

Edge-on Disk Galaxies

*A Structure Analysis
in the Optical and Near-Infrared*

Proefschrift

ter verkrijging van het doctoraat in de
Wiskunde en Natuurwetenschappen
aan de Rijksuniversiteit Groningen
op gezag van de
Rector Magnificus, Dr. F. van der Woude,
in het openbaar te verdedigen op
vrijdag 31 oktober 1997
des namiddags te 2.45 uur

door

RICHARD DE GRIJS

geboren op 20 december 1969
te Amsterdam

Promotor: Prof. Dr. P.C. van der Kruit
Referent: Dr. R.F. Peletier

ISBN: 90-367-0808-7

El Sabio Lucha Consigo, El Necio No

(Spanish proverb / Spaans spreekwoord)

Front cover:

I-band image of IC 2531, one of the best-studied edge-on disk galaxies on the southern sky. The peanut-shaped bulge and the central dust lane of this Sc-type galaxy are clearly visible. The observations were obtained with the Dutch 92cm telescope of the European Southern Observatory at La Silla, Chile.

Omslagfoto:

Negatiefafbeelding van een van de best bestudeerde sterrenstelsels in zij-aanzicht aan de zuidelijke sterrenhemel, IC 2531, waargenomen in rood licht. De “pindavormige” centrale lichtconcentratie en de stofband in dit sterrenstelsel van het type “Sc” zijn duidelijk zichtbaar. De waarnemingen voor deze afbeelding werden verkregen met behulp van de Nederlandse telescoop (spiegeldoorsnede 92 cm) op de Europese Zuidelijke Sterrenwacht “La Silla” in Chili.

<i>Voorwoord – Preface</i>	<i>11</i>
<i>Samenvatting – Summary in Dutch</i>	<i>13</i>
1 Sterrenstelsels als bouwstenen van het Heelal	13
1.1 Een kwestie van schaal	13
1.2 Morfologie: sigaren, sombrero's en spiralen	13
1.3 Samenstelling	15
1.4 Stof	16
2 Intrigerende, maar lastige problemen...	17
3 Een vertroebeld beeld wordt scherper	18
3.1 Licht en materie	18
3.2 Vreemde voorvallen in de buitenwijken	19
3.3 Kleuren en kameleons	19
4 Een afgesloten hoofdstuk?	20
<i>Chapter 1 The three-dimensional light distribution in disk galaxies</i>	<i>21</i>
1 Introduction	21
2 Vertical disk components	21
2.1 The thin disk	21
2.1.1 The isothermal sheet	21
2.1.2 The exponential model	22
2.1.3 Intermediate solution	22
2.1.4 Isothermal versus exponential distributions	22
2.1.5 A multi-component model	22
2.2 The Galaxy	23
2.3 The vertical scale height	23
2.4 The thick disk	24
3 Stellar warps in galaxy disks	24
3.1 Introduction	24
3.2 The Galactic warp	25
3.3 The formation and persistence of gaseous and stellar warps	25
3.3.1 Comparison between stellar and gaseous warps	25
3.3.2 Gravitational interaction	26
3.3.3 Infall of extragalactic material	26
3.3.4 Intergalactic magnetic fields	26
3.3.5 Disk bending modes	27
3.3.6 The effects of a dark halo and self-gravity	27
3.3.7 Concluding remarks	28

4	Disk colours and colour gradients in edge-on galaxies	28
4.1	Galaxy structure inferred from colour profiles	28
4.2	Observational evidence	28
4.2.1	Major axis colours	28
4.2.2	Colour profiles parallel to the major axis	28
4.2.3	Vertical colour profiles	28
4.3	Colours and colour gradients as diagnostics	29
4.3.1	Ultraviolet–optical colour indices	29
4.3.2	Optical–near-infrared colour indices	29
4.3.3	Colour gradients from scale length ratios	29
4.4	The influence of extinction	30
4.4.1	The effects of scattering on galaxy colours	30
4.4.2	Near-infrared observations	30
4.5	Dust versus stellar population gradients	31
5	Thesis Outline	31

Chapter 2 *Sample selection, observations and data reduction* **34**

1	The sample selection	34
1.1	Statistically complete samples	34
1.2	The ESO-LV sample	34
1.2.1	Selection criteria	34
1.2.2	From a volume-limited to a diameter-limited sample	34
1.2.3	Inclination selection	35
1.3	The UGC sample	35
2	Observations	37
2.1	The Near-Infrared Observations	37
2.2	The Optical Observations	38
2.2.1	The ESO-LV data	38
2.2.2	The UGC data	39
2.3	Image processing and data reduction	39
2.3.1	Reduction of the Near-Infrared Images	39
2.3.2	Reduction of the Optical Images	41
2.3.3	Calibration of the Observations	41
2.3.4	Profile Extraction	42
3	Internal and external consistency checks	43
3.1	Internal consistency checks	43
3.2	Comparison with published observations	43
3.2.1	Comparison with Mathewson et al. (1992)	45
3.2.2	Comparison with Barteldrees & Dettmar (1993)	45
4	Summary and Conclusions	46

Chapter 3 *The vertical stellar distribution in NGC 6504: detection of a thick disk* **49**

1	Introduction	49
1.1	Galaxy components	49
1.2	Vertical distributions	49
2	Observations and reduction	50
2.1	Observations	50
2.2	Data reduction	50
2.3	Analysis	51

3 Modeling	51
3.1 Exponential model	51
3.1.1 First model: fit to all points	51
3.1.2 Second model: fit to linear part of profiles	51
3.1.3 Third model: second model, with fixed scale heights	51
3.2 Deviations from the exponential model	51
3.2.1 Deviations at large z	51
3.2.2 Deviations near the plane	52
3.3 Non-exponential distribution	54
3.4 Bulge model	55
4 Discussion	55
4.1 Inner parts	55
4.2 Outer parts	55
5 Thick disk?	56
5.1 Evidence for thick disks in other (spiral) galaxies	56
5.2 Parameters of the thick disk; discussion	56
6 Conclusions	57

Chapter 4 Structure analysis of edge-on disk galaxies **59**

1 Introduction	59
1.1 Theoretical models	59
1.2 The vertical scale parameter	60
1.3 Models for the dust distribution	60
1.4 The ratio of radial to vertical scale parameters	60
2 Observations and data reduction	60
2.1 Sample selection and observations	60
2.2 Reduction	61
3 Results	61
3.1 Vertical surface brightness distributions	61
3.1.1 Exponential scale heights	61
3.1.2 More complex modeling of the vertical profiles	67
3.1.3 The global goodness-of-fit parameter	67
3.1.4 The vertical scale parameter	67
3.2 Radial surface brightness distributions	69
3.2.1 Exponential scale lengths as a function of z height	69
3.2.2 The fitting of more complex models	71
3.2.3 The ratio of radial to vertical scale parameters	73
4 Discussion	73
4.1 Main observational results	73
4.2 The vertical scale parameter	73
4.3 The dust contribution	74
4.4 Disk components	74
5 Summary and Conclusions	75

Chapter 5 Global structure parameters of edge-on disk galaxies **77**

1 A statistical analysis	77
1.1 The flattening of exponential disks	77
1.2 Colour gradients as diagnostics	78
1.2.1 Radial Colour gradients in edge-on disk galaxies	78
1.2.2 Colour gradients from scale length ratios	78

2 Approach	78
2.1 Determination of the exponential scale length	78
2.2 Determination of the exponential scale height	79
3 Results	79
3.1 Scale parameter ratios	81
3.2 Radial colour gradients	81
3.3 Correlations between gross galaxy properties	84
3.3.1 Type dependences	84
3.3.2 Dust	85
4 Discussion	85
4.1 Main observational results	85
4.2 Kinematic constraints from structure analysis	85
4.3 Radial colour gradients and extinction	87
5 Summary and Conclusions	87

Chapter 6 The optical/near-infrared colour-magnitude relation in disk galaxies **89**

1 Introduction	89
1.1 Ellipticals versus spiral galaxies	89
1.2 Environmental effects	90
1.3 A universal CM relation?	90
1.4 Advantages of near-infrared observations	90
2 A dust-free CM relation	90
2.1 Colour gradients	91
2.2 Galactic reddening	91
2.3 <i>K</i> -corrections and distance determinations	91
3 Comparison to literature samples	92
4 Discussion	95
4.1 Applications of a tight CM relation	95
4.2 The shape of the CM relation	96
4.3 The CM vs. Tully-Fisher relation	96
5 Summary and Conclusions	97

Chapter 7 The shape of galaxy disks: how the scale height increases with galactocentric distance **99**

1 Disk vertical scale parameters	99
1.1 Why should the scale height be constant?	99
1.2 A statistically complete sample	99
2 Results	100
3 Discussion	100
4 Conclusions	102

<i>Chapter 8</i>	<i>The z-structure of disk galaxies towards the galaxy planes</i>	103
	1 Introduction	103
	1.1 Motivation	103
	1.2 Observational status	103
	1.3 An intermediate solution	104
	1.4 The Galaxy	104
	1.5 Near-Infrared Observations	104
	2 Approach	104
	2.1 Sample selection, observations and data reduction	104
	2.2 Vertical profiles	106
	2.3 Comparison to published luminosity profiles	106
	2.4 Extinction correction	108
	2.5 A generalized family of density laws	108
	3 Results	109
	3.1 Near-infrared profiles	109
	3.2 Effects of seeing	115
	3.3 Comparison with I-band observations	116
	3.4 Extinction analysis	116
	4 Discussion	117
	4.1 Main observational results	117
	4.2 Projection effects	121
	4.3 Disk heating	121
	4.4 Vertical disk heating mechanisms	122
	4.4.1 Spiral structure	122
	4.4.2 Giant molecular clouds	122
	4.4.3 Mini black holes in galactic halos	123
	4.4.4 Disk accretion	123
	4.4.5 Vertical potentials	123
	4.5 Isothermal versus exponential distributions	123
	5 Summary and Conclusions	124
<i>Chapter 9</i>	<i>Stellar warps</i>	126
	1 Optical warps in edge-on disk galaxies	126
	1.1 The stellar warp in our Galaxy	126
	1.2 Colour gradients in galaxy warps	126
	1.2.1 Colour gradients as a diagnostic tool	126
	1.2.2 The effects of a sharp disk truncation	127
	1.2.3 Spatial differences	127
	1.3 Outline of the present analysis	127
	2 Approach	127
	3 Analysis of optical warps	128
	3.1 Frequency and colour dependence of stellar warps	128
	3.2 Correlations of optical warps with global galaxy properties	133
	3.3 The warping galaxy ESO 235-G53	135
	3.3.1 Global characteristics	135
	3.3.2 Colour dependence	135

4 Discussion	136
4.1 The frequency of optical warps	136
4.2 Formation mechanisms	136
4.3 Warp characteristics and projection effects	137
4.4 Warps from a near-infrared perspective	139
5 Summary and Conclusions	140

Chapter 10 Summary and Prospects **142**

1 Overview of results	142
1.1 Vertical disk structures and the effects of extinction	142
1.2 Colours and colour gradients in edge-on galaxies	142
1.3 Peculiarities in the outer disks	142
2 Suggestions for future study	143
2.1 The vertical nature of galaxy disks	143
2.2 Truncated stellar disks	143
2.3 Disk colours and vertical colour gradients	144
2.4 Dynamics and stability of galaxy disks	144
2.5 Bulges versus bars in spiral galaxies	144

De afronding van een promotie-onderzoek in de vorm van een proefschrift is een belangrijke mijlpaal in de wetenschappelijke loopbaan van een beginnend wetenschapper. Toen ik in januari 1993 onbevangen aan het onderzoek begon, waarvan de resultaten in het voor U liggende proefschrift zijn gebundeld, realiseerde ik me maar nauwelijks waar ik aan begonnen was. Ondertussen zijn er ruim vier jaar verstreken; vier jaar, waarin het wetenschappelijk onderzoek zijn ups en downs gekend heeft. Nu mijn promotie-onderzoek ten einde is, en ik op het punt sta als gepromoveerd astronoom mijn bijdrage aan het sterrenkundig onderzoek te leveren, is dit de plaats waar en het moment waarop ik een aantal personen uit de – relatieve – achtergrond naar voren wil halen om hun bijdrage aan mijn werk te benadrukken.

Allerest wil ik hier de voortdurende steun en stimulans van mijn ouders noemen. Zij hebben me altijd gestimuleerd in mijn keuzes, eerst om überhaupt te kiezen voor een studie sterrenkunde, terwijl ze later tijdens mijn promotie-onderzoek me, ook in moeilijke tijden, steeds hebben laten blijken te geloven in mijn capaciteiten. Dit is voor mij erg belangrijk geweest en ik waardeer dit dan ook enorm.

Op wetenschappelijk gebied is de inbreng van mijn promotor, Piet van der Kruit, erg stimulerend geweest; de maandelijkse bijeenkomsten waarin de voortgang van het onderzoek werd besproken en zijn niet-aflatende bereidheid om mee te denken hebben een erg stimulerende werking gehad op de uiteindelijke resultaten van het onderzoek. Toen Piet een functie als decaan van de faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen aanvaardde werd de directe aansturing door zijn drukke werkzaamheden enigszins bemoeilijkt. Uiteindelijk heeft de samenwerking met Reynier Peletier de laatste ca. twee jaar de voortgang van het onderzoek in een stroomversnelling gebracht en ook mijn wetenschappelijke vorming positief beïnvloed. De inbreng van Reynier is naar mening onmisbaar geweest voor de positieve afronding van mijn promotie-onderzoek.

Gedurende de ruim vier jaar dat ik op het Kapteyn Instituut aan mijn promotie-onderzoek gewerkt heb, hebben de kamergenoten van kamer 193 zowel wat sfeerbeïnvloeding als wat wetenschappelijke resultaten betreft hun bijdrage geleverd in de vorm van af en toe de meest onzinnige conversaties, afgewisseld met serieuze discussies. In de loop der jaren is daarom, wellicht ongemerkt, een substantiële bijdrage aan mijn werk – of in ieder geval aan mijn gemoedstoestand – geleverd door Edwin Huizinga, Gerard Lemson, Rob Swaters en Wendy Lane.

Het verrichten van wetenschappelijk onderzoek is geen individuele activiteit; de interactie met collega's, waardoor enerzijds het perspectief van de wetenschapper kan veranderen en wat anderzijds kan bijdragen tot het in context kunnen plaatsen van de behaalde resultaten, is van wezenlijk belang voor de interpretatie van waarnemingen en resultaten. In dit verband wil ik daarom de collega's op zowel het Kapteyn Instituut als op buitenlandse sterrenkundige instituten bedanken. Op het Kapteyn Instituut betreft dit met name (in alfabetische volgorde) Yiannis Andredakis, Kor Begeman, Erwin de Blok, Roelof Bottema, Frank Briggs, Peter van Dokkum, David Fisher, Jeroen Gerritsen, Henk Hoekstra, Thijs van der Hulst, Rolf Jansen, Roelof de Jong (die ook zijn lay-out files ter beschikking stelde), Leon Koopmans, Koen Kuijken, Penny Sackett, Renzo Sancisi, Remco Schoenmakers, Alain Smette en Hugo van Woerden.

Part of my Ph.D. thesis research was initiated during a working visit to the Universidad de Granada, Spain, in April 1997. I would like to thank Eduardo Battaner, Jorge Jiménez Vicente and the Departamento de Física Teórica y del Cosmos for their hospitality (both scientifically and socially) and the subsequent collaborative efforts to tackle the scientifically interesting problem of warps in stellar disks, of which the first results are presented in Chapter 9 of this thesis.

The American Astronomical Society (AAS) gave me the opportunity to present my Ph.D. thesis work in a dissertation talk at their 190th Annual Meeting in June 1997, which I would like to acknowledge here.

I would like to thank the following persons and their institutes for their hospitality and their scientific input during a subsequent number of working visits: thanks are due to Dennis Zaritsky (University of California, Santa Cruz), Donald Terndrup (Ohio State University, Columbus), Jay Gallagher and Linda Sparke (University of Wisconsin, Madison) and Edwin Huizinga (Space Telescope Science Institute, Baltimore). Moreover and in addition to the persons listed above, I would like to mention the scientific input by Raja Guhathakurta and Nicole Vogt (University of California, Santa Cruz), Jay Frogel and Leslie Kuchinski (Ohio State University, Columbus), Chris Howk (University of Wisconsin, Madison), and Daniela Calzetti, Stefano Casertano, and Massimo Stiavelli at the Space Telescope Science Institute (Baltimore).

Furthermore, I acknowledge the scientific discussions with Andreas Just of the Astronomisches Rechen Institut,

Heidelberg (Germany) during a working visit he made to Groningen in March 1997.

My Ph.D. thesis research is based on observations obtained with the telescopes of both the Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), operated by the Royal Greenwich Observatory (RGO) with financial support of PPARC (United Kingdom) and NWO (The Netherlands), and the European Southern Observatory (ESO) at La Silla, Chile. I would like to thank both the PPARC and the ESO time allocation panels for the observing time granted for the present study.

Bovendien wil ik Tjeerd van Albada, Frank Briggs en Renzo Sancisi bedanken voor hun bereidwilligheid om het uiteindelijke manuscript van mijn proefschrift door te lezen en te beoordelen op zijn wetenschappelijke inhoud.

Om volledig te kunnen profiteren van de op het Kapteyn Instituut aanwezige infrastructuur, was de ondersteuning van soft- en hardware door Kor Begeeman, Martin Vogelaar en Wim Zwitser onontbeerlijk. Ook de ondersteuning door het onderwijs-ondersteunend personeel en de secretariaatsmedewerkers Gineke Alberts, Georg Comello, Jantina Hoving, Jacqueline Morris-Zwegers, Donald Staal, en Nanne Zuidema kan hier niet onvermeld blijven. In dit verband wil ik ook de altijd vrolijke noot, die door Coby Roerig tijdens het schoonmaakwerk werd ingebracht, vermelden.

Naast financiële bijdragen van het Kapteyn Instituut hebben subsidies van het Leids Kerkhoven-Bosscha Fonds (LKBF) en het Internationaliseringsfonds voor AIO's/OIO's van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) me in staat gesteld aan internationale conferenties deel te nemen in Nizhny Arkhyz (Rusland, september 1993 [LKBF en NWO]), Cardiff (Wales, juli 1994 [LKBF en NWO]), Garching bei München (Duitsland, juni 1995 [LKBF en NWO]), aan de AAS conferentie in Winston-Salem (Verenigde Staten van Amerika, juni 1997 [LKBF]) en de daaropvolgende rondreis langs verschillende Amerikaanse sterrenkundige instituten (juni 1997 [LKBF]), en aan de SAAS-FEE winterschool voor promovendi in Les Diablerets (Zwitserland, maart 1996 [LKBF en NWO]).

Op deze plaats wil ik ten slotte het Shell Reisdonatieprogramma voor promovendi bedanken voor het beschikbaar gestelde transatlantische ticket voor deelname aan de AAS conferentie in Winston-Salem (Verenigde Staten van Amerika, juni 1997) en de daaropvolgende rondreis langs verschillende Amerikaanse instituten.

Naast het inhoudelijke promotie-onderzoek is voor mij de sociale omgang met de bewoners van het Kapteyn Instituut altijd erg belangrijk geweest. Ik wil hierbij dan ook alle huidige en ex-bewoners van het Kapteyn Instituut bedanken voor het delen van hun niet-wetenschappelijke kant met mij op die momenten dat dit zo uitkwam.

Echter, behalve bij de collega-astronomen, heb ik in mijn niet-sterrenkundige activiteiten regelmatig de

broodnodige uitlaatklep gevonden om even "mezelf" te zijn, vooral op die momenten dat het onderzoek even eens wat minder soepel verliep. In dit opzicht hebben mijn activiteiten bij SIW Internationale Vrijwilligersprojecten, eerst als "landenspecialist" voor West-Europa, later als trainer/ondersteuning van begeleiders van internationale vrijwilligersprojecten in Nederland, als coördinator en bestuurslid Uitwisseling en Internationaal Beleid altijd voor de nodige afwisseling gezorgd. Soms heeft dit echter ook wel eens tot frictie geleid tussen mijn promotie-onderzoek enerzijds en een internationale vertegenwoordiging anderzijds... De contacten met met name Ingrid Fröberg, Marjolein Spiering en Arno Witte zijn voor mij erg belangrijk geweest. Arno, die – als het ware – me is voorgegaan in mijn carrière bij SIW, inclusief de internationale activiteiten, is een goede vriend geworden en zal tijdens mijn promotie als paranimf dienst doen.

I also acknowledge the stimulating contacts with my friends at UNA (Wales) IYS, in particular with Roger Edwards, Richard Jones and Tamara Morris, as well as with my collaborators and friends in the External Relations Working Group of the Alliance of European Voluntary Service Organisations, in particular Simona Costanzo and Maren Stell. After having worked with them – in my spare time – I was generally eager to pick up my Ph.D. thesis research again!

Last, but not least wil ik een aantal woorden wijden aan het contact met Johan Hooge en zijn echtgenote Aly. Zij zijn door de jaren heen altijd een stimulerende factor geweest en wisten me vaak weer enorm enthousiast te maken als het onderzoek eens wat minder vlot verliep. Johan zal als eerste paranimf optreden tijdens mijn promotie, waar ik heel blij mee ben.

Uiteraard kan een dankwoord als dit niet uitputtend zijn, en ongetwijfeld ben ik vergeten de bijdragen van een aantal mensen te noemen. Mijn verontschuldigen daarvoor, het betekent natuurlijk niet dat ik die mensen daarom minder waardeer!

I may have forgotten to mention the names of a few persons who have contributed to my thesis work. If so, I apologize for the omission; of course, it does not mean that I do not appreciate their contributions!



Groningen, 11 september 1997
Richard de Grijs

Beknopt overzicht. De vage nevelachtige vlekken, die we soms met het blote oog, maar beter met een verrekijker of telescoop tussen de ontelbare sterren aan de nachthemel kunnen onderscheiden, zijn in werkelijkheid sterrenstelsels, vergelijkbaar met onze eigen Melkweg. Door onze positie in de Melkweg hebben we een uniek uitgangspunt om een sterrenstelsel in zij-aanzicht van nabij te bestuderen en mogen we hopen de waarnemingen van externe sterrenstelsels in zij-aanzicht in hun context te kunnen plaatsen. In deze Nederlandse samenvatting leg ik in algemene termen uit wat er nu eigenlijk zo fascinerend is aan de studie van sterrenstelsels en wat we ervan kunnen leren. Echter, hoewel de nieuwsgierige geest door onderzoek mogelijk een aantal vragen in meer of mindere mate kan beantwoorden, roept wetenschappelijk onderzoek nog altijd meer vragen op dan er daadwerkelijk opgelost kunnen worden. Gelukkig maar.

1 Sterrenstelsels als bouwstenen van het Heelal

1.1 Een kwestie van schaal ¹

Er zijn maar weinig sterrenkundige problemen, die tot zulke heftige discussies hebben geleid als de bepaling van de schaal van ons eigen Melkwegstelsel. Met de ontwikkeling van steeds grotere telescopen aan het eind van de negentiende en het begin van de huidige eeuw, werd het plotseling mogelijk om de vage, vaak spiraalvormige “nevels”, die zich tussen de bekende “vaste” sterren en planeten aan de nachthemel bleken te bevinden, in detail te bestuderen.

Het fundamentele probleem dat in die tijd een allesoverheersende rol speelde was het vraagstuk van de afstandsbepaling in het Heelal. Aangezien er nog geen betrouwbare methodes bestonden om afstanden verder dan die tot de dichtstbijzijnde sterren te bepalen, bleef het de vraag of deze spiraalvormige nevels zich relatief dichtbij bevonden (en gewoon rondtollende gaswolken waren, met hier en daar een ster), dan wel op grote afstanden. Dat laatste zou betekenen dat ze extreem groot moesten zijn, vergelijkbaar met de afmetingen van onze eigen Melkweg.

Een van de voornaamste aanhangers van het idee dat deze spiraalnevels “eilandjes” in het Heelal zijn die zich op grote afstand van ons bevinden, was de Amerikaanse astronoom Heber Curtis. Zoals blijkt uit zijn bijdrage aan het jaarverslag van Lick Observatory in 1914 was hij erg enthousiast over het idee: *“they may be inconceivably distant galaxies of stars or separate stellar universes so remote that an entire galaxy becomes but an unresolved haze of light”*.²

¹ Historische feiten ontleend aan *“Man Discovers the Galaxies”*, door Richard Berendzen, Richard Hart en Daniel Seely (Science History Publications: New York, 1976)

² Nederlandse vertaling: *“Het zouden sterrenstelsels kunnen zijn op ongelooflijke afstanden, of zelfs andere universa van sterren, op zulke grote afstanden dat hele sterrenstelsels tot niet meer dan een vage lichtvlek worden gereduceerd”*.

In diezelfde periode was met name Harlow Shapley, verbonden aan Mount Wilson Observatory, een fervent verkondiger van het tegenovergestelde idee dat deze nevels juist onderdeel waren van ons eigen Melkwegstelsel. Uiteindelijk leidde dit wetenschappelijke conflict tot een confrontatie tussen beide astronomen tijdens de jaarlijkse bijeenkomst van de Amerikaanse Nationale Academie van Wetenschappen in 1920. Deze confrontatie vond plaats in de vorm van een discussie over de schaal van het Heelal, het zgn. *“Great Debate”* (Grote Debat). Ondanks alle goede bedoelingen bleven beide wetenschappers echter vasthouden aan hun oorspronkelijke zienswijze en bovendien waren ze er beide van overtuigd dat ze als overwinnaar uit het debat waren gekomen.....

Tegenwoordig hebben we verschillende methodes tot onze beschikking om afstanden in het Heelal met redelijke precisie te kunnen bepalen, zodat we in retrospect Curtis en de zijnen gelijk moeten geven: deze “spiraalnevels” zijn inderdaad sterrenstelsels, die zich op enorm grote afstanden van ons bevinden (het licht van het dichtstbijzijnde grote spiraalstelsel, de *“Andromedanevel”*, doet er al zo’n 2 miljoen jaar over om ons te bereiken!).

1.2 Morfologie: sigaren, sombrero's en spiralen

Als we een willekeurige atlas met foto's van sterrenstelsels openslaan, valt onmiddellijk op dat geen twee stelsels er hetzelfde uit zien. Net als bij mensen heeft elk stelsel zijn eigen “persoonlijkheid”, die o.a. wordt bepaald door uiterlijke kenmerken zoals het wel of niet hebben van een spiraalstructuur of een grote concentratie van licht in het centrum. Grofweg kunnen we onderscheid maken tussen spiraalstelsels en stelsels die op het eerste gezicht geen duidelijke details vertonen, de zgn. “elliptische stelsels”. In de praktijk kunnen deze elliptische stelsels onderling enorm verschillen in vorm: zowel voetballen als langgerekte sigaarvormige sterrenstelsels, en alle tussenliggende vormen, worden tot de elliptische stelsels gerekend.

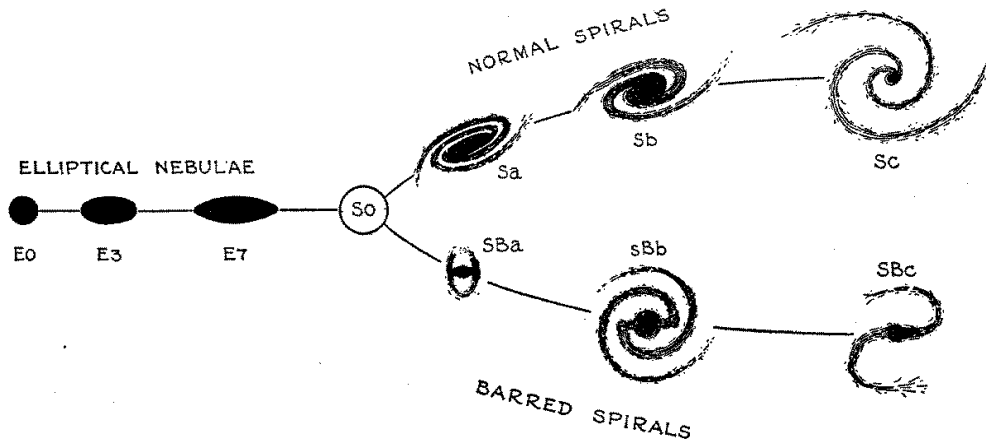


Fig. 1. Door Edwin Hubble voorgestelde classificatie van sterrenstelsels (1923). (Uit: "The Realm of the Nebulae", Edwin Hubble, Oxford University Press: Londen (1936), pag. 45)

Al in 1917, voordat hij had aangetoond dat de "spiraalnevls" externe sterrenstelsels zijn, die geen onderdeel uitmaken van de Melkweg, begon de Amerikaanse astronoom Edwin Hubble aan een project om de waargenomen "spiraalnevls" in categorieën in te delen, aangezien de bestaande classificaties te ingewikkeld of juist te weinig omvattend waren. Dit onderzoek resulteerde uiteindelijk, in 1923, in de zgn. "Hubble stemvork" (figuur 1), tegenwoordig de geaccepteerde standaard voor de indeling in "morfologische types"³ van het merendeel van de sterrenstelsels.

Hubble plaatste de elliptische stelsels vooraan in dit schema, omdat hij ervan uit ging dat de door hem voorgestelde indeling een evolutiereeks was: sterrenstelsels zouden zich ontwikkelen van "vroeg-type" elliptische stelsels naar "laat-type" spiralen. Hoewel er mogelijk evolutie tussen verschillende categorieën stelsels kan plaatsvinden, weten we inmiddels wel dat de Hubble stemvork niet in de eerste plaats een tijdspad is waarlangs een sterrenstelsel zich tijdens zijn levensduur verplaatst.

Naast de duidelijke scheiding tussen "normale" spiralen en spiraalstelsels met een centrale balk (de "barred spirals" in figuur 1), is de indeling van spiraalstelsels in eerste instantie gebaseerd op de morfologie van de spiraalarmen: stelsels met strak opgewonden armen worden als vroeg-type spiralen (bijv. Sa in figuur 1) geclassificeerd, terwijl laat-type spiralen, zoals bijvoorbeeld de "Sc-stelsels", losse armen vertonen. Ons Melkwegstelsel is waarschijnlijk een sterrenstelsel van het type SBbc, d.w.z. een spiraalstelsel tussen de types Sb en Sc in met een centrale balkstructuur ("B").

Behalve de spiralen en de elliptische stelsels bestaat er nog een tussenklasse, die zowel eigenschappen van elliptische als van spiraalstelsels vertoont, de zgn. S0-stelsels.

³ Zoals de uitdrukking al aangeeft, is deze classificatie allereerst gebaseerd op het uiterlijk, c.q. de vorm van een sterrenstelsel, zonder dat daarbij allerlei ingewikkelde natuurkundige principes om de hoek komen kijken.

Als we ons baseren op de hierboven beschreven indeling van sterrenstelsels, lijkt de classificatie van stelsels een fluitje van een cent. Zoals in de meeste vakgebieden, echter, is de praktijk de theorie niet altijd welgezind. Hoewel de Hubble-stemvork als standaard voor stelselclassificatie wordt gehanteerd, kunnen er complicerende factoren optreden.

In de meeste gevallen kunnen we externe sterrenstelsels niet onder de ideale hoek, d.w.z. in "boven-aanzicht", waarnemen. Integendeel, het merendeel van de sterrenstelsels laat zich meer van de zijkant dan van bovenaf zien. Dit is overigens ook statistisch gesproken te verwachten, of, anders verwoord: de kans is groter dat we een sterrenstelsel in zij-aanzicht waarnemen dan van bovenaf. Dat is bijzonder vervelend met het oog op een nauwkeurige classificatie van de stelsels, want in dat geval kun je immers niet goed bepalen hoe strak de spiraalarmen om het centrum zijn gewonden en zelfs of er wel spiraalarmen aanwezig zijn!

Gelukkig zijn er vaak indirecte aanwijzingen die ons vertellen met wat voor type stelsel we te maken hebben. Laten we nog eens naar figuur 1 kijken. Ondanks dat dit een schematische voorstelling van de werkelijkheid betreft, kunnen we wel zien dat er klaarblijkelijk een globaal verband bestaat tussen de grootte van het bolvormige centrum, in feite dus de hoeveelheid licht (en waarschijnlijk ook materie) die zich in het centrum van een sterrenstelsel heeft opgehoopt, en het type. Het centrum van een sterrenstelsel heeft vaak de vorm van een (soms enigszins afgeplatte) voetbal, terwijl de spiraalarmen zich normaalgesproken in een platte structuur, de "schijf", bevinden. Deze informatie kunnen we gebruiken als een indirecte indicatie van het type stelsel dat we waarnemen. Immers, vanaf de zijkant ziet zo'n spiraalstelsel (of een stelsel van het type S0) er uit zoals men in de science-fictionlectuur vaak vliegende schotels afbeeldt. De grootte van de centrale bolvorm ten opzichte van de grootte van

het gehele stelsel geeft ons nu een aanwijzing die we kunnen gebruiken voor de classificatie van het stelsel.

Behalve aan de vorm van een stelsel in zij-aanzicht, kunnen we ook de hoeveelheid stof die in een sterrenstelsel aanwezig is gebruiken als indicatie van het stelseltype. De relatie tussen het type en de hoeveelheid stof is echter niet zo duidelijk als die tussen het type en de grootte van de kern ten opzichte van het gehele stelsel. Als onderdeel van mijn promotie-onderzoek laat ik in de Hoofdstukken 5 en 8 van dit proefschrift zien dat er in de vroeg-type stelsels (S0 tot Sa) heel weinig stof wordt waargenomen, en dat ook in de late types (vanaf type Scd) weinig stof aanwezig lijkt te zijn. Over de hoeveelheid stof in de tussenliggende types is op voorhand echter geen peil te trekken.

In figuur 2a is een beroemd voorbeeld van een Sa-type stelsel afgebeeld: het “Sombbrero”-stelsel, genoemd naar het Mexicaanse hoofddeksel waarop het lijkt; deze naam spreekt in ieder geval meer aan dan “Messier 104 (M104)” of “NGC 4594” (NGC = New General Catalogue), zoals het stelsel in de verschillende catalogi heet. Figuur 2b toont een later type (Sc) stelsel (met catalogusnaam IC 2531, uit de “Index Catalog”). Let op de duidelijke verschillen in de grootte van de centrale lichtconcentratie ten opzichte van de schijf die de spiraalarmen bevat!

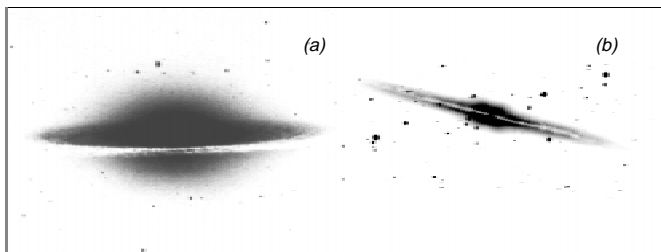


Fig. 2. Enige voorbeelden van sterrenstelsels in zij-aanzicht (afgebeeld in negatief, niet op dezelfde schaal): (a) het “Sombbrero”-stelsel, een stelsel van het type Sa; (b) IC 2531 is een Sc-type stelsel. In beide stelsels is er duidelijk een lichtere strook te zien die de centrale kern (bijna) door midden deelt: dit is een effect veroorzaakt door de aanwezigheid van stof. Deze strook wordt dan ook de “stofband” genoemd⁴.

Ondanks de hierboven beschreven problemen met de categorisatie van sterrenstelsels, die door geometrische effecten worden veroorzaakt, zijn de sterrenstelsels die we in zij-aanzicht (“edge-on” in het Engels) waarnemen geenszins oninteressant voor verdere studie. Integendeel, de bestudering van sterrenstelsels die we onder een zodanige hoek zien dat we recht op de zijkant van de schijf, gevormd door de spiraalarmen kijken, kan in hoge mate bijdragen aan ons begrip hoe sterrenstelsels zijn ontstaan en hoe ze zich tijdens hun levensduur hebben ontwikkeld.

⁴ Vanwege de negatiefafbeelding is de stofband in de figuren 2a en b als een lichte strook te zien; in de praktijk houdt stof echter het licht tegen en zal de stofband als een donkere band over een stelsel te zien zijn.

Dit zijn de hoofdvragen die ten grondslag liggen aan mijn promotie-onderzoek, en waarvan ik in dit proefschrift verslag doe van de behaalde resultaten op een aantal deelgebieden.

Hoewel de nadruk in de hedendaagse sterrenkunde ligt op de fantastische waarnemingen van zeer ver verwijderde sterrenstelsels die ons bijna dagelijks door de *Hubble Space Telescope* (HST, de Amerikaanse ruimtetelescoop) worden toegezonden, kunnen we nog veel leren van de bestudering van nabije stelsels. Door de voortdurende studie van relatief nabije sterrenstelsels en het vergelijken van de aldaar verkregen resultaten met de waarnemingen van hun voorlopers op grote afstand⁵, kunnen we die waarnemingen hopelijk beter in hun context plaatsen en zodoende hopen uiteindelijk de vorming, evolutie en dood van sterrenstelsels beter te begrijpen.

1.3 Samenstelling

Sterrenstelsels bestaan uit een aantal componenten, die elkaar door hun wederzijdse aantrekkingskrachten (de zwaartekracht is de belangrijkste natuurkracht in het Heelal) in evenwicht houden en ervoor zorgen dat stelsels hun structuur behouden en niet spontaan uit elkaar vallen of juist in elkaar storten. Naast de zichtbare, lichtgevende materie, voor het grootste deel in sterren, bevindt zich tussen de sterren de zgn. “interstellaire materie”, voornamelijk in de vorm van gas (zoals waterstofgas) en minuscule stofdeeltjes⁶.

Uit metingen van de rotatiesnelheden van sterrenstelsels is gebleken dat de bijdrage van de zichtbare materie alleen in veel stelsels niet voldoende is om de waargenomen rotatie te kunnen verklaren; er is vaak meer materie nodig dan men aan de hand van de waarnemingen kan afleiden. Daarom is het tegenwoordig algemeen gebruik om voor dit soort vraagstukken een extra massa-component toe te voegen, in de vorm van de zgn. “donkere materie”, waarvan de samenstelling, de hoeveelheid (voor sommige stelsels zou tot 90% van de massa in de vorm van deze donkere materie aanwezig moeten zijn!) en zelfs het bestaan tot heftige discussies heeft geleid en nog steeds daartoe aanleiding geeft.

Zoals ik in de voorgaande sectie al heb aangegeven, vertonen spiraalstelsels globaal gesproken een (vaak

⁵ Aangezien zelfs licht een eindige snelheid heeft (van ca. 300.000 km/s; d.w.z. een lichtstraal legt in 1 seconde een afstand af van ca. $7\frac{1}{2}$ maal de omtrek van de aarde) betekent het dat we verder terugkijken in de tijd naarmate we objecten op grotere afstanden waarnemen. De verre sterrenstelsels die men tegenwoordig met de HST waarneemt zijn daarom onder tusschen al verder geëvolueerd, zodat we door dit soort waarnemingen in theorie naar de voorlopers van de nabije sterrenstelsels kunnen kijken.

⁶ Het stof dat zich tussen de sterren bevindt, bestaat uit hele kleine deeltjes die nog het meeste weg hebben van verpulverd zand (de zgn. “silicaten”) of koolstofdeeltjes (zoals grafiet).

enigszins afgeplat) bolvormig centrum (dat soms zelfs een zgn. “pinda”-vorm heeft, zie bijv. figuur 2b) en een aantal spiraalarmen die zich min of meer in een platte schijf bevinden. In het vervolg zal ik de richting vanuit het centrum van een sterrenstelsel langs deze schijf naar de buitendelen toe de “*radiële richting*” noemen, terwijl we van “*verticale*” structuren spreken als het gaat om de richting loodrecht daarop.

Een van de grootste voordelen van het bestuderen van sterrenstelsels in zij-aanzicht is de mogelijkheid om het gedrag van de materie in de verticale richting te onderzoeken. In de meeste spiraalstelsels kunnen we verticaal een aantal componenten onderscheiden:

- **De jonge schijf** is het gebied in de schijf van een sterrenstelsel waar de concentratie van de materie het grootst is. Door de grote massaconcentratie vinden er hier allerlei processen plaats die met grote energieproductie gepaard gaan; hier vindt dan ook actieve ster-
vorming plaats, vandaar de aanduiding “jong”; het is de geboorteplaats van sterren.
- **De stofband.** Ondanks dat de jonge schijf uit zeer heldere sterren bestaat, is het vaak erg lastig deze component waar te nemen, omdat de jonge sterren zich midden in de schijf bevinden, waar ze omringd zijn door stof. Dit stof, dat zich in een iets dikkere component bevindt, heeft de eigenschap dat het zichtbaar licht de pas afsnijdt. Als we een sterrenstelsel in zij-aanzicht door een (optische) telescoop bekijken, valt het onmiddellijk op als er een stofband aanwezig is: deze steekt dan donker af tegen de heldere achtergrond van het stelsel.
- **De dunne schijf.** De belangrijkste verticale schijfcomponent, zowel wat betreft de hoeveelheid licht als de hoeveelheid materie, is de dunne (of ook wel “oude”) schijf.
- **De dikke schijf.** In sommige stelsels is er, behalve de bovengenoemde schijfcomponenten, op grote verticale afstanden van het midden van de schijf nog een extra component waarneembaar, de “dikke” schijf. Aangezien de helderheid van deze component vaak erg laag is, is het niet eenvoudig de dikke schijf te detecteren. Dikke schijven lijken voornamelijk in stelsels van het type S0 voor te komen. In dit proefschrift (Hoofdstuk 3) melden we echter de detectie van een dikke schijf in het spiraalstelsel NGC 6504 (waarschijnlijk een Sab-type stelsel); dit is een van de eerste duidelijke detecties van een dikke schijf in een spiraalstelsel.
- **De halo.** Ten slotte zijn er aanwijzingen dat de zgn. bolvormige sterrenhopen (groepen voornamelijk erg oude sterren, die waarschijnlijk tegelijkertijd met de stelsels zelf ontstaan zijn) zich in grote bolvormige “*halo’s*” rondom sterrenstelsels bevinden. Bovendien wijzen metingen van snelheden in sterrenstelsels op het bestaan van een extra massacomponent; daarom hebben astronomen de gewoonte het bestaan van een

halo van “donkere materie” aan te nemen. Deze halo’s hoeven niet precies bolvormig te zijn, maar kunnen best afgeplat zijn (bijvoorbeeld in de vorm van een rugby bal).

Ondanks dat astronomen bij de studie van sterrenstelsels in zij-aanzicht proberen gegevens te ontleen aan waarnemingen van externe sterrenstelsels, is het dichtstbijzijnde sterrenstelsel dat we in zij-aanzicht zien onze eigen Melkweg! Bestudering van de verticale structuur van de Melkweg heeft als voordeel dat we de verschillende componenten in detail kunnen bestuderen en we bovendien de waarnemingen en resultaten die verkregen zijn door de studie van externe sterrenstelsels beter in hun context kunnen plaatsen. Er kleven echter ook nadelen aan onze positie ergens halverwege tussen het centrum en de rand van de schijf van de Melkweg: door de grote hoeveelheid stof die zich in de schijf bevindt, kunnen we eigenlijk alleen nauwkeurige waarnemingen doen in de omgeving van de zon, waar we door relatief weinig stof worden gehinderd. Door deze gegevens te combineren met alle stukjes en beetjes die we weten te verzamelen over de structuur van de Melkweg komen we langzamerhand steeds meer te weten over hoe ons sterrenstelsel er nu eigenlijk globaal uit ziet.

1.4 Stof

Zoals ik in de vorige paragraaf al heb aangegeven, kan de aanwezigheid van stof een grote belemmering vormen bij de bestudering van de verticale structuren in externe sterrenstelsels. Als we dit soort objecten in zichtbaar licht willen bestuderen, moeten we bij de interpretatie van de waarnemingen rekening houden met zowel het stof dat zich tussen ons en die stelsels in bevindt, voornamelijk in onze Melkweg, als het stof in die stelsels zelf. In deze paragraaf zal ik de belangrijkste effecten van stof op onze waarnemingen samenvatten.

Uit figuur 2 bleek al dat de aanwezigheid van stof de (voor onze doeleinden) vervelende eigenschap heeft dat het het licht tegenhoudt, wat in vaktermen “*absorptie*” genoemd wordt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat (zichtbaar) licht een “*golflengte*” heeft, die ongeveer even groot is als de afmeting van de stofdeeltjes. Het gevolg is dat de stofdeeltjes de in het licht aanwezige energie opnemen, met uiteindelijk resultaat dat ze “warmer” worden. Stof kan in een stabiele situatie bestaan door weer af te koelen, hetzij door de warmte om te zetten in beweging (ook een vorm van energie: *kinetische energie*), hetzij door de warmte uit te stralen.

In het voorgaande zijn we ervan uit gegaan dat licht zich gedraagt als een electromagnetische golf. Echter, licht heeft de eigenschap dat het zich ook als een stroom deeltjes kan voordoen. Als zo’n lichtdeeltje nu een stofdeeltje tegenkomt, kan het gebeuren dat het stofdeeltje het licht niet “absorbeert”, maar dat het lichtdeeltje op het stofdeeltje afketst, zodat het licht zich vervolgens in een andere richting verder voortplant. Dit proces, “*verstrooi-*

ing” in vaktermen, is eenvoudig te begrijpen door de vergelijking te maken met wat er gebeurt als twee biljartballen met elkaar in aanraking komen: beide ballen vervolgen hun weg in een gewijzigde richting.

De combinatie van beide processen, de absorptie en de verstrooiing, wordt “*extinctie*” genoemd. Er is echter nog een proces, waarmee we rekening moeten houden bij de bestudering van objecten die we door een stofsluier waarnemen: aangezien de meeste stofdeeltjes iets kleiner zijn dan de golflengte van het zichtbare licht, zorgt het stof er ook voor dat we een object “roder” zien dan het in werkelijkheid is. Zichtbaar licht bestaat immers uit een combinatie van verschillende kleuren licht, variërend van rood naar blauw, waarbij blauw licht de kortste golflengte heeft. De golflengte van blauw licht is daarom beter in overeenstemming met de afmetingen van de stofdeeltjes, waardoor blauw licht relatief meer “*extinctie*” zal ondervinden dan rood licht. Het resultaat is een “*verroding*” van de kleur van het object.

2 Intrigerende, maar lastige problemen...

Mijn promotie-onderzoek heeft zich met name gericht op een tweetal wetenschappelijk interessante problemen:

- De verticale verdeling van licht en materie in de schijven van sterrenstelsels en
- De eigenschappen van het in die stelsels aanwezige stof.

Om conclusies te kunnen baseren op statistische overwegingen in plaats van op waarnemingen van individuele sterrenstelsels is het zaak te beschikken over waarnemingen van een groot aantal sterrenstelsels (ofwel over een “*statistisch complete*” verzameling, d.w.z. waarnemingen van alle stelsels in een bepaald deel van het [nabije] Heelal, die voldoen aan onze eisen).

We besloten daartoe alle sterrenstelsels te selecteren uit een grote catalogus met sterrenstelsels aan de zuidelijke hemel (d.w.z. stelsels die alleen vanaf het Zuidelijk Halfrond kunnen worden waargenomen), die voldoen aan de volgende vereisten:

- De stelsels moesten vrijwel volledig in zij-aanzicht te zien zijn, we lieten maar een paar graden afwijking toe (in vaktermen: de inclinatie moest groter zijn dan 87°);
- We selecteerden alleen stelsels die een bepaalde minimumgrootte (in blauw licht) aan de hemel hadden (ofwel in vaktermen: $D_{25}^B \geq 2.2$), omdat we de stelsels in detail wilden bestuderen. Natuurlijk moest dat detail dan ook waarneembaar zijn;
- Alleen stelsels van de types S0 (als die een schijf vertoonden) tot Sd werden geselecteerd, omdat het onderzoek zich met name zou richten op schijven van sterrenstelsels. Elliptische stelsels zijn wezenlijk anders en de “*latere types*”, d.w.z. later dan type Sd in de Hubble-stemvork, en de zgn. “*dwergstelsels*” zijn te onregelmatig of vertonen een onduidelijke schijf;

- De stelsels moesten liefst geen nabije burens hebben en mochten ook niet duidelijk door de zwaartekracht van een ander stelsel beïnvloed zijn. Omdat we geïnteresseerd waren in de evolutie van schijven, wilden we zoveel mogelijk invloeden van buitenaf uitsluiten.

Dit mogen duidelijke eisen zijn, de toepassing van onze selectiecriteria op de stelsels in de bewuste catalogus (de “*Surface Photometry Catalogue of the ESO-Uppsala Galaxies*”, samengesteld door Lauberts & Valentijn, 1989) was niet eenvoudig. Zoals ik al heb vermeld, is ten eerste de indeling van sterrenstelsels in zij-aanzicht in categorieën niet altijd eenduidig; vaak kunnen we echter wel bepalen of we te maken hebben met een spiraalstelsel of een elliptisch/S0 stelsel.

Bovendien is de hoek waaronder we een stelsel zien (de eerste eis) niet gemakkelijk te bepalen voor dit soort stelsels. Men gebruikt vaak de verhouding tussen de “*lengte*” van de schijf en de verticale dikte van het stelsel als een maat voor de hoek. Er kunnen in dit geval echter complicaties optreden: als we te maken hebben met de vroeg-type spiralen, hebben die grote bolvormige centra, die kunnen zorgen voor een verkeerde (lees “*grotere*”) schatting van de waargenomen dikte van de schijf, wat resulteert in een te klein berekende hoek. In de bepaling van de hoek moet ook een aanname worden gemaakt omtrent de echte dikte van de schijven, een controversieel onderwerp in de hedendaagse sterrenkunde.

Ondanks de genoemde potentiële problemen zijn we ervan overtuigd dat de door ons gemaakte selectie van sterrenstelsels voldoet aan alle door ons gestelde eisen.

De benodigde waarnemingen werden verkregen met behulp van grote optische telescopen van de Europese Zuidelijke Sterrenwacht (ESO) in Chili in blauw, groen en rood licht. De helft van de stelsels die we in deze optische kleuren hebben waargenomen hebben we ook in het “*nabij-infrarood*”, ofwel warmtestraling, kunnen observeren. Dit is een redelijk nieuwe techniek, die pas aan het eind van de jaren '80 voor de professionele sterrenkunde beschikbaar is gekomen, na decennia lang alleen voor militaire doeleinden te zijn toegepast. Pas rond de periode dat wij waarneemtijd kregen toegewezen om via nabij-infrarode straling onze stelsels te bekijken waren de detectoren van een zodanige kwaliteit dat de toepassingen die wij voor ogen hadden binnen handbereik kwamen.

Zoals ik in de vorige sectie al aangaf, worden waarnemingen van externe sterrenstelsels in grote mate gehinderd door de in die stelsels aanwezige stofcomponent. Een manier om dit probleem te omzeilen is door waarnemingen te verrichten met detectoren die gevoelig zijn voor straling met een langere golflengte dan zichtbaar licht. Aangezien we ook tot waarnemingen vanaf de aarde waren beperkt, speelt de doorlaatbaarheid van de aardatmosfeer voor verschillende soorten straling ook een niet te verwaarlozen rol. Bovendien wilden we ons beperken tot de straling die door de sterren wordt uitgezonden, zonder

rekening te hoeven houden met straling van de gascomponent of warmtestraling door stofdeeltjes. Gelukkig kan aan al deze voorwaarden worden voldaan door waar te nemen in het nabij-infrarood (qua golflengte volgt nabij-infrarode straling in het elektromagnetische spectrum direct op rood zichtbaar licht).

3 Een vertroebeld beeld wordt scherper

3.1 Licht en materie

De verticale structuur van schijven van sterrenstelsels is waarschijnlijk ontstaan als gevolg van de energierijke processen die zich in de schijven zelf afspelen: door de grote hoeveelheid materie in de schijven, zowel sterren als gas en stof, vinden er voortdurend stervorming en andere processen (zoals botsingen tussen sterren en gaswolken) plaats, waardoor de sterren, die in de schijf aanwezig zijn, veel extra energie in de vorm van hogere snelheden krijgen. Door die energierijke processen is de kans aanwezig dat de sterren niet alleen sneller gaan bewegen in de schijven zelf, maar ook dat ze extra energie krijgen die ze omhoog of omlaag stuwt, d.w.z. in de verticale richting.

Gedurende de levensduur van een spiraalstelsel vindt er continu stervorming in de schijf plaats. Het gevolg van zowel de voortdurende stervorming als de energierijke processen in de schijf is dat de oudste sterren de grootste gelegenheid hebben gehad om relatief ver (in verticale richting) van het midden van de schijf te eindigen, terwijl de jongere sterren nog vlak bij hun geboorteplaats in de schijf aangetroffen worden.

Door nu de verticale structuur van schijven van sterrenstelsels te bestuderen kunnen we veel te weten komen over de recente stervormingsgeschiedenis van een stelsel en de processen die zorgen voor het “uit de schijf” bewegen van de sterren. Onderzoek uit het eind van de jaren '70 en het begin van de jaren '80 had al aangetoond dat de verticale structuur van het merendeel van de schijven van externe sterrenstelsels vergelijkbaar was, voor zover men dat kon beoordelen aan de hand van waarnemingen in zichtbaar licht, die in de buurt van het midden van de schijf bemoeilijkt worden door de invloed van het daar aanwezige stof.

Hoe dan ook, aan de hand van de beschikbare gegevens probeerde men de waargenomen verticale lichtverdeling te verklaren aan de hand van natuurkundige processen, die van belang zouden zijn bij het ontstaan en de verdere evolutie van de schijven. Het geldende idee was dat de schijven van sterrenstelsels ontstaan zouden zijn uit een ronddraaiende wolk “oermaterie”, die tot een schijfvormige structuur in elkaar geklapt zou zijn, terwijl de temperatuur in de gehele schijf min of meer hetzelfde was gebleven, in vaktermen de “*isotherme schijf*” genoemd.

In figuur 3 is schematisch een voorbeeld gegeven van de verticale verdeling van de materie in dat geval, op een willekeurige positie (kijk naar de onderste stippellijn). In

deze figuur zien we langs de horizontale as de afstand in verticale richting van het midden van de schijf (waarbij “0” het midden is) en langs de verticale as de hoeveelheid materie. In de praktijk kunnen we echter niet zo eenvoudig de hoeveelheid materie bepalen, maar nemen we een “helderheid” waar. Helderheden worden in “*magnituden*” aangegeven, die redelijk eenvoudig gerelateerd zijn aan de intensiteit (d.w.z. de hoeveelheid) van het waargenomen licht. Alleen betekent een groter getal voor de magnitude een lagere intensiteit. De “*schaalhoogte*”, die langs de horizontale as wordt gebruikt om de afstand vanaf het midden van de schijf aan te geven is een lengtemaat die gebruikt wordt om de waarnemingen van verschillende stelsels met elkaar te vergelijken. De afmetingen en dus ook de verschillende karakteristieke lengtes verschillen tussen stelsels onderling, maar door de schaalhoogte te gebruiken kunnen we ze echter toch met elkaar vergelijken. Ten slotte, het karakter “ μ_0 ” langs de verticale as is een willekeurig getal, dat de theoretische helderheid in het midden van de schijf aangeeft.

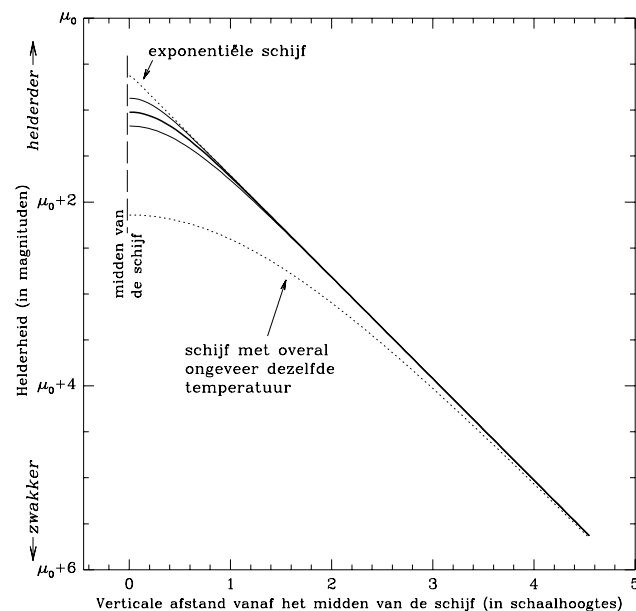


Fig. 3. Schematische voorstelling van de verticale structuur op een willekeurige positie in de schijf van een sterrenstelsel. Zie voor uitleg van de figuur de beschrijving in de tekst (§3.1).

Echter, toen de eerste waarnemingen met detectoren die gevoelig waren voor nabij-infrarode straling beschikbaar kwamen, bleek de lichtverdeling vaak een scherpere piek te vertonen dan het theoretische model van figuur 3, vandaar dat men toen voorstelde dat de lichtverdeling misschien wel helemaal tot het midden van de schijf steil zou toenemen in helderheid, ofwel schijven van sterrenstelsels zouden “*exponentieel*” zijn (de bovenste stippellijn in de figuur). Dit laatste model lijkt ook te gelden

voor de verdeling van de sterren in onze eigen Melkweg; in ieder geval voldoet het model van de schijf met overal ongeveer dezelfde temperatuur niet in onze Melkweg.

Aan de hand van de studie van de verticale lichtverdeling in nabij-infrarode straling, die ik in dit proefschrift presenteer, kunnen we nu op statistische gronden conclusies trekken over de beste modellen voor de verticale structuur, in plaats van ons te baseren op waarnemingen van individuele stelsels. Onze conclusie, gepresenteerd in Hoofdstuk 8 en een van de belangrijkste resultaten van mijn promotie-onderzoek, is dat de nabij-infrarode straling een gemiddelde verticale helderheidsverdeling volgt die is aangegeven door de dikke getrokken lijn, waarbij er een mogelijke afwijking gemeten kan worden, die is aangegeven door het verschil tussen de twee dunne getrokken lijnen. Het kleine verschil tussen de dikke getrokken lijn (ons resultaat) en de exponentiële schijf kan zelfs nog kleiner worden als we een kleine fout hebben gemaakt in de (gemiddelde) geschatte hoek, waaronder we de waargenomen stelsels zien. Bovendien zorgt de invloed van de luchtstromingen in de aardatmosfeer ervoor dat scherpe pieken iets worden afgeplat, een effect dat bekend staat als de “seeing” van de atmosfeer.

Een haast nog opmerkelijker resultaat is, dat blijkt dat de vorm van de verticale verdeling in nabij-infrarode straling identiek is op elke willekeurige plaats in de schijf (het maakt dus niet uit of dat nu vlakbij het centrum van het stelsel is of in de buitendelen), en zelfs onveranderlijk tussen verschillende types sterrenstelsels.

Een kleine kanttekening moet hier echter gemaakt worden: de verticale structuur van de straling hoeft niet precies de structuur te zijn van de materie. Ondanks dat we op enige (verticale) afstand van het midden van de schijf naar sterren kijken, die allemaal min of meer even oud zijn, bevinden zich in het midden van de schijf veel jonge sterren. Die jonge sterren vertegenwoordigen heel weinig materie, maar stralen wel veel licht en warmte uit, en daardoor zou de verticale *licht* verdeling wel eens extra gepiekt kunnen zijn. Tot nu toe is er echter niet onomstotelijk vastgesteld dat dit een belangrijk effect is.

3.2 *Vreemde voorvallen in de buitenwijken*

In de vorige paragraaf kwam het begrip “schaalhoogte” al kort ter sprake, als een karakteristieke *verticale* lengtemaat waardoor we stelsels onderling kunnen vergelijken. In feite is er een direct verband tussen de grootte van de schaalhoogte en de dikte van de schijf. Als onderdeel van mijn promotie-onderzoek naar de verticale structuur van schijven van sterrenstelsels heb ik het gedrag de schaalhoogte van alle waargenomen stelsels bestudeerd op verschillende posities in de schijven, en ook in alle kleuren waargenomen licht en nabij-infrarode straling.

Ook hier bewees een statistische benadering zijn nut: tot voor kort was het algemene idee dat schijven een constante schaalhoogte hadden, d.w.z. dat er geen ver-

schillen gedetecteerd zouden worden als je op verschillende posities in de schijf de schaalhoogte (ofwel de dikte) zou bepalen.

Onverwachts vonden wij echter dat in sommige stelsels de dikte van de schijf toeneemt naarmate je de schaalhoogte verder vanuit het centrum (dus in de buitengebieden) bepaalt (Hoofdstuk 7, zie ook Hoofdstuk 4). Dit effect is het duidelijkst waarneembaar voor de vroegste types sterrenstelsels tussen onze waarnemingen (S0 – Sa), maar ook in de latere types zijn er aanwijzingen voor een soortgelijk gedrag. De – ons inziens – meest voor de hand liggende verklaring voor deze toenemende dikte van sterrenstelsels naar buiten toe, die ook getest kon worden door nauwkeurig naar de waarnemingen te kijken, is dat in de buitendelen de invloed van de (lichtzwakke) “dikke schijf” belangrijker wordt. In die context is het begrijpelijk dat het effect het duidelijkste is voor de vroegste types stelsels, aangezien dikke schijven juist voornamelijk voorkomen bij die types.

Nog verder vanuit het centrum naar buiten toe komen we in sommige stelsels nog vreemdere structuren tegen: de tot dan toe vlakke schijven lijken plotseling te gaan “opkrullen”, een bekende eigenschap van stelsels die de “warp” wordt genoemd. Deze warps lijken vooral voor te komen in het gas van de sterrenstelsels, dat zich veel verder naar buiten toe uitstrekt dan de sterren. Dit gas, voornamelijk in de vorm van waterstofgas, kan met behulp van radiotelescopie (zoals die in Westerbork) worden waargenomen. Vaak begint de warp pas in het gas op een (radiële) afstand vanaf het centrum waar al geen sterren meer kunnen worden waargenomen. Recentelijk is er door een aantal onderzoeksgroepen aandacht besteed aan dit fenomeen in de schijven van sterren. Dit valt daar het moeilijk te detecteren valt, omdat op die posities de helderheid van de schijven heel laag is.

Een verzameling waarnemingen, zoals die door ons zijn verkregen, is natuurlijk ideaal voor de bestudering van dit soort structuren, omdat we door de unieke oriëntatie de warps perfect kunnen detecteren. In Hoofdstuk 9 meld ik als resultaat dat in ruim de helft van de waargenomen stelsels inderdaad een (begin van een) warp te zien valt. Omdat het opkrullen van de schijven echter ook naar ons toe (of van ons af) kan plaatsvinden, wat we niet zo gemakkelijk kunnen detecteren, is het waarschijnlijk dat in bijna alle sterrenstelsels een zekere afwijking van een vlakke schijf aanwezig is. Toch moeten we voorzichtig zijn met dit soort uitspraken, aangezien een enigszins gekromde stofband het al kan doen lijken alsof de sterren zich niet meer in een vlakke structuur bevinden!

3.3 *Kleuren en kameleons*

Waarnemingen in zichtbaar licht (zelfs in de “roodste” golflengtes) hebben nogal te lijden van extinctie-effecten door stof, terwijl die effecten een heel stuk kleiner zijn voor nabij-infrarode straling. Deze wetenschap hebben

we in Hoofdstuk 6 (en ook in Hoofdstuk 8) gebruikt om de invloed van stof juist te omzeilen. Daartoe hebben we “kleuren” gebruikt. Een kleur in de sterrenkundige zin van het woord is het verschil in helderheid tussen de straling in twee golflengtes, bijvoorbeeld de helderheid in blauw licht (“B”) min de helderheid in groen licht (“V”) levert een “B-V kleur” op, die in een getalletje kan worden uitgedrukt. Het verschil tussen de helderheid van de waarnemingen in het roodste optische licht (“I”) en de helderheid van onze waarnemingen in de nabij-infrarode straling die het minst door stof wordt beïnvloed (“K”) geeft, d.m.v. de “I-K kleur”, een indicatie van de hoeveelheid stof in een sterrenstelsel, aangezien we die kleur op elke willekeurige positie in een stelsel kunnen bepalen als we het betreffende stelsel in beide soorten straling hebben waargenomen. In Hoofdstuk 8 laten we zien dat de I-K kleur van de waargenomen stelsels niet veel verschilt tussen verschillende posities, zodra je de invloed van de stofband kwijt bent; ik zal deze kleur aanduiden als de “stofvrije kleur”.

Het blijkt nu dat er een relatie bestaat tussen de stofvrije I-K kleur van de stelsels en hun “absolute magnitude” (in infra-rode straling, die ook min of meer stofvrij is). De absolute magnitude van een stelsel is de theoretische helderheid die een stelsel zou hebben als het op een zekere (vaste) afstand van ons af zou staan. Ondanks dat alle stelsels op andere afstanden staan, kunnen we door het vergelijken van hun absolute magnituden toch de stelsels onderling vergelijken. De oplettende lezer heeft nu al opgemerkt dat de relatie waar ik hier over spreek als een hulpmiddel kan dienen om vanuit twee eigenschappen van sterrenstelsels die je kunt waarnemen, nl. de stofvrije kleur en de totale helderheid van een stelsel, de afstand tot een stelsel te bepalen. (Hoofdstuk 6; voor onze stelsels had men de afstand al via een andere methode bepaald). In feite was al bekend dat deze relatie kan worden gebruikt voor elliptische stelsels, maar voor spiraalstelsels was de aanwezigheid van stof het voornaamste probleem.

Een andere manier om de kleuren van sterrenstelsels te bestuderen is door de karakteristieke lengtes van de lichtverdeling in de schijf, de zgn. “schaallengtes” (de radiële variant van de schaalhoogte), met elkaar te vergelijken in blauw, rood en nabij-infrarood “licht”. De verschillende soorten straling worden ten eerste op een iets andere manier beïnvloed door stof, en bovendien hebben sterren de eigenschap dat ze gedurende hun levensloop de soort straling die ze uitzenden langzaam variëren. Oudere sterren, bijvoorbeeld, stralen voornamelijk rood licht (en nabij-infrarode straling) uit, terwijl jonge sterren in alle golflengtes (zichtbaar licht en nabij-infrarode straling) tegelijk veel stralen, maar hun voornaamste energie wordt toch in blauw licht uitgestraald.

Als we dus verschillen zien tussen de schaallengtes in blauw, rood en nabij-infrarood “licht”, weten we dat een sterrenstelsel niet overal uit dezelfde soort sterren bestaat. In feite gedragen sterrenstelsels zich als kameleons: ze veranderen van kleur naarmate we verder

vanuit het centrum naar buiten kijken (ze worden blauwer naar buiten toe). De resultaten van de analyse van de verdeling van zowel het stof als van de verschillende soorten sterren worden beschreven in Hoofdstuk 5.

4 Een afgesloten hoofdstuk?

Een promotie-onderzoek afgerond, een proefschrift geschreven, is nu alles dan bekend? Gelukkig is dat niet het geval; er blijven nog legio intrigerende problemen over om als sterrenkundige mijn tanden in te zetten. Een onderzoek zoals in dit proefschrift gepresenteerd is, is nooit af. Tijdens het schrijven van de laatste hoofdstukken kwamen er telkens weer, vanuit een nieuwe invalshoek, interessante onderwerpen in me op.

Ondanks dat ik in Hoofdstuk 9 aandacht heb besteed aan de warps die voorkomen in de buitengebieden van schijven van sterrenstelsels, verdienen deze gebieden een nadere studie: zijn er verbanden te vinden tussen het voorkomen van een scherpe rand van de schijven en de aanwezigheid van een warp, wat zijn de implicaties van het voorkomen van een dergelijke scherpe rand voor de theorieën over het ontstaan en de evolutie van sterrenstelsels, hoe beïnvloeden dit soort kenmerken de zwaartekracht van sterrenstelsels?

De in Hoofdstuk 6 onder de loupe gehouden relatie waarmee mogelijk afstanden tot sterrenstelsels bepaald kunnen worden is wezenlijk verschillend voor spiraalstelsels en elliptische stelsels. Wat is de oorzaak hiervan? Een eigenschap van de stelsels of een externe invloed?

Hoe kunnen schijven van sterrenstelsels eigenlijk stabiel zijn? Waardoor komt dat? Heeft het zwaartekrachtsveld van de massaconcentratie in het centrum hier een belangrijke rol in? En hoe zit het eigenlijk met die massaconcentratie – waarom ziet die er soms bolvormig uit en soms als een pinda? Is er een relatie met de balkspiraalen uit de Hubble stemvork? Hoe is de verdeling van stof nu eigenlijk precies – bevindt het stof zich in een groot aantal wolken, of juist in een continue verdeling? Kunnen we daar iets over zeggen door naar structuren in het stof te kijken? Of kunnen deze structuren iets zeggen over de energierijke processen die zich in de schijven van sterrenstelsels afspelen?

Zo zou ik nog een tijdlang kunnen doorgaan. De belangrijkste conclusie van deze sectie, één die ik de lezer wil meegeven, is dat wetenschappelijk onderzoek meer vragen met zich meebrengt dan dat het oplossingen verschaft. Hopelijk geeft deze Nederlandse samenvatting ook een begrijpelijk beeld van het promotie-onderzoek waarmee ik me de afgelopen jaren heb beziggehouden. Mogelijk heeft deze samenvatting ook meer vragen opgeroepen dan beantwoord; ik ben gaarne bereid die – voor zover ik daartoe in staat ben – te beantwoorden.