

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DOCTORADO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)



**Análisis de las historias de formación estelar
de galaxias en diferentes ambientes:
desde baja densidad hasta alta densidad**

TESIS

que, para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

presenta

RENÉ ALBERTO ORTEGA MINAKATA

Director de Tesis: DR. JUAN PABLO TORRES PAPAQUI

Codirector de Tesis: DR. HEINZ ANDERNACH

(Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato)

Guanajuato, Gto., noviembre de 2015

Abstract

In this thesis, a value-added catalogue of 403,372 SDSS-DR7 galaxies is presented. This catalogue incorporates information on their stellar populations, including their star formation histories, their dominant emission-line activity type, inferred morphology and a measurement of their environmental density.

The sample that formed this catalogue was selected from the SDSS-DR7 (Legacy) spectroscopic catalogue of galaxies in the Northern Galactic Cap, selecting only galaxies with high-quality spectra and redshift determination, and photometric measurements with small errors. Also, galaxies near the edge of the photometric survey footprint were excluded to avoid errors in the determination of their environment. Only galaxies in the 0.03–0.30 redshift range were considered.

STARLIGHT fits of the spectra of these galaxies were used to obtain information on their star formation history and stellar mass, velocity dispersion and mean age. From the fit residuals, emission-line fluxes were measured and used to obtain the dominant activity type of these galaxies using the BPT diagnostic diagram.

A neighbour search code was written and applied to the catalogue to measure the local environmental density of these galaxies. This code counts the number of neighbours within a fixed search radius and a radial velocity range centered at each galaxy's radial velocity. A projected radius of 1.5 Mpc and a range of $\pm 2,500$ km/s, both centered at the redshift of the target galaxy, were used to search and count all the neighbours of each galaxy in the catalogue. The neighbours were counted from the photometric catalogue of the SDSS-DR7 using photometric redshifts, to avoid incompleteness of the spectroscopic catalogue.

The morphology of the galaxies in the catalogue was inferred by inverting previously found relations between subsamples of galaxies with visual morphology classification and their optical colours and concentration of light.

The galaxies in the catalogue were matched to six other catalogues, creating six subsamples from these matches used to characterize these new value-added catalogue. These catalogues are: the 2MIG catalogue of isolated galaxies with visual morphology; a catalogue of galaxies with visual morphology; a catalogue of galaxies with automated morphology; the first Galaxy Zoo catalogue of galaxies with visual morphology based on general public participation (citizen

science); the MaxBCG catalogue of Brightest Cluster Galaxies found with an automatic method; and a compilation of galaxies in rich clusters maintained by H. Andernach.

Using the information from the catalogue presented here, strong evidence of a downsizing effect in the formation of galaxies was found, with high mass galaxies showing older stellar populations and mean stellar ages at any redshift in the 0.03–0.30 range than low mass galaxies, which show increasing stellar ages with decreasing redshifts.

A strong relation between the dominant activity type and the inferred morphologies of galaxies was also found, with star-forming galaxies having the latest morphologies, Sy2-dominated galaxies being of intermediate types, LINER-like galaxies having earlier morphologies, and passive galaxies showing the earliest morphologies. This relation is observed regardless of the environment of the galaxies and for both high and low stellar mass galaxies. This implies that the morphology and emission-line activity of galaxies are tightly linked to their evolution, and mostly determined by their stellar mass.

Also, the morphology-density relation was recovered for galaxies in clusters, but was only observed weakly for the general galaxy population. This confirms that the processes that may change the morphology of individual galaxies are more common in the cluster environment but are mostly absent in other environments, and also implies that secular evolution may change the morphology of galaxies only for less massive galaxies that are still building up their mass.

The star formation histories of galaxies in our catalogue were found to be strongly dependent on their morphology, and consequently on their emission-line activity. Star-forming galaxies are late types that have the youngest populations; Sy2-dominated galaxies show a mixture of young and old populations, while LINER-likes have older populations; and passive, early-type galaxies have the oldest populations and have no current star formation. This is consistent with the idea that the processes that fix or change the morphology of galaxies are more internal and modulated by their mass, and are tightly related to how much gas is available to stimulate or stop star formation or AGN activity.

In contrast, the star formation histories of galaxies were found to be only weakly dependent on their environmental density, with isolated galaxies showing somewhat younger populations than galaxies in high-density environments. This is consistent with the weak morphology-density relation found for the general population of galaxies, and supports the idea that morphology and formation history are tightly related and, while the processes that change the morphology

are more common in the cluster environment, the environmental density itself does not directly affect much the formation history of galaxies.

The stellar mass of galaxies seems to modulate their activity and morphology: massive galaxies formed more rapidly in the past, efficiently converting their gas into stars, leaving little or no gas to form stars or fuel AGN activity later on, thus making them low-intensity active galaxies or passive galaxies. The formation of these massive galaxies would then only depend on the local density of protogalaxies, so a high merger rate in environments similar to compact groups of galaxies in the past would result in an early-type galaxy, effectively explaining the relation between mass, activity, morphology, stellar mean age and velocity dispersion of galaxies.

The catalogue presented here is useful and relevant because it is a publicly available catalogue of galaxies with consistent, homogeneous information that allows for direct comparisons between samples defined from galaxies in the catalogue, thus providing less biased results, and the large number of galaxies within it allows for statistically significant results, increasing their reliability.

Resumen en español

En esta tesis se presenta un catálogo de valor agregado de 403,372 galaxias provenientes del SDSS-DR7. Este catálogo incorpora información sobre sus poblaciones estelares, incluyendo su historia de formación estelar, su tipo de actividad por líneas de emisión dominante, morfología inferida, y una medida de la densidad de su ambiente.

La muestra que conformó el catálogo fue seleccionada de la región celeste norte galáctica del catálogo espectroscópico del SDSS-DR7 (Legacy), seleccionando sólo galaxias con espectro y determinación de su corrimiento al rojo de alta calidad, y mediciones fotométricas con errores pequeños. Además, galaxias cercanas al borde de la región cubierta por el muestreo fotométrico fueron excluidas para evitar errores en la determinación de su ambiente. Sólo galaxias en el rango 0.03–0.30 de corrimiento al rojo fueron consideradas.

Ajustes de modelos al espectro de estas galaxias usando el código STARLIGHT fueron usados para obtener información sobre su historia de formación estelar y su masa, dispersión de velocidades y edad estelares. A partir de los residuos de los ajustes, los flujos de algunas líneas de emisión fueron medidos y utilizados para obtener el tipo de actividad dominante de estas galaxias utilizando el diagrama de diagnóstico BPT.

Se escribió un código de búsqueda de vecinos que fue aplicado a las galaxias del catálogo para medir la densidad del ambiente local de estas galaxias. Este código cuenta el número de vecinos dentro de un radio de búsqueda fijo y un rango de velocidades radiales centrado en la velocidad radial de cada galaxia. Un radio físico de 1.5 Mpc y un rango de $\pm 2,500$ km/s fueron utilizados para buscar y contar todos los vecinos de cada galaxia en el catálogo. Los vecinos fueron contados sobre el catálogo fotométrico del SDSS-DR7 usando corrimientos al rojo fotométricos, para evitar efectos de incompletez en el catálogo espectroscópico.

La morfología de las galaxias en el catálogo fue inferida invirtiendo relaciones previamente encontradas entre submuestras de galaxias con morfología clasificada a ojo y sus colores ópticos y concentración de luz.

Se buscaron coincidencias de las galaxias en el catálogo dentro de otros seis catálogos, creando seis submuestras a partir de estas coincidencias utilizadas para caracterizar este nuevo catálogo de valor agregado. Estos catálogos son: el catálogo 2MIG de galaxias aisladas con clasificación morfológica visual (a ojo); un catálogo de galaxias con clasificación morfológica visual (a ojo); un catálogo de galaxias con morfología obtenida por un método automático; el

primer catálogo del proyecto Galaxy Zoo, que contiene la morfología de galaxias clasificada a ojo basándose en la participación del público en general (ciencia ciudadana); el catálogo MaxBCG de galaxias más brillantes en cúmulos encontradas utilizando un método automático; y una compilación de galaxias en cúmulos ricos mantenida por H. Andernach.

Usando la información del catálogo presentado aquí, se encontró evidencia fuerte de un efecto de *downsizing* en la formación de las galaxias, encontrando que las galaxias de alta masa muestran poblaciones estelares más viejas y edades medias estelares mayores a cualquier corrimiento al rojo en el rango 0.03–0.30 que las galaxias de baja masa, que en contraste muestran edades estelares que se incrementan con el corrimiento al rojo decreciente.

También se encontró una relación fuerte entre el tipo de actividad dominante y las morfologías inferidas de las galaxias: las galaxias que forman estrellas tienen las morfologías más tardías; las galaxias dominadas por emisión tipo Sy2 son tipos intermedios; las galaxias tipo LINER tienen morfologías comparativamente más tempranas; y las galaxias pasivas muestran las morfologías más tempranas. Esta relación se observa independientemente del ambiente de las galaxias y en muestras de alta y baja masa estelar. Esto implica que la morfología de las galaxias y la actividad expresada en sus líneas de emisión están estrechamente relacionadas a su evolución, y están principalmente determinadas por su masa estelar.

La relación morfología-densidad también fue recobrada para galaxias en cúmulos, pero fue observada sólo débilmente para la población general de galaxias. Esto confirma que los procesos que pueden cambiar la morfología de galaxias individuales son más comunes en el ambiente del cúmulo pero están en su mayoría ausentes en cualquier otro ambiente, y también implica que la evolución secular puede cambiar la morfología de las galaxias sólo en galaxias de baja masa que aún están reuniendo su masa.

Se encontró que las historias de formación estelar de las galaxias en nuestro catálogo dependen fuertemente de su morfología, y en consecuencia de su actividad medida a través de sus líneas de emisión. Las galaxias que forman estrellas son tipos tardíos que tienen las poblaciones más jóvenes; las galaxias dominadas por actividad tipo Sy2 muestran una mezcla de poblaciones jóvenes y viejas, mientras que las galaxias tipo LINER tienen poblaciones comparativamente más viejas; y las galaxias pasivas de tipo temprano tienen las poblaciones más viejas y no tienen nada de formación estelar actual. Esto es consistente con la idea de que los procesos que fijan o cambian la morfología de las galaxias son más internos y modulados por su masa, y

están estrechamente relacionados con qué tanto gas está disponible para estimular o detener la formación estelar o la actividad nuclear.

En contraste, se encontró que las historias de formación estelar de las galaxias en nuestro catálogo dependen sólo débilmente de su densidad ambiental, con galaxias aisladas que muestran poblaciones ligeramente más jóvenes que las galaxias en ambientes de alta densidad. Esto es consistente con la débil relación morfología densidad encontrada para la población general de galaxias, y apoya la idea de que su morfología y su historia de formación están estrechamente relacionadas y, incluso encontrando que los procesos que cambian su morfología son más comunes en el ambiente de cúmulo, la densidad ambiental en sí misma no afecta mucho directamente la historia de formación de las galaxias.

La masa estelar de las galaxias parece modular su actividad y morfología: las galaxias masivas se formaron más rápidamente en el pasado, convirtiendo eficientemente su gas en estrellas, dejando poco o ningún gas para formar nuevas estrellas o alimentar un AGN después, volviéndolas entonces galaxias activas de baja intensidad o galaxias pasivas. La formación de estas galaxias masivas dependería entonces de la densidad local de protogalaxias, por lo que una tasa más alta de fusiones entre ellas en ambientes similares grupos compactos de galaxias en el pasado resultaría en una galaxia de tipo temprano, explicando efectivamente la relación entre masa, actividad, morfología, edad estelar media y dispersión de velocidades de las galaxias.

El catálogo presentado aquí es útil y relevante porque es un catálogo de galaxias disponible públicamente con información consistente y homogénea que permite comparaciones directas entre muestras de galaxias definidas a partir del catálogo, obteniendo así resultados con menos sesgos, y el gran número de galaxias en él permite obtener resultados estadísticamente significativos, incrementando su confiabilidad.

Contents

1	Introductory remarks	1
1.1	Background	1
1.2	Goals of this thesis	5
2	Sample selection	9
2.1	Selection criteria	9
2.2	The OMCat value-added catalogue of galaxies	12
2.3	Characterization and comparison subsamples of OMCat	15
3	Stellar populations properties	19
3.1	Stellar populations synthesis and spectral fitting	19
3.2	On how STARLIGHT works	22
3.3	On how STARLIGHT was used for this work	26
4	Emission-line activity	29
4.1	Emission-line diagnostics	29
4.2	The OMCat sample of active and passive galaxies	30
5	Inferred morphology	33
5.1	Inferring the morphology of galaxies	33

5.2 Testing the inferred morphology	36
6 Environmental density	45
6.1 Defining an environmental density parameter, N	45
6.2 Testing the environmental density, N	50
7 Results	57
7.1 Stellar population properties, activity, morphology and environment of OMCat galaxies	57
7.2 The star formation histories of OMCat galaxies	76
8 Discussion and conclusions	87
8.1 Discussion	87
8.2 Conclusions	98
8.3 Future work using methods, results or products of this thesis	100
Appendices	103
A Publications that include parts of the results of this thesis	103
B Information obtained from the SDSS	115
C About galaxies classified as NA	117
D About the $M_{\text{stars}}-\sigma_{\text{stars}}$ and $L_r-\sigma_{\text{stars}}$ relations	125

E	About completeness of OMCat and analysis on volume-limited samples	128
F	Useful astronomical quantities	133
	References	135

List of Figures

2.1	Map of galaxies in OMCat	11
2.2	EPDF of stellar mass and apparent magnitude	15
3.1	Three different IMFs	21
3.2	Schematic representation of stellar population synthesis and spectral fitting	23
3.3	Extinction laws available to be used in STARLIGHT	23
3.4	Example of STARLIGHT results	25
3.5	Colour image of galaxy UGC 6070 from the SDSS.	26
3.6	Spectra of the 150 SSPs used for spectral fitting	27
4.1	BPT diagram of galaxies in OMCat	31
5.1	Inferred morphology distribution of galaxies in OMCat	35
5.2	Inferred morphology comparison with visual morphologies	37
5.3	Inferred morphology of ACO and MaxBCG samples	40
5.4	Huertas-Company11 morphology comparison 1	41
5.5	Huertas-Company11 morphology comparison 2	42
5.6	Galaxy Zoo morphology comparison	43
6.1	Schematic representation of the neighbour search algorithm	47
6.2	Histogram of N for all galaxies in OMCat.	49
6.3	Dependence of the photometric redshift on the spectroscopic redshift	50
6.4	Variation of N using different sizes of the search region	51
6.5	Mean number density of galaxies in the neighbours sample	53
6.6	Histograms of N for the 2MIG, MaxBCG and ACO samples	54
6.7	Different measurements of N of MaxBCG galaxies	55
7.1	Redshift evolution of mean stellar age and velocity dispersion	58
7.2	Redshift evolution of stellar mass	60
7.3	Redshift evolution of emission-line activity	61
7.4	Redshift distribution of environmental density	61
7.5	Redshift evolution of inferred morphology	62
7.6	Inferred morphology of active galaxies	64
7.7	Environmental density of active galaxies	66
7.8	Mean stellar age of active galaxies	67

7.9	Velocity dispersion of active galaxies	68
7.10	Stellar mass of active galaxies	69
7.11	Inferred morphology and environmental density	70
7.12	Inferred morphology and stellar age and velocity dispersion	71
7.13	Inferred morphology and stellar mass	72
7.14	Environmental density and stellar age and velocity dispersion	73
7.15	Environmental density and stellar mass	74
7.16	Stellar mass and mean stellar age	75
7.17	Stellar mass and velocity dispersion	77
7.18	SFH of all OMCat galaxies	78
7.19	SFH of OMCat galaxies by activity	79
7.20	SFH of OMCat galaxies by morphology	80
7.21	SFH of OMCat galaxies by environmental density	81
7.22	SFH of OMCat galaxies by morphology and environmental density 1	82
7.23	SFH of OMCat galaxies by morphology and environmental density 2	83
7.24	SFH of OMCat galaxies by activity and environmental density 1	85
7.25	SFH of OMCat galaxies by activity and environmental density 2	86
8.1	Inferred morphology and stellar mass	90
8.2	Inferred morphology of very low density, active galaxies	92
8.3	Inferred morphology of low density, active galaxies	93
8.4	Inferred morphology of intermediate density, active galaxies	94
8.5	Inferred morphology of high density, active galaxies	95
8.6	Inferred morphology of very high density, active galaxies	96
C.1	Inferred morphology of active, passive and NA galaxies	118
C.2	Environmental density of active, passive and NA galaxies	119
C.3	Mean stellar age of active, passive and NA galaxies	120
C.4	Velocity dispersion of active, passive and NA galaxies	121
C.5	Stellar mass of active, passive and NA galaxies	122
C.6	Redshift distribution of environmental density by activity type 1	123
C.7	Redshift distribution of environmental density by activity type 2	124
D.1	$M_{\text{stars}}-\sigma_{\text{stars}}$ relation	126
D.2	$L_r-\sigma_{\text{stars}}$ relation	127

E.1	Redshift distribution of the mean stellar age for volume-limited samples	129
E.2	Stellar mass and mean stellar age for volume-limited samples	130
E.3	Stellar mass and inferred morphology for volume-limited samples	131
E.4	Inferred morphology and activity for volume-limited samples	132

List of Tables

2.1	OMCat catalogue sample	14
5.1	Relations of colours and concentration index with visual morphology	34
5.2	Visual morphology rescaling and correspondence	36
5.3	Comparison with Nair10 sample	38
5.4	Discrepancies and rms between inferred morphologies and Nair10 sample	39
B.1	Information obtained from the SDSS	115
B.2	Description of all possible values of <code>zstatus</code>	116
F.1	Useful astronomical quantities	133

*A mis familias;
ahora sí es la última tesis...*

*For me, it is far better to grasp the Universe as it really is than to persist in delusion,
however satisfying and reassuring.*

Carl Sagan, in *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*

Agradecimientos (Acknowledgements)

A mis familias	To my families
A mis hermanos y hermanas	To my brothers and sisters
A mis amigos y amigas	To my friends
A mis compañeros y compañeras	To my colleagues and classmates
A mis directores y tutores	To my advisors and mentors
A mis sinodales	To my thesis jury
A la UG	To the University of Guanajuato
A Guanajuato	To Guanajuato

Muchas gracias, en verdad.
Thank you very much indeed.