Scheibe hat ohne Feedback einen mittleren Sersic Index von $n \simeq 3.5$. Der Sersic Index von stellaren Scheiben ist jedoch niedriger als derjenige der baryonischen Scheibe, da Sternbildung bei grossen Radien unterdrückt ist. Feedback entfernt vorzugsweise Material bei kleinen Radien, was den Sersic Index zu $n \simeq 1$ erniedrigt. Die vorzugsweise Entfernung von niedrigem Drehimpuls Material führt auch zu einem Spinparameter, welcher mit abnehmender Halomasse zunimmt und welcher grösser ist als der Spinparameter des Halos.

Wir finden, dass die Steigungen der VL und RL Relationen ungefähr unabhängig von der Rotverschiebung sind, aber die Evolution des Nullpunktes stark Pass-Band abhängig. Zwischen $z = 1$ and $z = 0$ erhöhen Galaxien ihre B -Band Grösse um $\simeq 60\%$ bei konstanter B -band Leuchtkraft (Äquivalent zu $1 \text{ mag. arcsec}^{-2}$ in Oberflächenhelligkeit), wobei die stellare Grössen bei konstanter stellaren Masse um nur $\simeq 15\%$ zunehmen. Die Nullpunkte der stellaren Masse VM und RM Relationen folgen denselben Trends wie die Virialmasse MV und MV Relationen, aber mit $\simeq 4$ mal weniger Evolution. Dieser Unterschied hängt mit der unterschiedlichen Zeitskala von Masseansammlung, Gaskühlung und Sternbildung zusammen.