

Dissertation  
submitted to the  
Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics  
of the Ruperto-Carola University of Heidelberg, Germany  
for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

Diplom-Physicist: Angela Hempel  
born in: Karl-Marx-Stadt (today Chemnitz), Germany

Oral examination: 03<sup>th</sup> November 2004



# Classification and Abundance of Extremely Red Galaxies with $R-J \geq 5$

Referees: Prof. Dr. Hans-Walter Rix  
Prof. Dr. Immo Appenzeller



### **Klassifikation und Häufigkeit von extrem roten Galaxien mit $R-J \geq 5$**

Diese Arbeit untersucht die Häufigkeit und die Eigenschaften extrem roter Galaxien. Obwohl die Existenz dieser auffälligen Galaxien schon lange bekannt ist, gibt es noch eine ganze Reihe offener Fragen bezüglich ihrer Natur, Entstehung und Entwicklung. Das liegt zu einem in der Anzahl unterschiedlicher Definitionen des Begriffes “extrem rot”, die zur Folge haben, dass unterschiedliche Galaxien Populationen diese Bezeichnung erhalten. In dieser Arbeit werden Galaxien mit einer Farbe von  $R-J \geq 5$  als extrem rot klassifiziert. Der verwendete Datensatz beruht auf Beobachtungen im R und J-band. Mittels dieser Daten wurde ein Katalog von 160 Objekten zusammengestellt, die bereits auf Grund ihres Helligkeitsprofils oder ihrer Magnitude als Galaxien eingestuft wurden. Die resultierende Oberflächen- und Volumendichte wird mit den Ergebnissen für vergleichbare Objekte, wie zum Beispiel Galaxien mit  $R-K \geq 7$ , oder anderen, hoch rotverschobenen Galaxien verglichen. Da es bis jetzt noch keine Spektren oder spektrale Energieverteilung für diese extrem roten Galaxien gibt, benutzen wir stellare Populationssynthese Modelle um festzustellen, welche Klasse von Galaxien das gewählte Farbkriterium erfüllen. Getestet wurden unterschiedliche Sternentstehungsszenarien für elliptische Galaxien, staubreiche Galaxien mit intensiver Sternentstehung (staubreichen Starbursts) und Spiralgalaxien. Einzig elliptische Galaxien bei einer Rotverschiebung von mindestens  $z=1.4$  und Sternpopulationen die bei  $z=3$  und früher entstanden sind, werden im Laufe ihrer Entwicklung eine spektrale Energieverteilung aufweisen, die als “extrem rot” eingestuft werden kann. Mit den Ergebnissen von Vielfarben-Aufnahmen an einer kleinen Auswahl von Feldern, haben wir eine Methode zur Unterscheidung von alten elliptischen Galaxien und staubreichen Starbursts getestet und deren relative Häufigkeit in einer Probe von Galaxien mit einer Farbe von  $R-K \geq 5$  berechnet. Trotz der geringen Anzahl von Objekten, stellen wir eine gute Übereinstimmung der relativen Häufigkeit beider Populationen mit bereits veröffentlichten Arbeiten fest.

### **Classification and Abundance of Extremely Red Galaxies with $R-J \geq 5$**

This thesis investigates the abundance and properties of extremely red galaxies (EROs). Although the existence of such conspicuous galaxies has been known for some time, there are numerous open questions regarding their nature, formation, and evolution. One reason is the number of different colour criteria applied to select EROs. Hence, different galaxy populations are called “extremely red”. In this thesis, galaxies with  $R-J \geq 5$  are classified as extremely red. The available data set is based on optical (R-band) and near-infrared (J-band) observations. We have compiled a catalogue of 160 objects, which were classified as galaxies either due to their surface brightness distribution or their brightness. Their surface and comoving volume density is compared to that of similar objects, such as galaxies with  $R-K \geq 7$ , and other, high-redshift galaxies. Since there are no spectra or spectral energy distributions of such galaxies available, we use stellar population synthesis models to predict which class of galaxies can satisfy our colour criterion. We test various star formation scenarios, both for elliptical galaxies, dusty starbursts and spiral galaxies. Only elliptical galaxies at redshift  $> 1.4$  and which have undergone the last phase of star formation at redshift  $z=3$ , have red enough spectral energy distributions to be classified as an ERO. Using multi-colour imaging on a small sample of fields, we have tested a photometric method to separate old elliptical galaxies and dusty starbursts with colours redder than  $R-K=5$ . Despite the small number of objects, we find that the relative abundance of both galaxy types is in good agreement with previously published results.



*There is a theory which states that if ever anybody discovers exactly what the universe is made for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable. There is another theory which states that this has already happened.*

Douglas Adams





# Contents

<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 The MPIA Wide Field EROs Survey</b>	<b>7</b>
2.1 Optical data . . . . .	8
2.1.1 Zero-point calibration . . . . .	8
2.1.1.1 Galaxy number counts - The Metcalfe method . . . . .	9
2.1.1.2 Cross check against the SDSS catalogue . . . . .	9
2.1.1.3 Surface density of galaxies . . . . .	13
2.1.1.4 Star/Galaxy classification . . . . .	17
2.1.1.5 Galactic coordinates . . . . .	18
2.1.2 Detection limit . . . . .	21
2.2 Near-infrared data . . . . .	22
2.3 Source detection . . . . .	23
2.3.1 Star - Galaxy Separation . . . . .	23
2.3.2 Stellarity Index . . . . .	24
2.3.3 Detection Limit Tests . . . . .	24
<b>3 Colour-redshift classification of EROs</b>	<b>27</b>
3.1 Spectral energy distribution and colours of elliptical galaxies . . . . .	29
3.1.1 Initial Mass Function . . . . .	30
3.1.2 Initial Metallicity and Formation redshift . . . . .	32
3.1.3 Influence of the Star Formation Rate . . . . .	34
3.2 Starburst Galaxies . . . . .	37
3.3 Spiral galaxies . . . . .	41
3.4 Possible candidates for EROs . . . . .	44
<b>4 Results</b>	<b>47</b>
4.1 J-band galaxy counts . . . . .	47
4.1.1 Uncertainties in the number counts . . . . .	50
4.1.2 Comparison with other surveys . . . . .	50
4.2 Colour - magnitude distribution . . . . .	51
4.3 The abundance of extremely red galaxies . . . . .	54
4.3.1 Surface density of EROs . . . . .	54
4.3.2 Estimates of the volume density . . . . .	57
4.3.3 Spatial distribution . . . . .	57

<b>5</b>	<b>Multi-colour follow-up with ISAAC</b>	<b>59</b>
5.1	Observations and data reduction . . . . .	59
5.2	Colour distribution and abundance of the ISAAC sources . . . . .	60
5.3	The Abundance of old ellipticals and dusty starbursts . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Summary and Outlook</b>	<b>67</b>
6.1	Wide-field Survey for EROs with $R-J \geq 5$ . . . . .	67
6.2	Using the R-band GNC-MR for photometric zero-point calibration . . . . .	69
6.3	The ISAAC sample - abundances and classification of $R-K \geq 5$ EROs . . . . .	69
6.4	Outlook . . . . .	70
<b>A</b>	<b>Acronyms and Symbols</b>	<b>75</b>
<b>B</b>	<b>Coordinates of the 79 survey fields</b>	<b>77</b>
<b>C</b>	<b>Catalogue of EROs</b>	<b>81</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>86</b>
	<b>Acknowledgment</b>	<b>95</b>