

16. S T E R N F R E U N D E - S E M I N A R , 1 9 8 8

Planetarium der Stadt Wien - Zeiss Planetarium  
und Österreichischer Astronomischer Verein

D I E G A L A X I E N

- 1 - 2 Titelseite mit Inhaltsverzeichnis. 16 Jahre Österreichische Sternfreunde-Seminare zur Weiterbildung der Amateure.
- 3 - 16 Ausgewählte Literatur zu Galaxien (Prof.Hermann Mucke, Wien).
- 17 - 24 Aus der Geschichte der Galaxienforschung (Renate Weiland, Wien).
- 25 Galaktische Koordinaten und Milchstraßenpanorama (Prof. Hermann Mucke, Wien).
- 26 - 38 Über eine lichtelektrische Flächenphotometrie der südlichen und nördlichen Milchstraße in zwei Farben und die Struktur des galaktischen Systems (Univ.Prof.Dr.Hans Elsässer, Direktor des Max Planck Instituts für Astronomie, Heidelberg, und Univ.Prof.Dr.Ulrich Haug, Sternwarte Hamburg-Bergedorf, BRD).
- 39 - 42 Die helleren Galaxien aus dem Sky Catalogue 2000,0 (Alexander Probst, Brunn am Gebirge NÖ).
- 43 - 52 Die hellsten Galaxien des Himmels (Wolfgang Vollmann, Wien).
- 53 - 68 Übersicht Galaxien (Ing.Michael Pietschnig, Wien).
- 69 - 86 Radiostrahlung von Galaxien (Univ.Prof.Dr.Jörg Pfeleiderer, Vorstand des Instituts für Astronomie der Universität Innsbruck TI).
- 87 - 98 Staub in Galaxien (Dr.Werner Zeilinger, Dipartimento di Astronomia, Università di Padova, Italia).
- 99 - 138 Galaxien und Kosmologie (Univ.Prof.Dr.Rudolf Kippenhahn, Direktor des Max Planck Instituts für Astronomie und Astrophysik, Garching bei München, BRD).
- 139-148 Zum extragalaktischen Fundamentalsystem (Univ.Ass.Dipl.Ing. Robert Weber, Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abt.Geodäsie, Technische Universität Wien).
- 149-150 Finden schwacher Objekte mit elektronischer Hilfe - das CAT. Mit Geräte-Demonstration (Ing.Michael Pietschnig, Wien).

→

Seminarleiter: Prof. Hermann Mucke.

Wiedergabe dieser Papiere oder deren Teile ist nicht gestattet.

## 16 Jahre Österreichische Sternfreunde-Seminare

Veranstaltet vom Planetarium der Stadt Wien und dem Österreichischen Astronomischen Verein, wurde jeweils ein Teilgebiet der Himmelskunde eingehender und aktueller, als dies in den einschlägigen Handbüchern der Fall ist, behandelt. Die Seminare dienen der Weiterbildung der Amateurastronomen und Lehrer in Österreich.

- 1973 Astronomische Koordinatensysteme
- 1974 Gebrauch astronomischer Jahrbücher
- 1975 Himmelskarten und ihr Gebrauch
- 1976 Fernrohre und ihr Gebrauch
- 1977 Astronomische Phänomenologie
- 1978 Amateurastronomie, Theorie-Praxis
- 1979 Astronomische Finsternisse
- 1980 Kometen
- 1981 Mond
- 1982 Kleinplaneten
- 1983 Doppelsterne
- 1984 Sonne
- 1985 Himmelskunde und Kleinrechner
- 1986 Meteore
- 1987 Veränderliche Sterne
- 1988 Galaxien

Insgesamt umfassen die zugehörigen Papiere 1584 Seiten DIN A4 mit Erläuterungen, Formeln, Tabellen, Beispielen und Literaturhinweisen. Näheres im Sternenboten 1987, Heft 7, Seite 134-140.

Sie werden vom ÖSTERREICHISCHEN ASTRONOMISCHEN VEREIN herausgegeben und sind ab einschließlich Ausgabe 1979 noch lieferbar. Auskünfte und Bestellungen: Astronomisches Büro, Hasenwartg.32, A-1238 Wien, Österreich, Telephon 0222-8816703.

*Res severa est verum gaudium!*

Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

1. Geschichtlich bedeutende Werke

- Ptolemaios C.: Μαθηματικῆς Συνατάξεως βιβλία τῷ, die "Syntaxis".  
Original griechisch, übersetzt von Heiberg und Manitius. Bd. I, II.  
B.G. Teubner, Leipzig 1963. Darin in II, 8, 2 Beschreibung des  
Erscheinungsbildes der Milchstraße mit Bezug auf die Sterne.
- Wright T.: An Original Theory or new Hypothesis of the Universe.  
London 1750.
- Lambert H.J.: Cosmologische Briefe über die Einrichtung des  
Weltenbaues. Augsburg 1761.
- Herschel W.: Account of some Observations tending to investigate  
on the Construction of the Heavens and On the Construction of  
the Heavens, 1784. Nach Dreyer J.L.E.: The Scientific papers  
of Sir W. Herschel, London, Vol. 1.
- Messier C.: Liste der Nebel und Sternhaufen, in: Connaissance des  
Temps 1799, 1800, 1801, 1807, 1809, 1810. Dargestellt von  
Jones K.G.: Messier's Nebulae and Star Clusters, American  
Elsevier Publishing Company, New York 1968.
- Herschel J.F.W.: General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars  
Stars of the Epoch 1860, London 1864.
- Dreyer J.L.E.: New General Catalogue of Nebulae and Clusters of  
Stars, 1888 ("NGC"); Index Catalogue, 1895 ("IC"); Second Index  
Catalogue, 1908. Memoirs of the Royal Astronomical Society 49,  
51, 59; Neudruck London 1953.
- Kapteyn J.C.: Plan of Selected Areas. Publication of the Astrono-  
mical Laboratory, Groningen 1906.
- Keeler J.E.: Photographs of Nebulae and Clusters, made with the  
Crossley Reflector. Publications of the Lick Observatory, Vol.  
VIII. University of California Publications, Sacramento 1908.
- Bailey S.I.: The Southern Milky Way. Harvard Annals 72, Cambridge  
Mass., USA 1913.
- Barnard E.E.: Photographs of the Milky Way and of Comets, made  
with the Six-inch Willard Lens and Crocker Telescope. Publica-  
tions of the Lick Observatory, Vol. XI, University of California  
Publications, Sacramento 1913.

## 1. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Pannekoek A.: Die nördliche Milchstraße, Leiden 1920. Die südliche Milchstraße, Lembang 1929.

Barnard E.E.: Atlas of Selected Regions of the Milky Way. Carnegie Institution, Washington 1927.

Shapley H., Ames A.: A Survey of the External Galaxies Brighter than the Thirteenth Magnitude. Harvard Annals 88, Cambridge 1930.

Ross F.E., Calvert M.R.: Atlas of the Northern Milky Way. Chicago 1934.

Bottlinger K.F., Beck I.: Galaktischer Atlas. J.Springer, Berlin 1937.

Carlson D.: Some Corrections to Dreyer's Catalogue of Nebulae and Clusters. Contributions from the Mt. Wilson Observatory, Astrophysical Journal, Vol.91, 1940.

Frühe Entdeckungsgeschichte:

Jones K.G.: The Search for the Nebulae. Alpha Academic, Science History Publications, Chalfont St.Giles, UK, 1975.

## 2. Allgemein verständliche Werke

Kühn L.: Das Milchstraßensystem, Bauplan und Entwicklung unseres Sternsystems. Bücher der Zeitschrift Naturwissenschaftliche Rundschau, Wiss.Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1978.

Szécsényi-Nagy G.: Jenseits der Milchstraße. Original ungarisch, Gondolat Zebkönyvek, Budapest 1976. Übersetzt von Arndt. Akzent Taschenbuchreihe, Urania-Verlag, Leipzig 1979.

Ferris T.: Galaxien. Birkhäuser Verlag, Basel 1981.

Shapley H., Payne-Gaposchkin C., revised by Hodge P.W.: Galaxies. The Harvard Books on Astronomy, Harvard University Press, Cambridge, Mass., USA.

Mitton S.: Die Erforschung der Galaxien. Original englisch, Faber & Faber, London 1976. Übersetzt von Schallwisch und Reinhardt. Springer Verlag, Berlin 1978.

Taylor R.J.: Galaxien, Aufbau und Entwicklung. Reihe Spektrum der Astronomie. Original englisch, Wykeham Publications Ltd., London 1978. Übersetzt von Grewing. Vieweg Verlag, Braunschweig 1986.

## 2. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Heckmann O.: Sterne, Kosmos, Weltmodelle. Erlebte Astronomie.

R.Piper Verlag, München 1976.

Hodge P.W.: The Physics and Astronomy of Galaxies and Cosmology.

McGraw Hill Book Company, New York 1966.

Burnham R.Jr.: Burnham's Celestial Handbook. An Observer's Guide to the Universe Beyond the Solar System. Vol.I,II,III. Expanded and updated edition, Dover Publications Inc., New York 1978.

Jones K.G., Argyle W., Allen A., Barker S., Whiston G.S., Thomson M.J., Morales R.J., Hynes S.J.: Webb Society Deep-Sky Observer's Handbook, Vol.I-VIII: I.Double Stars. II.Planetary and Gaseous Nebulae. III.Open and Globular Clusters. IV.Galaxies. V.Clusters of Galaxies. VI.Anonymous Galaxies. VII.The Southern Sky.

Compiled by the Webb Society. Enslow Publishers, Inc., Aldershot UK, 1979-1987.

## 3. Eingehendere Werke

### 3.1. Milchstraße

Elsässer H., Haug U.: Die südliche und nördliche Milchstraße.

Flächenphotometrie in zwei Farben und die Struktur der Galaxis. Zeitschrift für Astrophysik, Bd.50, p.121-144. Springer Verlag, Berlin 1960.

Torgård I.: Lund Observatory Table for the Conversion of Equatorial into Galactic Coordinates and vice versa. Based on the Galactic Pole  $\alpha = 12^{\text{h}}49$ ,  $\delta = +27,4^\circ$  (1950,0). Dazu 2 Supplements: Interpolationstabeln. Annals of the Observatory of Lund 15 und 16, 1961.

Lund Observatory Table for Conversion of Galactic Coordinates, from the System based on the Pole  $\alpha = 12^{\text{h}}40$ ,  $\delta = +28^\circ$  (1900,0) into the System based on the Pole  $\alpha = 12^{\text{h}}49$ ,  $\delta = +27,4^\circ$  (1950,0) and vice versa. Annals of the Observatory of Lund 17, 1961.

Gilmore G., Carswell B.: The Galaxy. NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences Vol.207. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on this topic, Cambridge UK, 1986.

Kerr F.J., Rodgers A.W.: The Galaxy and the Magellanic Clouds.

Proceedings of the 20th IAU-URSI Symposium, Canberra 1963.

Australian Academy of Sciences, Canberra 1964.

### 3. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

#### Inhaltsverzeichnis zu Gilmore G., Carswell B.: The Galaxy

Preface	vii
List of Participants	ix
Photograph	xii
Index to Photograph	xiii
<b>GALACTIC DISTANCE SCALES</b>	<b>1</b>
M.W. Feast	
<b>COMPARISON OF THE GALAXY WITH EXTERNAL SPIRAL GALAXIES</b>	<b>27</b>
P.C. van der Kruit	
<b>THE GALACTIC CENTER</b>	<b>51</b>
Reinhard Genzel	
<b>THE HIGH ENERGY GALAXY</b>	<b>81</b>
Catherine J. Cesarsky	
<b>MOLECULAR CLOUDS IN THE GALAXY</b>	<b>105</b>
P.M. Solomon and A.R. Rivolo	
<b>THE MORPHOLOGY OF COOL, DIFFUSE GAS AND DUST IN THE GALAXY</b>	<b>141</b>
W.B. Burton and E.R. Deul	
<b>HIGHLY EVOLVED STARS IN THE GALAXY AS SEEN BY IRAS AND IN OH SURVEYS</b>	<b>173</b>
H.J. Habing	
<b>NONLINEAR PHENOMENA IN SPIRAL GALAXIES</b>	<b>199</b>
G. Contopoulos	
<b>STELLAR SUPERCLUSTERS AND GROUPS</b>	<b>211</b>
Olin J. Eggen	
<b>AN INVESTIGATION OF THE RELATIONS BETWEEN AGE, CHEMICAL COMPOSITION AND PARAMETERS OF VELOCITY DISTRIBUTION BASED ON <i>uvby</i> PHOTOMETRY OF F STARS WITHIN 100 PARSEC</b>	<b>229</b>
B. Strömgren	
<b>THE MULTIVARIATE STELLAR DISTRIBUTION FUNCTION</b>	<b>247</b>
Gerard Gilmore and Rosemary F.G. Wyse	
<b>THE STRUCTURE OF THE GALACTIC HALO</b>	<b>281</b>
F.D.A. Hartwick	
<b>KINEMATICS OF OLD STARS</b>	<b>291</b>
K.C. Freeman	
<b>POPULATION STUDIES OF THE GALAXY - CONSTRAINTS ON THE THIN DISK, THICK DISK AND THE HALO</b>	<b>297</b>
John Norris	
<b>KINEMATICS AND GALACTIC STRUCTURE</b>	<b>321</b>
Allan Sandage	
<b>GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION</b>	<b>341</b>
B.E.J. Pagel	
<b>MASS LOSS FROM SINGLE AND CLOSE BINARY STARS</b>	<b>365</b>
Icko Iben Jr.	
<b>DYNAMICAL EVOLUTION OF THE GALACTIC DISK</b>	<b>375</b>
Burkhard Fuchs and Roland Wielen	
<b>THE GALAXY IN ACTION SPACE</b>	<b>399</b>
James Binney	
<b>THE FORMATION OF THE GALAXY</b>	<b>413</b>
James E. Gunn	
<b>Index</b>	<b>431</b>

#### 4. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Mavridis L.N.: Stars and the Milky Way System. Proceedings of the First European Astronomical Meeting, Athen 1972. Springer Verlag, Berlin 1974.

Freeman K.C.: The Galactic Spheroid and Old Disk. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.25, 603-633, Palo Alto, California, USA 1987.

Becker W., Contopoulos G.: The Spiral Structure of our Galaxy. Proceedings of the 38th Symposium of the IAU, Basel 1969. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1970.

Shuter W.L.H.: Kinematics, Dynamics and Structure of the Milky Way. Proceedings of a workshop, Vancouver 1982. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1983.

Kerr F.J., Simonson III S.C.: Galactic Radio Astronomy. Proceedings of the 60th Symposium of the IAU, Maroochydore, Australien 1973. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1974.

Van Woerden H.: Radio Astronomy and the Galactic System. Proceedings of the 31th IAU-URSI Symposium, Nordwijk, 1966. Academic Press, London 1967.

Sanford P.W., Laskarides P., Salton J.: Galactic X-Ray Sources. Wiley & Sons, Chichester UK, 1982.

Basinka-Grzesik E., Mayor M: Chemical and Dynamical Evolution of our Galaxy. Proceedings of the 45th Colloquium of the IAU, Torun, Polen 1977. Sternwarte Genf, Sauverny, Schweiz 1978.

#### 3.2. Galaxien

Sersic J.L.: Extragalactic Astronomy. Lecture Notes from Cordoba. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1982.

McVittie G.C.: Problems of Extra-Galactic Research. Proceedings of the 15th IAU Symposium, 1961. The Macmillan Company, New York 1962.

Miller J.S.: Astrophysics of Active Galaxies and Quasi-Stellar Objects. Proceedings of the 7th Santa Cruz Workshop on Astrophysics, 1984. University Science Books, Oxford University Press, 1985.

Barbanis B., Hadjidemetriou J.D.: Galaxies and Relativistic

## 5. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

### Inhaltsverzeichnis zu Sersic J.L.: Extragalactic Astronomy

#### PREFACE

v

#### CHAPTER I: FORMS AND STRUCTURES

I.1.	Normal and Peculiar Galaxies	1
I.2.	Classification of Normal Galaxies	3
	<i>The Holmberg Classification</i>	4
	<i>Description of the Holmberg Types</i>	6
	<i>The Hubble Classification</i>	9
	<i>The de Vaucouleurs Classification</i>	11
I.3.	Apparent and True Flattening of Galaxies	14
I.4.	Other Classification Systems	17
	<i>The Yerkes Classification</i>	17
	<i>Luminosity Classes</i>	20
I.5.	Classification of Peculiar Galaxies	22

#### CHAPTER II: NORMAL GALAXIES

II.1.	Contents	24
II.1.1.	Photometric Properties	24
	<i>Total Luminosities</i>	26
	<i>Brightness Distributions</i>	28
	<i>Other Luminosity Distributions</i>	30
	<i>Apparent Dimensions</i>	30
	<i>Colors</i>	30
II.1.2.	Stellar Content	34
	<i>Composite Spectra</i>	35
	<i>Luminosity Effects</i>	35
	<i>Composition Differences</i>	36
II.1.3.	The Interstellar Medium in Galaxies	37
	<i>Neutral Hydrogen Observations</i>	37
	<i>The Neutral Hydrogen Content along the Sequence</i>	38
	<i>Neutral Hydrogen Distribution</i>	40
	<i>The Ionized Medium in Galaxies</i>	40
II.1.4.	Subsystems	44
	<i>Spheroidal Subsystems</i>	44
	<i>Globular Clusters</i>	44
	<i>The Nuclear Subsystems</i>	45
	<i>Disk Subsystems</i>	45
	<i>Arm Subsystems</i>	46
	<i>The Bar and its Associated Subsystems</i>	46
II.2.	Motions and Masses	48
II.2.1.	Kinematics	48
	<i>Rotation Curves in Late-type Galaxies</i>	50
	<i>Observed Rotation Curves in Late-type Galaxies</i>	52
	<i>Departures from Circular Motion</i>	54
	<i>Rotation in Early-type Galaxies</i>	56
	<i>Velocity Dispersion in Early-type Galaxies</i>	56
II.2.2.	Masses of Galaxies	57
	<i>Masses from Curves of Rotation</i>	57
	<i>Indicative Masses</i>	58
	<i>Mass Distribution</i>	60
	<i>Angular Momentum from Rotation Curves</i>	61
	<i>Masses from the Velocity Dispersion of Stars</i>	62
	<i>Statistical Masses from Galaxy Pairs</i>	62
	<i>Statistical Masses from Systems of Galaxies</i>	63

II.2.3.	Mass-Luminosity Ratios	65
	<i>Integrated Values</i>	65
	<i>Variation of the Local Value of the <math>M/L_B</math> Ratio</i>	66
	<i>Massive Halos</i>	66
II.3.	Models for Normal Galaxies	67
II.3.1.	Dynamical Models	67
	<i>Elliptical Galaxies</i>	68
	<i>Flattening of Elliptical Galaxies</i>	69
	<i>Triaxial Structures in Elliptical Galaxies</i>	70
II.3.2.	Evolution of Galactic Content	71
	<i>Basic Equations</i>	71
	<i>Chemical Evolution of the Interstellar Gas</i>	72
	<i>The Rate of Stellar Formation</i>	74
	<i>Integrated Colors as Age Indicators</i>	75
	<i>The Nature of Dwarf Galaxies</i>	77

#### CHAPTER III: ACTIVE GALAXIES

III.1.	Classification	82
III.2.	Intergalactic H II Regions (IG H II)	86
III.3.	Galaxies with Nuclear Emission (neG)	86
III.4.	Irr II Galaxies	89
	<i>Explosive Galaxies</i>	89
	<i>Post Eruptive Galaxies</i>	91
III.5.	Seyfert Galaxies (SyG)	93
III.5.1.	Spectrum of Emission	93
III.5.2.	Continuum Spectrum	95
III.5.3.	Variability	95
III.5.4.	Radioemission	95
III.5.5.	Correlations	97
III.6.	Strong Radio Galaxies (SRG)	97
III.6.1.	Radio Structures	98
III.6.2.	Spectrum of Radio Frequencies	99
III.6.3.	Time Scale	99
III.6.4.	Compact Sources	100
III.6.5.	Optical Forms Associated with SRG's	102
III.6.6.	Optical Spectra	104
III.6.7.	Energetics of SRG's	104
III.7.	N Galaxies	106
III.8.	Quasi Stellar Objects (QSO)	107
III.8.1.	Continuum Spectrum	109
III.8.2.	Line Spectrum	109
III.8.3.	BL Lacertae Objects	110
III.8.4.	Redshifts and Nature of the QSO's	111
III.9.	Activity in Compact Objects	112
III.9.1.	Excitation Mechanism	112
III.9.2.	The Source of Energy	114

Fortsetzung nächste Seite

## 6. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

### Fortsetzung Inhaltsverzeichnis zu Sersic J.L.: Extragalactic Astronomy

<b>CHAPTER IV: GALAXIES AND THEIR ENVIRONMENT</b>		
IV.1.	Tidal Interactions	118
	<i>Interacting Galaxies (IG)</i>	118
	<i>Ring-like Peculiar Galaxies</i>	122
	<i>Dynamical Friction</i>	122
	<i>Mergers</i>	125
IV.1.2.	Non-tidal Interactions	126
	<i>SRGs as Environmental Probes</i>	126
	<i>The Head-Tail Radio Sources</i>	130
	<i>Stripping Process</i>	134
	<i>Accretion</i>	134
IV.2.	Agregates of Galaxies	135
IV.2.1.	Pairs and Multiplets	136
IV.2.2.	Groups of Galaxies	138
IV.2.3.	Clusters	140
	<i>Classification</i>	140
	<i>Dynamics and Evolution</i>	144
	<i>Intracluster Medium (ICM)</i>	145
	<i>Luminosity Function</i>	146
IV.2.4.	Second Order Clustering	146
	<i>The Local Super Cluster (SC)</i>	147
IV.2.5.	Clustering	147
	<i>The Observed and Computed Correlations</i>	148
	<i>Saslaw's Interpretation</i>	149
IV.3.	Mean Mass Density of Matter in the Universe	149
	<i>A Hierarchical Universe?</i>	150
<b>CHAPTER V: MEASURING THE UNIVERSE</b>		
V.1.	Distance Indicators	155
V.1.1.	Primary Distance Indicators	156
	<i>Interstellar Absorption</i>	156
	<i>Novae</i>	158
	<i>Population I Cepheids</i>	159
	<i>RR Lyrae</i>	162
V.1.2.	Other Photometric Indicators	162
	<i>The Brightest Stars</i>	163
	<i>Blue Bright Stars</i>	163
	<i>The Hubble-Sandage Stars</i>	164
	<i>Red Giants</i>	164
	<i>Globular Clusters</i>	164
	<i>The Color-Magnitude (CM) Effect</i>	166
	<i>Luminosity Classes</i>	166
	<i>Absolute Magnitudes of Galaxies</i>	167
V.1.3.	Geometric Indicators.	167
	<i>Diameters of H II Rings</i>	168
	<i>Diameters of the Largest H II Regions</i>	168
	<i>Diameters of Spiral Galaxies</i>	170
V.1.4.	Other Indicators	170
	<i>Surface Brightness of Galaxies</i>	171
	<i>Super Associations (SAS)</i>	171
	<i>Supernovae</i>	171
	<i>The 21-cm Line Width</i>	173
	<i>Sypernovae Expansion</i>	174
	<i>Super Luminial Expansion</i>	174
V.2.	The Scale of Distances	175
		176
V.2.1.	The Hubble Flow	
V.2.2.	The Quest for $H_0$	177
	<i>Seven Steps Toward the Hubble Constant</i>	177
	<i>Seven Other Steps Toward the Hubble Ratio</i>	178
	<i>Two Leaps to <math>H_0</math></i>	179
	<i>Epilog</i>	179
V.3.	Far Away and Long Ago	180
V.3.1.	The Redshift	180
V.3.2.	The Hubble Law	183
	<i>The Redshift Magnitude Diagram</i>	184
	<i>The Deceleration Parameter</i>	186
<b>CHAPTER VI: COSMOLOGY</b>		
VI.1.	Basic Assumptions	190
VI.2.	Explosive Cosmologies	193
VI.3.	Thermal Evolution of the Universe	196
VI.4.	Primaeval Nucleosynthesis	199
VI.5.	The Background Radiation	201
VI.6.	Observational Cosmology	203
VI.6.1.	Observable Parameters	203
VI.6.2.	Fitting the Model to the Universe	205
VI.6.3.	Lifting the Restriction $\Lambda = 0$	207
<b>CHAPTER VII: GRAVITATIONAL INSTABILITY AND GALAXY FORMATION</b>		
VII.1.	Theory of Jeans' Wavelength and Mass	209
VII.1.1.	The Jeans Mass	211
VII.2.	Gravitational Instability in an Expanding Universe	211
VII.2.1.	The Era of Gravitational Instability	215
VII.3.	Protogalaxies	215
VII.3.1.	Non-linear Growth of a Density Perturbation	216
VII.4.	Galaxy Formation Through Dissipative Collapse	217
VII.4.1.	Stationary State out of Equilibrium	221
VII.4.2.	Hierarchy of Fragmentations	222
VII.4.3.	The End of the Hierarchy	224
VII.4.4.	Global Dynamics	226
VII.4.5.	The Influence of Rotation	227
VII.5.	Dissipationless Collapse	229
<b>CHAPTER VIII: NOTES AND COMMENTS</b>		
VIII.1.	Catalogs and Atlas of Galaxies	231
VIII.2.	Composite Spectra	233
	<i>Quantitative Analysis of Composite Spectra</i>	233
VIII.3.	The H I Spectrum	234
	<i>Line Formation</i>	235
	<i>Excitation of the 21-cm Line</i>	236
	<i>Optical Depth and Absorption</i>	237
VIII.4.	Determination of Rotation Curves	238
VIII.5.	Rotation Period of Central Regions in Galaxies	239
VIII.6.	Note for Section V.1.3	240
<b>SUBJECT INDEX</b>		242

## 7. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Astrophysics. Proceedings of the First European Astronomical Meeting, Vol.3, Athen 1972. Springer Verlag, Berlin 1974.

Heeschen D.S., Campbell Wade M.: Extragalactic Radio Astronomy. Proceedings of the 97th Symposium of the IAU-URSI, Albuquerque, USA, 1981. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1982.

Haynes R.F., Heuchmeier W.K.H., Siegman B.C., Wright A.E.: A Compendium of Radio Measurement of Bright Galaxies. CSIRO Division of Radiophysics, 1975.

Van den Bergh S.: The Classification of Normal Galaxies. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada 69, 57, 1975.

The Classification of Active Galaxies. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada 69, 105, 1975.

A New Classification System of Galaxies. Astrophysical Journal 206, 883, 1976.

Luminosity Classification of Dwarf Galaxies. Astronomical Journal 71, 922, 1966.

Freeman K., Larson R.B., Tinsley B.: Galaxies. Sixth Advanced Course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics, Swiss National Academy of Sciences, Saas-Fee, Schweiz 1977.

Evans D.S., Wills D., Wills B.J.: External Galaxies and Quasi-Stellar Objects. Proceedings of the 44th Symposium of the IAU, Uppsala 1970. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1972.

Evans D.S.: Photometry, Kinematics and Dynamics of Galaxies. Proceedings of a Conference, Austin, Texas 1979. Department of Astronomy, University of Texas, Austin 1980.

Ogorodnikov K.F.: Dynamics of Stellar Systems. Original Russisch, Dinamika zvezdnykh sistem, Fizmatgiz, Moskau. Pergamon Press, London 1965.

Shakeshaft J.R.: The Formation and Dynamics of Galaxies. Proceedings of the 58th Symposium of the IAU, Canberra, Australia, 1973. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1974.

De Zeeuw T.: Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies. Proceedings of the 127th Symposium of the IAU, Princeton, USA, 1986. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1987.

## 8. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

- Weliachew L.: La Dynamique des Galaxies Spirales. Colloque International Du CNRS No.241. CNRS, Paris 1975.
- Gallagher II J.S., Hunter D.A.: Structure and Evolution of Irregular Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.22, 37-75, Palo Alto, California, USA, 1984.
- Tarenghi M., Kjær K.: Dwarf Galaxies. First ESO/ESA Workshop on the Need for Coordinated Space and Ground-based Observations, ESO/ESA, Genf 1980.
- Bregman J.N., Lockman F.J.: Gaseous Halos of Galaxies. Proceedings of a Workshop, Green Bank, Virginia, USA, 1985. NRAO, Green Bank 1986.
- Athanassoula E., Bosma A.: Shells and Rings around Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.23, 147-169, Palo Alto, California, USA, 1985.
- Stein W.A., Soifer B.T.: Dust in Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.21, 177-207, Palo Alto, California, USA, 1983.
- Woltjer L.: The Distribution and Motion of Interstellar Matter in Galaxies. Proceedings of a Conference, Princeton USA, 1961, W.A.Benjamin Inc., New York 1962.
- De Loore C.W.H., Willis A.J., Laskarides P.: Luminous Stars and Associations in Galaxies. Proceedings of the 116th Symposium of the IAU, Porto Heli, Griechenland, 1985. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1986.
- Faber S.M., Gallagher J.S.: Masses and Mass-to-Light Ratios of Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.17, p.135-187, Palo Alto, California, USA, 1979.
- Dickel J.R., Rood H.J.: Integrated Masses of Galaxies. Astrophysical Journal 223, 391, 1978.
- O'Connell J.K. SJ: Nuclei of Galaxies. Study Week, Pontifica Academia Scientiarum, North Holland Publishing Company, Amsterdam 1971.
- Muller A.B.: The Magellanic Clouds. Based on the Symposium on the Magellanic Clouds, Santiago 1969. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1970.

## 9. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Van den Bergh S.: The Galaxies of the Local Group, in: Fall S.M., Lynden-Bell D.: The Structure and Evolution of Normal Galaxies. Cambridge University Press, Cambridge UK, 1981.

Mardirossian F., Giuricin G., Mezzetti M.: Clusters and Groups of Galaxies. Astrophysics and Space Science Library, Vol.111, International Meeting, Triest, Italien, 1983. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1984.

Madore B.F., Tully R.B.: Galaxy Distances and Deviations from Universal Expansion. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Kona, Hawaii, 1986. NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences, Vol.180. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1986.

### 3.3. Entwicklung der Galaxien

Giuricin G., Mardirossian F., Mezzetti M., Ramella M.: Structure and Evolution of Galactic Nuclei. Astrophysics and Space Library, Vol.121, Proceedings of an International Meeting, Triest, Italien, 1985. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1986.

Jones B.J.T., Jones J.E.: The Origin and Evolution of Galaxies. NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences, Vol.97, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Erice, Italien, 1981. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1983.

Lequeux J.: Structure and Evolution of Galaxies. Gordon and Breach Science Publishers, New York 1969.

Chiosi C., Renzini A.: Spectral Evolution of Galaxies. Astrophysics and Space Science Library, Vol.122. Proceedings of the 4th Workshop of the Advanced School of Astronomy, Erice, Italien, 1985. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1986.

### 3.4. Galaxien und Universum

Sandage A., Sandage M., Tammann G.A.: Galaxies and the Universe. Vol.IX aus: Kuiper G.P., Middlehurst B.M., Stars and Stellar Systems. The University of Chicago Press, Chicago 1975.

Kleczek J.: The Universe. Geophysics and Astrophysics Monographs, Vol.11. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1976.

## 10. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Gore R, Sugar J.A.: The Once and Future Universe. National Geographic, Vol.163, No.6, June 1983. National Geographic Society, Washington D.C., USA, 1983.

West R.M.: Understanding the Universe - The Impact of Space Astronomy. Based on Talks given at the UN/IAU International Seminar on the Occasion of UNISPACE 82, Wien 1982. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1983.

Abell G.O., Chincarini G.: Early Evolution of the Universe and its Present Structure. Proceedings of the 104th Symposium of the IAU, Kolybari, Kreta 1982. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1983.

Ambarzumjan V.A.: Probleme der moderne Kosmogonie. Original russisch, Verlag Nauka, 2.Auflage, Moskau 1972. In Deutsch herausgegeben von H.Oleak. Akademie Verlag, Berlin DDR 1976.

Longair M.S.: Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data. Proceedings of the 63th Symposium of the IAU, Krakau 1973. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht 1974.

### 4. Karten und Atlanten mit galaktischen und extragalaktischen Objekten

#### 4.1. Karten und Atlanten für die ganze Himmelskugel

Hlad O., Hovorka F.: Die neuen Kosmos-Himmelskarten. Nördlicher und Südlicher Sternenhimmel für das Äquinoktium 2000,0, Grenzgröße Sterne +5,25<sup>mag</sup>, Galaxien +11,25<sup>mag</sup> visuell. Franckh'sche Verlagshandlung, W.Keller, Stuttgart 1986.

Bečvář A.: Atlas Coeli 1950,0. Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prag und Sky Publishing Corporation, Cambridge, Mass., USA, 1962. Grenzgröße Sterne +7,75<sup>mag</sup>, Galaxien +13,0<sup>mag</sup> visuell. Milchstraßenisophoten nach Pannekoek.

Tirion W.: Sky Atlas 2000,0. Grenzgröße Sterne +8,0<sup>mag</sup>, Galaxien +13,0<sup>mag</sup> visuell. Milchstraßenisophoten nach Pannekoek. Sky Publishing Company, Cambridge, Mass., USA, 1981.

Vehrenberg H.: Falkauer Atlas. Photographischer Atlas, Nordteil vom Nordpol bis  $\delta = -26^\circ$ , Südteil von  $\delta = -14^\circ$  bis Südpol. 464 Karten, Grenzgröße Objekte +12<sup>mag</sup> photographisch. Treugesell Verlag, Düsseldorf 1962-1964.

## 11. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Vehrenberg H.: Atlas Stellarum 1950,0. Photographischer Atlas, 450 Karten, Grenzgröße Objekte  $+14^{\text{mag}}$ . Dazu: Conversion Tables for Standard Epochs 1855,0 bis 2000,0, matching to Atlas Stellarum 1950. Treugesell Verlag, Düsseldorf 1972.

Second Palomar Sky Survey: 894 Aufnahmen vom Nordpol bis zum Äquator mit Palomar Schmidt 122/307cm in drei Farben: IIA-J, mit GG 385, IIIA-F mit RG 610, IV-N mit RG 9. Grenzgröße  $+23^{\text{mag}}$ . Ab 1991, Kopien auf Film pro Farbe US \$ 16 000.-. Grenzgröße  $+23^{\text{mag}}$ . California Institute of Technology, Pasadena, California USA.

ESO Quick Blue Survey: 606 Aufnahmen vom Südpol bis  $\delta = -17,5^\circ$ . mit ESO-Schmidt 100/300cm auf IIA-O mit GG 385. Grenzgröße  $+21^{\text{mag}}$ . Kopien auf Film sFr 20 500.-. ESO Zentrale, Garching bei München.

ESO/SRC Deep Sky Survey: 1212 Aufnahmen, Südpol bis Äquator, mit ESO-Schmidt, La Silla, Chile in J und R, und mit UK-Schmidt in Siding Spring, Australien, in B. Grenzgröße  $+23^{\text{mag}}$ . Filmkopie aller 3 Farben: sFr 100 000.-. ESO-Zentrale, Garching/München. *Zwei Aufnahmen sind im Planetarium öffentlich ausgestellt und können mit Leseglas durchmustert werden - Filmkopien 30x30cm: Rotaufnahme 056,  $\alpha = 5^{\text{h}}12$ ,  $\delta = -70^\circ$  DOR/MEN mit Gr. Magellanwolke Rotaufnahme 437,  $\alpha = 10^{\text{h}}44$   $\delta = -30^\circ$  HYA/ANT. ESO-Schmidt, 2 Std.*

### 4.2. Karten und Atlanten für spezielle Himmelsausschnitte

Mallas J.H., Kreimer E.: The Messier Album, an Observer's Handbook. Sky Publishing Company, Cambridge, Mass. USA, 1978.

Vehrenberg H., Güntzel-Lingner U.: Atlas der schönsten Himmelsobjekte ("Mein Messier-Buch", 3. Auflage). Gleichmaßstäbliche Aufnahmen und Einzeldarstellungen. Treugesell Verlag, Düsseldorf 1978.

Sarna T.M.: Sarna Deep Sky Atlas. 2nd Edition, William Bell, Inc., Richmond, Virginia, USA 1985.

Sandage A.: The Hubble Atlas of Galaxies. Carnegie Institution, Washington D.C., USA, 1961.

Sersic J.L.: Atlas de Galaxias Australes. Observatorio Astronomico, Universidad Nacional de Cordoba, Argentina 1968.

Tully R.B., Fisher J.R.: Nearby Galaxies Atlas. Cambridge University Press, Cambridge UK, 1987.

## 12. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Hodge P.W.: Atlas of the Andromeda Galaxy. University of Washington Press, Seattle.

Arp H.: Atlas of Peculiar Galaxies. Mt. Wilson und Palomar Observatories, Institute of Technology, Pasadena, California 1966.

### 5. Kataloge mit galaktischen und extragalaktischen Objekten

Hirshfeld A., Sinnott R.W.: Sky Catalogue 2000,0. Vol.1: Stars, 1982; Vol.2: Double Stars, Variable Stars, Nonstellar Objects, 1985. Sky Publishing Company, Cambridge, Mass. USA.

Bečvář A.: Atlas Coeli II. Katalog 1950,0. Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prag und Sky Publishing Corporation, Cambridge, Mass., USA. 1968.

Sulentic J.W., Tifft W.G.: The Revised New General Catalogue of Nonstellar Astronomical Objects. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA, 1973.

### 6. Reine Galaxien-Kataloge

Dressel L.L., Condon J.J.: Accurate Positions of Bright Galaxies. The Astrophysical Journal Supplement Series, 31, 187-236, 1976.

De Vaucouleurs G.: Integrated Colors of Bright Galaxies in the UBV-System. Astrophysical Journal, Supplement Series 48,V, 1961.

Sandage A., Tammann G.A.: A Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies. Carnegie Institution, Washington D.C., USA, 1981.

Nilson P.N.: Uppsala General Catalogue of Galaxies ("UGC"), 1973. Catalogue of Selected Non-UGC Galaxies, 1974. Uppsala Astronomical Observatory, Uppsala, Schweden.

De Vaucouleurs G., Corwin H.G.Jr.: Second Reference Catalogue of Bright Galaxies. University of Texas Press, Austin 1976.

Kraan-Korteweg R.C., Tammann G.A.: A Catalogue of Galaxies within 10 Mpc. Astronomische Nachrichten 300, 181, 1979.

Vorontsov-Velyaminov B., Krasnogorskaja A., Arhipova V.: Morphological Catalogue of Galaxies. Alle Galaxien heller als +15,0<sup>mag</sup> aus POSS. Verlag der Universität Moskau, 1962-1968.

Weedman D.W.: Seyfert Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 15, 69, 1977.

### 13. Fortsetzung Referat: Ausgewählte Literatur zu Galaxien

Weedman D.W.: More Seyfert Galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 184, 11P, 1978.

Zwicky F., Herzog E., Wild P.: Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies. Bände I-VI. Galaxien aus POSS. California Institute of Technology, Carnegie Institution of Washington, 1966.

Bahcall N.A., Soneira R.M.: A Supercluster-Catalog. Astrophysical Journal 277, 27, 1984,

Noonan T.W.: List of Clusters of Galaxies with Published Redshifts. Astrophysical Journal Supplement Series 45, 613, 1981.

Palumbo G.G.C., Tanzella-Nitti G., Vettolani G.: Catalogue of Radial Velocities of Galaxies. Gordon and Breach Science Publishers, New York 1983.

Humason M.L., Mayall N.U., Sandage A.R.: Redshifts and Magnitudes of Extragalactic Nebulae. Astronomical Journal 61, 97, 1956.

Eine Anzahl der hier genannten Werke ist im Anschluß an das Referat einzusehen. Es wird gebeten, die Bücher und Atlanten möglichst schonend zu behandeln. In einem Leuchtkasten können zwei Filmkopien der ESO/SRC Deep Sky Survey, 30x30cm, mit einem Lese-  
glas durchmustert werden.

Prof. H. Mucke  
Hasenwartgasse 32  
A-1238 Wien

Referat: Aus der Geschichte der Galaxienforschung

1. Milchstraße

In der Mythologie alter Völker ist die Milchstraße himmlischer Fluß, Straße oder Brücke zwischen Himmel und Erde. In China ist die Milchstraße ein Sinnbild des Lebenswegs, in Griechenland wird der Name Galaxias (=Milchstraße) geprägt (es handelt sich um die Milch der Hera), in Arabien wird ein Fluß angenommen, das hebräische Wort Aroch bedeutet "langes Band", bei den Indianern Nordamerikas ist die Milchstraße der Weg ins Jenseits und in Indien Akash Ganga, das Flußbett des Ganges.

Durch Manilius (um das Jahr 0) wird überliefert, daß Demokrit (um 500 v. Chr.) angenommen hat, die Milchstraße sei der vereinigte Glanz vieler schwacher Sterne und das Universum bestehe aus vielen Welten wie unsere Erde. Einige Jahrzehnte vor Demokrit bemerkte Theophrast, daß die Milchstraße offenbar ein Ring ist, der den Himmel in 2 Teile trennt, durch die Fuge ist das Licht der Götter sichtbar.

- 1610 Galilei beobachtet die Milchstraße mit seinem Fernrohr und sieht, daß sie aus lauter Sternen besteht.
- 1618 Kepler spekuliert, daß die Milchstraße ein großer Sternerring sei, die Sonne stehe in ihrer Mitte, weil annähernd ein Großkreis zu sehen ist.
- 1656 Huygens löst große Teile der Milchstraße in Sterne auf und hält daher die gesamte Milchstraße für auflösbar.
- 1718 Halley stellt durch Vergleich zeitgenössischer Positionen mit den Angaben aus dem Katalog des Ptolemäios fest, daß bestimmte Sterne (Sirius, Arkturus, Aldebaran) ihren Ort an der Himmelskugel verändert haben.
- 1750, bedingt durch die Entdeckung des Gravitationsgesetzes, herrscht der Gedanke nach der Suche des einheitlichen Weltganzen. Wright veröffentlicht "An original theory or a new hypothesis of the universe founded on the laws of nature" (Eine neue Theorie oder Hypothese vom Universum auf Basis der Naturgesetze). Demnach sei die Milchstraße ein scheibenförmiges Sternsystem. Da die Sonne im System steht, ergibt sich geometrisch das schmale Band. Wright macht sich als einer der Ersten Gedanken über die Milchstraße und meint auch, daß sie nur eines von vielen gleichartigen Sternsystemen sei, die wegen der großen Entfernung nur als schwache Nebelchen sichtbar sind.

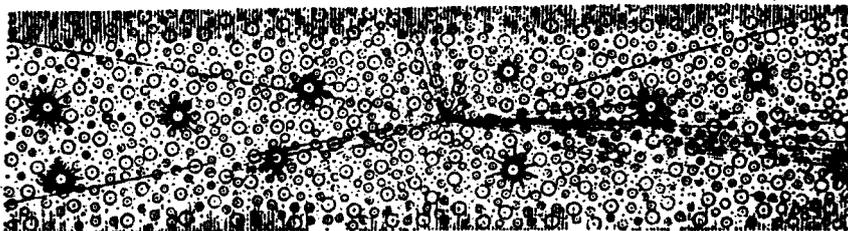


Abb. 1. Wrights Darstellung der Milchstraße als eine flache Scheibe von Sternen

## 1. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

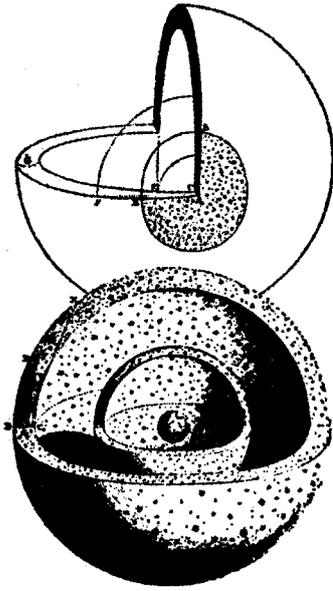


Abb. 2. Ein weiteres Modell der Sternverteilung nach Wright

- 1755 Kant "Allgemeine Naturgeschichte oder Theorie des Himmels oder der Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt". Er greift Wrigth's Idee auf. Dieses System ist abgeplattet, weil durch Rotation Kräfte wirken. Die kleinen, runden oder ovalen Nebelfleckchen am Himmel sind auch solche Sternsysteme. Das Universum ist also nicht aus Einzelsternen, sondern aus Sternsystemen aufgebaut. (Theorie der Inseluniversen)
- 1760 Mayer mißt sehr genaue Sternpositionen und beweist die Eigenbewegung der Sterne.
- 1761 Der Mathematiker und Astronom Lambert veröffentlicht seine "Kosmologischen Briefe", wo er die Kanttheorie unterstützt. Das ganze System aller sichtbaren Sterne ist eine Scheibe, deren Durchmesser vielfach größer als die Dicke ist. Außer der Milchstraße gibt es noch andere solche Systeme, die zusammen wieder Systeme höherer Ordnung ergeben. Die Milchstraße ist aus Teilsystemen aufgebaut, die sich um einen gemeinsamen Mittelpunkt bewegen.
- 1784 Herschel möchte den Aufbau der Milchstraße mit Hilfe statistischer Methoden erforschen. Er verwendet als Eichfeld (star gauges) das Gesichtsfeld seines 49cm Fernrohrs bei 157-facher Vergrößerung. Er beobachtet 3400 Felder zwischen  $+45^\circ$  und  $-30^\circ$ , später zählt sein Sohn noch 2299 Felder des südlichen Himmels aus. Er schätzt, daß der ganze Himmel 20 Millionen Sterne, für sein Fernrohr sichtbar, hat. Herschel's Methode liefert keine absoluten Ausdehnungen, doch kann man die Milchstraße in Siriusweiten abschätzen. (Durchmesser 1000 Siriusweiten, Dicke 100, im Zentrum steht die Sonne)
- 1785 Herschel: "On the constructions of the heavens" veröffentlicht seine Ergebnisse und Schlußfolgerungen. Die Milchstraße ist eine Scheibe mit ausgezackten Rändern aus Millionen von Sternen. In großer Entfernung sieht sie genauso aus, wie die vielen, kleinen, runden Nebel.

## 2. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

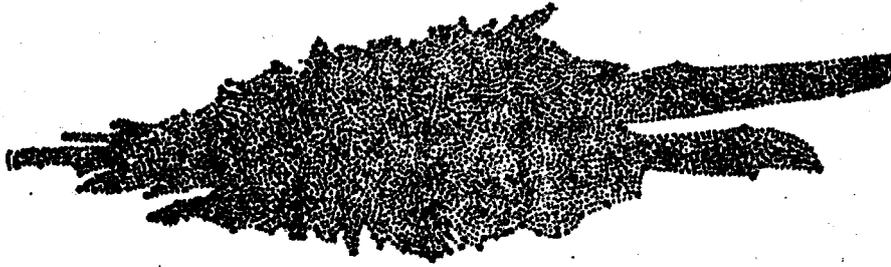


Abb. 3. Wilhelm Herschels Modell der Milchstraße aus Zählungen der Sterndichte

- 1818 Herschel revidiert seine Ansicht vom Bau der Milchstraße. Sie ist ihrer Ebene unbegrenzt.
- 1825 Struve bestimmt erstmals die galaktische Ebene, der Pol liegt bei  $\alpha = 12^{\text{h}}38^{\text{m}}$  und  $\delta = +31^{\circ},5$ . (bezogen auf 1825)
- 1847 Struve erklärt, die Milchstraße bestehe aus planparallelen Schichten von Sternen mit wachsender Dichte gegen die mittlere Schicht. ("Etude d'Astronomie stellaire")
- 1850 May bemerkt, daß die 650 bekannten Sternhaufen fast alle in der Ebene der Milchstraße zu finden sind, während die 3400 bekannten Nebel über den ganzen Himmel verteilt sind, sogar häufiger in der Nähe der galaktischen Pole zu finden sind.
- 1869 Proctor erklärt die Milchstraße als Band von schwachen Sternen, zwischen denen helle Sterne gleichmäßig verteilt sind.
- 1877 Celoria schließt aus Sternzählungen auf 2 exzentrische, gegeneinander geneigte Ringe von Sternen.
- 1881 Houzeau bestimmt den galaktischen Pol neu. Er vermißt 33 Punkte mit größtem Glanz gegenüber der Umgebung und legt die Galaxisebene durch.
- 1890 Kapteyn stellt fest, daß das vorhandene Beobachtungsmaterial (einige Dutzend Parallaxen, wenige Eigenbewegungen von Sternen schwächer als  $7^{\text{m}}$ , keine von schwächeren Sternen als  $9^{\text{m}}$ ) zu gering ist, um das Sternsystem zu erforschen
- 1898 Seeliger und Kapteyn führen Sternzählungen nach Herschel's Vorbild durch. Sie versuchen durch statistische Methoden auch schwache, aber nahe Sterne zu berücksichtigen. Diese Methode ist aber sehr ungenau, die Sterne bilden ein ellipsoides System mit der Sonne als Mittelpunkt.
- 1900 Easton hält die Spiralstruktur für die Milchstraße als sehr wahrscheinlich.
- 1904 Hartmann findet im Spektrum des Doppelsterns  $\delta$  Ori eine Linie ionisierten Kalziums, die die periodischen Dopplerverschiebungen nicht mitmacht. ("Ruhende Kalziumlinie") Diese Linie entsteht also nicht in der Sternatmosphäre, sondern vom Kalziumgas, das zwischen den Sternen vorkommt. Slipher findet diese ruhende Linie und auch weitere in anderen Sternen und beweist die Existenz der interstellaren Materie.
- 1906 Kapteyn legt einen Plan zur Erforschung der Milchstraße vor. (Plan of Selected Areas) Alle Sterne in 206 Eichfeldern (hunderttausende) sollen auf alle zugänglichen Daten (Position, Eigenbewegung, Parallaxe, Spektrum, Radialgeschwindigkeit) untersucht werden, später noch zusätzlich 18 weitere Felder in der galaktischen Ebene. Im Unterschied zu den Durchmusterungen ist dieser Plan zweckorientiert.

### 3. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

- 1910 Schwarzschild leitet aus Seeliger's stellarstatistischen Arbeiten die Grundgleichung der Stellarstatistik ab: Integralgleichung, die den Zusammenhang zwischen Dichte, Leuchtkraftfunktion (nicht für alle Sterne gleich) und Funktion der Verteilung der scheinbaren Helligkeiten beschreibt. Das Resultat ist hier ein abgeplattetes Rotationsellipsoid mit Sonne im Zentrum und Dichteabnahme nach allen Richtungen, schneller zum Pol als in der Ebene, Durchmesser 100 000 pc und Dicke 2 000 pc.
- 1915 Gyllenberg, Freundlich, van der Pallen und Oort bemerken, daß bei B-Sternen die Radialgeschwindigkeiten von der galaktischen Länge abhängen.
- 1918 Shapley untersucht die Entfernungen der Kugelsternhaufen (möglich durch Anwendung der Perioden-Leuchtkraftbeziehung) und findet sie gleichmäßig über eine große Kugelschale verteilt. Das Zentrum der 100 Kugelhaufen liegt im Schützen und ist ident mit dem Zentrum der Milchstraße. Die Sternwolke hat 100 000 pc Durchmesser und 10 000 pc Dicke und ist von einem Halo umgeben. Die Milchstraße ist jetzt viel größer als bei Anwendung rein stellarstat. Methoden, doch da die interstellare Absorption nicht berücksichtigt wurde, ist das Ergebnis viel zu groß (wirklicher Durchmesser 50 000 pc) Abweichend von Kapteyn liegt die Sonne hier nicht im Zentrum. Es ist weiter fraglich, ob die Spiralnebel zum Sternsystem gehören (diese Frage wurde erst in den 20er Jahren geklärt).  
Am Harvardobservatorium beobachtet man in den Jahren 1907 bis 1917 145 nördliche Eichfelder mit Photographien aller Sterne bis  $15^m$  und gibt den "Atlas of Selected Areas" heraus.
- 1926/27 Lindblad und Oort stellen eine dynamische Theorie der Milchstraße auf. Das abgeplattete Rotationsellipsoid mit Massekonzentration im Zentrum rotiert auf einer zur Ebene senkrechten Achse.
- 1929 Trümpler untersucht die räumliche Verteilung der offenen Sternhaufen und findet, daß die interstellare Materie Licht verschluckt und Einfluß auf die photometrische Entfernungsbestimmung ausübt. Die Milchstraße ist damit nur halb so groß wie bisher angenommen und in der Größe mit dem Andromedanebel vergleichbar.
- 1966 Becklin und Neugebauer finden das Zentrum der Milchstraße als kleines (weniger als  $15''$ ) scharf begrenztes Gebiet, "sichtbar" bei 220 nm.

### 2. Galaxien

- 964 gibt Al Sufi ein Sternverzeichnis heraus, wo erstmals auch Nebelflecke erwähnt werden. Eine "kleine Wolke" (Andromedanebel) und ein "weißer Ochse tief unter dem Canopus" (große Magellan'sche Wolke) werden beschrieben. Später ist der Andromedanebel auch auf Sternkarten der vorteleskop. Zeit zu finden.
- 1612 Marius beschreibt den Andromedanebel als "durch ein Hornblättchen gesehenes Kerzenlicht".
- 1746 Messier entdeckt M33 im Dreieck, zwischen diesem und dem oberen der beiden Fische.

#### 4. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

1749 Le Gentil findet M32, einen der 4 Begleiter des Andromedanebels.

1751 Lacaille entdeckt M83 in der Wasserschlange ("Titelgalaxie" auf dem Planetariumsprogramm) und beobachtet am Kap der guten Hoffnung die beiden "Kapnebel" aus Sternen und Nebel, die schon von holländischen und portugiesischen Seefahrern beschrieben worden sind. Zu Ehren des Weltumseglers wurden sie später die Magellan'schen Wolken genannt. Lacaille liefert die erste wissenschaftliche Beschreibung. ("Sur les etoiles nebuleuses du ciel austral")

1773 Messier entdeckt M51 an den Ohren des nördl. Jagdhunds.

1774 Bode findet M81 und M82 hinter den Ohren des Großen Bären

1781 Herschel beginnt mit systematischen Nebelbeobachtungen und katalogisiert die Nebel in 8 Klassen (Glänzende Nebel, Schwache Nebel, Sehr schwache Nebel, Planetarische Nebel, Sehr gedrängte und reiche Sternhaufen, Große und zerstreute Sternhaufen).

Herschel katalogisiert 2313 Nebel und 197 Sternhaufen, über 2000 davon beobachtet er erstmalig. Diese Nebel sind Sternansammlungen, die schwächsten, die er beobachtet sind 2 Millionen Lichtjahre entfernt.

1789 Herschel publiziert seinen Nebelkatalog.

1786 Laplace veröffentlicht seine Theorie zur Entstehung des Planetensystems und nimmt an, daß auch an anderen Stellen des Weltalls Planetensysteme entstehen können.

1825 - 33 John Herschel verbessert und ergänzt den Nebelkatalog seines Vaters.

1828 Dunlop gibt ein Verzeichnis von 629 Sternhaufen und Nebel des südlichen Himmels heraus (teilweise sehr schlechte Positionen).

1833 - 38 Herschel katalogisiert 1708 Sternhaufen und Nebel des Südhimmels.

1845 Lord Rosse baut das größte und damals beste Fernrohr der Welt mit 180 cm Durchmesser und 16,5 m Brennweite. In "Observations of the Nebulae" beschreibt er erstmalig die Form von M51 als Spirale. Später findet er noch andere Spiralnebel (z.B. M99, M100, M74 ...). Viele Forscher der nächsten Jahrzehnte sehen in diesen Spiralnebeln sich bildende Planetensysteme.



Abb. 4. Lord Rosses berühmte Zeichnung der Spiralstruktur von M 51.

## 5. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

- 1864 Herschel gibt einen Generalkatalog des Südhimmels mit 5079 Objekten heraus.  
Huggins untersucht die Spektren aller Nebel. 1/3 zeigt Emissionslinien (gasartig, planetarische Nebel), die anderen zeigen Absorptionsspektren, was auf stellare Natur hinweist. Das Spektrum des Andromedanebels ist durch eine Überlagerung sehr vieler Sternspektren zu erklären.
- 1877 Secchi schreibt über den Bau des Weltalls: Sterne sind Sonnen und bilden mit ihren Planeten Systeme 1. Ordnung, wo nur das Gravitationsgesetz herrscht. Solche Systeme können aber auch durch andere, wie beispielsweise Kugelsternhaufen ersetzt werden. Es gibt aber auch Haufen ohne besondere Gesetzmäßigkeit, wahrscheinlich bildet die Sonne mit allen sichtbaren hellen Sternen auch ein solches System 2. Ordnung. Die Milchstraße ist eine Zone aus solchen Systemen. Außer den Sternen gibt es noch Gasnebel, die unabhängig von der Milchstraße eigene Systeme bilden. Die Entfernungen zu den Sternen und den Nebel sind unbekannt, aber sehr groß.
- 1888 Dreyer ergänzt den Herschelkatalog und legt den "New General Catalogue" (NGC) mit etwa 10 000 Objekten vor.
- 1890 Clerke bestreitet, daß es Nebel außerhalb der Milchstraße gibt.
- 1895 "Index Catalogue" (IC) von Dreyer.
- 1899 Scheiner zeigt, daß das Spektrum des Andromedanebels einem Fixsternspektrum gleicht.
- 1907 Bohlin gibt die Entfernung zum Andromedanebel mit 20 Lichtjahren an, wodurch dieser Nebel entsprechend klein wird.  
"Second Index Catalogue" von Dreyer.
- 1913 Slipher findet am Lowellobservatorium Dopplerverschiebungen in extragalaktischen Nebel. Es gelingt ihm die Messung der Radialgeschwindigkeit beim Andromedanebel (hier Blauverschiebung).  
Slipher mißt die extrem große Rotverschiebung von M77 (später als Seyfertgalaxie erkannt).
- 1917 Curtis beobachtet Supernova im Andromedanebel und bestimmt die Entfernung zu 1 Million pc, damit ist das Objekt extragalaktisch. Da aber kein Beweis, daß die Supernova wirklich im Andromedanebel, wird das Resultat nicht allgemein anerkannt.
- 1919 Shapley "On the Existence of External Galaxies"  
Curtis "Modern Theories of Spiral Nebulae"
- 1922 Friedmann schließt aus der allgemeinen Relativitätstheorie, das Weltall müsse sich entweder ausdehnen oder zusammenziehen. Auch Robertson, Eddington, Heckmann und andere kommen zu diesem Ergebnis. Deshalb müssen die Spektrallinien entfernter Sternsysteme rot- oder blauverschoben sein.

## 6. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

- 1923 Mit dem neuen 2,5 m Spiegel am Mt. Wilson können die Randpartien des Andromedanebels in Sterne aufgelöst werden und einige Sterne als pulsierende Veränderliche identifiziert werden. Hubble bestimmt die Entfernung zu 750000 Lichtjahre damit kann der Andromedanebel kein Objekt der Milchstraße sein, er hat aber nur ein Fünftel der Größe der Milchstraße. In den nächsten Jahren werden weitere 125 Nebel in Sterne aufgelöst.
- 1925 Radialgeschwindigkeitsmessungen an über 50 Galaxien lassen nach Slipher den Schluß zu, daß Helligkeit und Rotverschiebung in einem Zusammenhang stehen.
- 1926 Hubble veröffentlicht seine Galaxienklassifikation. (Elliptische - Spiralförmige (Normale und Balkenspiralen) - Irreguläre). Er und Jeans nehmen an, daß es sich um eine Entwicklungssequenz handelt.
- 1929 aus verbesserten Messungen finden Hubble und Humason die Slipher'sche Vermutung bestätigt. Es besteht eine lineare Beziehung zwischen Radialgeschwindigkeit und Entfernung der Galaxien. Da (fast) nur Rotverschiebungen auftreten, muß das Weltall expandieren (Friedmannuniversum).
- 1936 Hubble erweitert seine Galaxienklassifikation um die Klassen SO und SBO (ohne Spiralarme).
- 1937 Shapley findet die erste Zwerggalaxie im Sculptor, die zur lokalen Gruppe gehört. (locker, unbekannter Typ mit wenigen Sternen, komplett auflösbar). Viele Galaxien sind also so leuchtkraftarm, daß sie nicht gesehen werden können.
- 1943 Seyfert findet erstmals eine aktive Galaxie mit kleinem Kern und nichtthermischer Kontinuumstrahlung mit Emissionslinien hoher Temperatur und großer Expansionsgeschwindigkeit.
- 1944 Baade löst den Kern des Andromedanebels in Sterne auf. Die Sterne des Kerns sind rötlicher als die Sterne der Spiralarme. Baade prägt den Begriff der Sternpopulationen.
- 1949 Aufnahmen des neuen 5m Teleskops zeigen filamentartige Strukturen im Kern von M82. (Explosion)
- 1950 Brown und Hazard finden Radiostrahlung vom Andromedanebel
- 1952 Baade findet unterschiedliche Perioden-Leuchtkraftbeziehungen für Sterne der Population I und II. Alle Galaxienentfernungen müssen korrigiert werden, Verdoppelung der Entfernung, Größe und Zeitskala.
- 1954 Baade und Minkowski finden, daß die Radioquelle Cygnus A zu einem extragalaktischen Objekt gehört. Diese Radiogalaxien ähneln den Seyfertgalaxien. Im Palomar Sky Atlas werden Tausende von Galaxien vermessen. Zwicky und seine Mitarbeiter identifizieren 31 000 Galaxien und 9 700 Galaxienhaufen mit je mehr als 200 Galaxien.
- 1958 Abell stellt fest, daß Galaxienhaufen Superhaufen bis etwa 50 Mpc bilden.

## 7. Fortsetzung Referat: Geschichte der Galaxienforschung

- 1959 Ryle entwickelt Theorie der Radiogalaxien. Da viel weiter entfernte als bei optischen Galaxien beobachtet werden können, ergibt sich ein Einblick in die Frühgeschichte des Universums.  
Ambarzumjan veröffentlicht Theorie über die Kerne aktiver Galaxien. In der frühen Entwicklung von Galaxien sind die Kerne superdichte, aktive Objekte.  
Woronozow-Weljaminow: "Atlas der wechselwirkenden Galaxien", z. B. Seyfert-Sextett: 5 Spiralgalaxien und eine irreguläre Galaxie, die sehr eng zusammen stehen.
- 1960 Erstmals werden Cepheiden in einer Galaxie außerhalb der lokalen Gruppe (in NGC 2403) gefunden.  
2 Objekte starker Radiostrahlung 3C 48 und 3C 273 werden mit sternartigen Objekten identifiziert. Interpretation dieser "Radiosterne" nicht möglich.
- 1961 Zwicky "Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies"
- 1962 Schmidt untersucht am Mt. Palomar das Spektrum von 3C 273 und findet die gigantische Rotverschiebung von 16%, was einer Entweichgeschwindigkeit von etwa der halben Lichtgeschwindigkeit entspricht. (später bei 3C 147 sogar 54% Rotverschiebung)
- 1963 Während einer Sternbedeckung durch den Mond findet man, daß 3C 273 doch etwa 300 000 Lichtjahre groß ist und einen Kern von 7500 Lichtjahren hat. Es ist nicht erklärbar, wie dieser kleine strahlende Kern soviel Energie erzeugen kann. Wegen der großen Entfernung ist diese Galaxie heller als alle anderen. Diese merkwürdigen Radioquellen mit hoher Rotverschiebung werden Quasare genannt. Quasare haben die größten Rotverschiebungen, Radiogalaxien kleinere und "gewöhnliche" Galaxien die geringsten, Seyfertgalaxien sind "Miniquasare".
- 1964 Ambarzumjan entwickelt Theorie, daß das Zentrum jedes Spiralnebels aus einem Körper von einigen Millionen Sonnenmassen besteht und nicht aus Sternen aufgebaut ist. Er erklärt damit die Radiostrahlung.
- 1966 Arp "Atlas der außergewöhnlichen Galaxien"
- 1972 Arp findet explodierende Galaxien mit Quasar in der Mitte. Die großen Dichtewerte liefern einen Teil der extremen Rotverschiebung.
- 1973 Mathewson, Cleary und Murray (austral. Radioastronomen) finden feinen 21cm Wasserstoffgasstrahl von den Magellanuswolken bis in die Milchstraßenebene. Diese Wechselwirkung ist nicht vollständig erklärbar.  
Sulentic-Tifft "The Revised New Catalogue of Nonstellar Astronomical Objects"
- 1974 schätzt Holmberg, daß 70% aller Galaxien zu Galaxienhaufen gehören.

Abb. 1-4 aus S. Mitton, *Die Erforschung der Galaxien*. Springer-Verlag, Berlin 1978.

Renate Weiland  
Schwenderg. 45  
1150 Wien

Referat: Galaktische Koordinaten und Milchstraßenpanorama

1. Galaktische Koordinaten (l steigt für  $b=0^\circ$  mit  $\alpha$ ,  $b>0^\circ$  gegen Com).

1.1. Altes System (Ohlsson J., Ann.Obs.Lund, 3, 19; 1932):

$l^I, b^I$  Galaktische Länge, Breite, 1900,0;  $\alpha, \delta$  Rektaszension, Deklination, hier in dezimal geteilten Altgrad, 1900,0.

$$l^I = 270^\circ - x^I$$

$$\tan x^I = [\sin(190^\circ - \alpha)] / [\cos(190^\circ - \alpha) \sin 28^\circ - \tan \delta \cos 28^\circ]$$

$$\sin b^I = \sin \delta \sin 28^\circ + \cos \delta \cos 28^\circ \cos(190^\circ - \alpha)$$

$$\alpha = y^I + 10^\circ$$

$$\tan y^I = [\sin(l^I - 90^\circ)] / [\cos(l^I - 90^\circ) \sin 28^\circ - \tan b^I \cos 28^\circ]$$

$$\sin \delta = \sin b^I \sin 28^\circ + \cos b^I \cos 28^\circ \cos(l^I - 90^\circ)$$

Galaktische Pole: N  $\alpha = 190^\circ$ ,  $\delta = +28^\circ$  (Com), S  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\delta = -28^\circ$  (Scl); Galaktischer Nullpunkt:  $\alpha = 280^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$  (Aql), 1900,0.

1.2. Neues System (Torgård I., Ann.Obs.Lund, 15,16,17; 1961):

$l^{II}, b^{II}$  Galaktische Länge, Breite, 1950,0;  $\alpha, \delta$  Rektaszension, Deklination, hier in dezimal geteilten Altgrad, 1950,0 (J.Meeus).

$$l^{II} = 303^\circ - x^{II}$$

$$\tan x^{II} = [\sin(192,25^\circ - \alpha)] / [\cos(192,25^\circ - \alpha) \sin 27,4^\circ - \tan \delta \cos 27,4^\circ]$$

$$\sin b^{II} = \sin \delta \sin 27,4^\circ + \cos \delta \cos 27,4^\circ \cos(192,25^\circ - \alpha)$$

$$\alpha = y^{II} + 12,25^\circ$$

$$\tan y^{II} = [\sin(l^{II} - 123^\circ)] / [\cos(l^{II} - 123^\circ) \sin 27,4^\circ - \tan b^{II} \cos 27,4^\circ]$$

$$\sin \delta = \sin b^{II} \sin 27,4^\circ + \cos b^{II} \cos 27,4^\circ \cos(l^{II} - 123^\circ)$$

Galaktische Pole: N  $\alpha = 192,25^\circ$ ,  $\delta = +27,4^\circ$  (Com), S  $\alpha = 12,25^\circ$ ,  $\delta = -27,4^\circ$  (Scl); Gal. Nullpunkt:  $\alpha = 265,61^\circ$ ,  $\delta = -28,92^\circ$  (Sgr), 1950,0.

2. Milchstraßenpanorama

8 Weitwinkelaufnahmen mit ZEISS Biogon F/4,5, F=38mm, wurden auf KODAK 2415 (TP) im Format 6x6cm (HASSELBLAD SWC) auf La Palma im September 1984 je 60 und auf La Silla im März 1985 je 90 Minuten belichtet. So entstand das äußerst informative ESO-Milchstraßenpanorama. Es bietet zwischen  $\pm 30^\circ$  galaktischer Breite rund 350 000 Sterne bis  $V = +11^{\text{mag}}$  mit Auflösung 1'. Dieses "freisichtige" Panorama ist, bei 40° Überlappung 120cm lang, dem Werk von Laustsen/Madsen/West, ENTDECKUNGEN AM SÜDHIMMEL, Verlag Birkhäuser, Basel 1987, beigelegt und dort genau - auch hinsichtlich der vielen aufscheinenden Einzelobjekte - erläutert.

Prof.H.Mucke, 1238 Wien

## Beilage: Lichtelektrische Milchstraßen-Photometrie

122

H. ELSSÄSSER und U. HAUO:

vermögen zusammengestellt, deren Helligkeitsverteilung aber für  $|b| < 20^\circ$  schon vom visuellen Eindruck stark abweicht. Die größte Helligkeit findet sich z. B. weit entfernt von der Richtung zum galaktischen Zentrum bei der galaktischen Länge  $240^\circ$ .

Unsere lichtelektrischen Registrierungen der Milchstraße wurden im Jahre 1956 an der Boyden-Station bei Bloemfontein/Südafrika und im Winter 1958/59 an der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch mit einer bis auf unwesentliche Einzelheiten gleichen Meßanordnung durchgeführt (Abschnitt 1). Das Ziel war zunächst, in den Helligkeitsangaben zuverlässige Isophotekarten für zwei Farben zu erhalten, die eine Aufkösung von der Größenordnung ein Grad haben sollte (Abschnitt 3). Die Hauptschwierigkeit einer exakten Milchstraßenphotometrie ist die Aufrennung der verschiedenen Anteile, die zur Nachthimmelhelligkeit beitragen. Sie ist hier besonders problematisch, da sich die Registrierungen praktisch über die ganze Sphäre erstrecken müssen und so die genaue Kenntnis der atmosphärischen Extinktion und der Helligkeitsverteilung des Zodiaklichtes und des Nachthimmelleuchtens über den ganzen Himmel voraussetzen (Abschnitt 2).

Darüber hinaus bestand die Hoffnung, aus einer besseren Kenntnis der Helligkeitsverteilung in der Milchstraße Aufschlüsse über die Struktur des galaktischen Systems zu erhalten. Wie in Abschnitt 4 näher erläutert wird, scheint es in der Tat möglich zu sein, an Hand der beobachteten Flächenhelligkeiten die Spiralstruktur der Galaxis in ihren groben Zügen abzuleiten. Die Flächenphotometrie erweist sich dabei der optischen Untersuchung von Einzelobjekten durch ihre größere räumliche Reichweite als überlegen. Sie ist als das optische Analogon der radioastronomischen Durchmusterungen der Milchstraße mit relativ geringem Auflösungsvermögen anzusehen.

### 1. Meßanordnung, Beobachtungen und Sternanschluß

Die Registrierungen erfolgten mit dem von BEHR und SIENSTOFF (1953) beschriebenen, inzwischen in mehreren Punkten abgeänderten Nachthimmelphotometer in azimutaler Aufstellung (Objektiv 60 mm/300 mm). Es wurde mit derselben Ausrüstung benützt, wie sie von ELSSÄSSER und SIENSTOFF (1957) aus Anlaß von Gegenscheinbeobachtungen ausführlicher beschrieben ist. Der Vollständigkeit halber seien die wichtigsten Daten nochmals angeführt: Zusammen mit einem ausgeuchten Photomultiplier vom Typ 931 A wurden für den visuellen Spektralbereich ein Schottfilter GG 11 2 mm, fürs Blaue BG 12 + GG 13 je 1 mm verwendet. Zur Registrierung diente auf dem Jungfrauoch anstelle des Lichtpunktlinienschreibers von Hartmann & Braun ein Tintenreiber von Siemens & Halske, Typ SD 12 K, mit einem Drehpulmeßwerk (7.4 K.Ω Innenwiderstand, Vollausschlag bei 1 mA, 0.5 sec Ein-

Zeitschrift für Astrophysik 50, 121—144 (1960)

Mittellungen des Astronomischen Instituts der Universität Tübingen  
Nr. 48

## Über eine lichtelektrische Flächenphotometrie der südlichen und nördlichen Milchstraße in zwei Farben und die Struktur des galaktischen Systems

Von

H. ELSSÄSSER und U. HAUO

Mit 10 Textabbildungen

(Eingegangen am 21. April 1960)

From photoelectric records in two colors, made with a nightky-photometer (60/300 mm) at the Boyden-Station/South Africa and at the Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch/Switzerland, the brightness- and color-distribution within the southern and northern Milky Way have been derived. The maximum brightness was measured in Sagittarius, it is 260 stars  $10^m/\square^\circ$  in the blue and 750 stars  $10^m/\square^\circ$  in the visual. The minimum brightness on the galactic equator was found in Perseus (blue  $< 50$ , visual  $< 100$  st.  $10^m/\square^\circ$ ) (Fig. 2 and 3). The color index varies from  $+1.1$  to  $+0.4$ , in the regions near the direction of the galactic centrum the mean values are higher than near the anticentrum (Fig. 4). The apparent total brightness of the Milky Way follows as  $P = -5.768$ , the integrated color index is  $P - V = +0.789$ . From the brightness- and color-distribution along the galactic equator (Fig. 5 and 6) a model of the galactic spiral-structure is derived (Fig. 7 and 8) which is in fair agreement with the results of 21 cm-observations, except near the sun (Fig. 10). It has been gained without any assumption about the kinematics of the galaxy and shows that the convex side of the spiral arms lead in the rotation.

Der Anlaß zu dieser Arbeit war in erster Linie das Fehlen einer zuverlässigen Karte der Helligkeitsverteilung in der Milchstraße, wie sie für flächenphotometrische Untersuchungen am Nachthimmel (z. B. Photometrie des Zodiaklichtes, des Nachthimmelleuchtens, galaktischer und extragalaktischer Nebel) ständig gebraucht wird. In der Vergangenheit wurde neben zahlreichen visuellen Schätzungen eine umfangreiche photographische Photometrie der ganzen Milchstraße von PANNKOEK u. Mitarb. (1933, 1949) durchgeführt, die aber heute einmal wegen der prinzipiellen Schwierigkeiten der photographischen Flächenphotometrie von Objekten großer Ausdehnung, zum andern wegen der unzulänglichen Eliminierung des überlagerten Zodiaklichtes, Airglows und atmosphärischen Streulichtes als unbefriedigend erscheint. Außerdem bezieht sie sich nur auf den photographischen Farbbereich. Daneben haben ROACH et al. (1954) nach VAN RIJN'S Sternzahlen für die selected areas eine Isophotekarte der Milchstraße im Visuellen mit geringem Auflösungs-

stellzeit). Die Anpassungsverstärker waren in beiden Fällen nach dem gleichen Prinzip gebaut (1. c.). Wegen der etwas geringeren Empfindlichkeit der Jungtraujoch-Anordnung wurde dort mit einem kreisförmigen Diaphragma entsprechend  $0.61 \square^\circ$  Fläche anstatt  $0.28 \square^\circ$  am Südhimmel registriert. Wie aus Abschnitt 2 hervorgeht, ist aber in den Isophotokarten kein Unterschied in der Auflösung zwischen nördlicher und südlicher Milchstraße.

Die Messungen bestanden aus Registrierungen in konstanter Höhe  $h$  zwischen  $h = 20^\circ$  und  $h = 65^\circ$  im Abstand von  $2.5$  und  $5^\circ$ . Die überstrichenen Azimutintervalle variierten zwischen  $100^\circ$  und  $210^\circ$  und wurden stets so gewählt, daß Anfangs- und Endpunkt der Registrierung weit außerhalb der Milchstraße lagen. Ein Beobachtungssatz mit einer vollständigen Serie von Höhen dauerte ein bis anderthalb Stunden und lieferte bei günstiger Lage der Milchstraße Meßpunkte über ein Intervall von mehr als  $100^\circ$  in galaktischer Länge.

Die Beobachtungen am Südhimmel wurden in zehn Nächten zwischen 1956 August 27 und Oktober 13 vom einen Verfasser (E.) gewonnen. Sie überdecken den Bereich von  $l = 190^\circ$  bis  $l = 30^\circ$  ( $\Delta l = 210^\circ$ ) in galaktischer Länge. Die Messungen am Nordhimmel machte der andere Autor in neun Nächten zwischen 1958 Dezember 4 und 1959 Februar 12. Sie erfassen das Gebiet  $l = 20^\circ$  bis  $l = 200^\circ$ . Der gemeinsam beobachtete Bereich liegt zwischen  $20^\circ$  und  $30^\circ$  bzw.  $180^\circ$  und  $200^\circ$  galaktischer Länge. Die Registrierungen waren so angelegt, daß für jeden Punkt des Rasters, das der Konstruktion der Isophotokarten zugrunde lag (vgl. Abschnitt 2), die Helligkeit in beiden Farben im Mittel fünfmal gemessen wurde. Jeder von uns hat seine Beobachtungen auch reduziert.

An der Boyden-Station wurde außerdem in jeder Beobachtungsnacht mit Hilfe eines lichtelektrischen Sternphotometers der ESO-Sichtexpedition, das mit einer Zelle gleicher spektraler Empfindlichkeit und denselben Filtern wie das Nachthimmelphotometer versehen war, die Extinktion in beiden Farben bestimmt.

Die Eichung der registrierten Flächenhelligkeiten in absoluten Einheiten ergab sich aus der wiederholten Messung von mehreren Sternen bekannter Helligkeit mit dem Nachthimmelphotometer. Sie sind in Tab. 1 mit ihren P, V-Helligkeiten aufgeführt. Die Helligkeiten der süd-

Tabelle 1. Eichsterne am Süd- und Nordhimmel

Stern	Spektraltyp	P	P-V
$\alpha$ Gru	B 5	1.43	-0.32
$\alpha$ Pav	B 3	1.54	-0.39
$\alpha$ Hyi	F 0	2.90	+0.14
$\beta$ Pav	A 5	3.45	0.00
$\beta$ Aur	A 0 P	1.74	-0.15
$\alpha$ UMi	F 8	2.46	+0.46
$\beta$ UMa	A 0	2.14	-0.20
$\gamma$ Boo	G 0	3.14	+0.45
$\gamma$ Cep	K 0	4.13	+0.91

lichen Eichsterne sind dem Cape Mimeo-gram 1 (1953) entnommen und mit den dort angegebenen Beziehungen ins internationale PV-System umgerechnet. Für die nördlichen Sterne sind UBV-Helligkeiten bekannt.

Für den Südhimmel ist das Ergebnis dieser Eichung bereits in der Gegenseituntersuchung (1. c.) enthalten. Der Zusammenhang der hier benutzten Blau- und Visuellhelligkeiten  $P_T$  und  $V_T$  mit den entsprechenden Größen des internationalen Systems ergab sich dort über den Anschluß an das Kap-System zu

$$P_T = P - 0.01 (P - V) \quad (1)$$

$$P_T - V_T = 0.86_4 (P - V) - 0.03.$$

Für die Sterne des Nordhimmels von Tab. 1 wurde eine Beziehung gefunden, die im Rahmen der Meßgenauigkeit mit (1) übereinstimmt. Die Umwandlung von den willkürlichen Einheiten der Registrierung in absolute geschah deshalb für das ganze Beobachtungsmaterial einheitlich mit den aus (1) folgenden Umrechnungsfaktoren.

2. Reduktion der Messungen

Das Reduktionsverfahren war im wesentlichen dasselbe wie bei den früheren Tübinger Flächenphotometrischen Arbeiten. Da es in der Publikation über den Gegenschein von Elsässer und Sredznitoff (1957) ausführlich beschrieben ist, sollen hier nur kurz die einzelnen Schritte aufgeführt und die benutzten Zahlenwerte angegeben werden.

a) Bestimmung extraterrestrischer Helligkeiten. Die Ordinaten der Registrierkurven wurden zunächst an den in  $5^\circ$  Abstand liegenden Azimutmarken ausgemessen. Die Ablesungen bezogen sich auf das von den Zacken hellerer Einzelsterne befreite „Kontinuum“. Im Visuellen wurden dadurch die Sterne heller als etwa  $7^m$ , im Blauen heller als  $8^m$  eliminiert. Nach kleinen Korrekturen wegen Empfindlichkeitsschwankungen der Apparatur wurden aus den registrierten Flächenhelligkeiten  $J_1(\zeta, a)$  —  $\zeta$  Zenitdistanz,  $a$  Azimut — extraterrestrische Helligkeiten  $J_0$  nach der Beziehung

$$J_0(\zeta, a) = \frac{J_1(\zeta, a)}{e^{-\tau \Delta m} + \delta(\zeta)} \quad (2)$$

berechnet, die das beobachtete  $J_1$  vom Einfluß der Extinktion und des atmosphärischen Streulichts befreit ( $\tau$  Extinktionskoeffizient fürs Zenit =  $0.921 \Delta m$ ,  $\Delta m$  Zenitextinktion in Größenklassen,  $M(\zeta)$  Luftmasse,  $S(\zeta)$  atmosphärische Streufunktion). Die Ableitung und eingehendere Diskussion dieser Beziehung findet sich in der erwähnten Arbeit. Die Beobachtung an der Boyden-Station wurden mit den für die einzelnen Nächte ermittelten  $\tau$ - bzw.  $\Delta m$ -Werten reduziert, die im Visuellen zwischen  $0^m.13$  und  $0^m.23$ , im Blauen zwischen  $0^m.21$  und  $0^m.34$  schwankten (Zenitextinktion der dunstfreien Atmosphäre an der Boyden-Station

0<sup>m</sup>11 bzw. 0<sup>m</sup>19). Da auf Jungfrauoch in Ermangelung eines geeigneten Instrumentes Extinktionsmessungen nicht möglich waren, wurden nach früheren Beobachtungen von ELZÄSSER (1954) mittlere Werte der Zenitextinktion gewählt, fürs Visuelle 0<sup>m</sup>13, fürs Blaue 0<sup>m</sup>19 (dunstfreie Jungfrauoch-Atmosphäre 0<sup>m</sup>09 bzw. 0<sup>m</sup>15). Das ist kein schwerwiegendes Nachteil, da einmal nach den früheren Erfahrungen die zeitlichen Schwankungen der atmosphärischen Durchsicht, besonders im Winter, auf Jungfrauoch klein sind, zum andern aber bei Flächenhelligkeiten der Einfluß der Extinktion durch das atmosphärische Streulicht weitgehend kompensiert wird (1. c.). Die Funktion  $S(\zeta)$  wurde, wie früher beschrieben, ermittelt, die Albedo des Erdbodens an der Boyden-Station war dabei zu 0,0, auf dem Jungfrauoch wegen der schneebedeckten Umgebung zu 0,5 angenommen.

b) Subtraktion des Airglow-Anteils. Die extraterrestrischen Helligkeiten  $J_0$  setzen sich aus der Helligkeit der Milchstraße  $J_S$ , des Airglows  $J_A$  und des Zodiakallichts  $J_Z$  zusammen:

$$J_0 = J_S + J_A + J_Z \quad (3)$$

Es wurde nun angenommen, daß an den in großem Abstand von der Milchstraße gelegenen Enden der Registrierungen die Helligkeit  $J_S$  aus Sternzählungen bekannt ist. Sie wurde im Visuellen der erwähnten Karte von ROACH et al. (1954) entnommen, an deren Zuverlässigkeit für galaktische Breiten  $|b| > 30^\circ$  zu zweifeln wir keinen Anlaß sahen. Im Blauen wurde auf den von BORRLINGER (1932) angegebenen mittleren Abfall der Sternzahlen mit wachsender galaktischer Breite zurückgegriffen. Für die drei äußersten Meßpunkte am einen Ende der Registrierung wurde dann das so ermittelte  $J_S$  von  $J_0$  abgezogen und dadurch  $J_A + J_Z$  für diese Stelle bestimmt. Da man annehmen darf, daß  $J_A$  längs einer Registrierung parallel zum Horizont in erster Näherung konstant ist, subtrahierten wir dieses  $J_A + J_Z$  von allen  $J_0$  dieser Registrierung. Das bedeutet, daß bei diesem Reduktionsschritt bereits ein konstanter Zodiakallichtanteil mit abgezogen wurde. Die Werte von  $J_A + J_Z$  lagen im Visuellen für  $\zeta = 30^\circ$  bei 100 bis 150 Sternen  $10^m/\square^\circ$ ; für  $\zeta = 70^\circ$  betragen sie etwa das Doppelte; im Blauen waren sie etwa halb so groß. Wegen der unvermeidbaren Fehler bei der Bestimmung dieser Größen (wolkenartige Struktur des Airglows, Änderungen mit dem Azimut) konnten wir aus unseren Messungen keine zuverlässigen Milchstraßenhelligkeiten für  $|b| > 30^\circ$  ableiten (vgl. Abb. 2 und 3).

Es ist schwer abzuschätzen, welche Unsicherheiten durch die Verwendung der Werte nach ROACH et al. und BORRLINGER in unsere Photometrie hineingetragen wurden. Sie lassen sich dadurch herabdrücken, daß man versucht, in möglichst verschiedenen Richtungen über den galaktischen Äquator zu registrieren, so daß die Enden der Registrierungen immer wie-

der an andere Stellen zu liegen kommen. Das ist bei unseren Messungen so weit wie möglich geschehen. Im übrigen muß man sich aber darüber klar sein, daß es sich bei dieser Photometrie gewissermaßen um den ersten Schritt eines möglicherweise schlecht konvergierenden Iterationsverfahrens handelt.

c) Mittelung in Feldern von  $2,5 \times 2,5 \square^\circ$ . Nach der Subtraktion des Airglows wurden die Beobachtungen aus mehreren aufeinanderfolgenden Nächten, in denen die Verschiebung des Zodiakallichts gegenüber der Milchstraße unbedeutend ist, zusammengefaßt. Wenn die Registrierungen der verschiedenen Nächte relativ zur Milchstraße und damit relativ zum Zodiakallicht verschieden verliefen, so wurde vorher eine Korrektur wegen des bereits subtrahierten, unterschiedlichen Zodiakallichtanteiles angebracht. Über alle Meßsätze wurde ein Raster von Feldern mit  $2,5$  Seitenlänge gelegt und die in ein Feld fallenden Messungen gemittelt. Das Auflösungsvermögen unserer Isophotokarten ist durch die gewählte Feldgröße, nicht durch die benützte Gesichtsfeldblende, bestimmt. Sie ist der Höhendifferenz der Registrierungen ( $2,5$  und  $5^\circ$ ) und dem Abstand der Meßpunkte im Azimut ( $5^\circ$ ) angepaßt. Da beim Zeichnen der Isophoten noch eine gewisse Verschmierung erfolgt, liegt das effektive Auflösungsvermögen der Karten bei  $3^\circ$  in den hellen Milchstraßengegenenden, bei  $5^\circ$  in den lichtschwächeren Partien.

d) Subtraktion des Zodiakallichtes, endgültige Mittelung. Der noch verbliebene Zodiakallichtrest wurde dann entsprechend der in Abb. 1 ge-

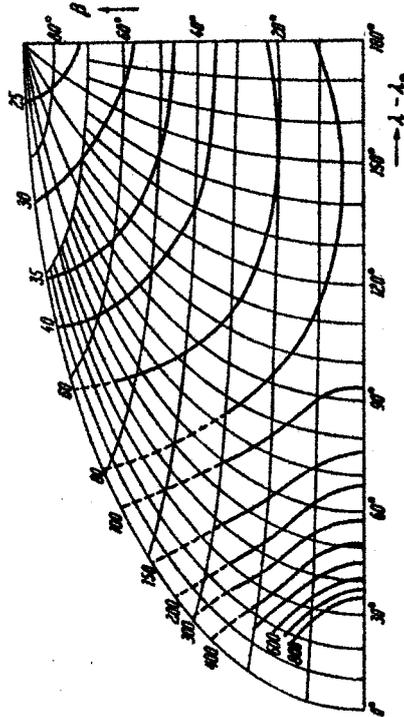


Abb. 1. Helligkeitsverteilung im Zodiakallicht (visuell), ekliptikale Koordinaten. Isophotenwerte: Sterne  $10^m/\square^\circ$

zeigten Helligkeitsverteilung im Visuellen subtrahiert. Die Zodiakallicht-helligkeiten im Blauen berechnet wir daraus mit dem Farbindex der Sonne  $P_r - V_r = +0,49$ . Die Verteilung folgt in der Ekliptik neueren

Messungen von ELSÄSSER (1958), für ekliptikale Breiten  $|\beta| > 0^\circ$  entspricht die Form der Isophoten den älteren Daten von ROACH et al. (1954) und BEHR und SIEZUNOFF (1953). Dieser Reduktionsschritt bringt erneut Fehler in das endgültige Beobachtungsergebnis, da die Helligkeitsverteilung im Zodiaklicht bis heute nicht mit der gewünschten Genauigkeit bekannt ist. Das läßt sich aber nur bei einer genaueren Kenntnis der Helligkeit des Sternhintergrundes  $J_s$  [vgl. (3)] erreichen! Unsere Registrierungen waren jedoch so angelegt, daß sie entweder bei hohen ekliptikalen Breiten oder bei großen Elongationen verlaufen, um den Anteil des Zodiaklichtes an  $J_s$  möglichst klein zu halten.

Schließlich wurden die vom Zodiaklicht befreiten Helligkeiten in einer Karte zusammengefaßt, die dann der Konstruktion der endgültigen Isophoten zugrunde lag. Nach den Abweichungen der aus den einzelnen Registrierungen folgenden Helligkeiten von den gemittelten Werten beträgt der mittlere Fehler der Isophotenwerte im Visuellen  $\pm 10$  bis  $\pm 15$  Sterne  $10^m/\square$ , im Blauen etwa die Hälfte. Dazu können aber durch die erwähnten Schwierigkeiten beim Reduzieren systematische Fehler kommen, deren Größe sich nicht abschätzen läßt. Ein wichtiges Kriterium für die Zuverlässigkeit unseres Beobachtungsergebnisses war der Grad der Übereinstimmung in den zwei gemeinsam am Süd- und Nordhemisphären beobachteten Bereichen (s. o.). Für die galaktischen Längen  $180^\circ - 200^\circ$  waren die Abweichungen von derselben Größe wie die genannten mittleren Fehler, so daß der Anschluß der nördlichen Karte an die südliche ohne weiteres möglich war. Im Intervall  $l = 20^\circ - 30^\circ$  war die Übereinstimmung etwas schlechter. Das war nicht sehr überraschend, da es sich in beiden Fällen um Messungen dicht über dem Horizont handelte. Die Interpolation der Isophoten bereitete aber auch hier keine Schwierigkeiten.

### 3. Das Beobachtungsergebnis

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die gewonnene Helligkeitsverteilung der Milchstraße für die beiden Spektralbereiche im alten galaktischen Koordinatensystem  $l, b^1$  (Ohlson-Pol). Wegen der erläuterten Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Untergrundhelligkeit  $J_s + J_z$  beschränkten wir uns im Visuellen auf die Isophoten der Helligkeiten  $\geq 75$  Sterne  $10^m/\square = 23^m 1/\square$ , im Blauen auf Helligkeiten  $\geq 50$  Sterne  $10^m/\square = 23^m 6/\square$ . Im Visuellen wäre die Karte der Abb. 2 für höhere galaktische Breiten durch das erwähnte Diagramm von ROACH et al. (l. c.) zu ergänzen. Bei der Benützung der Karten, besonders in den helleren Partien, ist stets zu beachten, daß die angegebenen Helligkeiten durch Verschmierung über Felder von  $2'5 \times 2'5$  gewonnen wurden. Man darf aus diesem Grund keine Reproduktion der zahlreichen feinen Absorptionsstrukturen erwarten.

Die größten Helligkeiten finden sich in der Segitarius-Wolke mit 750 St.  $10^m/\square = 20^m 90/\square$  im Visuellen und 260 St.  $10^m/\square = 21^m 75/\square$  im Blauen. (Die visuellen Maximalhelligkeiten in der Karte von ROACH liegen bei 600 St.  $10^m/\square$ ). Die kleinsten Helligkeiten auf dem galaktischen Äquator trifft man bei  $l \approx 120^\circ$  im Perseus an (visuell  $< 100$ , blau  $< 50$  St.  $10^m/\square$ ). Die Isophotekarten zeigen deutlich die größere Helligkeit der südlichen Milchstraße ( $l \geq 180^\circ$ ) im Vergleich zur nördlichen (vgl. auch Abb. 5 und 7) und die Asymmetrie bezüglich des galaktischen Äquators. Die ausgedehnten Absorptionsgebiete, insbesondere die Teilung der Milchstraße, treten auf beiden Karten wesentlich weniger stark hervor, als man es nach dem visuellen Eindruck und nach photographischen Aufnahmen von Milchstraßenfeldern erwarten würde. Der Vergleich mit der von M. und T. KASKÜLA nach Photographien gezeichneten Milchstraßenkarte (LUNDMARK 1957) ist in dieser Hinsicht besonders interessant. Die Verschiedenheiten gehen vor allem auf die Betonung der Kontraste durch das logarithmische Empfindlich-

$l^I, b^I (1900, 0) !$

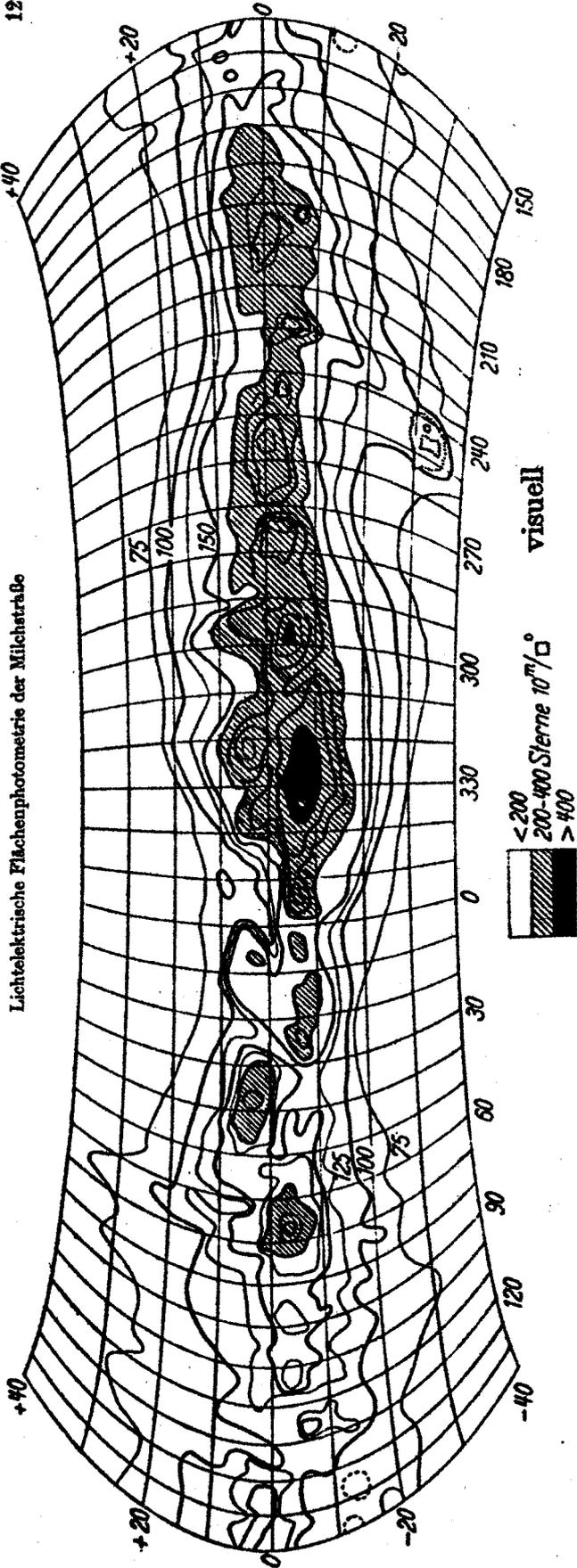


Abb. 2. Isophotometrie der Milchstraße im Visuellen. Einheit: Sterne  $10^m / \square^\circ$ . Stark ausgezogen sind zwischen 100 und 800 Einheiten die Linien von 50 zu 50, über 800 Einheiten die Linien von 100 zu 100 Sternen  $10^m / \square^\circ$ . Die Isophote 75 sowie Zwischenlinien für die halbe Intervallgröße sind, soweit möglich, dünn eingezeichnet. Einsenkungen sind gestrichelt umrandet; die Isophoten 10 und 100 Sterne  $10^m / \square^\circ$  der Großen Magellanschen Wolke punktiert

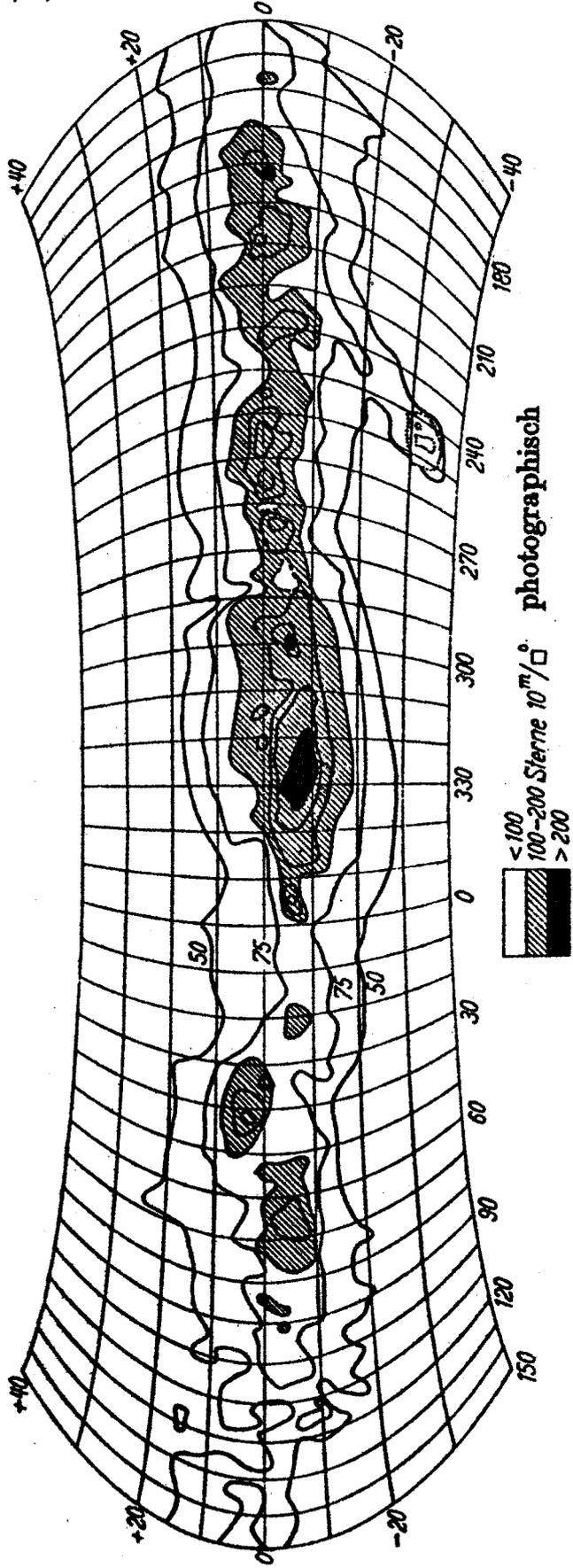


Abb. 3. Isophotometrie der Milchstraße in Blauen. Einheit: Sterne  $10^m / \square^\circ$ . Von 50 bis 150 ist die Intervallgröße darüber 50 Sterne  $10^m / \square^\circ$

Lichtelektrische Flächenphotometrie der Milchstraße

keitsgesetz des Auges und der photographischen Platte zurück. Hervorgehoben seien noch die Ausbuchtungen der schwächeren Isophoten beider Karten auf die Große Magellansche Wolke zu ( $l = 235^\circ$ ), die bis  $b = -10^\circ$  zu sehen sind. Für die GMW selbst sind zur Charakterisierung des von diesem Sternsystem stammenden Lichtes nach ELSÄSSER (1959) zwei punktierte Isophoten ( $10$  und  $100 \text{ St. } 10^m/\square^\circ$ ) angegeben. Auf diese „Lichtbrücke“ zur GMW hat bereits J. HIRSCHEL hingewiesen (vgl. BUSCOMBE, GASCOIGNE und DE VAUCOULEURS, 1964). Wir waren sehr überrascht, ähnliche Deformationen der schwächeren Isophoten in der nördlichen Milchstraße bei positiven Breiten im gleichen Abstand von der Richtung zum galaktischen Zentrum zu finden. Es ist allerdings nicht ganz ausgeschlossen, daß sie hier mit dem bei  $l = 20^\circ$  einsetzenden „Breiterwerden“ der Milchstraße zusammenhängen (vgl. Abschnitt 4).

Aus den Isophoten der Abb. 2 und 3 folgt die Farbverteilung von Abb. 4. Dazu wurden die Isophotekarten in Feldern von  $10^\circ$  Länge und  $5^\circ$  Breite planimetriert und aus den mittleren Helligkeiten jedes Feldes der Farbindex errechnet. Der Übersichtlichkeit wegen wurde die damit verbundene Verschmierung in Kauf genommen. Ist man am FI einer bestimmten Stelle interessiert, so läßt er sich leicht direkt aus den Isophotendiagrammen gewinnen. Nach Abb. 4 liegt der  $FI_r$  vorwiegend zwischen  $0^m.5$  und  $1^m.0$ . Die niedersten vorkommenden Werte sind etwa  $0^m.4$ , die höchsten  $1^m.1$ . Sehr auffallend ist die durchschnittlich stärkere Rötung der südlichen Milchstraße gegenüber der nördlichen. Abgesehen von einigen deutlich hervortretenden Absorptionsgebieten mit  $FI_r > 1^m.0$ , die zu der Verlagerung der Helligkeitsmaxima nach negativen Breiten führen, erscheint die Farbverteilung als außerordentlich komplex. Eine gewisse Klärung wird die Diskussion in Abschnitt 4 bringen.

Die Kurven der Abb. 5 wurden aus den Isophotekarten in der Absicht abgeleitet, eine Annäherung an den von interstellarer Absorption befreiten Helligkeitsverlauf längs des galaktischen Äquators zu erhalten; für jedes  $l$  wurde die bei einem Schnitt senkrecht zum Äquator gefundene größte Helligkeit aufgetragen. Aus den Abb. 2 und 3 geht hervor, daß diese Punkte maximaler Helligkeit in beiden Farben auf einer Linie liegen, die vorwiegend bei negativen Breiten ( $0^\circ > b > -8^\circ$ ) verläuft und nur im Cygnus ( $l \approx 40^\circ$ ), Monoceros ( $l \approx 180^\circ$ ) und Auriga ( $l \approx 150^\circ$ ) den Äquator für kurze Strecken nach  $b > 0^\circ$  überquert. — In Abb. 5 fällt zuerst die alles überragende Helligkeit der Sagittarius-Gegend auf. Der Anstieg zu diesem zentralen Helligkeitsmaximum, das bei  $b' = -7^\circ$  liegt, erfolgt annähernd symmetrisch zur Richtung

$$l' = \begin{cases} 326^\circ & \text{im Blauen,} \\ 329^\circ & \text{im Visuellen.} \end{cases}$$

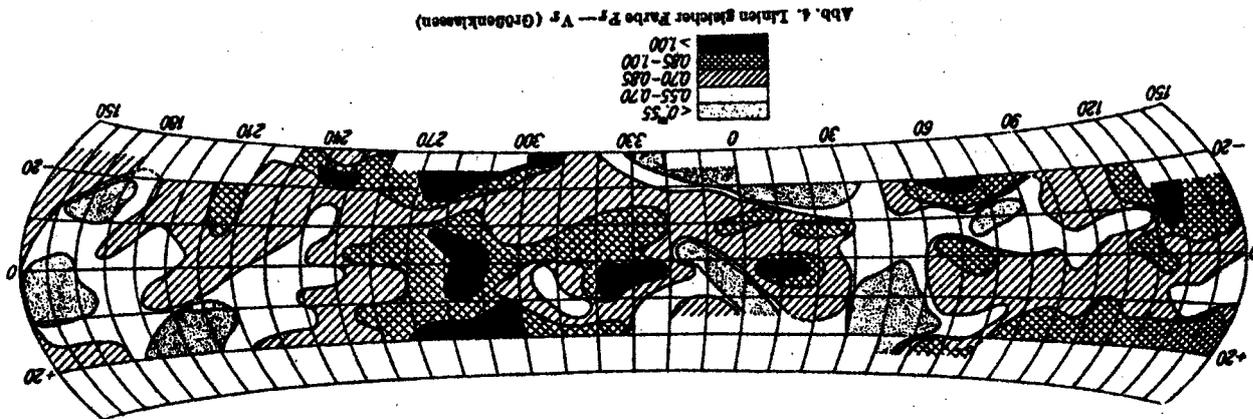


Abb. 4. Linien gleicher Farbe  $FI_r - V_r$  (Größenklassen)

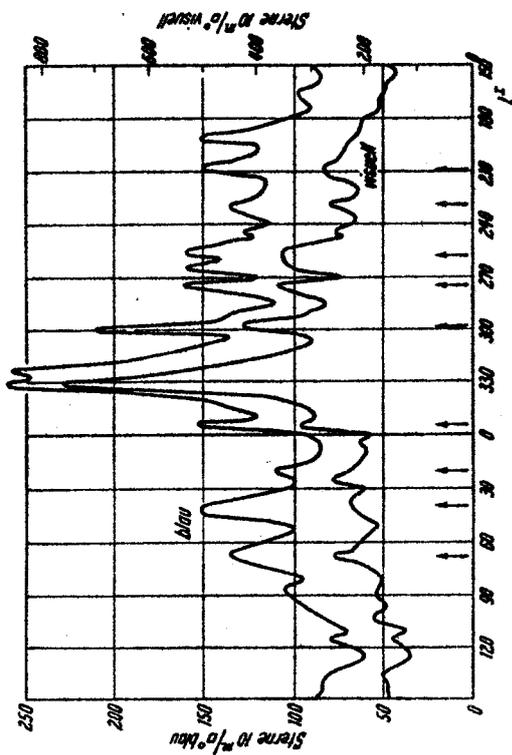


Abb. 5. Maximalhelligkeiten der Milchstraße für beide Farben in Abhängigkeit von der galaktischen Länge (vgl. Text)

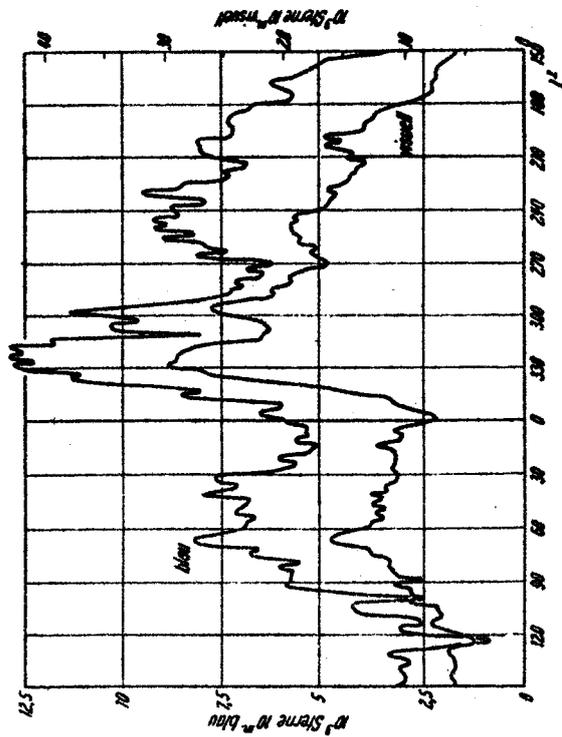


Abb. 6. Helligkeit der Milchstraße für beide Farben integriert über die galaktische Breite in Abhängigkeit von der galaktischen Länge (vgl. Text)

Als optisch bestimmte Richtung zum galaktischen Zentrum stimmt sie in Anbetracht des geringen Auflösungsvermögens unserer Isophotokarten und möglicher Absorptionseinflüsse mit dem radio-astromischen Wert  $l^I = 327.7$  ( $l^I = 0$ ) sehr gut überein. Mit zunehmendem Abstand von dieser ausgezeichneten Länge zeigt Abb. 5 einen allgemeinen Helligkeitsabfall bis zur Richtung zum Antizentrum, dem aber eine Reihe von Helligkeitsspitzen überlagert sind. Sie treten besonders im Blauen hervor und fallen durch ihre annähernd gleichen Abstände in  $l$  auf. Die mittlere Position der Spitzen, die in beiden Farben auftreten, ist durch Pfeile im unteren Teil der Figur markiert.

In Abb. 6 sieht man die Helligkeitsverteilung der Milchstraße in Abhängigkeit von  $l$ , wie sie sich bei einer Integration der Isophotokarten über die galaktische Breite ergab. Durch Planimetrieren wurde dazu die innerhalb senkrecht zum Äquator liegenden Streifen ( $\Delta l = 2.5^\circ$ ) emittierte Helligkeit ermittelt (die Begrenzung in Breite waren die Isophote 50 im Blauen, die Isophote 100 im Visuellen). Die Figur zeigt sehr deutlich den Helligkeitsunterschied von nördlicher und südlicher Milchstraße. Im Gegensatz zu Abb. 5 finden sich, neben dem zentralen Anstieg, im wesentlichen zwei breite Helligkeitsmaxima zwischen  $30^\circ$  und  $70^\circ$  bzw.  $220^\circ$  und  $280^\circ$ . Die Spitzen von Abb. 5 sind demnach, wie auch der Blick auf die Isophotokarten lehrt, in erster Linie ein Phänomen der galaktischen Ebene.

Durch Planimetrieren innerhalb der 100er-Isophote im Visuellen und der 50er-Isophote im Blauen ergaben sich als Gesamthelligkeiten die Zahlen der Tabelle 2 ( $N$  nördlicher,  $S$  südlicher Teil). Die beiden Isophoten umschließen fast genau dieselbe Fläche (Unterschied etwa 2%), so daß ein sinnvoller Vergleich zwischen Blau- und Visuell-Helligkeiten möglich ist.

Tabelle 2. Gesamthelligkeit nach den Isophoten von Abb. 2 und 3. Einheit: Sterne  $10^{10}$

	$N$ ( $0^\circ - 180^\circ$ )	$S$ ( $180^\circ - 360^\circ$ )	$N + S$	$N/S$
$P_r$	$3.73 \cdot 10^4$	$6.25 \cdot 10^4$	$9.98 \cdot 10^4$	0.60
$V_r$	$6.80 \cdot 10^4$	$13.20 \cdot 10^4$	$20.00 \cdot 10^4$	0.52
$FI_r$	$0.765$	$0.781$	$0.775$	

Hier kommen wieder die Unterschiede in der Helligkeit und Rötung von Nord und Süd deutlich zum Ausdruck. Auf einen mittleren  $FI$  in der Nähe von  $0.775$  weist auch das annähernde Zusammenfallen der visuellen 100er-Isophote mit der blauen 50er-Isophote hin.

Um die scheinbare Totalhelligkeit der Milchstraße zu erhalten, müssen die Zahlen der Tab. 2 durch den Beitrag aus höheren galaktischen Breiten,

den wir in unserer Photometrie nicht zuverlässig bestimmen konnten, ergänzt werden. Dafür wurde die aus Sternzählungen abgeleitete Karte von ROACH (l. c.) benützt. Vorher wurde durch Interpolation für einen glatten Übergang zu unseren Isophoten gesorgt. Im Blauen sind die Gelb- isophoten von ROACH mit dem mittleren  $FI_T = 0.75$  umgerechnet worden. Im Visuellen ergab sich für die Teile mit Flächenhelligkeiten  $< 100 \text{ St. } 10^m/\square^\circ$  als Gesamthelligkeit  $1.72 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m$ , die zu dem Wert von Tab. 2 zu addieren ist (zwischen 100 und 75 nach Abb. 2, für  $< 75$  nach ROACHs Karte planimetriert). Im Blauen ist die entsprechende Zahl  $8.84 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m$ . Man sieht, daß fast 50% der totalen Milchstraßen- helligkeit aus  $|\delta| > 20^\circ$  stammt. Nach der Addition zu den Werten von Tab. 2 ergeben sich dann als Totalhelligkeit und integraler Farbindex

$$P_T = 1.88 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m \text{ bzw. } P_T = -5.769$$

$$V_T = 3.72 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m \text{ bzw. } V_T = -6.743$$

$$FI_T = +0.774$$

Die entsprechenden Größen fürs internationale P, V-System sind nach (1)

$$P = 1.86 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m \text{ bzw. } P = -5.768$$

$$V = 4.22 \cdot 10^6 \text{ St. } 10^m \text{ bzw. } V = -6.757$$

$$FI = +0.769$$

#### 4. Zur Struktur der Galaxis

Es hat bisher nicht an Versuchen gefehlt, aus der Helligkeitsverteilung der Milchstraße den Aufbau des galaktischen Systems zu erschließen. Aus neuerer Zeit sind in erster Linie die Überlegungen von W. BUCKER (1951, 1956) und BOX (1959) zu erwähnen. Der letztere weist besonders darauf hin, daß trotz der fundamentalen Ergebnisse der 21 cm-Untersuchungen der Verlauf der galaktischen Spiralarme, vor allem in Sonnennähe, keineswegs als geklärt gelten kann. Die bisherigen Versuche leiden aber alle an dem Fehlen zuverlässiger Beobachtungsdaten, so daß es naheliegt, auf Grund der jetzigen Kenntnisse über die Helligkeits- und Farbverteilung das Problem der optischen Struktur der Milchstraße erneut aufzugreifen.

a) Galaktische Struktur abgeleitet aus der Flächenphotometrie. Nach den heutigen Vorstellungen über den Aufbau großer Galaxien werden zur beobachteten Helligkeits- und Farbverteilung der Milchstraße beitragen:

a) Die Sterne der das ganze System durchdringenden Scheibenpopulation (Pop. II). Ihr integraler Farbindex liegt im P, V-System bei  $0.75$  ( $FI_T \approx 0.743$ ).

b) Die Objekte der Spiralarmpopulation (Pop. I);  $FI \approx 0.72$  bzw.  $FI_T \approx 0.715$ .

c) Die vor allem auf die Spiralarme konzentrierte interstellare Absorption  $A$ . In grober Näherung kann im Blauen  $A_s = 1.2/kpc$  gesetzt werden, für den Farbercess  $E = A_s - A$ , gilt  $E \approx 0.25 A_s$ , (vgl. ALLEN, 1955). Der aus den Isophotenkarten und der Abb. 5 hervorgehende allgemeine Helligkeitsabfall zwischen der Richtung zum Zentrum und dem Antizentrum geht ohne Zweifel auf die nach außen abnehmende Dichte der Scheibenpopulation zurück. Auch der kleinere  $FI$  in größeren Abständen vom Zentrum (Abb. 4) deutet darauf hin.

Dagegen scheinen die bereits hervorgehobenen Helligkeitsspitzen in Abb. 5 durch Population I-Objekte hervorgerufen zu werden. Dafür spricht einmal ihr stärkeres Hervortreten im Blauen als im Gelben (ihr

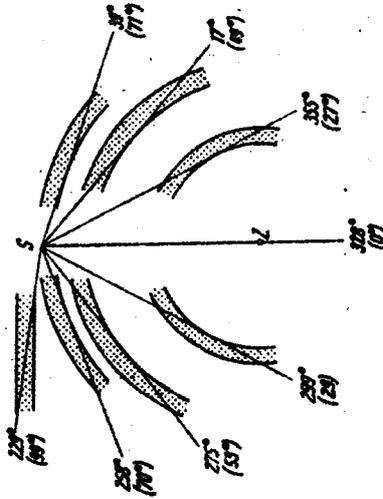


Abb. 7. Zur Lokalisierung der kreisförmig angeordneten Arme auf Grund der beobachteten Tangentialrichtungen

$FI$  ist also kleiner als der des Untergrundes), zum anderen, daß sie nur in der Nähe der galaktischen Ebene zu finden sind. In Anbetracht ihrer annähernd gleichen gegenseitigen Abstände (s. Positionsmarkierungen) und ihrer auffallend symmetrischen Anordnung bezüglich der Richtung zum Zentrum ist aber kaum anzunehmen, daß sie auf zufällige Sternverdichtungen in unserer näheren Umgebung zurückzuführen sind.

Wir gehen im folgenden von der Hypothese aus, bei der entsprechenden galaktischen Länge verlaufe die Blickrichtung längs eines Spiralarms. (Dabei ist zu beachten, daß die aus Abb. 5 folgenden Positionen und Höhen dieser Spitzen infolge interstellarer Absorption verfälscht sein können.) Nimmt man zunächst der Einfachheit halber kreisförmige Arme an, so kommt man für die inneren Teile des Milchstraßensystems (die beiden äußersten Maxima von Abb. 5 seien vorerst weggelassen) zu der in Abb. 7

gezeigten Figur: Die Helligkeitsspitzen entstehen bei tangentialer Berührung der inneren Kanten der Arme, der Lichtweg im Arm ist dann am längsten. Auf Grund dieses Diagramms läßt sich bereits ein auffallendes Beobachtungsergebnis verstehen: Die zunehmende Breite der Spitzen mit wachsendem Abstand von der Zentrumsrichtung, die sowohl aus Abb. 5 als auch aus den Isophotenkarten hervorgeht, ist durch die größere Entfernung der inneren Arme vom Beobachter bedingt. Die Dicke der Arme entspricht in Abb. 7 etwa der Basisbreite der Helligkeitsmaxima am Übergang zur Untergrundhelligkeit. — Abweichend von Abb. 5 ist in Abb. 7 und im folgenden die Tangentialrichtung des für die bei 20° liegenden Spitzen verantwortlichen Arms zu 17° angenommen. Aus den Isophotenkarten gewinnt man den Eindruck, daß dieser in Aquila verlaufende Arm infolge starker Absorption (vgl. Farbkarte) nur sehr unvollständig zu sehen ist und das ihm entsprechende Helligkeitsmaximum in Wirklichkeit bei etwas kleinerer Länge liegt. Auch der unsymmetrische Helligkeitsanstieg zu dem zwischen 20° und 30° Länge vorhandenen, sehr niederen Maximum (im Gelben höher als im Blauen!) deutet darauf hin. Die beträchtliche Absorption in dieser Gegend ist auch aus anderen Untersuchungen bekannt (WEAVER, 1949).

Wie sind nun diese Bruchstücke von Armen aneinander anzuschließen? Nach Abb. 7 erscheint es naheliegend, den längs 355° verlaufenden Arm in den bei 299° übergehen zu lassen und entsprechend bei 17° mit 275° bzw. bei 39° mit 258° zu verbinden. Das würde bedeuten, daß das im Cygnus (39°) beobachtete Helligkeitsmaximum vom selben Arm herrührt, dem wir in Carina (258°), nur in der anderen Richtung, entlangsehen. Der Vorschlag von BOX (1959) zur Spiralstruktur in Sonnennähe zielt darauf hin, die Existenz dieses Cygnus-Carina-Armes zu beweisen. Gegen diese Lösung, die zwangsläufig auf annähernd kreisförmige Arme führen würde, spricht als erstes (s. Abb. 7), daß sich dabei für die inneren Teile der Galaxis weiter auseinanderliegende Arme ergäben als in größeren Abständen vom Zentrum, entgegen den Erfahrungen bei extragalaktischen Systemen. Darüber hinaus scheint uns aber der aus den Beobachtungen folgende Unterschied in Helligkeit und Farbe zwischen nördlicher und südlicher Milchstraße nur mit dem in Abb. 8 gezeigten Verlauf der Spiralarme verständlich zu sein.

Dazu muß darauf hingewiesen werden, daß die Entfernungen der Tangentialpunkte von der Sonne in Abb. 7 allein durch die Annahme kreisförmiger Arme bestimmt sind. Bei spiralförmigen Armen wird die tangentiale Berührung zwar in derselben Richtung, aber an einer anderen Stelle erfolgen. Geht man von der Annahme aus, die Spiralarme seien im wesentlichen glatte Kurven, so kann man durch Verschieben der Tangentialpunkte nach einer plausiblen Interpolation der in Abb. 7 angedeu-

ten Bruchstücke suchen. Neben der „kreisförmigen“ Lösung kommt dann die Verbindung von 355° mit 275°, 17° mit 258°, 39° mit 229° oder 299° mit 17° usw. in Frage. Die erstere scheint uns die einzige mit den Beobachtungen verträgliche Möglichkeit zu sein aus folgenden Gründen:

Es fällt schwer anzunehmen, der besonders auf den Isophotenkarten hervortretende Helligkeitsunterschied von südlicher und nördlicher Milchstraße gehe auf die Wirkung lokaler interstellarer Absorption zurück. Auf der nördlichen Seite sind zwar, besonders zwischen  $l = 0^\circ$  und  $20^\circ$  (Ophiuchus-Aquila) Absorptionseinflüsse in der Helligkeits- und Farbkarte unverkennbar. Würde aber ein ausgedehntes Absorptionsgebiet die Schwächung des ganzen nördlichen Teils verursachen, so sollte man hier durchschnittlich höhere Farbindizes erwarten als auf der südlichen Seite des Zentrums. Genau das Gegenteil ist aber der Fall. Darüber hinaus ist es auffallend, daß sich die asymmetrische Helligkeitsverteilung längs des galaktischen Äquators in bezug aufs Zentrum in der Verteilung der Farbindizes wiederholt: Bei  $l = 240^\circ$  ( $90^\circ$  Abstand vom Zentrum) findet sich die erste stärkere Einschnürung der 200er-Isophote im Visuellen und der 100er-Isophote im Blauen, wenn man sich vom Zentrum nach außen bewegt. An derselben Stelle wird der FI zum ersten Mal für ein größeres Gebiet  $< 0^m70$ . Auf der nördlichen Seite fällt der Wechsel im FI von  $> 0^m70$  nach  $< 0^m70$ , bei etwa  $60^\circ$  Abstand vom Zentrum ( $l \cong 30^\circ$ ), ebenfalls mit einer „Helligkeitakante“ zusammen.

Wählt man nun im Anschluß an Abb. 7 einen glatten Verlauf der Spiralarme in der Weise, daß von 355° nach 275° usw. interpoliert wird (die endgültige Lösung zeigt Abb. 8), so ist die qualitative Erklärung der Helligkeits- und Farbverteilung einfach: Im Bereich 258°—328°—17° beobachten wir stets durch den, von der Sonne gesehen, nächstinneren Spiralarm hindurch. Für diesen Teil der Milchstraße addiert sich also zur Helligkeit der inneren Teile stets der Beitrag dieses Armes, im Süden für Abstände kleiner als etwa  $80^\circ$ , im Norden erst etwa ab  $50^\circ$  Abstand vom Zentrum. Weiter innen kommt dann noch die Helligkeit des nächsten Armes dazu, südlich des Zentrums wieder früher als auf der nördlichen Seite. Die Asymmetrie der Helligkeitsverteilung ist also nach dieser Vorstellung eine direkte Folge der Anordnung der Spiralarme. (Es sei hervorgehoben, daß W. BECKER (1956) schon früher auf die Bedeutung dieser Asymmetrie für das Verständnis der galaktischen Struktur hingewiesen hat.) — Was folgt daraus für die Farbverteilung? Im Bereich von etwa  $250^\circ$  bis  $20^\circ$  sind die inneren Teile der Galaxis für uns durch die Absorption mindestens eines Arms verfärbt. Setzt man für den Lichtweg in einem Arm etwa 1 kpc an, so resultiert (vgl. oben) ein Farbexzess von etwa  $0^m25$ . Da der Hauptbeitrag zur Helligkeit, gerade in den zentralen Gegenden, von Population II-Sternen mit  $FI_T \cong 0^m43$  kommt, ist dort in

besten Übereinstimmung mit den Beobachtungen im  $FI_r \approx 0.70$  zu erwarten. Für  $l \approx 275^\circ - 355^\circ$  sind zwei Arme zu durchqueren. Der integrale  $FI$  wird also dort bei  $l \approx 1.70$  liegen, wobei diese weitere Verfärbung wieder asymmetrisch zum Zentrum auftritt, wie es die Farbkarte zeigt. Mit der größeren Helligkeit der südlichen Milchstraße ist also nach diesem Modell der Spiralstruktur zwangsläufig eine stärkere Rötung gekoppelt. Es ist leicht einzusehen, daß eine ähnlich befriedigende Deutung der

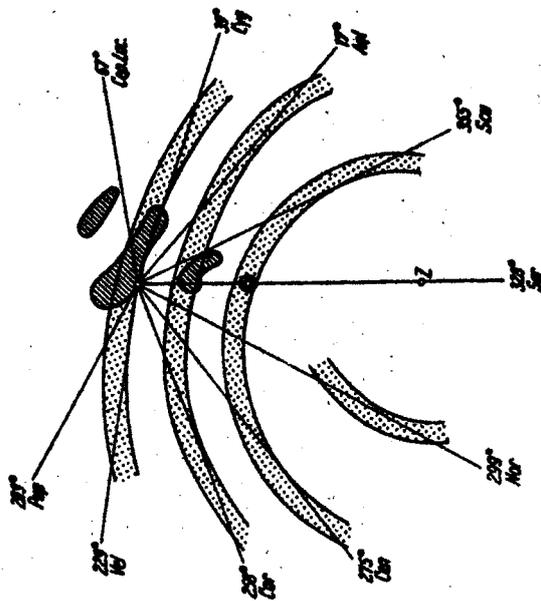


Abb. 8. Modell der galaktischen Spiralstruktur. (Innerhalb der gestrichelten Bereiche Identifikation von OI-Assoziationen durch MORGAN, WHITFORD und CODR. Der Kreis auf der zum Zentrum  $Z$  lautenden Linie entspricht etwa der Entfernung eines Helligkeitsmaximums offener Haufen nach W. BACKER.)

galaktischen Helligkeits- und Farbverteilung mit keiner anderen Lösung für die Interpolation der fragmentarischen Arme von Abb. 7 möglich ist.

Für diese qualitative Erklärung ist es nicht erforderlich, den Verlauf der Spiralarme im einzelnen sehr genau zu kennen. Aus der Flächenphotometrie allein ist er auch nicht abzuleiten. Wir haben deshalb zusätzlich optische Beobachtungen von Einzelobjekten für eine genauere Festlegung der Stellen herangezogen, an denen die Spiralarme die Richtung zum galaktischen Zentrum überqueren. In Abb. 8 sind die Gebiete, in denen von MORGAN, WHITFORD und CODR (1953) O-Assoziationen lokalisiert werden konnten, schraffiert eingetragen. Diese Beobachtungen reichen leider nur bis zu relativ geringen Entfernungen von der Sonne.

Insbesondere genügen sie nicht für eine genauere Festlegung des zweiten inneren Spiralarms. Für dessen Entfernung findet sich ein Hinweis in einer statistischen Bearbeitung des Collinderschen Katalogs offener Haufen durch W. BACKER (1956). Die von ihm abgeleitete Verteilung der scheinbaren Haufendurchmesser  $\varphi$  in der Richtung zum galaktischen Zentrum hat neben einem Maximum bei  $\varphi \approx 14'$ , das einer Entfernung von etwa 1.4 kpc entspricht (erster Arm!), ein weiteres, weniger deutlich ausgeprägtes bei  $\varphi \approx 5'$ . Das bedeutet nach BACKER eine Entfernung von ungefähr 3.3 kpc. Der in Abb. 8 angegebene Kreis auf der Zentrallinie entspricht diesem nur ungenau bekannten Abstand. — Mit den vorgegebenen Tangentialrichtungen, diesen Entfernungsangaben von typischen Populations I-Objekten und der Annahme eines glatten Spiralarmverlaufs wurde das in Abb. 8 enthaltene Modell der galaktischen Spiralstruktur gewonnen. Die Entfernung des galaktischen Zentrums ist nach BAADE (1951) zu 8.7 kpc angenommen. Es ist bemerkenswert, daß erst für die genauere Festlegung der Spiralarme diese Distanz gebraucht wird. Alle vorhergehenden Betrachtungen konnten ohne Kenntnis der wahren Dimensionen des Sternsystems angestellt werden. Die Dicke der Arme ist die gleiche wie in Abb. 7, die in Anlehnung an die Breite der Helligkeitsspitzen von Abb. 5 gewählt wurde; sie entspricht 0.6 kpc. Nach den Isophotenkarten sollte die Ausdehnung der Arme senkrecht zur galaktischen Ebene etwa von derselben Größe sein.

Über die Spiralstruktur in dem außerhalb des lokalen Arms gelegenen Teil der Galaxis läßt sich auf Grund der Flächenphotometrie allein wenig aussagen, da dort bei einem der inneren Arme ähnlichen Verlauf der Spiralen keine bevorzugten Richtungen des Sehstrahls vorkommen. Bei den für  $l = 67^\circ$  und  $209^\circ$  beobachteten Helligkeitsspitzen läßt sich deshalb im Augenblick nicht entscheiden, ob sie auf Sternwolken des lokalen oder eines weiter außen verlaufenden Armes zurückgehen, der auch so verzerrt sein könnte, daß ausgezeichnete Richtungen für den irdischen Beobachter auftreten. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, daß man bei extragalaktischen Nebeln in dem Außenbezirken vielfach Unterbrechungen, Aufspaltungen und andere Auflösungserscheinungen der Spiralarme findet. Es erscheint uns nicht ausgeschlossen, daß der lokale Arm in Richtung  $l = 229^\circ$  nur unvollständig ausgebildet (das entsprechende Helligkeitsmaximum in Abb. 5 ist auffallend niedrig) und nach  $l = 209^\circ$  aufgespalten ist. Eine endgültige Klärung kann aber hier nur die zuverlässige Identifikation einzelner Spiralarmobjekte bringen.

Es sei noch kurz auf die Helligkeitsverteilung der Abb. 6 eingegangen, die durch Integration der Isophotenkarten über die galaktische Breite gewonnen wurde. Im Gegensatz zu der von Abb. 5 ist sie vorwiegend durch die Struktur der näheren Sonnenumgebung bestimmt. Die Beiträge aus

zu erwarten. In dieser Richtung trifft man aber auf die nach WEAVER (1949) extrem hohe Vordergrundsabsorption (s. auch oben).

Eine zweite qualitative Bestätigung der im vorhergehenden Abschnitt gewonnenen Ergebnisse ergibt sich aus dem Verlauf der "zone of avoidance". Auf deren Beziehung zum Aufbau des Sternsystems hat ebenfalls W. BECKER bereits hingewiesen, dessen Schlüsse bei einer Spiralstruktur entsprechend Abb. 8 nur wenig zu modifizieren sind. Unser

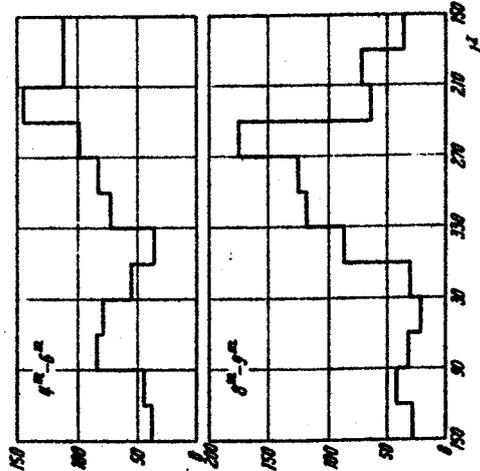


Abb. 9. Häufigkeit früher B-Sterne für zwei Intervalle der sichtbaren Helligkeit in Abhängigkeit von der galaktischen Länge

Ergebnis unterscheidet sich von seinen Vorstellungen im wesentlichen dadurch, daß er den längs 355° angeschnittenen Teil eines Armes mit dem längs 258° verlaufenden Stück verbindet.

c) Vergleich mit radioastronomischen Daten. Die Abb. 10 zeigt einmal die Gebiete der galaktischen Ebene mit HI-Dichten größer als 0.6 Atomen/cm<sup>3</sup>, wie sie von WESTERHOUT (1957) und COBT, KERR und WESTERHOUT (1958) nach 21 cm-Untersuchungen angegeben werden. Außerdem sind die Mittellinien der in Abb. 8 enthaltenen Spiralarme eingetragen. Man sieht, daß in größerer Entfernung von der Sonne, insbesondere in der Nähe der Tangentialpunkte, die optisch ermittelten Arme mit den Bereichen höherer HI-Dichte zusammenfallen. Dagegen ist die Übereinstimmung in Sonnennähe, wo der Zusammenhang der für die nördliche Milchstraße gefundenen Spiralarme mit denen der südlichen Seite nach den Radiodaten unklar ist (vgl. auch Box 1. c.), weniger gut. Wenn man es als unwahrscheinlich ausschließt, daß hier reelle Differenzen in der

höheren galaktischen Breiten kommen in erster Linie aus dem lokalen bzw. den uns benachbarten Armen und führen zu den breiten Maxima der Abb. 6. Damit unmittelbar zusammenhängend ist die Form der schwächsten Isophoten in Abb. 2 und 3: Das Breiterwerden der Milchstraße mit der Annäherung ans Antizentrum ist auf den Einfluß des lokalen Arms zurückzuführen, wie bereits W. BECKER (1956) am Modell einer „idealen Milchstraße“ demonstriert hat.

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß die bereits hervorgehobene Ausbuchtung der schwächeren Isophoten nach der Großen Magellanschen Wolke hin und die entsprechenden Deformationen bei der nördlichen Milchstraße mit der bei den 21 cm-Untersuchungen gefundenen Verbiegung der galaktischen Ebene zusammenhängen könnten, die ebenfalls auf die Magellanschen Wolken hin orientiert ist. Eine ähnliche Erscheinung ist beim Andromedanebel bekannt, die wahrscheinlich durch den Einfluß seines Begleiters M 32 hervorgerufen ist (vgl. SCHWARZSCHILD 1954).

b) Vergleich mit der Verteilung früher B-Sterne, "Zone of avoidance". Die Untersuchung typischer Spiralarmobjekte beschränkte sich bisher fast ausschließlich auf die nähere Sonnenumgebung (vgl. Box 1. c.). Ein Vergleich der aus der Flächenphotometrie abgeleiteten Spiralstruktur mit anderen optischen Ergebnissen ist deshalb für größere Entfernungen von der Sonne nur sehr beschränkt möglich. Eine Bestätigung der in Abb. 8 gezeigten Anordnung der Spiralarme scheint uns die aus Abb. 9 hervor gehende Verteilung früher B-Sterne zu sein. Sie ist der Arbeit von W. BECKER (1956) entnommen und entspricht den von CHARLIER aus dem Draper Katalog abgeleiteten Häufigkeiten der B0—B5-Sterne für die Größenklassenintervalle 4<sup>m</sup>—6<sup>m</sup> und 8<sup>m</sup>—9<sup>m</sup> in Abhängigkeit von der galaktischen Länge. Bei einer mittleren absoluten Helligkeit von  $M \approx -5^m$  liegen die Sterne des ersten Intervalls bis zu etwa 1 kpc, die des zweiten, wenn man als Absorption 1<sup>m</sup> annimmt, etwa zwischen 2 und 4 kpc von der Sonne entfernt. Die Häufigkeit in der ersten Gruppe (oberer Teil in Abb. 9) ist zwischen  $l = 30^\circ - 90^\circ$  und  $150^\circ - 240^\circ$  am größten. Das ist nach Abb. 8 zu erwarten; es handelt sich hier um die Objekte des lokalen Arms, die benachbarten Arme tragen noch nichts bei. Bei den weiter entfernten B-Sternen wird das breite Maximum zwischen  $240^\circ$  und  $360^\circ$  mit der hohen Spitze zwischen  $240^\circ$  und  $270^\circ$  durch die Objekte der inneren Spiralarme hervorgerufen (auffällig ist die der Helligkeitsverteilung analoge Asymmetrie der Häufigkeitskurve). Der steile Anstieg in der Nähe von  $l = 240^\circ$  weist darauf hin, daß man hier nicht die Fortsetzung des lokalen Arms vor sich hat. Es sieht vielmehr so aus, als ob in Übereinstimmung mit Abb. 8 der nächstinnere Arm tangential angeschnitten würde. Ein entsprechendes Maximum wäre bei  $l \approx 15^\circ$

nahe dem Bokesehen Vorschlag (l. c.) und unterliegt deshalb den gleichen, durch die optische Helligkeits- und Farbverteilung der Milchstraße begründeten Einwänden (s. oben). Die Spiralstruktur nach MILLS läßt sich auch mit den 21 cm-Ergebnissen schlecht in Einklang bringen.

d) **Schlussbemerkungen.** Eine wesentliche Konsequenz der in Abb. 8 gezeigten Spiralstruktur betrifft den Rotationssinn der Spiralarme. Die Sonne bewegt sich auf ihrer Bahn um das galaktische Zentrum in Richtung  $l \approx 56^\circ$ . Daraus folgt nach Abb. 8, daß die Spiralarme mit der konvexen Seite nach vorn rotieren. Es sei hervorgehoben, daß dieses Ergebnis hier, im Gegensatz zu den 21 cm-Daten, ohne Annahmen über das Rotationsgesetz und den Bewegungszustand des Sternsystems gewonnen wird.

Es versteht sich von selbst, daß die in Abb. 2—6 gezeigten Beobachtungsergebnisse über die vorhergehenden Betrachtungen hinaus eine Fülle von Informationen enthalten, die für quantitative Aussagen über das galaktische System nützlich sind (z. B. über die räumliche Verteilung und Dichte der Scheibenpopulation, Dichte der Population I-Sterne, Verteilung der Dunkelwolken, Absolutheitigkeit und Massenverteilung der Galaxis usw.). Ihre Diskussion bleibe zukünftigen Arbeiten überlassen.

In Anbetracht der hier erhaltenen Resultate wäre noch zu fragen, wie es, entgegen einer weitverbreiteten Meinung mit optischen Methoden möglich sein kann, bis in die zentralen Teile des galaktischen Systems vorzudringen. Das dürfte vor allem zwei Gründe haben: Einmal ist durch die Beobachtung von Flächenhelligkeiten eine große räumliche Reichweite gewährleistet, da diese bei gleichbleibendem Sehinkel von der Entfernung unabhängig sind. Dieser Vorteil gegenüber der Beobachtung von Punkthelligkeiten ist auch für die radioastronomischen Untersuchungen der Galaxis wesentlich. Daneben ist der Einfluß der interstellaren Absorption dadurch teilweise aufgehoben, daß wir unserer Diskussion der Spiralstruktur die Helligkeitsverteilung etwas außerhalb der galaktischen Ebene zugrunde gelegt haben. Das hat auch zur Folge, daß sich die „Spiral-armspitzen“ in Abb. 5 vom Untergrund besser abheben als es in der Hauptebene der Fall sein würde. Der gegen die Hauptebene geneigte Schertrahl läuft jenseits der Tangentialpunkte über die weiter entfernten Arme hinweg.

Wenn auch das hier gewonnene Modell der galaktischen Spiralstruktur vielleicht in Zukunft zu modifizieren sein wird, so erscheint es uns eine brauchbare Arbeitshypothese vor allem für die sinnvolle Planung der Beobachtung hinreichend entfernter Einzelobjekte zu sein, deren Bedeutung nur aufs Neue unterstrichen werden kann.

Anordnung der aus Gas bzw. aus stellaren Objekten bestehenden Arme vorliegen, so kann diese Diskrepanz einmal auf unsere Annahme eines im wesentlichen glatten Spiralarmlaufes zurückgehen, die in Sonnennähe vielleicht nicht den wirklichen Verhältnissen entspricht (s. o.). Andererseits ist aber auch folgendes zu berücksichtigen: Die HI-Dichten sind unter der Voraussetzung abgeleitet, das Gas bewege sich auf kreisförmigen Bahnen um das galaktische Zentrum. Wie OORT, KAAZ und

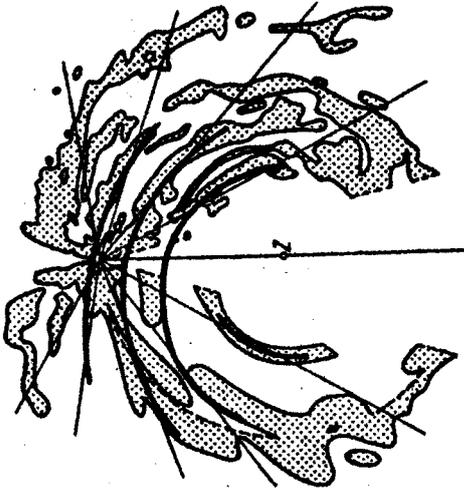


Abb. 10. Gebiete mit HI-Dichten größer als  $0,8 \text{ Atoms/cm}^3$  nach 21 cm-Daten (gestrichelte Begrenzungen durch Beobachtungsmethodik bedingt). Stark ausgezogen: Mittellinien der in Abb. 8 gezeigten Spiralarme

WZERSHOFF selbst hervorheben, muß aber mit systematischen und zufälligen Abweichungen von der Kreisbewegung gerechnet werden. Sie führen über die zur Entfernungsbestimmung benutzten Radialgeschwindigkeiten  $V_r$  zu Fehlern in der Distanz der 21 cm-Strahlung emittierenden Gaswolken. Wie leicht einzusehen ist, nehmen diese Fehler bei gleichbleibender Unsicherheit in  $V_r$  mit der Annäherung an die Richtung zum galaktischen Zentrum bzw. zum Antizentrum zu. Das legt den Verdacht nahe, daß die verwickelte Verteilung des HI-Gases in Sonnennähe, die u. a. ein Zusammenlaufen der Spiralarme auf die Sonne hin andeutet, wenigstens teilweise vorgetäuscht ist.

Es sei noch auf eine Arbeit von MILLS (1959) hingewiesen, der aus Beobachtungen der kontinuierlichen Radiostahlung bei 3,5 m Wellenlänge ein Modell der galaktischen Spiralstruktur abgeleitet hat. Die von ihm angegebenen Tangentialrichtungen stimmen mit den unseren zum Teil sehr gut überein. Die Anordnung der Spiralarme entspricht in Sonnen-

Herr Prof. SIEDENTOFF hat durch seine tatkräftige Förderung die Durchführung der Messungen ermöglicht, dafür möchten wir ihm herzlich danken. Ebenfalls zu großem Dank verpflichtet sind wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Boyden-Council und der Verwaltung der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch, die durch ihre Unterstützung und ihr Entgegenkommen zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Frau JENSBACH und Frl. VETTER vom Tübinger Institut danken wir für ihre unermüdliche Hilfe bei den Reduktionen. Der eine Verfasser (E.) möchte sich außerdem bei Herrn Prof. BAADE für mehrere Diskussionen über die galaktische Struktur herzlich bedanken.

## Literatur

- ALLEN, C. W.: *Astrophysical Quantities*, S. 226. London: The Athlone Press 1955.
- BAADE, W.: *Galaxies — present day problems*. Publ. Obs. Univ. Michigan 10, 7 (1951).
- BECKER, W.: Bemerkungen zum Rotationsproblem von Spiralnebeln. *Z. Astrophysik* 29, 269 (1951).
- BECKER, W.: *An analysis of the Milky Way*. *Vistas in Astronomy* II, S. 1515. Ed. A. Beer. London: Pergamon Press 1956.
- BEHR, A., u. H. SIEDENTOFF: Untersuchungen über Zodiaklicht und Gegenschein nach lichtelektrischen Messungen auf dem Jungfrauoch. *Z. Astrophysik* 32, 19 (1953).
- BOK, B. J.: The spiral structure of our galaxy. *Observatory* 79, 58 (1959).
- BOTTLINGER, K. F.: Über die Verteilung der Lichtintensität auf die einzelnen Größenklassen der Sterne. *Z. Astrophysik* 4, 370 (1932).
- BUSCOMBE, W., S. C. B. GASCOIGNE and G. DE VAUCOULEURS: Problems of the Magellanic Clouds. *Austr. J. Sci. Suppl.* 17, No. 3 (1954).
- ELSÄSSER, H.: Extinktionsmessungen am Jungfrauoch. *Z. Astrophysik* 35, 36 (1954).
- ELSÄSSER, H.: Neue Helligkeits- und Polarisationsmessungen am Zodiaklicht und ihre Interpretation. *Sterne* 34, 166 (1958).
- ELSÄSSER, H.: Lichtelektrische Flächenphotometrie der Magellanschen Wolken II. *Z. Astrophysik* 47, 1 (1959).
- ELSÄSSER, H., u. H. SIEDENTOFF: Die Helligkeit des Gegenscheins nach lichtelektrischen Messungen an der Boyden-Station. *Z. Astrophysik* 43, 132 (1957).
- LUNDMARK, K.: A Swedish chart of the photographic Milky Way. *Sky and Telescope* 16, Nr. 5 (1957).
- MILLS, B. Y.: The radio continuum radiation from the galaxy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 71, 267 (1959).
- MORGAN, W. W., A. E. WHITFORD and A. D. CODE: Studies in galactic structure. *Astrophysic. J.* 118, 318 (1953).
- OORT, J. H., F. T. KERR and G. WESTERHOUT: The galactic system as a spiral nebula. *Monthly Notices* 118, 379 (1958).
- PANNEKOEK, A.: Photographische Photometrie der nördlichen Milchstraße. *Publ. Astron. Institute Amsterdam*, No. 3 (1933).
- PANNEKOEK, A., and D. KOELBLOED: Photographic photometry of the southern Milky Way. *Publ. Astron. Institute Amsterdam* No. 9 (1949).

- ROACH, F. E., H. B. PETTIT, E. TANDBERG-HANSEN and D. N. DAVIS: Observations of the zodiacal light. *Astrophysic. J.* 119, 253 (1954).
- SCHWARZSCHILD, M.: Mass distribution and mass-luminosity ratio in galaxies. *Astronomical J.* 59, 273 (1954).
- WEAVER, H. F.: Color excess, total photographic absorption, and the distance of the dark cloud in the Aquila region of the Milky Way. *Astrophysic. J.* 110, 190 (1949).
- WESTERHOUT, G.: The distribution of atomic hydrogen in the outer parts of the galactic system. *Bull. Astr. Inst. Neth.* 18, 201, Nr. 475 (1957).

Dr. H. ELSÄSSER, Universitäts-Sternwarte, Göttingen,  
Geismarlandstr. 11;

Dr. U. HAUG, Astronomisches Institut der Universität Tübingen,  
Waldhäuser Höhe

Herzlich sei den beiden Autoren für das Einverständnis zur Wiedergabe ihres Beitrages gedankt. Die neuen Adressen sind:

Univ. Prof. Dr. H. Elsässer,  
Direktor des MPI für Astronomie  
Königstuhl, D-6900 Heidelberg, BRD.

Univ. Prof. Dr. U. Haug,  
Sternwarte Hamburg-Bergedorf,  
Gojenbergweg 200, D-2050 Hamburg, BRD.

Allen Seminarteilnehmern  
sei weiters empfohlen:

H. Scheffler / H. Elsässer  
BAU UND PHYSIK DER GALAXIS  
642 Seiten

Bibliographisches Institut  
Mannheim 1982

STERNFREUNDE-SEMINAR, WIENER PLANETARIUM, 1988 / Mucke

Beilage: Die helleren Galaxien aus dem Sky Catalogue 2000,0

Vorliegendes Referat stellt eine Reduktion des SKY CATALOGUE 2000.0, Volume 2 (Double Stars, Variable Stars and Nonstellar Objects) des Katalogteiles "Galaxien" dar. Für ein Aufscheinen in der nachfolgenden Liste ist eine visuelle Totalhelligkeit von mind. 10,40<sup>mag</sup> Voraussetzung.

Folgende Daten werden angeführt:

NGC: Galaxiennummer in J.L.E.Dreyer's New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars (1888).

Rekt., Dekl.: Rektaszension und Deklination bezogen auf Epoche 2000.

Const.: Sternbild der Galaxie.

V: Totale visuelle V (gelbe) Helligkeit im UBV-System.

Dim.: Durchmesser für große und kleine Achse in Bogenminuten.

Type: Galaxientyp nach Edwin Hubble (1926).

RV: Radialgeschwindigkeit in km/sec., korrigiert um die Rotationsgeschwindigkeit des Sonnensystems um das Milchstraßenzentrum.

Notes: Messierbezeichnung oder anderer spezieller Eigennamen.

NGC	Rekt.	Dekl.	Const.	V	Dim.	Type	RV	Notes
IC10	0h20,4m	+59°18'	Cas	10,27	5,1/4,3	Ir+	-84	
134	0h30,4m	-33°15'	Sc1	10,1	8,1/2,6	SBb+	1531	
147	0h33,2m	+48°30'	Cas	9,3	12,9/8,1	dE4	89	
185	0h39,0m	+48°20'	Cas	9,17	11,5/9,8	dE0	4	
205	0h40,4m	+41°41'	And	8,01	17,4/9,8	E6	1	M110
221	0h42,7m	+40°52'	And	8,21	7,6/5,8	E2	21	M32
224	0h42,7m	+41°16'	And	3,47	178/63	Sb	-59	M31
247	0h47,1m	-20°46'	Cet	8,86	20,0/7,4	S-	180	
253	0h47,6m	-25°17'	Sc1	7,07	25,1/7,4	Scp	259	Sculptor G.
	0h52,7m	-72°50'	Tuc	2,29	280/160	SBmp	-30	SMC
IC1613	1h04,8m	+ 2°07'	Cet	9,33	12,0/11,2	Ir+	-125	
404	1h09,4m	+35°43'	And	10,11	4,4/4,2	E0	178	
488	1h21,8m	+ 5°15'	Psc	10,29	5,2/4,1	Sb-	2292	
584	1h31,3m	- 6°52'	Cet	10,35	3,8/2,4	E4	1868	
598	1h33,9m	+30°39'	Tri	5,71	62/39	Sc	2	M33
613	1h34,3m	-29°25'	Sc1	10,03	5,8/4,6	SBb+	1462	
628	1h36,7m	+15°47'	Psc	9,17	10,2/9,5	Sc	793	M74
720	1h53,0m	-13°44'	Cet	10,22	4,4/2,8	E3	1820	
772	1h59,3m	+19°01'	Ari	10,33	7,1/4,5	Sb	2562	
891	2h22,6m	+42°21'	And	9,98	13,5/2,8	Sb	706	
908	2h23,1m	-21°14'	Cet	10,18	5,5/2,8	Sc	1470	
925	2h27,3m	+33°35'	Tri	10,01	9,8/6,0	SBc	716	
936	2h27,6m	- 1°09'	Cet	10,14	5,2/4,4	SBa	1350	
1023	2h40,4m	+39°04'	Per	9,46	8,7/3,3	E7p	776	
1068	2h42,7m	- 0°01'	Cet	8,81	6,9/5,9	Sbp	1134	M77
1097	2h46,3m	-30°17'	For	9,25	9,3/6,6	SBb	1227	
1232	3h09,8m	-20°35'	Eri	9,87	7,8/6,9	Sc	1664	
1291	3h17,3m	-41°08'	Eri	8,49	10,5/9,1	SBa	674	
1316	3h22,7m	-37°12'	For	8,85	7,1/5,5	SBOp	1632	
1332	3h26,3m	-21°20'	Eri	10,3	4,6/1,7	E7	1471	
1344	3h28,3m	-31°04'	For	10,32	3,9/2,3	E3	1088	
1365	3h33,6m	-36°08'	For	9,52	9,8/5,5	SBb	1502	

1. Fortsetzung Beilage: Die helleren Galaxien aus dem Sky Catalogue 2000,0

NGC	Rekt.	Dekl.	Const.	V	Dim.	Type	RV	Notes
1399	3h38,5m	-35°27'	For	9,9	3,2/3,1	E1p	1295	
1398	3h38,9m	-26°20'	For	9,7	6,6/5,2	SBb-	1299	
1404	3h38,9m	-35°35'	For	10,25	2,5/2,3	E1	1759	
1407	3h40,2m	-18°35'	Eri	9,8	2,5/2,5	E0	1717	
1433	3h42,0m	-47°13'	Hor	9,99	6,8/6,0	SBa	802	
1549	4h15,7m	-55°36'	Dor	9,94	3,7/3,2	E0	938	
1553	4h16,2m	-55°47'	Dor	9,53	4,1/2,8	S0	1064	
1566	4h20,0m	-54°56'	Dor	9,41	7,6/6,2	SBb+	1178	
1617	4h31,7m	-54°36'	Dor	10,35	4,7/2,4	SBa	778	
1792	5h05,2m	-37°59'	Col	10,18	4,0/2,1	Sb+	977	
1808	5h07,7m	-37°31'	Col	9,89	7,2/4,1	SBa	769	
	5h23,6m	-69°45'	Dor	0,08	650/550	SBm	13	LMC
2403	7h36,9m	+65°36'	Cam	8,39	17,8/11,0	Sc	259	
2683	8h52,7m	+33°25'	Lyn	9,72	9,3/2,5	Sb-	242	
2681	8h53,5m	+51°19'	UMa	10,30	3,8/3,5	Sa	760	
2655	8h55,6m	+78°13'	Cam	10,09	5,1/4,4	SBa	1623	
2775	9h10,3m	+7°02'	Cnc	10,33	4,5/3,5	Sa	965	
2768	9h11,6m	+60°02'	UMa	9,97	6,3/2,8	E5	1502	
2784	9h12,3m	-24°10'	Hya	10,10	5,1/2,3	S0	435	
2841	9h22,0m	+50°58'	UMa	9,32	8,1/3,8	Sb-	700	
2903	9h32,2m	+21°30'	Leo	8,92	12,6/6,6	Sb+	467	
2976	9h47,3m	+67°55'	UMa	10,15	4,9/2,5	Scp	175	
3031	9h55,6m	+69°04'	UMa	6,93	25,7/14,1	Sb	95	M81
3034	9h55,8m	+69°41'	UMa	8,41	11,2/4,6	P	388	M82
3077	10h03,3m	+68°44'	UMa	9,85	4,6/3,6	E2p	148	
3115	10h05,2m	-7°43'	Sex	9,15	8,3/3,2	E6	476	Spindle G.
	10h08,4m	+12°18'	Leo	9,84	10,7/8,3	dE3		
3184	10h18,3m	+41°25'	UMa	9,75	6,9/6,8	Sc	593	
3198	10h19,9m	+45°33'	UMa	10,4	8,3/3,7	Sc	691	
3344	10h43,5m	+24°55'	LMi	9,95	6,9/6,5	Sc	513	
3351	10h44,0m	+11°42'	Leo	9,71	7,4/5,1	SBb	673	M95
3368	10h46,8m	+11°49'	Leo	9,24	7,1/5,1	Sbp	773	M96
3377	10h47,7m	+13°59'	Leo	10,21	4,4/2,7	E5	596	
3379	10h47,8m	+12°35'	Leo	9,26	4,5/4,0	E1	756	M105
3384	10h48,3m	+12°38'	Leo	9,96	5,9/2,6	E7	642	
3489	11h00,3m	+13°54'	Leo	10,33	3,7/2,1	E6	577	
3486	11h00,4m	+28°58'	LMi	10,33	6,9/5,4	Sc	674	
3521	11h05,8m	-0°02'	Leo	8,86	9,5/5,0	Sb+	640	
3557	11h10,0m	-37°32'	Cen	10,4	4,0/2,7	E3	2837	
3556	11h11,5m	+55°40'	UMa	10,10	8,3/2,5	Sc	772	M108
3585	11h13,3m	-26°45'	Hya	10,0	2,9/1,6	E5	1237	
3607	11h16,9m	+18°03m	Leo	10,01	3,7/3,2	E1	841	
3623	11h18,9m	+13°05'	Leo	9,34	10,0/3,3	Sb	666	M65
3627	11h20,2m	+12°59'	Leo	9,04	8,7/4,4	Sb+	583	M66
3628	11h20,3m	+13°36'	Leo	9,51	14,8/3,6	Sb	728	
3640	11h21,1m	+3°14'	Leo	10,31	4,1/3,4	E1	1199	
3923	11h51,0m	-28°48'	Hya	10,1	2,9/1,9	E3	1546	
3938	11h52,8m	+44°07'	UMa	10,39	5,4/4,9	Sc	838	
3953	11h53,8m	+52°20'	UMa	10,05	6,6/3,6	Sb+	1043	
3992	11h57,6m	+53°23'	UMa	9,81	7,6/4,9	SBb+	1149	M109
4051	12h03,2m	+44°32'	UMa	10,28	5,0/4,0	Sc	726	
4125	12h08,1m	+65°11'	Dra	9,8	5,1/3,2	E5p	1482	
4151	12h10,5m	+39°24'	CVn	10,38	5,9/4,4	P	1002	
4192	12h13,8m	+14°54'	Com	10,13	9,5/3,2	Sb	-220	M98
4214	12h15,6m	+36°20'	CVn	9,74	7,9/6,3	Ir+	309	
4216	12h15,9m	+13°09'	Vir	9,98	8,3/2,2	Sb	55	
4236	12h16,7m	+69°28'	Dra	9,66	18,6/6,9	SB+	160	
4244	12h17,5m	+37°49'	CVn	10,16	16,2/2,5	S-	270	
4254	12h18,8m	+14°25'	Com	9,84	5,4/4,8	Sc	2324	M99

2.Fortsetzung Beilage: Die helleren Galaxien aus dem Sky Catalogue 2000,0

NGC	Rekt.	Dekl.	Const.	V	Dim.	Type	RV	Notes
4258	12h19,0m	+47°18'	CVn	8,31	18,2/7,9	Sb+p	537	M106
4261	12h19,4m	+ 5°49'	Vir	10,33	3,9/3,2	E2	2090	
4274	12h19,8m	+29°37'	Com	10,37	6,9/2,8	Sb+	715	
4278	12h20,1m	+29°17'	Com	10,21	3,6/3,5	E1	651	
4303	12h21,9m	+ 4°28'	Vir	9,67	6,0/5,5	Sc	1483	M61
4321	12h22,9m	+15°49'	Com	9,37	6,9/6,2	Sc	1543	M100
4374	12h25,1m	+12°53'	Vir	9,29	5,0/4,4	E1	854	M84
4382	12h25,4m	+18°11'	Com	9,22	7,1/5,2	Ep	718	M85
4395	12h25,8m	+33°33'	CVn	10,15	12,9/11,0	S+	307	
4406	12h26,2m	+12°57'	Vir	9,18	7,4/5,5	E3	-419	M86
4414	12h26,4m	+31°13'	Com	10,26	3,6/2,2	Sc	718	
4429	12h27,4m	+11°07'	Vir	10,16	5,5/2,6	S0	1029	
4438	12h27,8m	+13°01'	Vir	10,08	9,3/3,9	Sap	182	
4449	12h28,2m	+44°06'	CVn	9,44	5,1/3,7	Ir+	262	
4450	12h28,5m	+17°05'	Com	10,12	4,8/3,5	Sb	1990	
4459	12h29,0m	+13°59'	Com	10,40	3,8/2,8	E2	1039	
4472	12h29,8m	+ 8°00'	Vir	8,37	8,9/7,4	E4	817	M49
4473	12h29,8m	+13°26'	Com	10,22	4,5/2,6	E4	2205	
4490	12h30,6m	+41°38'	CVn	9,76	5,9/3,1	Sc	629	
4486	12h30,8m	+12°24'	Vir	8,62	7,2/6,8	E1	1180	M87
4494	12h31,4m	+25°47'	Com	9,86	4,8/3,8	E1	1289	
4501	12h32,0m	+14°25'	Com	9,52	6,9/3,9	Sb+	1989	M88
4526	12h34,0m	+ 7°42'	Vir	9,64	7,2/2,3	E7	355	
4535	12h34,3m	+ 8°12'	Vir	9,82	6,8/5,0	SBc	1835	
4536	12h34,5m	+ 2°11'	Vir	10,39	7,4/3,5	Sc	1810	
4548	12h35,4m	+14°30'	Com	10,19	5,4/4,4	SBb	403	M91
4546	12h35,5m	- 3°48'	Vir	10,3	3,5/1,7	E6	874	
4552	12h35,7m	+12°33'	Vir	9,81	4,2/4,2	E0	165	M89
4559	12h36,0m	+27°58'	Com	9,85	10,5/4,9	Sc	802	
4565	12h36,3m	+25°59'	Com	9,56	16,2/2,8	Sb	1122	
4569	12h36,8m	+13°10'	Vir	9,48	9,5/4,7	Sb+	-383	M90
4579	12h37,7m	+11°49'	Vir	9,78	5,4/4,4	Sb	1730	M58
4594	12h40,0m	-11°37'	Vir	8,3	8,9/4,1	Sb-	963	M104
4621	12h42,0m	+11°39'	Vir	9,79	5,1/3,4	E3	341	M59
4631	12h42,1m	+32°32'	CVn	9,3	15,1/3,3	Sc	638	
4636	12h42,8m	+ 2°41'	Vir	9,56	6,2/5,0	E1	869	
4649	12h43,7m	+11°33'	Vir	8,83	7,2/6,2	E1	1128	M60
4697	12h48,6m	- 5°48'	Vir	9,3	6,0/3,8	E4	1170	
4699	12h49,0m	- 8°40'	Vir	9,57	3,5/2,7	Sa	1359	
4725	12h50,4m	+25°30'	Com	9,21	11,0/7,9	SBb	1131	
4736	12h50,9m	+41°07'	CVn	8,17	11,0/9,1	Sb-p	329	M94
4753	12h52,4m	- 1°12'	Vir	9,9	5,4/2,9	P	1137	
4762	12h52,9m	+11°14'	Vir	10,22	8,7/1,6	SB0	878	
4826	12h56,7m	+21°41'	Com	8,51	9,3/5,4	Sb-	377	M64
4856	12h59,3m	-15°02'	Vir	10,4	4,6/1,6	SBa	1088	
4976	13h08,6m	-49°30'	Cen	10,2	4,3/2,6	E4p	1133	
5005	13h10,9m	+37°03'	CVn	9,82	5,4/2,7	Sb-	1069	
5033	13h13,4m	+36°36'	CVn	10,06	10,5/5,6	Sb+	961	
5055	13h15,8m	+42°02'	CVn	8,57	12,3/7,6	Sb+	587	M63
5102	13h22,0m	-36°38'	Cen	9,65	9,3/3,5	S0	247	
5128	13h25,5m	-43°01'	Cen	6,98	18,2/14,5	S0p	323	CenA
5194	13h29,9m	+47°12'	CVn	8,38	11,0/7,8	Sc	565	M51
5195	13h30,0m	+47°16'	CVn	9,63	5,4/4,3	P	658	Part of M51
5248	13h37,5m	+ 8°53'	Boo	10,17	6,5/4,9	Sc	1102	
5322	13h49,3m	+60°12'	UMa	9,97	5,5/3,9	E2	2061	
5363	13h56,1m	+ 5°15'	Vir	10,19	4,2/2,7	Ep	1081	
5364	13h56,2m	+ 5°01'	Vir	10,4	7,1/5,0	Sb+p	1349	

3.Fortsetzung Beilage: Die helleren Galaxien aus dem Sky Catalogue 2000,0

NGC	Rekt.	Dekl.	Const.	V	Dim.	Type	RV	Notes
5457	14h03,2m	+54°21'	UMa	7,72	26,9/26,3	Sc	388	M101
	14h13,2m	-65°20'	Cir	9,85	3,2/1,2	Sb	176	
5846	15h06,5m	+ 1°36'	Vir	10,23	3,4/3,2	E0	1714	
5866	15h06,5m	+55°46'	Dra	10,0	5,2/2,3	E6p	874	
5907	15h15,9m	+56°19'	Dra	10,38	12,3/1,8	Sb+	780	
6503	17h49,4m	+70°09'	Dra	10,23	6,2/2,3	Sb	315	
6946	20h34,8m	+60°09'	Cep	8,88	11,0/9,8	Sc	338	
7217	22h07,9m	+31°22'	Peg	10,2	3,7/3,2	Sb-	1227	
7331	22h37,1m	+34°25'	Peg	9,51	10,7/4,0	Sb	1105	
7410	22h55,0m	-39°40'	Gru	10,4	5,5/2,0	SBa	1634	
IC1459	22h57,2m	-36°28'	Gru	10,01		E3	1634	
7507	23h12,1m	-28°32'	Sc1	10,4	2,6/2,6	E0	1681	
7793	23h57,8m	-32°35'	Sc1	9,11	9,1/6,6	Sdm	214	

Literatur: Alan Hirshfeld u. R.W.Sinnott

Sky Catalogue 2000.0, Volume 2

Cambridge University Press u. Sky Publishing Corp. 1985

Alexander Probst

Sulzfeldg.8

2345 Brunn/Geb.

Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

Überblick

In diesem Referat versuche ich, einen Überblick über Erscheinungsbild, Geschichte und Besonderheiten der scheinbar hellsten Galaxien des Himmels zu geben. Die dafür ausgewählten Objekte sind:

M31, die große Andromeda-Galaxis  
M33, die Dreiecks-Galaxis  
M81 und M82, die beiden Bärengalaxien  
LMC und SMC, die beiden Magellanschen Wolken

1. M31, die große Andromeda-Galaxis

Die große Andromeda-Galaxis ist die einzige mit freiem Auge gut sichtbare Galaxis des Nordhimmels. Damit ist M31 das am weitesten entfernte Objekt, das ein Beobachter mit unbewaffnetem Auge erkennen kann. In klaren Nächten kann er als kleine elliptische Wolke  $1^\circ$  westlich des Sterns Ny Andromedae gesehen werden.

Erstmals erwähnt wurde M31 erst 954 n.Chr. durch den persischen Astronomen Al Sufi in seinem "Buch der Fixsterne".

Die erste Beobachtung mit dem Fernrohr gelang 1611 oder 1612 Simon Marius. Er lieferte eine gute Beschreibung, die für einen Beobachter mit einem kleinen Fernrohr noch heute gültig ist: "Er erscheint wie die Flamme einer Kerze betrachtet durch durchsichtiges Horn. Er ist weißlich, unregelmäßig und lichtschwach und wird zum Zentrum hin heller."

Charles Messier sah ihn 1764: "Ähnelt zwei Pyramiden, die Boden an Boden zusammengefügt sind. Die beiden Lichtpunkte an den Spitzen sind etwa  $40'$  voneinander entfernt. Die gemeinsame Basis der Pyramiden ist etwa  $15'$  lang".

Wilhelm Herschel sah den hellsten Teil rötlich und meinte ihn fast auflösen zu können. Er glaubte, daß der Andromedanebel der nächste aller Nebel sei und schätzte die Entfernung auf 2000 Sirius-Weiten.

G.P. Bond beobachtete 1847 mit dem 38cm-Harvard-Refraktor als erster die beiden dunklen Streifen nordwestlich des Kerns, die auf die Spiralstruktur hindeuten.

William Huggins, der Pionier der Spektroskopie, fand 1864 beim Andromedanebel ein kontinuierliches Spektrum im Gegensatz zum Emissionslinien-Spektrum der echten Gasnebel.

Auch mit den größten Fernrohren bleibt M31 bei visueller Beobachtung ein "Nebel" und enttäuscht die Astronomen, die Strukturen erkennen wollen. Die Erkennung der wahren Spiralstruktur ist deshalb so schwierig, weil die Hauptebene von M31 nur  $16^\circ$  gegen unsere Blickrichtung geneigt ist und wir die NW-SO Achse nur stark verkürzt wahrnehmen können.

Erst Isaac Roberts konnte durch die Anwendung der Photographie mit einem 50cm Spiegelteleskop die Spiralstruktur von M31 erkennen. Er machte in den Jahren 1887 bis 1888 viele Aufnahmen; auf der besten ist M31 in der zugehörigen Stern-Assoziation NGC 206 partiell in Sterne auflösbar. Die hellsten Sterne dieser Assoziation sind  $16^m$  hell. Damals wurde aber die Bedeutung dieser Beobachtung nicht

## 1. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

erkannt. Durch wesentlich verbessertes Filmmaterial (TP 2415) gelingt heute die Auflösung auch schon mit 30cm-Amateur-Spiegelteleskopen.

Roberts war erst 1899 von der Spiralstruktur des Andromedanebels überzeugt. Vorher war er der Ansicht, es mit einem neu entstehenden Sonnensystem mit ringförmigem Aussehen zu tun zu haben. Das war bis etwa 1920 die vorherrschende Ansicht über die Natur des Andromedanebels.

Die ersten Hinweise auf die extragalaktische Natur von M31 konnte Heber Curtis 1918 finden: die von ihm beobachteten Novae waren wesentlich schwächer als die in der Milchstraße sichtbaren (die hellsten Novae in M31 werden  $15^m$  hell).

Endgültig bewiesen wurde die extragalaktische Natur von M31 durch Hubble, Ritchey und Duncan, die 1923 mit dem 2,5m Spiegel auf Mount Wilson durch die Beobachtung von Cepheiden feststellen konnten, daß M31 weit außerhalb unserer Milchstraße liegen muß und eine Entfernung von 900.000 Lichtjahren ableiteten.

Im Jahr 1953 wurde durch Beobachtungen an Cepheiden in M31 festgestellt, daß diese Sterne bei gleicher Periode zwei unterschiedliche absolute Helligkeiten haben können, die um etwa  $1,5^m$  differieren, je nachdem, zu welcher "Sternpopulation" sie gehören. Population I sind die hellen blauen Sterne in den Spiralarmlen, Population II die schwächeren roten Sterne im Zentrum einer Galaxis. Das führte zur Verdoppelung der kosmischen Entfernungsskala und zur heute angenommenen Entfernung von M31: 2,1 bis 2,9 Millionen Lichtjahre, je nach verwendeter Methode.

Für den heutigen Sternfreund ist M31 die am besten beobachtbare Galaxis des Nordhimmels. Die scheinbare Helligkeit beträgt  $3,5^m$ , die scheinbare Länge  $2^\circ$ . Mit lichtstarken Feldstechern und auf langbelichteten Aufnahmen kann die Länge der Galaxis über  $5^\circ$  verfolgt werden.

Die von Bond gefundenen dunklen Streifen sind in Fernrohren ab 20cm Durchmesser zu sehen, wobei der dem Kern nähere auffälliger und etwa 15' lang zu sehen ist.

Die Sternassoziation NGC 206 süd-südwestlich des Kerns ist so hell, daß sie ebenfalls schon in 20cm Fernrohren sichtbar wird. Sie zeigt sich als neblige Verdichtung. Diese riesige Wolke von Sternen ist etwa  $2900 \times 1400$  Lichtjahre groß. Radiobeobachtungen bei 21 cm Wellenlänge konnten am Ort von NGC 206 ein "Loch" in der Verteilung des neutralen Wasserstoffs H I feststellen. Das ursprünglich dort vorhandene Gas wurde zu 10 % in Sterne umgewandelt und liegt zu 25 % in ionisierter Form als H II vor.

Im Zentrum der Andromeda-Galaxis ist der Kern als Objekt 13. Größe mit einem Durchmesser von etwas über einer Bogensekunde wahrnehmbar. Der photographische Durchmesser wurde zu 4,5" festgestellt. In kleinen Fernrohren ist die innerste Kernregion mit 1' Durchmesser und  $8^m$  Helligkeit sichtbar und sollte nicht mit dem echten Kern verwechselt werden.

Auch die hellsten Kugelsternhaufen von M31 ( $15^m$  hell) können mit Instrumenten ab 30cm Öffnung beobachtet werden. Mit etwas größeren Fernrohren sind etwa 15 dieser Haufen zu sehen. Insgesamt sind 140 Kugelsternhaufen in M31 bekannt und einige konnten mit dem 5m Spiegel in Sterne aufgelöst werden.

M31 ist die dominierende Galaxis der Lokalen Gruppe, eine riesige Spirale vom Typ Sb, etwa dreimal so leuchtkräftig und massereich wie die Milchstraße. Die Masse von M31 (400 Milliarden Sonnenmassen) dürfte größer sein, als die aller anderen Mitglieder der Lokalen Gruppe zusammengenommen.

## 2. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

Die Andromeda-Galaxis enthält mindestens 300 Milliarden Sterne, die mit einer absoluten Gesamthelligkeit von  $-21,1^m$  (22 Milliarden Sonnen) leuchten. Damit ist M31 eine der leuchtkräftigsten Galaxien, die heute bekannt sind.

Selbst in den größten Fernrohren sind jedoch nur die hellsten Riesensterne photographisch festzuhalten. Diese Sterne mit einer absoluten Helligkeit von  $-7^m$  sind nur mehr  $18,5^m$  hell zu sehen. Unsere Sonne wäre in dieser Entfernung nur mehr  $29,5^m$  hell.

Der absolute Durchmesser von 180.000 Lichtjahren ist 1,8mal größer als der der Milchstraße. Der helle Zentralteil ist mit 12.000 Lichtjahren im Durchmesser selbst eine kleine elliptische Galaxis. In diesem Gebiet zeigt sich, daß die hellsten Sterne einer Galaxis nur einen kleinen Teil der Masse ausmachen, die meiste Masse jedoch in lichtschwachen Zwergsternen konzentriert ist. Im Zentrum ist der Kern um die 50 Lichtjahre groß. In den innersten 5 Lichtjahren ist eine Masse von 10 Millionen Sonnenmassen konzentriert, was zur Vermutung eines "schwarzen Loches" geführt hat. Eine weitere Interpretation des Kerns ist die Annahme eines "Super-Kugelsternhaufens". Der Abstand der Sterne wäre hier nur mehr einige hundert AE und die Sterndichte 50 bis 60 Sterne pro Kubiklichtjahr! Damit wäre auch die Möglichkeit von Zusammenstößen zwischen einzelnen Sternen gegeben.

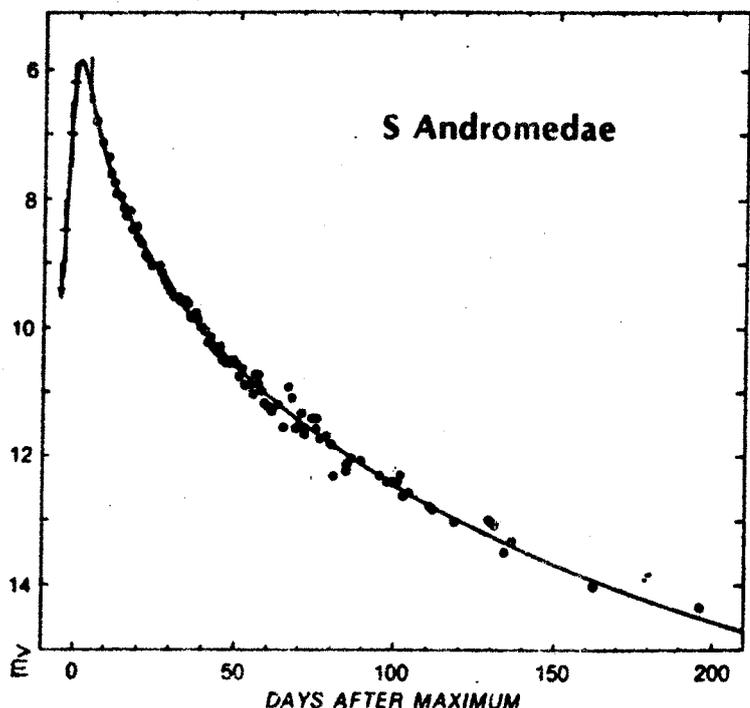
V. M. Slipher konnte 1912 erstmals die Radialgeschwindigkeit von M31 messen. Er fand, daß sich M31 mit 300 km/s der Erde nähert. Ein modernerer Wert ist 266 km/s, wobei jedoch der größte Teil durch die Bewegung der Sonne um das Zentrum der Milchstraße entsteht. Wenn diese Bewegung abgerechnet wird, reduziert sich die Annäherungsgeschwindigkeit auf 35 km/s. Damit zeigt M31 nicht wie die meisten Galaxien eine Rotverschiebung, sondern eine Blauverschiebung im Spektrum.

M31 war die erste Galaxis, die als Radioquelle identifiziert wurde (1950). Die Stärke der Radiostrahlung ist normal für Galaxien: pro Quadratcentimeter und Sekunde erreichen uns 7 Radiophotonen.

H II (11 cm Wellenlänge) ist im Kern und in einem Ring mit 35.000 Lichtjahren Radius sichtbar. H I (21 cm Wellenlänge) ist nur mehr in diesem Ring zu erkennen.

Im Kern wurde der neutrale Wasserstoff bereits verbraucht und heute entstehen dort keine Sterne mehr.

Im Jahre 1885 konnte nahe dem Zentrum von M31 eine Supernova beobachtet werden, die  $5,9^m$  hell wurde. Am 16. Aug. konnte die Supernova noch nicht gesehen werden. Erstmals beobachtet wurde sie am 17. Aug. von L. Gully in Frankreich, der aber seine Entdeckung einem Fehler in seinem neuen Fernrohr zuordnete! Die offizielle Entdeckung machte E. Hartwig in Dorpat am 20. Aug. mit einem 23cm-Refraktor.



### 3. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

Nach dem Maximum am 21. Aug. mit 5,9<sup>m</sup> wurde die Supernova schnell schwächer, nach 5 Wochen war sie noch 10<sup>m</sup> hell. Zuletzt gesehen wurde sie im Februar 1890 mit 16<sup>m</sup>. Diese Supernova erhielt als zweiter entdeckter Veränderlicher in der Andromeda die Bezeichnung S And. Da die Spektroskopie und Photographie zu dieser Zeit noch in den Anfängen waren, sind hauptsächlich visuelle Beobachtungen bekannt geworden. Schwierig war bei den Beobachtungen sicherlich, daß S And nur 16" westlich des Kerns von M31 erschien.

Die Supernova war vermutlich vom Typ I (abgeleitet aus den visuellen spektroskopischen Beobachtungen von de Vaucouleurs 1985) und erreichte eine absolute Helligkeit von -19,3<sup>m</sup>. Vor einigen Jahren wurde mit dem VLA Radio-Teleskop nach einem Überrest der Supernova gesucht, jedoch ohne Erfolg.

M31 hat insgesamt sechs bekannte Begleiter, von denen vier mit Amateurfernrohren gesehen werden können: M32, M110 (=NGC 205), NGC 147 und NGC 185 (die letzten beiden sind etwa 7° von M31 entfernt und liegen bereits in der Kassiopeia; beide sind mit einem 15cm Fernrohr sichtbar).

### 2. M33, die Dreiecks-Galaxis

M33 ist eine der schönsten Galaxien, aber durch die niedrige Oberflächenhelligkeit auch die Quelle der unterschiedlichsten Beobachtungsberichte durch Sternfreunde. Manche Beobachter sehen ihn im Feldstecher oder sogar mit dem freien Auge, andere wieder können keine Spur der Galaxis feststellen und resümieren, daß M33 auf dem Atlas falsch eingezeichnet sein muß.

Unter sehr guten Beobachtungsbedingungen ist M33 in einem Feldstecher ein sehr auffälliges schönes Objekt und wird von erfahrenen Beobachtern in sehr guten Nächten auch mit dem freiem Auge gesehen. Unter schlechteren Sichtbedingungen und in einem Fernrohr bei höherer Vergrößerung ist er jedoch sehr schwach und im Extremfall überhaupt nicht zu sehen.

Der Schlüssel zum Erfolg liegt hier in der Wahl einer möglichst niedrigen Vergrößerung und der besten verfügbaren Sichtbedingungen. Die scheinbare Gesamthelligkeit von M33 beträgt zwar 5,7<sup>m</sup>, verteilt sich allerdings auf eine Fläche von 60 x 35'.

M33 ist eine Entdeckung von Messier, der ihn am 25. August 1764 fand und bemerkte: "Der Nebel ist ein weißliches Fleckchen von fast gleichmäßiger Helligkeit. Allerdings ist er über zwei Drittel seines Durchmessers etwas heller. Er enthält keine Sterne. Mit Mühe war er in einem Teleskop von 1 Fuß Brennweite zu sehen". Messier schätzte den Durchmesser auf 15'.

Wilhelm Herschel sah ihn mit fleckiger Struktur. John Herschel beschrieb die Schwierigkeit bei der Beobachtung adäquat: "Man kann ihn nur mit schwachen Vergrößerungen finden, er zeigt kaum Kontrast bei 144facher Vergrößerung".

Lord Rosse konnte mit seinem 1,8m Metallspiegel als erster echte Details wahrnehmen: "Übersät mit Verdichtungen, spiralförmig, 2 S-förmige Streifen kreuzen sich im Zentrum".

T. W. Webb beschrieb ihn als groß, schwach, schlecht definiert und nur durch seinen großen Durchmesser sichtbar (9 cm Refraktor).

#### 4. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

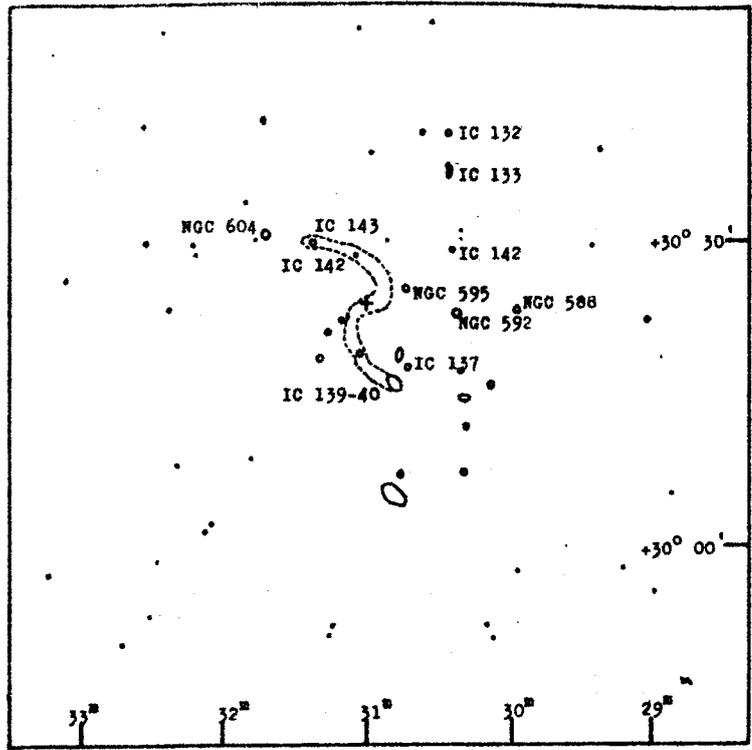
Mit größeren Amateurfernrohren lassen sich einige Details in M33 wahrnehmen: Ab etwa 20cm Öffnung die Spiralstruktur (hier nach M51 am leichtesten von allen Galaxien zu beobachten!) und die riesige H II-Region NGC 604 (10<sup>m</sup>, 2x1'). NGC 604 liegt etwa 10' nordöstlich des Kerns von M33 und ist auf Farbaufnahmen ein auffälliges, rotgefärbtes Wölkchen. Dieses Objekt ist etwa 1000mal so groß wie der von der Natur her vergleichbare Orionnebel! Nach dem Tarantelnebel in der Großen Magellanschen Wolke ist NGC 604 der am leichtesten zu beobachtende extragalaktische Emissionsnebel.

Der Kern von M33 ist visuell etwa 12<sup>m</sup> hell und nur sternförmig zu sehen. Mit größeren Fernrohren ab etwa 30cm Öffnung sind einige weitere H II-Regionen und mehrere Sternassoziationen zu sehen.

M33 ist nach M31 und der Milchstraße die drittgrößte Galaxis der Lokalen Gruppe. Er ist etwas weiter entfernt als M31, 2,9 Millionen Lichtjahre. Mit einer absoluten Helligkeit von -18,9<sup>m</sup> ist er nur ein Zehntel so leuchtkräftig wie M31. Der absolute Durchmesser ergibt sich zu 52.000 Lichtjahren, die Gesamtmasse beträgt 8 Milliarden Sonnenmassen (1/10 von M31). Auch M33 zeigt eine leichte Blauverschiebung im Spektrum, er nähert sich der Sonne mit 117 km/s. Er ist eine schöne Spirale vom Typ Sc, die wir fast ganz genau in Draufsicht sehen können. M33 ist die am leichtesten auflösbare Galaxis. Auf Aufnahmen mit größeren Fernrohren zeigt sich prächtig die komplexe Spiralstruktur mit vielen H II-Regionen und Sternassoziationen. Auf Aufnahmen mit dem 6m-Spiegel im H-Alpha-Licht erkennt man die äußerst komplexe Verteilung des ionisierten Wasserstoffs in Form von Blasen und Schleifen entlang der Spiralarme.

Die Radio-Helligkeit ist nahezu gleich der von M31, da M33 mehr H II Regionen und mehr massive Sterne enthält. Als intensivste Quelle wurde NGC 604 identifiziert. In der H II Region IC133 wurde 1976 im Radio-Mikrowellenbereich erstmals in einer anderen Galaxis Wasserdampf entdeckt. Dieses Objekt ähnelt den Wasserdampf-Masern in der Milchstraße.

Die Frage, ob Spiralgalaxien ihre Arme "nachschieben" oder nicht, scheint heute durch Beobachtungen des Dopplereffekts an M33 entschieden zu sein: die Arme folgen bei der Rotation nach.



Spiralarme und Emissionsnebel von M33

Koordinaten für 1950.0

Aus Webb Society, Galaxies

1<sup>h</sup>

## 5. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

### 3. M81 und M82, die Bärengalaxien

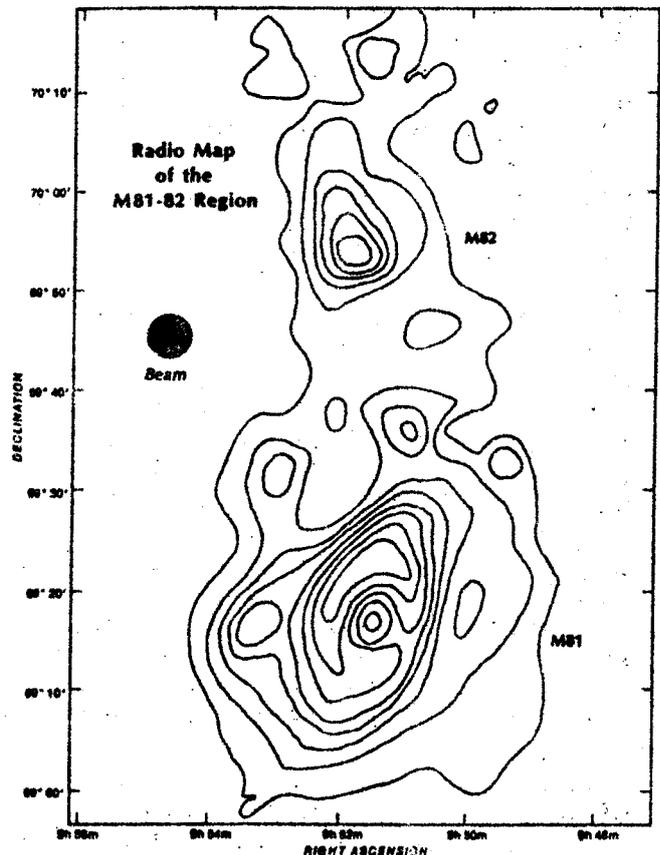
M81 und M82 sind nach M31 die in einem kleinen Fernrohr unter weniger als optimalen Sichtbedingungen am besten sichtbaren Galaxien des Nordhimmels. M81 zeigt bereits ein 10x50 Feldstecher sehr deutlich, mit etwas Mühe kann auch M82 wahrgenommen werden. In einem kleinen Fernrohr unter guten Bedingungen bieten die beiden einen unvergeßlichen Anblick: mit 38' Abstand sind beide in einem Gesichtsfeld zu sehen, M81 als elliptische Wolke mit hellerer Kernregion, M82 als länglicher Strich.

M81 und M82 sind Entdeckungen von Johann Bode in Berlin (31. Dezember 1774). Er beschrieb M81 als nebligen Fleck, mehr oder weniger rund mit einem dichten Kern in der Mitte. M82 sah er als sehr bleichen, in die Länge gezogenen Nebel. Messier fügte die beiden 1781 seinem Katalog hinzu. Er sah M81 als "ein bißchen oval, das Zentrum hell, er kann in gewöhnlichen Fernrohren gut gesehen werden."

Die beiden Galaxien sind die hellsten einer Gruppe von etwa 30 Galaxien. Nach der Sculptor-Gruppe ist die M81-Gruppe die nächste zur Milchstraße.

Die Entfernung der M81-Gruppe wird von verschiedenen Autoren zwischen 6,5 und 10 Millionen Lichtjahren angegeben, als Mittel können etwa 8 Millionen Lichtjahre gelten.

Eine schwache Hülle aus H I (neutralem Wasserstoff) umschließt M81, M82 und die zugehörige Galaxis NGC 3077.



#### 3.1. M81

M81 zeigt auf Aufnahmen sehr gleichmäßige und schöne Spiralarme und ist eine der prächtigsten Spiralgalaxien. Den ersten Hinweis auf die Spiralstruktur fand Isaac Roberts 1889. Heute wird er als Typ Sb klassifiziert. Die Spiralarme umschließen eine helle, ovale Zentralmasse und sind durch schmale Staubstreifen gut begrenzt. Auf kurz belichteten Aufnahmen können sie bis zu 35" Abstand vom Kern verfolgt werden.

Visuell ist die Galaxis auch in 15cm Fernrohren ein dankbares Objekt. M81 erscheint mit 16x10' Durchmesser (lange Achse in PW 156°). Er zeigt bei höherer Vergrößerung einen sternförmigen Kern.

## 6. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

Bis heute konnte die Zentralregion von M81 auch mit den größten Fernrohren nicht in Sterne aufgelöst werden, die hellsten Sterne sollten in dieser Entfernung etwa  $24,5^m$  hell sein. In den Spiralarmen sind auf Aufnahmen eine Vielzahl von Sternassoziationen und H II-Regionen festgestellt worden.

M81 ähnelt in Größe (60.000 Lichtjahre), Leuchtkraft (20 Milliarden Sonnen) und Masse (250 Milliarden Sonnenmassen) unserer Milchstraße. M81 ist eine der nächsten Galaxien und daher ist die Rotverschiebung sehr klein; er entfernt sich mit etwa 95 km/s.

M81 war der erste Spiralnebel, bei dem eine Rotation festgestellt wurde. Max Wolf stellte 1914 fest, daß er an den äußeren Rändern eine Rotationsgeschwindigkeit von 300 km/s hat.

### 3.2. M82

In kleinen Fernrohren ist M82 durch die hohe Oberflächenhelligkeit gut zu sehen. Der visuelle Durchmesser beträgt  $7 \times 2'$ , er ist länglich in PW  $65^\circ$ . Lord Rosse fand, daß die Galaxis von dunklen Bändern überzogen ist. Schon mit 10cm Öffnung ist die Galaxis nicht gleichförmig hell, sondern strukturiert zu sehen. Mit 15cm Öffnung ist das dunkle Band in der Mitte von M82 gut sichtbar.

In einem kleinen Fernrohr sieht M82 wie eine Spiralgalaxis von der Kante gesehen aus. In großen Fernrohren läßt sich jedoch nur eine chaotische Struktur ohne Spiralarme feststellen. Lynds und Sandage fanden 1962 ausgedehnte Wasserstoff-Filamente, die sich vom Kern in Richtung der kleinen Achse mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/s radial nach außen bewegen. Einige Astronomen schlossen daraus auf eine Explosion im Kerngebiet vor 1,5 Millionen Jahren. Neben intensiver Radiostrahlung wurde auch Polarisation des Lichts im Kerngebiet gemessen, alles Anzeichen starker Aktivität.

Derzeit wird zur Erklärung der Beobachtungen die Sternentstehungshypothese bevorzugt. M82 ist eine sehr "staubige" Galaxis, die Polarisation des Lichts entsteht durch Lichtstreuung am Staub. Durch Infrarot-Beobachtungen, die durch den Staub hindurchsehen können wurden sehr viele junge O- und B-Sterne im Kern der Galaxis festgestellt. In einem Gebiet von 1000 Lichtjahren sind dort viele Sternhaufen und ionisierte Gaswolken konzentriert. Diese Region ist etwa 100.000 mal so massereich wie der Orion-Nebel und die Geburtsstätte vieler Sterne. Durch Polarisationsmessungen wurde der Staub auch Tausende von Lichtjahren außerhalb von M82 festgestellt. Die von Lynds und Sandage gemessene hohe Geschwindigkeit läßt sich auch dadurch erklären, daß eine intergalaktische Gas- und Staubwolke die Galaxis mit einer Geschwindigkeit von 100 km/s durchzieht. Diese Wolke löste vor 100 Millionen Jahren eine richtige "Sternentstehungsepidemie" aus. Abgesehen davon ist M82 eine normale Spiralgalaxis. Es gibt ein Dutzend ähnlicher Galaxien, die aber alle weiter entfernt sind; sie werden als Seyfert-Galaxien der Klasse 2 bezeichnet. Die intergalaktische Wolke, die für das Aussehen von M82 verantwortlich ist, entstand durch die Wechselwirkung zwischen M81 und M82 und umkreist die beiden Galaxien noch immer. Die in der Nähe befindliche Galaxis NGC3077 scheint ein ähnliches Objekt wie M82 zu sein.

M82 ist eine kleinere Galaxis mit 15.000 Lichtjahren Durchmesser. Wir sehen sie nahezu von der Kante unter einer Neigung von  $10^\circ$ .

## 7. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

### 4. LMC und SMC, die beiden Magellanschen Wolken

Diese beiden Galaxien, die nur südlich des Äquators gut zu sehen sind, sind die scheinbar hellsten des gesamten Himmels. Al Sufi beschreibt sie als "weißen Ochsen tief unter dem Canopus". Um 1520 wurden sie von portugiesischen Seefahrern erwähnt.

Sie sind für das freie Auge wesentlich eindrucksvollere Objekte als die Andromeda-Galaxis und unsere nächsten Nachbarn im Welt-  
raum.

Beide Wolken gehören zur Lokalen Gruppe u. sind nach den drei Spiralgalaxien M31, Milchstraße und M33 die größten Mitglieder.

Sie sind die der Milchstraße nächsten Galaxien und deshalb am besten beobachtbar. Für die Astronomen sind sie von besonderem Wert: Robert Burnham weist darauf hin, daß ein 50cm Teleskop an den Magellanschen Wolken dasselbe leistet wie der 5m Spiegel an der Andromeda-Galaxis, da sie nur 1/10 so weit entfernt sind.

Beide Wolken sind etwa  $20^\circ$ , das entspricht 80.000 Lichtjahren, voneinander entfernt und heute ist kein Zweifel mehr daran, daß sie physisch zusammengehören. Die Verbindung zwischen beiden Wolken wurde durch Radiobeobachtungen als eine Brücke aus H I (neutralem Wasserstoffgas) erkannt. Dieser "Magellanische Strom" enthält auch vereinzelte Sterne und Sternhaufen. Möglicherweise erstreckt sich diese Verbindung bis zur Milchstraße. Es wird vermutet, daß dieses Gas aus einem nahen Vorübergang der SMC an der Milchstraße vor etwa 5 Milliarden Jahren stammt.

#### 4.1. LMC - Große Magellansche Wolke

Die LMC erscheint mit freiem Auge als große Wolke ähnlich einem Teil des Milchstraßenbandes mit einem Durchmesser von  $6^\circ$ . Auf den besten Aufnahmen ist sie  $11 \times 9^\circ$  groß. Die aufsummierte scheinbare Helligkeit von  $0,1^m$  zeigt die gute Sichtbarkeit: die LMC ist selbst bei Mondschein mit freiem Auge zu sehen.

Früher wurde sie als Irreguläre Galaxis klassifiziert, bis 1955 de Vaucouleurs einen balkenförmigen Kern und mehrere Spiralarme fand. Die Wolke konnte auf den Aufnahmen bis zu  $20^\circ$  groß festgestellt werden. Heute wird die LMC von verschiedenen Autoren als Typ SBm oder IBm klassifiziert (m bedeutet "Typ Magellansche Wolke"), als sich selbst sozusagen!

Die Entfernung der Großen Wolke ergab sich zu 150-180.000 Lichtjahren. Die absolute Helligkeit ist  $-18,5^m$  (2 Milliarden Sonnenleuchtkräfte), kaum schwächer als M33. Der absolute Durchmesser von 50.000 Lichtjahren zeigt, daß die LMC ein relativ großes System ist, etwa halb so groß wie die Milchstraße. Der Balken der LMC ist 20.000 Lichtjahre lang. Die Masse der LMC beträgt etwa 25 Milliarden Sonnenmassen, etwa 1/10 die der Milchstraße. Wir sehen die Große Wolke unter  $40$  bis  $50^\circ$  Neigung.

Die LMC entfernt sich mit 270 km/s von der Sonne. Diese Geschwindigkeit entsteht fast ausschließlich durch die Bewegung der Sonne um das Milchstrassenzentrum. Die LMC verändert ihre Position zur Milchstraße kaum und befindet sich vermutlich in einer außerordentlich langen Umlaufbahn.

Durch die große Nähe der Wolke können auch in kleinen Fernrohren viele Veränderliche, Offene und Kugelförmige Sternhaufen, Emissionsnebel und Planetarische Nebel gesehen werden.

## 8. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

Das eindrucksvollste Objekt in der LMC ist sicherlich NGC 2070, der Tarantelnebel oder 30 Doradus, eine riesige HII-Region mit 800 Lichtjahren Durchmesser und nahezu 500.000 Sonnenmassen. Dieses einmalige Objekt ist aus der Entfernung der LMC mit freiem Auge sichtbar! Falls der Tarantelnebel so nahe wie der Orionnebel wäre, würde er etwa  $30^\circ$  des Himmels bedecken und  $-6^m$  hell sein. Im Zentrum des Tarantelnebels befindet sich ein Haufen sehr heißer Wolf-Rayet- und O-Sterne, die die Energie für das Leuchten des Nebels liefern. Auf lang belichteten Aufnahmen erhöht sich der Durchmesser auf 6.000 Lichtjahre.

Ein weiteres berühmtes Objekt ist S Doradus, ein merkwürdiger Veränderlicher Stern, vermutlich einer der absolut hellsten Sterne ( $-10^m$ ). Aus der Entfernung der LMC leuchtet er mit  $9^m$  und ist im kleinen Fernrohr der hellste dort sichtbare Stern. S Dor steht im Zentrum des Sternhaufens NGC 1910.

Acht Sterne der LMC sind scheinbar heller als  $10^m$  und können daher in kleinen Fernrohren gesehen werden. Zum Vergleich: Unsere Sonne könnten wir in dieser Entfernung gerade noch als Stern  $23,5^m$  feststellen. Insgesamt enthält die LMC 30 Milliarden Sterne. Etwa 700 Offene Sternhaufen konnten in der LMC beobachtet werden. Der hellste davon ist "Constellation I", eine riesige Sternassoziation mit 500 Lichtjahren Durchmesser, die mit dem Gasnebel NGC 1936 verbunden ist.

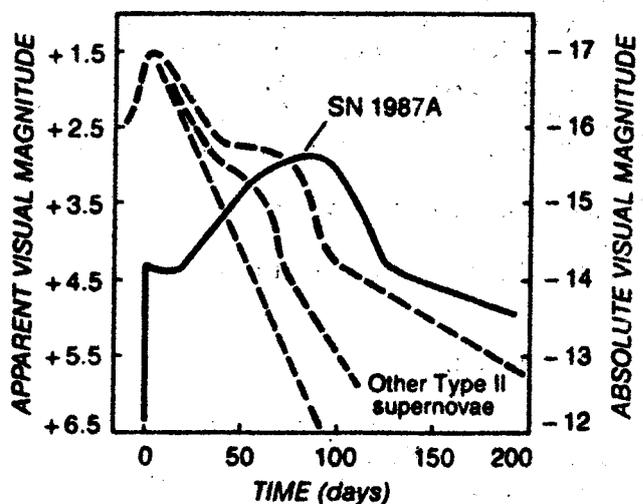
In der LMC sind 60 Kugelsternhaufen bekannt, der hellste davon ist NGC 1866. Die Kugelsternhaufen der LMC sind besonders interessant, da sie nicht nur alte Objekte wie in der Milchstraße sind, sondern ganz verschiedene Alter zwischen 10 Millionen und 12 Milliarden Jahren aufweisen. Die Altersverteilung der Sternhaufen läßt die Annahme zu, daß vor 3 bis 5 Milliarden Jahren eine "Sternentstehungswelle" in der LMC stattfand.

Am 24. Februar 1987 wurde ein bis dahin unauffälliger B3-Stern 12.Größe mit 15 Sonnenmassen (Sanduleak -69°202) zur "Supernova des Jahrhunderts".

Supernova 1987a wurde mit  $5,0^m$  entdeckt und erreichte ihr Maximum Ende Mai 1987 mit  $2,9^m$ . Bis Anfang 1988 nahm die Helligkeit auf  $6^m$  ab. Trotz der untypischen Lichtkurve, die durch die relativ geringe Größe des Vorläufersterns bedingt war, gehört die Supernova zum Typ II. Sie erreichte eine absolute Maximalhelligkeit von  $-16^m$ .

Als Überrest der Explosion wird ein Neutronenstern mit 1,3 Sonnenmassen angenommen. 1987a war die erste mit freiem Auge sichtbare Supernova seit der Erfindung des Fernrohrs.

Sie ist für die Astronomen von größter Bedeutung und wird in allen Wellenlängen beobachtet. Sogar die durch den Ausbruch entstandenen Neutrinos konnten festgestellt werden.



## 9. Fortsetzung Referat: Die hellsten Galaxien des Himmels

### 4.2. SMC - Kleine Magellansche Wolke

Die Kleine Magellansche Wolke ist ebenfalls mit freiem Auge als Nebelfleck von etwa  $3^\circ$  Durchmesser zu sehen. Auf den besten Aufnahmen ist sie  $4,5 \times 3^\circ$  groß erkennbar. Die aufsummierte scheinbare Gesamthelligkeit beträgt  $2,3^m$ .

Die SMC ist eine kleinere Galaxis in 170-200.000 Lichtjahren Entfernung. Damit ist sie etwas weiter entfernt als die LMC. Auch hier ist die Klassifikation nicht eindeutig, der Typ wird als SBmp oder IBm angegeben.

Ihre absolute Helligkeit ist  $-16,8^m$ , viermal schwächer als die LMC, und ihr absoluter Durchmesser beträgt 30.000 Lichtjahre. Der helle Zentralteil ist 10.000 Lichtjahre groß.

Die SMC ist nicht so reich an eindrucksvollen Objekten wie die LMC. Sie ist aber im kleinen Fernrohr auflösbar und entspricht im Anblick einer Sternwolke der Milchstraße.

Sie beinhaltet mehrere helle gut beobachtbare Sternhaufen, die schon mit einem 8cm Fernrohr auflösbar sind (vor allem bemerkenswert sind NGC 346 und 371; diese Sternhaufen sind auch im Feldstecher erkennbar).

Neuere Beobachtungen haben gezeigt, daß die SMC ein sehr langgestrecktes zigarrenförmiges Objekt ist, wobei die lange Achse fast genau in unserer Blickrichtung liegt. Radiobeobachtungen im Licht des neutralen Wasserstoffs bieten auch Anzeichen, daß die SMC eine geteilte Galaxis ist, wobei ein Teil direkt hinter dem anderen liegt. Die Erklärung dafür dürfte in der Wechselwirkung mit unserer Milchstraße oder der LMC liegen, an denen die SMC sehr nahe vorübergezogen sein soll.

An der Kleine Wolke wurde erstmals die Eignung der Cepheiden zur extragalaktischen Entfernungsbestimmung festgestellt. Henrietta Leavitt fand 1912 aus der Beobachtung von 25 Cepheiden der Wolke, daß die helleren Cepheiden stets auch die längeren Perioden hatten. Da alle Cepheiden der SMC etwa gleich weit von der Erde entfernt sind, konnte aus dieser Beobachtung die Perioden-Leuchtkraft Beziehung in relativen Werten abgeleitet werden. Nachdem dann auch in M31 Cepheiden entdeckt wurden, konnte die extragalaktische Natur der "Spiralnebel" nachgewiesen werden.

Wenige Grade neben der SMC ist der helle Kugelsternhaufen NGC 104 (47 Tuc) zu sehen, der jedoch wesentlich näher liegt und zu unserer Milchstraße gehört.

#### Literatur:

Robert Burnham: Burnhams Celestial Handbook  
Laustsen, Madsen, West: Exploring the Southern Sky  
Webb Society Deep Sky Observers Handbook: Vol. 4: Galaxies  
Sky Catalogue 2000.0 Band 2  
Sky and Telescope 1979-1988

Wolfgang Vollmann, Baumgasse 17-19/12, 1030 Wien

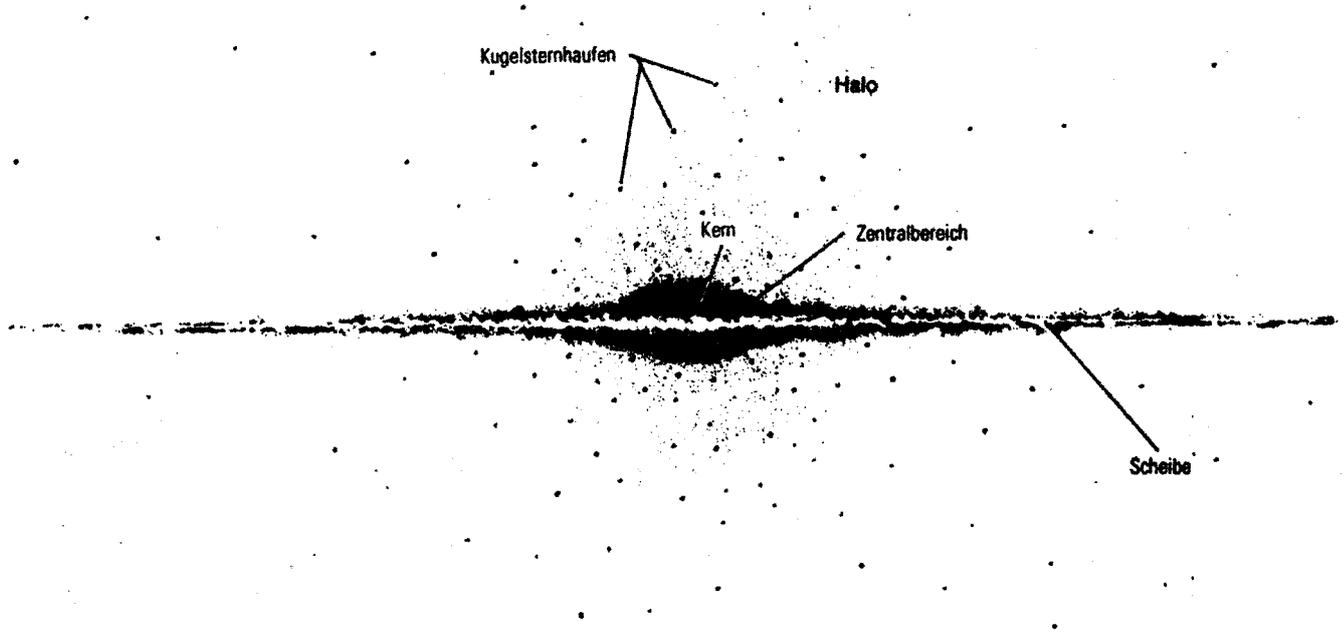
Referat: Übersicht Galaxien

Im Folgenden soll besprochen werden:

1. Aufbau
2. Klassifikation
3. Normale Galaxien
4. Galaxien mit aktivem Kern
5. Verteilung der Galaxien, Galaxienhaufen
6. Wechselwirkungen zwischen Galaxien

1. Aufbau

Wir können Galaxien in vielfältigen Erscheinungsformen beobachten. Dennoch ist es möglich, ihren Aufbau aus zwei Hauptbestandteilen zu beschreiben. Diese sind der *Zentralbereich* und die *Scheibe*. Fast alle normalen Galaxien bestehen hauptsächlich aus unterschiedlichen Anteilen dieser beiden Komponenten. Neben diesen beiden Hauptbestandteilen finden wir noch den *Kern* und den *Halo*.



(Lit.1)

1.1. Zentralbereich

Der Zentralbereich (central bulge) besteht hauptsächlich aus roten Sternen der Spektralklassen K und M. Die Bahnen dieser Sterne sind zum größten Teil statistisch verteilt; die Rotation spielt eine untergeordnete Rolle. Die Form des Zentralbereichs ist einem Ellipsoid ähnlich. Interstellarer Staub tritt nicht auf. Der mittlere Intensitätsverlauf  $I_z$  in Abhängigkeit vom Abstand vom Mittelpunkt des Galaxienbildes kann beschrieben werden durch

$$\log I_z = -3.33(r^{1/4}-1) \quad (\text{Lit.3})$$

wobei  $r$  der auf den effektiven Radius der Galaxie bezogene Abstand ist.

Der effektive Radius ist jener, den ein kreisförmiges, gleichmäßig helles Galaxienbild hätte, das die halbe Gesamthelligkeit der Galaxie besitzt.

# 1. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

## 1.2. Scheibe

Die Scheibe (disk) besteht aus Sternen von etwa solarer Zusammensetzung. Die Bahnen der Sterne sind von der Umlaufbewegung um das Zentrum der Galaxie dominiert. Hier tritt interstellarer Staub auf. Der mittlere Intensitätsverlauf  $I_s$  in der Scheibe kann beschrieben werden durch

$$\log I_s = -0.729(r-1) \quad (\text{Lit. 3})$$

wobei  $r$  der auf den effektiven Radius der Galaxie bezogene Abstand ist. Die Scheibe ist auch der Ort, wo bei den Spiralgalaxien die Spiralarme mit ihren H II-Regionen und extrem jungen, hellen blauen Sternen liegen.

## 1.3. Andere Komponenten von Galaxien

Neben den beiden Hauptbestandteilen Zentralbereich und Scheibe finden wir noch den Kern und den Halo.

### 1.3.1. Kern

Bei den massereicheren Galaxien befindet sich ein Kern in der Mitte der Galaxie. Dieser ist meist klein (einige pc) und oft der Ort von Aktivität wie das Ausschleudern von Gas senkrecht von der Galaxienebene weg. Von einem aktiven Kern spricht man wenn athermische Strahlung beobachtet wird. Bei manchen Kernen beobachtet man Infrarotemissionen, was auf das Vorhandensein von Staub schließen läßt. Manchmal beobachtet man Emissionslinien, was auf dünnes Gas hindeutet; oft ist dann auch Strahlung im Radiowellengebiet zu beobachten.

### 1.3.2. Halo

Die Galaxien werden von einem Halo aus alten, metallarmen Sternen umgeben. In diesem Bereich findet man auch die Kugelsternhaufen mit ihren RR-Lyrae Veränderlichen. In unserer Milchstraße kennen wir Sterne aus dieser Halopopulation, die auf ihren Bahnen in die Nähe der Sonne gelangen. Sie geben sich durch ihre rasche Eigenbewegung zu erkennen, weswegen wir sie Schnellläufer nennen. Berechnet man ihre Bahnen, dann erkennt man, daß sie nicht an der Rotation der Milchstraße teilnehmen sondern ganz zufällig verteilte Bahnen haben, auf denen sie die Ebene der Milchstraße queren.

## 2. Klassifikation

Die Klassifikation kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Wir wollen hier die Klassifikation nach der *Morphologie* und nach der *Leuchtkraft* besprechen.

### 2.1. Morphologie

Um Ordnung in die Vielfalt von Erscheinungsformen zu bringen und Gemeinsamkeiten zu erkennen, wurden von verschiedenen Forschern Schemata für die Klassifikation der Galaxienformen entwickelt.

#### 2.1.1. Das Hubble-Schema

1926 hat Edwin Hubble ein Schema vorgeschlagen, das so aussieht

	Normale Spiralen			
	Sa	Sb	Sc	
Elliptische				Irreguläre
E0 ..... E7				IrrI   IrrII
	Balkenspiralen			
	SBa	SBb	SBc	

Die elliptischen Galaxien zeigen keine Anzeichen von Spiralstruktur und erscheinen rotationssymmetrisch. Die Unterteilung in Untergruppen erfolgt nach ihrer scheinbaren Abplattung. Wenn  $a$  die große und  $b$  die kleine Halbachse des Galaxienbildes ist, dann ist die Unterklasse  $n$

$$n = 10(a-b)/a$$

## 2. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

Bei den *normalen Spiralgalaxien* setzen die Spiralarme am Zentralgebiet an, bei den *Balkenspiralen* am Ende eines Balkens, der aus dem Zentralgebiet reicht. Beide werden nach fortschreitend mehr aufgelösten Armen in die Untergruppen a bis c eingeteilt. Man bezeichnet die Untergruppe a als früh, c als spät. Dies hat nichts mit einer zeitlichen Ordnung zu tun.

Die *irregulären Galaxien* lassen keine Symmetrie erkennen. Irr I Objekte sind die Magellanschen Irregulären, benannt nach den beiden Prototypen, der Großen Magellanschen Wolke (LMC) und der Kleinen Magellanschen Wolke (SMC). Sie lassen sich in Einzelsterne auflösen. Im Gegensatz dazu lassen sich Irr II Galaxien nicht in Einzelsterne auflösen.

Im Laufe der Zeit wurde klar, daß das Schema nicht ganz ausreichend ist. 1936 erweiterte es Hubble daher durch Einfügen einer weiteren Klasse zwischen E7 und Sa/SBa. Dieser weitere Galaxientyp heißt S0 bzw. S00 und ist gekennzeichnet durch das Vorhandensein einer Scheibe (bei S0) bzw. eines Balkens (bei S00), ohne daß Spiralarme erkennbar sind.

	Linsenförmige	Sa....
	S0	
.....E7		
	S00	
		SBa...

### Die Erweiterung des Hubble-Schemas (1936)

#### 2.1.1.1. Erweiterungen des Hubble-Schemas

Basierend auf Hubbles Schema entwickelte Allan Sandage in seinem 1961 erschienenen Werk *The Hubble Atlas of Galaxies* eine Erweiterung desselben, das feinere Unterteilungen zwischen den einzelnen Klassen vorsieht.

##### 2.1.1.1.1. Klassifikation nach G. de Vaucouleurs

Gerard de Vaucouleurs entwickelte ebenfalls ein Schema, mit dem Galaxien nach Bedarf mehr oder weniger detailliert beschrieben werden können. Wegen ihrer Wichtigkeit soll diese *revidierte Hubble-Klassifikation* hier beschrieben werden. Die Stufe ist eine numerische Repräsentation des Typs, der mit dem Galaxientyp im Hubble-Schema korrespondiert.

Stufe	Typ	
-6	E <sup>-</sup>	kompakte elliptische Galaxien
-5	E	normale und Zwergelliptische
-4	E <sup>+</sup>	elliptische Riesengalaxien (cD nach Morgan)
-3	L <sup>-</sup>	
-2	L	
-1	L <sup>+</sup>	
0	S0/a	sowie irreguläre nicht-magellansche Typen I0
1	Sa	
2	Sab	
3	Sb	
4	Sbc	
5	Sc	
6	Scd	
7	Sd	
8	Sdm	
9	Sm	
10	Im	Magellansche und Zwerg-Magellansche Irreguläre
11	Im <sup>+</sup>	kompakte Magellansche Irreguläre

### 3. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

In obigem Schema stehen die Großbuchstaben für die Galaxienklasse:

- E .. elliptisch
- L .. linsenförmig (lenticulär), elliptisch + Scheibe
- S .. spiralförmig
- I .. irregulär

Die Kleinbuchstaben bezeichnen die Entwicklungsstufe:

- a .. "früh", d.h. wenig entwickelt (sehr enge Arme, wenig Struktur)
  - bis
  - m .. "spät", d.h. stark entwickelt (sehr offene Arme, viel Struktur);
- zwei Kleinbuchstaben geben Zwischenstufen an.

Normale Galaxien werden durch A, Balkengalaxien durch B und Mischformen durch AB, der Klassenbezeichnung nachgestellt, beschrieben (z.B. SAB, SABab).

Ein innerer Ring wird durch (r), s-förmige Struktur durch (s) und Mischformen durch (rs), der Balkenklassifikation nachgestellt, beschrieben (z.B. SAB(rs)0/a).

Weitere Besonderheiten werden durch Voranstellen folgender Zeichen beschrieben:

- P ..... Besonderheit, allgemein (peculiar)
- : ..... unsicher
- ? ..... fraglich
- sp .... spindelförmig
- (R) ... äußerer Ring
- (R') .. äußerer Pseudoring

#### 2.1.2. Vorontsov-Velyaminov

Zur Beschreibung struktureller Details, die ja die Individualität der Galaxien ausmachen, eignet sich das System von Vorontsov-Velyaminov, wobei allerdings natürlich der Überblick über die gemeinsamen Strukturen verschiedener Galaxien stärker verloren geht.

#### 2.1.3. Die Genauigkeit der Zuordnung

Die morphologische Klassifikation von Galaxien ist subjektiv. Der mittlere Fehler, der von erfahrenen Astronomen in der Klassifizierung gemacht wird, ist etwa 5% in Vaucouleurs Stufenskala von -6 bis 11 (aus Vergleich mehrerer unabhängig voneinander durchgeführter Klassifizierungen).

#### 2.2. Leuchtkraft

Sidney van den Bergh hat 1960 eine Leuchtkraftklassifikation für Spiralgalaxien späteren Typs als Sb und Irreguläre entwickelt:

- I .. Überriesen
- II .. Helle Riesen
- III .. Riesen
- IV .. Unterriesen
- V .. Zwerge

Interessant festzuhalten ist, daß die leuchtkraftstärkeren Galaxien viel längere und besser entwickelte Arme zeigen als leuchtkraftschwächere Galaxien. Unterhalb einer absoluten Helligkeit von etwa  $-15^M$  treten überhaupt keine Spiralarms mehr auf.

#### 2.3. Bedeutung von Klassifikationen

Hat die Einordnung in ein Klassifikationsschema überhaupt einen Bezug auf die physikalischen Beschaffenheiten von Galaxien oder spiegeln sie nur rein phänomenologische Eigenschaften wider? Brosche hat 1973 dazu in einer Untersuchung der Korrelationen unterschiedlichster physikalischer und empirischer Parameter gefunden, daß die revidierte Hubble-Klassifikation (nach Vaucouleurs) und die Leuchtkraft die stärkste Aussagekraft haben. Diese zwei Parameter beschreiben einen wesentlichen Teil der physikalischen Eigenschaften einer Galaxie. Bei der Hubble-Klassifikation scheint aber nur der Typ (die Stufe, in der oben angeführten Klassifikation von -6 bis 11) physikalische Signifikanz zu besitzen. Die feinere Klassifikation in normale Spiralen,

## 4. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

Balkenspiralen, Ringstrukturen beschreibt anscheinend nur dynamische Details. Früher haben manche Astronomen vermutet, daß das Hubble-Schema eine Darstellung der zeitlichen Entwicklung von Galaxien wäre. Hubble selbst hat vor der voreiligen Annahme einer solchen Vermutung gewarnt. Manche sahen die Galaxien als Elliptische beginnen, sich dann langsam über die Spiralformen zu den Irregulären hin entwickeln; andere sahen die Entwicklung einer Galaxie genau umgekehrt, mit Spiralarmlen, die sich aufwickeln, dann als elliptische Galaxie endend. Heute nehmen wir an, daß keine der beiden Vorstellungen der Wirklichkeit entspricht. Die Galaxien sind wahrscheinlich alle etwa gleich alt. Die Ursache für ihr heute vielfältiges Aussehen ist in den *Anfangsbedingungen* der Materie zu suchen, aus denen sich die Galaxie gebildet hat. So gesehen zeigt uns die Einteilung einer Galaxie in das Hubble-Schema wahrscheinlich diese Anfangsbedingungen, insbesondere dürfte der Drehimpuls der protogalaktischen Wolke darin zum Ausdruck kommen.

### 3. Normale Galaxien

#### 3.1. Elliptische Galaxien

Die elliptischen Galaxien bestehen nur aus dem Zentralgebiet, dem Halo und evtl. einem Kern. Es fehlt die Scheibenkomponente.

##### 3.1.1. Wahre Abplattung

Die Einteilung in die Unterklassen E0 bis E7 im Hubble-Schema gibt keine Auskunft über die wahre Abplattung einer bestimmten Galaxie. Wir können ja z.B. eine sehr stark durch Rotation abgeplattete Galaxie zufällig vom Pol aus sehen - sie wird als E0 klassifiziert werden. Man kann aber aus der Häufigkeit der scheinbaren Abplattungen auf die Häufigkeit der wahren Abplattungen schließen. Daraus ergibt sich, daß nicht alle Abplattungen gleich häufig vorkommen, sondern daß eine Häufung um den "wahren Hubble-Typ" E6 bis E7 zu bemerken ist. Vollkommen kugelförmige Galaxien dürften sehr selten sein.

##### 3.1.2. Massenbestimmung

Wenn wir das Zentrum einer elliptischen Galaxie ansehen, dann umfaßt unser Blick alle Sterne dieser Galaxie, die auf unserem Sehstrahl liegen. Jeder einzelne Stern bewegt sich aber entsprechend der Gravitation, die auf ihn wirkt. Die Komponente dieser Bewegung entlang unseres Sehstrahls ist die Radialgeschwindigkeit des Sterns. Diese Radialgeschwindigkeit bewirkt eine Dopplerverschiebung der Spektrallinien. Nun können wir meist nicht Spektren einzelner Sterne in einer Galaxie beobachten, sehr wohl aber die *zusammengesetzten* Spektren aller Sterne auf unserem Sehstrahl. Dies bewirkt nun nicht eine Verschiebung, sondern eine Verbreiterung der Spektrallinien. Aus der Art dieser Verbreiterung kann man nun die Geschwindigkeitsverteilung der Sterne bestimmen. Unter der Annahme verschiedener Randbedingungen ist es möglich, daraus die Masse der Galaxie zu bestimmen. Trotz der großen Unsicherheit in den Ergebnissen kann eine größenordnungsmäßige Angabe der daraus bestimmten Massen erfolgen:

Typ	Galaxie	Masse in Sonnen	M/L
E-Überriese, cD	NGC4486, NGC4889	$>10^{12}$	$>30$
E-Riese, Zentralgebiete von Sa, Sb	NGC3379, Zg M31	$10^{10} - 10^{12}$	10-30
Kompakte Zwerge	M32, NGC4486B	$10^8 - 10^{10}$	3-10
Zwerge	Fornax, Sculptor	$10^6 - 10^8$	1- 3
extreme Zwerge	Draco, UMi System	$<10^6$	~1?

M/L ist das Verhältnis von Masse zu Leuchtkraft, relativ zur Sonne.

## 5. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

### 3.1.3. Anteil von Gas und Staub, Sternpopulation

Bis auf wenige Ausnahmen finden wir in elliptischen Galaxien keinen Staub und keines oder nur sehr dünnes Gas. Man kann davon ausgehen, daß bei den elliptischen Galaxien die Sternentstehung anfangs sehr wirkungsvoll gewesen sein muß und alle vorhandene Materie dabei verbraucht wurde. Es entstehen heute keine neuen Sterne mehr. Die vorhandenen Sterne sind so alt wie die ganze Galaxie.

### 3.1.4. Elliptische Zwerggalaxien

Zwerggalaxien bestehen nur aus einem Halo. In ihrer stellaren Zusammensetzung entsprechen sie einem sehr ausgedehnten Kugelsternhaufen. Diese Systeme treten in der Nähe großer Galaxien auf. Sie sind so ausgedehnt, daß die Gezeitenwirkung der großen Nachbargalaxie ihre äußeren Mitglieder im Laufe der Zeit entfernt. Aufgrund ihrer großen Ausdehnung und Lichtschwäche sind diese Systeme äußerst schwer zu entdecken und deshalb in den Galaxienkatalogen sicher unterrepräsentiert. Zahlenmäßig bilden die Zwerggalaxien sicher einen erheblichen Teil der Galaxien. Ihre Masse und auch ihre Leuchtkraft fallen aber kaum ins Gewicht.

### 3.1.5. cD Galaxien

Die cD Galaxien sind elliptische Riesengalaxien mit extrem ausgedehnten Halos. Diese Halos erreichen Durchmesser bis 1Mpc. Galaxien dieses Typs erscheinen sehr leuchtkräftig (Buchstabe c) und diffus (Buchstabe D). Die Bezeichnung stammt von einer Klassifikation nach Morgan (1958). In der Umgebung dieser Galaxien sind oft viele Zwerggalaxien zu finden.

## 3.2. Spiralgalaxien und magellansche Irreguläre

Spiralgalaxien bestehen aus einer Mischung von Zentralbereich, Scheibe, Kern und Halo. Der Anteil des Zentralbereiches relativ zur Scheibe ist bei den frühen Typen Sa, SBa größer als bei den späten Typen Sc, SBc.

Bei den magellanschen Irregulären ist kein Zentralbereich und kein Kern mehr vorhanden. Oft sind ihre Sterne aber balkenförmig angeordnet (z.B. bei der Großen Magellanschen Wolke).

Entsprechend den Anteilen von Zentralgebiet und Scheibe sind die Farben der Galaxien frühen Typs röter als die späteren Typs.

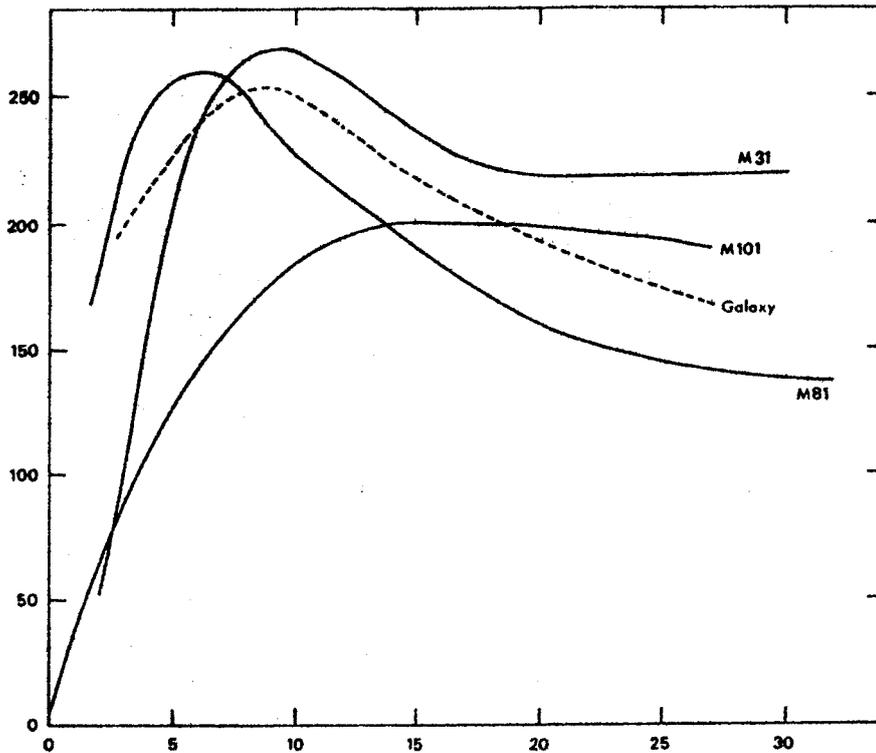
### 3.2.1. Rotation und Massenbestimmung

Wenn wir eine Spiralgalaxie betrachten, die rotiert, dann wird sich eine Hälfte der Galaxie auf uns zu, die andere von uns weg bewegen, wenn wir nicht gerade senkrecht auf sie blicken. Nehmen wir nun abschnittsweise Spektren der Galaxie auf, dann werden wir die Spektrallinien entsprechend den jeweiligen Geschwindigkeiten verschoben sehen. Daraus läßt sich das Geschwindigkeitsprofil zeichnen. Man kann nun versuchen, Modelle der Galaxie zu konstruieren und so lange zu verändern, bis die gemessene Geschwindigkeitskurve mit der durch die Rechnung ermittelte mit dem Modell als Grundlage ausreichend übereinstimmt. Die im Modell enthaltene Masse sollte dann gleich der Masse der Galaxie sein. Während optische Spektren wegen der abnehmenden Helligkeit der Scheibe nur bis zu einem beschränkten Abstand vom Zentrum der Galaxie auswertbar sind, kann man mit radioastronomisch ermittelten Spektren (21cm Linie des neutralen Wasserstoffs) in viel größerem Abstand vom Kern noch gute Geschwindigkeitsmessungen bekommen. Mit modernen Apertursynthese-Antennen ist auch das Auflösungsvermögen kein Problem mehr.

Typ	Galaxie	Masse in Sonnen	Anteil HI	M/L
SBm	LMC	$10^{10}$	10%	3
Sc II-III	M33	$3 \cdot 10^{10}$	5%	5
Sb I-II	M31	$3 \cdot 10^{11}$	1-2%	10

M/L ist das Verhältnis von Masse zu Leuchtkraft, relativ zur Sonne.

## 6. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien



Rotationsgeschwindigkeitskurven von Galaxien. (Lit.3)  
vertikal: km/s  
horizontal: Abstand vom Zentrum in kpc

### 3.2.2. Anteil und Verteilung von Gas

Grundsätzlich kann man feststellen, daß der Anteil von Wasserstoff (HI) an der Gesamtmasse der Galaxien in Abhängigkeit von ihrem Typ von S0 bis Sm und im deutlich zunimmt. Er beträgt bei den Spiralgalaxien frühen Typs (Sa, SBa) unter 1%, bei den magellanschen Irregulären etwa 10%. In den magellanschen Irregulären ist HI im Zentrum konzentriert und läßt sich oft weit über die optisch erkennbaren Grenzen hinaus nachweisen. Auch bei Spiralgalaxien findet man solche großen HI-Halos; die größte Konzentration von HI liegt bei ihnen aber nicht im Kern, sondern ein gutes Stück außerhalb. Weiter innen nimmt die HI-Dichte ab; im Mittelpunkt erreicht sie ein Minimum. In M31 und M81 etwa treten die Spiralarme zusammen mit dem neutralen Wasserstoff auf.



(optisch)



M81 (Lit.3)

HI (21cm)

## 7. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

### 3.2.3. Spiralarme

#### 3.2.3.1. Dynamik der Spiralarme

Der erste Eindruck, den man vom Anblick der Spiralarme einer Galaxie hat, ist der, daß diese Spiralarme als Ganzes mit der Galaxie rotieren. Aber wir wissen von unserem Planetensystem und den Keplerschen Gesetzen, daß dort die näher dem Zentralkörper Sonne befindlichen Planeten einen Umlauf um diesen viel schneller vollführen als die weiter außen liegenden. Ähnlich verhält es sich auch in einer Galaxie. Als Folge dieser unterschiedlichen Rotation müßten die Spiralarme verzerrt werden, und zwar schon während eines Umlaufes. Aus den bekannten Daten unserer und anderer Galaxien können wir eine typische Umlaufzeit mit etwa  $10^8$  Jahren angeben. Innerhalb dieser Zeit müßten sich die Spiralarme auflösen oder aufwickeln. Weil wir viele Galaxien mit sehr schönen Spiralarmen sehen und wir nicht ernsthaft annehmen können, daß sich diese alle eben erst (vielleicht vor  $10^7$  Jahren) gebildet haben, müssen wir also fragen, woraus diese Spiralarme bestehen und wieso wir sie überhaupt sehen können.

Sie bestehen aus sehr heißen, leuchtkräftigen Objekten - HII-Regionen, junge, massereiche Sterne, OB-Assoziationen - sodaß sie besonders auf blauempfindlichen Aufnahmen besonders deutlich hervortreten. In längeren Wellenlängenbereichen (Infrarot) treten die Arme immer mehr in den Hintergrund und es wird deutlich, daß sie nur der Scheibenkomponente der Spiralgalaxie überlagert sind. Die Spiralarme sind nicht so zu verstehen, daß in ihnen immer nur die selben Spiralarmsterne ihren Dienst tun. Ganz im Gegenteil: immer wieder neue, junge Sterne entstehen und erhalten so das Bild der Arme, während die alten, ausgebrannten Sterne weiterrotieren und sich in die Masse der unscheinbaren Scheibensterne zurückziehen.

UV, 125 - 175 nm

M33 (Lit.2)

IR, 710 - 880 nm

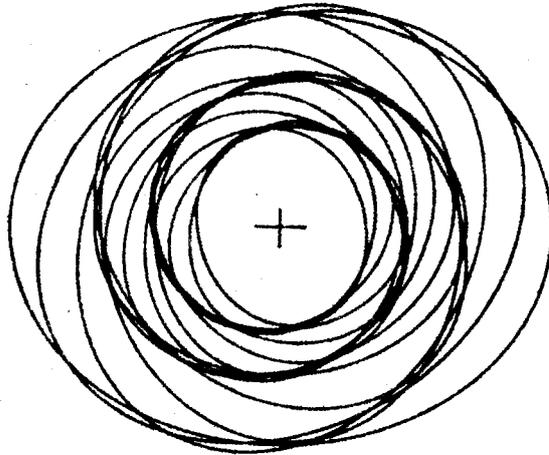
#### 3.2.3.2. Entstehung der Spiralarme

Was bewirkt nun, daß sich gerade an den Stellen, wo dann die Spiralarme sichtbar werden, die dazu notwendigen heißen, leuchtkräftigen jungen Sterne bilden? Dazu gibt es zwei Modelle: Das Dichtewellenmodell und das Supernovamodell. Beide sind wahrscheinlich am Entstehen der Spiralarme beteiligt.

## 8. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

### 3.2.3.2.1. Dichtewellenmodell

Beim Dichtewellenmodell nimmt man an, daß durch Resonanzen bei der Umlaufbewegung der Scheibensterne diese an manchen Stellen dichter stehen als an anderen Stellen. Das Ausmaß dieser spiralförmigen Dichtevariation ist von Galaxie zu Galaxie unterschiedlich; es liegt bei einigen Prozent.



Entstehung einer spiralförmigen Dichtewelle durch elliptische Umlaufbahnen und Drehung der Bahnhalbachse im Laufe der Zeit (Lit.3)

Trifft nun das interstellare Material (Gas, Staub) auf seiner Umlaufbahn auf so eine Dichtewelle, dann wird es komprimiert und es kann zum Gravitationskollaps der Wolke und zum Entstehen einer HII-Region mit jungen, extrem leuchtkräftigen Sternen kommen. Diese bewegen sich natürlich auf ihrer Umlaufbahn weiter, aber sie sind so kurzlebig (wenige  $10^6$  Jahre) relativ zu einer typischen Umlaufzeit von  $10^8$  Jahren, daß sie nach einem Bruchteil eines Umlaufes erloschen sind. Tatsächlich findet man in verschiedenen Galaxien ein Bild, das dieser Vorstellung entspricht: zunächst HII-Regionen, dann in galaktischer Umlaufrichtung weitergehend OB-Assoziationen. Mit dieser Modellvorstellung kann man die Entstehung von geordneten, langen Spiralarmen erklären.

### 3.2.3.2.2. Supernovamodell

Hier bewirkt die expandierende Gashölle, die von einer Supernovaexplosion in den Raum geblasen wird, die Kompression des interstellaren Materials, das dann kollabiert und neue Sterne formt. Durch die differentielle galaktische Rotation werden die neu gebildeten Sterngruppen auseinandergezogen - es entsteht ein Abschnitt eines Spiralarms. Unter diesen jungen Sternen wird es sicherlich einige so massereiche geben, daß diese in kurzer Zeit (etwa  $10^7$  Jahre) wieder eine Supernova hervorbringen und den beschriebenen Vorgang wiederholen. Mit diesem Modell lassen sich die stark strukturierten Arme mancher Galaxien verstehen.

## 3.3. Linsenförmige Galaxien

Sie bestehen aus dem Zentralgebiet, einer staub- und gasfreien Scheibe, Kern und Halo. Die Scheibe zeigt auch keine Spiralarme.

## 4. Galaxien mit aktivem Kern

Man spricht von einem aktiven Kern, wenn man von ihm Strahlung nichtthermischen Ursprungs beobachten kann.

### 4.1. Seyfert-Galaxien

Bei ihnen handelt es sich um Galaxien, die einen kleinen, hellen Kern haben. Dieser zeigt ein Spektrum mit breiten, starken Emissionslinien. Neben den Linien von Wasserstoff treten u.a. die verbotenen Linien von Eisen, Sauerstoff und

## 9. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

Argon auf, was auf sehr dünnes Gas deutet. Wir finden zwei Klassen von Seyfert-Galaxien. Bei der Klasse 1 ist das Gas sehr rasch bewegt (einige 1000km/s); diese Geschwindigkeiten liegen oft über den Entweichgeschwindigkeiten, sodaß dieses Gas in den intergalaktischen Raum entweicht. Die Massenverluste dadurch können bis  $10^4$  Sonnenmassen pro Jahr betragen. Die Klasse 2 zeigt Geschwindigkeiten des Gases um 500km/s. Gas, das nicht über die Entweichgeschwindigkeit hinaus beschleunigt wird, fällt wieder in die Galaxie zurück.

### 4.2. Quasare

Es sind sternartige, blaue Objekte, manchmal in Verbindung mit einer sehr schwachen nebelhaften Umgebung. Alle zeigen eine sehr große Rotverschiebung ihrer Spektrallinien. Wenn man diese Rotverschiebung als Fluchtgeschwindigkeit deutet, dann erreichen diese schon nahezu die Lichtgeschwindigkeit. Sind die Quasare soweit entfernt wie das durch ihre Rotverschiebung und die Hubble-Konstante (dzt. 50km/sMpc) angezeigt wird, so müssen sie Leuchtkräfte besitzen, die die einer normalen Galaxie um das etwa  $10^5$ -fache übertreffen. Manche Astronomen deuten diese Objekte als Galaxien, die gerade in Entstehung begriffen sind und sehr viele junge, extrem leuchtkräftige Sterne besitzen. Andererseits gibt es auch manche Anzeichen dafür, daß nicht alle beobachteten Rotverschiebungen von Spektrallinien von der Expansion des Alls herrühren.

### 4.3. BL Lacertae Objekte

Der Prototyp dieser extragalaktischen Objekte wurde einst für einen Veränderlichen Stern gehalten. Diese Objekte zeigen manchmal schwache nebelige Umgebungen. Sie zeigen Absorptionslinien wie normale elliptische Riesengalaxien. Die Zentralregion in diesen Galaxien zeigt athermische Strahlung, schnelle Veränderlichkeit, starke und variable Polarisation sowie Infrarotemission.

### 4.4. Markarian-Galaxien

Das sind Galaxien, die ein starkes UV-Kontinuum aussenden. Auch im blauen Bereich beobachtet man außergewöhnlich starke Strahlung.

### 4.5. Radiogalaxien

Viele Spiralgalaxien, auch unsere Milchstraße, senden schwache Radiostrahlung aus. Starke Radiostrahlung beobachten wir nur bei elliptischen Galaxien. Die Regionen der Radioemission stimmen oft nicht mit dem optischen Bild der Galaxie überein. Man findet zwei Stellen von Radiostrahlung an einander gegenüberliegenden Punkten der Galaxie. Bei der beobachteten Strahlung handelt es sich um Synchrotronstrahlung. Diese entsteht, wenn sich Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in einem Magnetfeld bewegen.

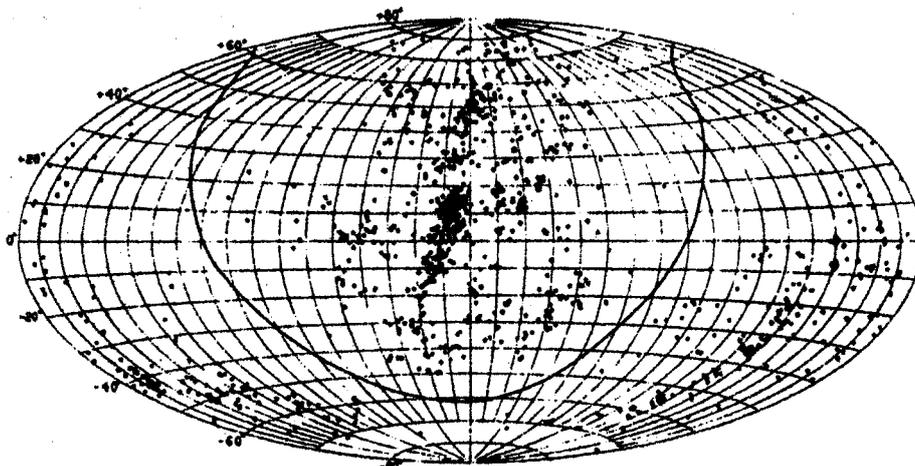
## 5. Verteilung der Galaxien, Galaxienhaufen

### 5.1. Scheinbare Verteilung

Die systematische Untersuchung der scheinbaren Verteilung der Galaxien an der Sphäre wurde zum erstenmal von R.A. Proctor am Ende des 19. Jahrhunderts vorgenommen. Er zeichnete alle Objekte des NGC in zwei Karten, des Nord- und des Südhimmels, ein. Wie wir heute wissen, enthält der NGC in der Hauptsache Galaxien, sodaß mit dieser Arbeit die Verteilung dieser Objekte dargestellt wurde. Es handelt sich beim NGC zwar um sehr inhomogenes Datenmaterial, aber die Karten zeigen im groben jenes Bild, das auch durch spätere Arbeiten nicht wesentlich verändert wurde.

Die erste große Darstellung der Verteilung der Galaxien an der Sphäre ist sicherlich die Shapley-Ames Karte (1932), die Galaxien bis zur 13. Größe beinhaltet. Sie basiert auf dem homogenen Datenmaterial, welches im Shapley-Ames Galaxienkatalog (1249 Galaxien) zur Verfügung stand.

## 10. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien



Die Verteilung der Galaxien bis zur 13. Größe nach dem Shapley-Ames Katalog. Die eingezeichnete Linie ist der galaktische Äquator. (Lit. 5)

Am auffallendsten ist das fast vollständige Fehlen von Galaxien entlang jener Zone, die mit dem galaktischen Äquator übereinstimmt. In diesem Bereich wird unser Blick durch unsere Milchstraße von den vielen Dunkelwolken genommen. Dieser etwa 40 Grad breite Bereich wird im anglikanischen Sprachbereich als *Zone of Avoidance* beschrieben. Weiters fällt auf der Karte die Häufung der Galaxien entlang eines Bandes auf, das sich von den Sternbildern Virgo bis Ursa Major erstreckt. Genau gegenüber dieser Konzentration fällt auch eine entsprechende Leere auf. Zusammenfassend kann man sicherlich von einer deutlich nicht zufälligen Verteilung der Galaxien bis etwa zur 13. Größe sprechen. Spätere Untersuchungen der Verteilung der Galaxien bis zu schwächeren Grenzgrößen wurden von mehreren Sternwarten unternommen.

Die Harvard-Durchmusterung bis zur 18. Größe überdeckt den ganzen Himmel und enthält etwa 600000 Galaxien. Vom Lick-Observatorium aus wurde der von dort sichtbare Himmel durchmusterung. Dabei wurden etwa 1000000 Galaxien bis zur 19. Größe entdeckt; diese Shane-Wirtanen Durchmusterung nahm etwa 12 Jahre in Anspruch.

Man findet, daß die Verteilung der Galaxien umso gleichförmiger wird, zu je schwächeren Grenzgrößen man vordringt.

### 5.2. Räumliche Verteilung

Von der scheinbaren Verteilung der Galaxien kann man auf die räumliche Verteilung der Galaxien schließen. Eine Auswahl von Galaxien einer bestimmten Helligkeit wird zwar schwache, nahe sowie helle, ferne Galaxien enthalten. Ist die Anzahl der untersuchten Galaxien aber groß genug, dann kann man sagen, daß die schwächeren Galaxien statistisch betrachtet eher die ferneren Galaxien sind. Die Anzahl  $N$  der Galaxien heller als eine Grenzgröße  $m$ , die man pro Quadratgrad findet, ist gegeben durch

$$\log N = k(m - m_1)$$

wobei  $k=0.6$  für eine gleichförmige Verteilung der Galaxien entlang unserer Blickrichtung ist.  $m_1$  ist der sogenannte *space density parameter*. Er gibt an, welche jene Grenzgröße ist, die wir wählen müssen, um eine Galaxie pro Quadratgrad zu finden. Er ist etwa  $15^m$ . Mit einer mittleren absoluten Helligkeit einer Galaxie von  $-20^M$  ergibt das eine Entfernung von 100Mpc. Um eine Galaxie pro Quadratgrad heller als  $15^m$  zu sehen, müssen wir etwa 100Mpc weit in den Raum blicken.

Beobachten wir nur hellere Galaxien, dann ist eine deutliche Abweichung von  $k=0.6$  festzustellen, das heißt daß die Galaxien nicht gleichmäßig entlang unseres Sehstrahles verteilt sind, sondern in Haufen konzentriert sind. Der Durchmesser eines galaxienreichen Haufens mit etwa 10000 Galaxien kann bis zu etwa 10Mpc betragen. Diese Haufen zeigen wiederum eine Tendenz zur Bildung von

## 11. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

Superhaufen mit charakteristischen Durchmessern von etwa 50Mpc. Je schwächere Galaxien man aber beobachtet, desto mehr nähert sich  $k$  dem Wert 0.6, desto gleichförmiger wird die Verteilung. Man kann daraus schließen, daß über kurze Distanzen (bis etwa 100Mpc) die Verteilung nicht gleichförmig ist; über größere Strecken ist die Verteilung sehr wohl gleichförmig.

Abell hat 1958 einen Katalog von Galaxienhaufen veröffentlicht. Er fand auf den Platten der Palomar Sky Survey 2712 galaxienreiche Haufen, wobei er Kriterien für die Aufnahme eines Galaxienhaufens in seinen Katalog aufstellte und dadurch homogenes Datenmaterial erhielt, das für statistische Auswertungen geeignet ist. Diese ergaben

1.) Die Entfernungen von Galaxienhaufen sind annähernd gleichförmig verteilt. Die Entfernungen wurden nach der Helligkeit der 10. hellsten Galaxie im Haufen bestimmt. Dabei ist die Annahme einer in allen Galaxien gleichen Leuchtkraftfunktion notwendig. Diese Annahme scheint berechtigt, weil die Streuung der Leuchtkraftfunktionen der 10 hellsten Galaxien in verschiedenen Haufen sehr klein ist. (Die Leuchtkraftfunktion stellt die Anzahl der Galaxien pro Leuchtkraft, oder gleichbedeutend, pro absoluter Helligkeit dar.)

2.) Es zeigen sich Konzentrationen zu Superhaufen mit einer charakteristischen Größe von etwa 90Mpc.

Weitere Untersuchungen ergaben, daß Haufen von Superhaufen wahrscheinlich nicht existieren. Eher wird eine "schwammähnliche" Verteilung von Superhaufen und Haufen angenommen, bei der zwischen diesen Haufen große galaxienleere Bereiche eingeschlossen sind.

### 5.2.1. Die Umgebung unserer Milchstraße

Wir wissen heute, daß die Galaxien fast nicht als einzeln stehende Feldgalaxien, sondern fast nur in physikalisch zusammengehörenden größeren Verbänden, den Gruppen und den Haufen, vorkommen.

Die nächste Umgebung unserer Milchstraße umfaßt die Galaxien der Lokalen Gruppe. Dazu gehört unsere Milchstraße mit den beiden Magellanschen Wolken, den Zwerggalaxien Fornax- und Sculptorsystem, M31 mit den beiden Begleitern M32 und NGC205, M33 und einige weitere Zwerggalaxien. Ihr Durchmesser liegt in der Größenordnung von 1 bis 2Mpc.

In etwa 3Mpc Entfernung finden wir die Gruppe um M81, die unserer lokalen Gruppe ähnlich ist. Beide dürften mit einigen anderen Gruppen Ausläufer des großen Virgo-Haufens bilden, der einige tausend Galaxien umfaßt und etwa 20 Mpc entfernt ist. Diese räumliche Konstellation bewirkt das Erscheinungsbild, das wir auf der Shapley-Ames Karte sehen. Wenn wir Richtung Virgo-Haufen blicken, dann sehen wir viele Galaxien. Weiter nördlich Richtung Ursa Major finden wir die uns näheren Gruppen, die Ausläufer des Virgo-Haufens, und wir stehen mit unserer Lokalen Gruppe am Rand der zum Virgo-Haufen gehörenden Galaxiengruppen. In der dem Virgo-Haufen gegenüberliegenden Raumrichtung sehen wir deshalb nur sehr wenige Galaxien. Diese Gruppierung von Galaxiengruppen und Haufen bezeichnen wir als den Lokalen Superhaufen.

### 5.3. Klassifikation von Galaxienhaufen

#### 5.3.1. Bautz-Morgan Klassifikation

Diese Klassifikation basiert auf der Dominanz der hellsten Galaxie im Haufen.

- I ... Der Haufen wird dominiert von einer extremen Riesengalaxie der Klasse cD
- II ... Die dominierende Galaxie liegt zwischen den Klassen cD und E.
- III ... Der Haufen läßt keine dominierende Galaxie erkennen.

#### 5.3.2. Rood-Sastry Klassifikation

Diese Klassifikation basiert auf der Verteilung der hellsten 10 Galaxien in einem Haufen.

cD ... Eine einzelne Galaxie dominiert den Haufen. Sie ist eine extreme Riesengalaxie (cD), oft mit gigantischem Halo, oder eine etwas weniger helle Galaxie des Typs D oder eine E-Riesengalaxie. Diese dominierende Galaxie ist mindestens dreimal größer als jede andere Galaxie des Haufens. Sie wird von

## 12. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

einem dichten Schwarm von Zwerggalaxien umgeben. Die meisten Galaxien, die in einem cD-Haufen auftreten, sind E und S0-Galaxien.

B .... Zwei eng benachbarte Riesengalaxien, meist vom Typ E, und umgeben von einem Schwarm Zwerggalaxien, dominieren den Haufen. Sie sind deutlich größer und mindestens um 1 Größenklasse heller als die anderen Haufengalaxien. Sie sind höchstens 10 Durchmesser voneinander entfernt. Manchmal sind sie von einem gemeinsamen Halo umgeben oder durch eine Brücke aus leuchtendem Material miteinander verbunden. In diesen Haufen treten bevorzugt Galaxien der Typen E und S0 auf.

C .... Mindestens 3 oder 4 der 10 hellsten Galaxien sind im Zentrum des Haufens zu finden. Diese heben sich deutlich in ihrer Größe von den anderen Haufengalaxien ab.

L .... Mindestens 3 der 10 hellsten Galaxien erscheinen in einer Linie aufgereiht. Bei manchen Haufen dieses Typs erscheinen auch die schwächeren Galaxien entlang dieser Linie aufgereiht.

F .... Ein Haufen ohne dominante Galaxien, die eine abgeflachte Verteilung zeigen. Die meisten Haufen dieses Typs könnten als aus mehreren Unterhaufen bestehend betrachtet werden, von denen jeder getrennt klassifiziert werden könnte. Die meisten Galaxien, die hier vorkommen, sind Spiralgalaxien und linsenförmige Galaxien.

I .... Irregulär - ohne dominante Galaxien. Die Haufenmitglieder, meist Spiralgalaxien, zeigen eine nur schwache Konzentration zum Haufenzentrum.

### 5.4. Physik der Galaxienhaufen

#### 5.4.1. Intragalaktisches Gas, Wechselwirkung mit Galaxien

Das in den Galaxienhaufen vorhandene Gas ist größtenteils in deren Zentrum konzentriert. Dessen Temperatur beträgt etwa  $10^8$  K. Bei diesen Temperaturen erwartet man die Emission von Röntgenstrahlung. Solche Strahlung kann tatsächlich in manchen Galaxienhaufen als diffuse Röntgenquelle beobachtet werden. Radiogalaxien, die Plasmawolken aus ihrem Kern ausstoßen, ziehen bei ihrer Bewegung durch dieses heiße, intragalaktische Gas einen Radio-Schweif hinter sich her. ('Head-Tail'-Galaxien). Die unabhängige Bestimmung der Masse des heißen intragalaktischen Gases aus dieser Wechselwirkung und aus der Röntgenemission liefert annähernd übereinstimmende Werte.

Galaxien, die sich durch das Gas bewegen, können dadurch ihr eigenes Gas verlieren; sie werden sozusagen "leergefegt". Diesen Bremsdruck, der auf die bewegte Galaxie wirkt, nennt man *ram pressure* (anglik.). Besonders wirkungsvoll ist dieser Mechanismus, wenn sich die Galaxie schnell bewegt oder das intragalaktische Gas sehr dicht ist, also im Haufenzentrum. Möglicherweise sind die S0-Galaxien solche leergefegte ehemalige Spiralen. Dafür spricht die Verteilung der Galaxientypen. So beobachtet man in galaxienreichen, zentral dichten Haufen fast nur E und S0-Galaxien. Galaxien vom Typ S0 treten auch besonders in Haufen mit großen Bewegungsgeschwindigkeiten ihrer Mitglieder auf. Auch findet man sie eher im Zentrum von Haufen als an deren Rand.

Das Leerfegen von gasreichen Galaxien muß eine Anreicherung des intragalaktischen Gases mit schwereren Elementen (aus Supernovaexplosionen in der Galaxie) bewirken. Tatsächlich konnte etwa im Virgo-Haufen die Röntgenemission von hochionisiertem Eisen beobachtet werden.

#### 5.4.2. Dynamische Entwicklung

Im Laufe der Zeit werden die massereichen, hellen Galaxien durch gravitationelle Wechselwirkung mit allen anderen Haufenmitgliedern des Haufens zu dessen Zentrum "sinken" und ihre Bewegungsenergie an kleinere, schwächere Galaxien abgeben, die dadurch nach außen beschleunigt werden.

Diesen Vorgang nennt man *Relaxation*. Enge Begegnungen von Haufengalaxien bewirken, daß durch die Gezeitenkräfte Material von den Randzonen der Galaxien entfernt wird. Dieses Material fällt zu den massereichen, im Zentrum des Haufens ruhenden Galaxien, welche dadurch immer mehr an Masse gewinnen und den Galaxienhaufen dominieren. Diese extrem großen Galaxien finden wir als cD-Galaxien, mit Halos von Ausdehnungen bis zu 1Mpc.

## 13. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien

### 6. Wechselwirkende Galaxien

Die Galaxien sind einander relativ nahe. So ist zum Beispiel der Andromedanebel von unserer Milchstraße etwa 600kpc entfernt. Der Durchmesser unserer Milchstraße beträgt etwa 30kpc. Wir sehen also, daß wir unsere Milchstraße bloß 20mal aneinanderreihen müßten, um zum Andromedanebel zu gelangen. In galaxienreichen Haufen stehen die Galaxien einander oft noch näher. Jede Galaxie bewegt sich wegen der Gravitation des Haufens, die auf sie wirkt. Nach Abschätzungen von Toomre hat etwa jede sechste Galaxie schon Zusammenstöße mit anderen Galaxien erfahren.

Bei einem Zusammenstoß zweier Galaxien werden Kollisionen zwischen ihren Sternen fast nicht vorkommen, da deren Abstände im Verhältnis zu ihren Durchmessern sehr groß sind. Wohl aber werden die Gase der Galaxien kollidieren. Dabei kann es zu Schockfronten im Gas und in der Folge zu gewaltigen Schüben von Sternentstehung kommen.

Es kann passieren, daß sich die Galaxien nach einem Zusammenstoß nicht mehr trennen und dann ein großes Sternsystem, vielleicht mit mehreren Kernen, bilden ('merger').

Harmloser verlaufen enge Vorübergänge zweier Galaxien. Hier sind die Gezeitenwirkungen für Veränderungen an den Galaxien verantwortlich. Besonders die Randbereiche der Scheibe und der Halo werden davon beeinflusst, wobei den Galaxien Material verloren gehen kann ('tidal stripping'). Die bei einigen Galaxien sichtbaren langgezogenen Filamente sind, wie Modellrechnungen von Toomre eindrucksvoll nahelegen, auf diese engen Vorübergänge zurückzuführen.



Arp 273

(Lit.1)

NGC4676

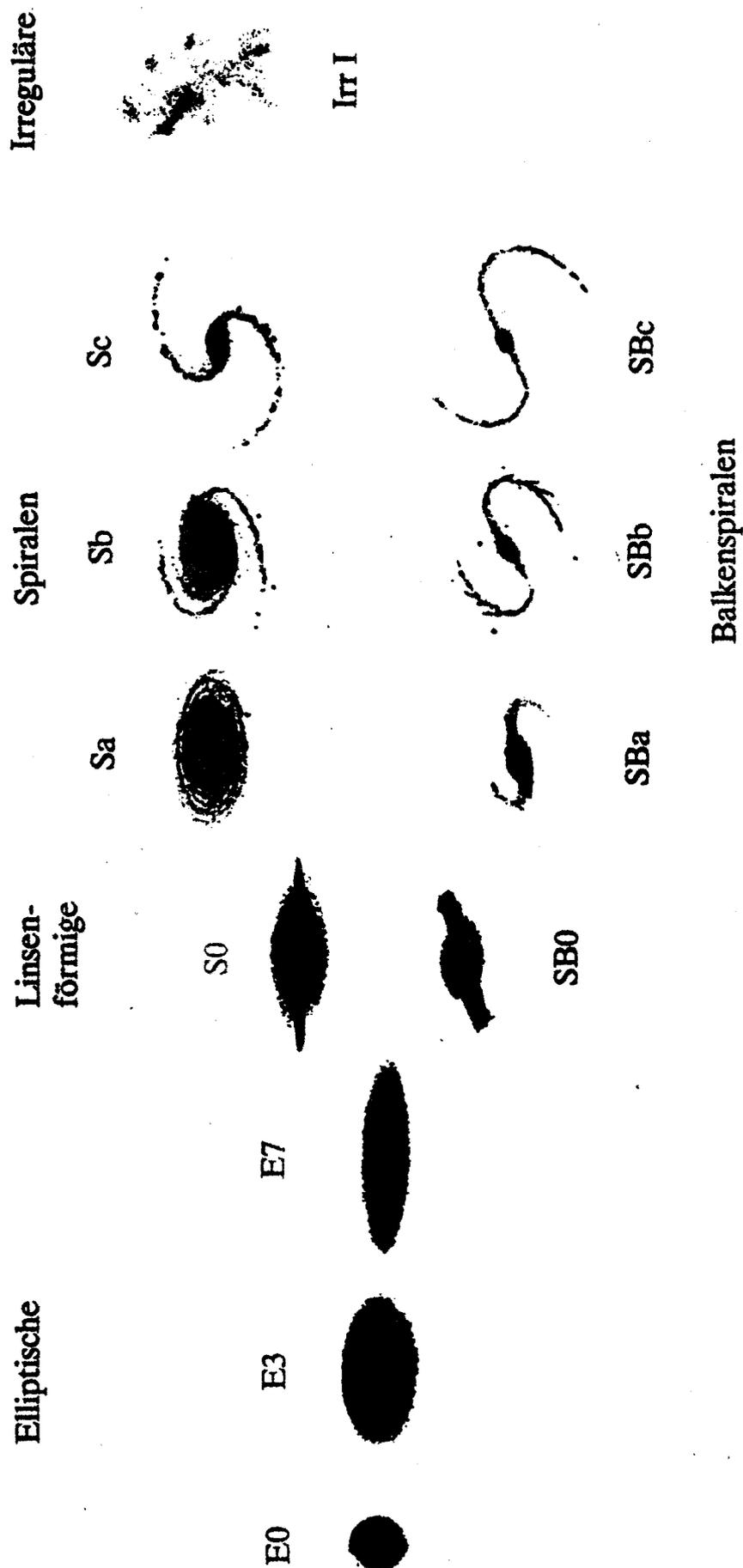
### Zusammenfassung

Es wurden die Erscheinungsformen der Galaxien, ihre Einordnung in Klassifikationsschemata, ihre Verteilung an der Sphäre und im Raum kurz besprochen. Auch manchen physikalischen Phänomenen, zusammen mit den aktuellen Vorstellungen der Forscher darüber, wurde Platz eingeräumt.

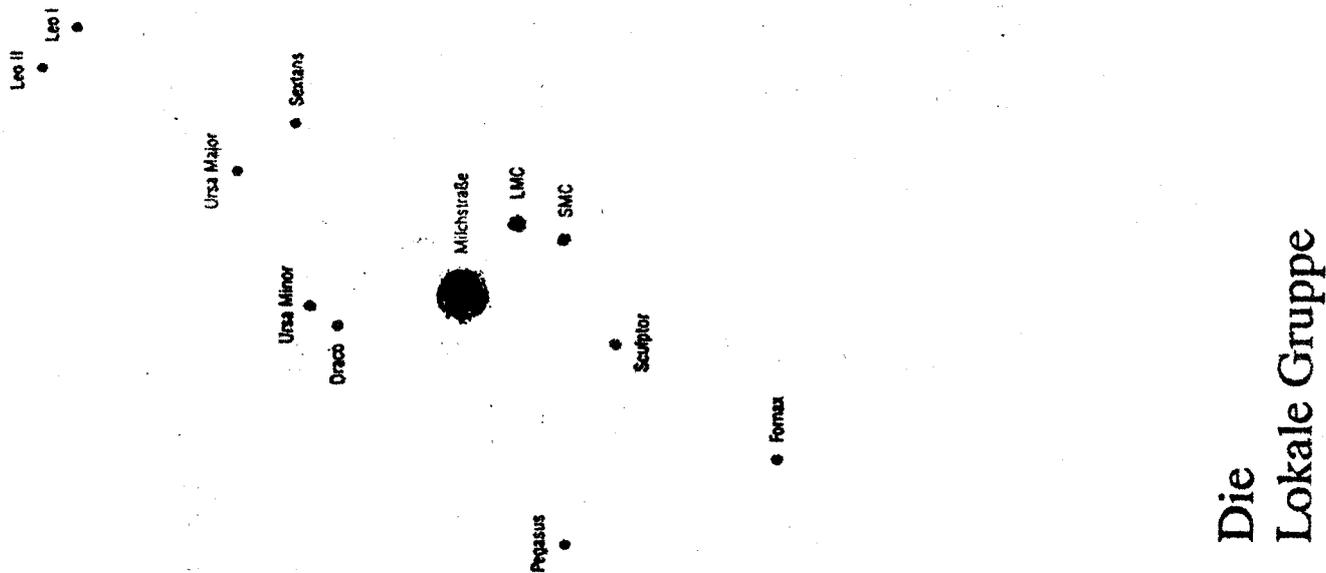
### Literatur:

1. Ferris, T., Galaxien, Birkhäuser-Verlag, 1987.
2. Henbest, N., Marten, M., Die neue Astronomie, Birkhäuser-Verlag, 1984.
3. IAU Symposium Nr.58, The Formation and Dynamics of Galaxies, Reidel Publishing, 1974.
4. Sandage, A., The Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Institution, 1961.
5. Shapley, H., Galaxies, Harvard College, 1972.
6. Sky&Telescope, Sky Publishing, 1973-1987.
7. Tayler, R.J., Galaxien - Aufbau und Entwicklung, Vieweg-Verlag, 1986.
8. Unsöld, A., Der neue Kosmos, Springer-Verlag, 1974.
9. Webb Society, Deep Sky Observer's Handbook, Vol. 4 (1981) und 5 (1982).

# HUBBLE-SCHEMA

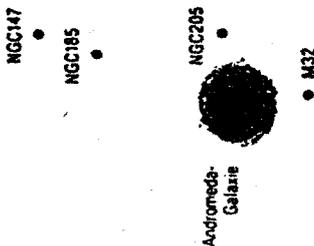


# 15. Fortsetzung Referat: Übersicht Galaxien



Die Lokale Gruppe

Name	Typ	M <sub>v</sub>
M 31 = NGC 224	Sb oder Sc	-21,1
Milchstraße	Sc	-20,7
M 33 = NGC 598	Irr I	-18,9
LMC	Irr I	-18,5
SMC	E 6	-16,8
NGC 205	E 2	-16,4
M 32 = NGC 221	Irr I	-16,4
NGC 6822	dE 0	-15,7
NGC 185	dE 4	-15,2
NGC 147	Irr I	-14,9
IC 1613	dE	-14,8
Fornax	dE	-13,6
Sculptor	dE	-11,7
Leo I	dE	-11,0
Leo II	dE	-9,4
Ursa Minor	dE	-8,8
Draco	dE	-8,6



M33

IC 1613

Michael Pietschnig  
 Diefenbachgasse 45-47/1/9  
 1150 Wien

Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

I. DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM

Für alle elektromagnetischen Wellen gilt: Frequenz  $f$  mal Wellenlänge  $\lambda$  = Lichtgeschwindigkeit  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

Einteilung des Spektrums:

1. Langwellige Radiostrahlung ( $\lambda > 30$ m,  $f < 10$ Mhz): Diese Strahlung wird von der Ionosphäre reflektiert (die genaue Grenze hängt von der Elektronendichte in der Ionosphäre ab, die im Tageszyklus, aber auch in Abhängigkeit von der Sonnenaktivität schwankt.) Sie kann von der Erde aus nicht aus dem Weltraum empfangen werden. Umgekehrt kann auch nicht in den Weltraum gestrahlt werden, also eignen sich diese Frequenzen zur terrestrischen Radiokommunikation über weite Strecken.

2. Astronomischer Radiobereich ("Radiofenster"):  $\lambda$  etwa 30m bis etwa 1mm,  $f$  etwa 10 Mhz bis etwa 300 GHz. Der höchste Frequenzbereich (20-300 GHz, 1.5cm-1mm) durch Molekülabsorption in der Atmosphäre stark beeinflusst. Das astronomische Interesse konzentriert sich immer mehr auf die kürzesten Wellenlängen (mm-Astronomie).

3. Infrarot (1mm-1 $\mu$ m,  $3 \cdot 10^{11}$ -  $3 \cdot 10^{14}$ Hz): Atmosphäre im Wesentlichen undurchlässig. Astronomische Beobachtung durch Satelliten.

4. Optisches Fenster der Atmosphäre (300-1000nm,  $3 \cdot 10^{14}$ -  $10^{15}$ Hz). Kurz Licht genannt.

5. Ultraviolett, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung (kürzer als 300nm). Atmosphäre im Wesentlichen undurchlässig. Astronomische Beobachtung durch Satelliten.

II. RADIOTELESKOPE

Wegen der gegenüber Licht sehr viel größeren Wellenlänge muß die Flächengenauigkeit weniger gut sein. (Beispiel: 100 m Spiegel: fast 8000 m<sup>2</sup>, Flächengenauigkeit ca 1/2 mm, kürzeste Beobachtungswellenlänge 7 mm). Dafür können die Teleskope viel größer sein (aber sie müssen es auch sein, wegen der schwachen Radiointensität fast aller kosmischer Radioquellen).

Einzelspiegel:

(a) voll bewegliche Spiegel (Paraboloide) > 50m  $\phi$ :

- 100m Effelsberg/Eifel (Max-Planck-Institut für Radioastronomie)
- 74m Jodrell Bank/England
- 64m Parkes/Australien
- 64m Goldstone/Kalifornien

(b) nicht voll bewegliche Spiegel:

- 305 m  $\phi$  Arecibo/Puerto Rico, das größte Instrument überhaupt.
- 40x200m Nancay/Frankreich
- 30x529m Ootacamund/Indien

## 1. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

10x1885m Zelenchukskaya, Russland

(c) Millimeter-Teleskope

30m Pico Veleta/Spanien (deutsch-französisches Gemeinschaftsprojekt)

20m Onsala/Schweden

14m Amherst, Massachusetts

Interferometer (mehrere Teleskope zusammengeschaltet)

VLA (Very Large Array): 27 Spiegel je 25 m  $\varnothing$ ; Socorro/ Neu-Mexiko, Gesamt  $\varnothing$  40km

5km-Array Cambridge/England

WSRT (Westerbork Radio Teleskop/Holland): 12 Spiegel je 25m  $\varnothing$ , Gesamt  $\varnothing$  etwa 1.6km.

Die Winkelauflösung eines Teleskops ist ungefähr gleich Wellenlänge/Durchmesser.

Beispiel 100m, 20cm - 0.002 im Bogenmaß = 7 Bogenminuten.

VLA, 2cm -  $5 \times 10^{-7}$  im Bogenmaß = 0."1.

VLBI (Very long Baseline Interferometry = Zusammenschalten weit entfernter Teleskope): Maximal 10 000km (fast Erddurchmesser), bei 2cm Auflösung von ca 1/2000 Bogensekunde, dh. 1000 mal besser als mit optischen Teleskopen auf der Erde erreichbar.

### III. VERSCHIEDENE ARTEN DER RADIOSTRAHLUNG

#### 1. Kontinuumsstrahlung

Diese Strahlung ist über einen großen, wenn nicht den ganzen Radiobereich verteilt. Es kommt deshalb nicht oder nur wenig darauf an, bei welcher Frequenz man beobachtet.

##### a) Thermische Strahlung, Coulomb-Bremsstrahlung.

Jeder Körper sendet nach dem Planckschen Strahlungsgesetz auch Radiostrahlung aus, z.B. die Sonne. Beobachtbar nur bei heißen ausgedehnten Gaswolken (H-II-Regionen, heißes ionisiertes Wasserstoffgas in der Umgebung sehr heißer Sterne). Setzt sich von anderer Strahlung vor allem bei kurzen Wellenlängen ab, ist extragalaktisch nur bei nahen Galaxien überhaupt beobachtbar.

##### b) Nicht-thermische Strahlung, Magnetobremsstrahlung, Synchrotronstrahlung: Sie wird erzeugt durch hochenergetische (=relativistische) Elektronen, die in einem Magnetfeld umlaufen. Treffen solche Elektronen auf die Erde auf, so nennt man sie die Elektronenkomponente der Kosmischen Strahlung (die Kosmische Strahlung wurde von Victor Franz Hess entdeckt, der dafür als Professor für Physik in Innsbruck 1936 den Nobelpreis erhielt). Beobachtet man Synchrotronstrahlung, so heißt das also nichts anderes als: Es gibt dort kosmische Strahlung und Magnetfelder.

Synchrotronstrahlung ist teilweise polarisiert. Dies ist nicht nur bei kurzen Wellenlängen ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zu thermischer Strahlung, sondern es kann auch die Richtung bzw. allgemeiner die Struktur des Magnetfeldes in einer Galaxie bestimmt werden.

Synchrotronstrahlung kann im Prinzip sehr viel stärker als jede andere Art von Radiostrahlung sein. In weit entfernten

## 2. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

Galaxien ist nur sie beobachtbar. Meist, wenn auch nicht immer, ist sie - im Gegensatz zur thermischen Strahlung - bei kleinen Frequenzen (langen Wellen) stärker als bei großen.

### 2. Linienstrahlung

Sie kommt von Atomen oder Molekülen und ist auf einen engen Frequenzbereich beschränkt. Die Frequenz ist charakteristisch für das jeweilige Atom. Aus der Verschiebung relativ zur sogenannten Laborfrequenz folgt die Geschwindigkeit der Atome dem Beobachter gegenüber (Dopplereffekt).

$$\Delta f/f = v/c$$

Beispiel: Die Wasserstofflinie bei 1420 MHz werde bei 1410 MHz beobachtet. Die Quelle entfernt sich von uns mit der Geschwindigkeit

$$v = c \cdot \Delta f/f = 3 \times 10^5 \text{ km/s} \times 10 \text{ MHz} / 1420 \text{ MHz} = 2100 \text{ km/s}$$

Ähnlich folgten aus der Linienbreite Geschwindigkeitsunterschiede in der Quelle.

a) Großräumige Bewegungen in der Quelle. Beispiel: Eine Spiralgalaxie rotiert mit einer typischen Rotationsgeschwindigkeit von rund 200 km/s. Sehen wir sie von der Seite, so kommt eine Hälfte auf uns zu, die andere dreht sich von uns weg. Die Linienbreite wäre also

$$\Delta f = f \cdot v/c = 1420 \text{ MHz} \times 400 \text{ km/s} / 300000 \text{ km/s} = 1.9 \text{ MHz}$$

b) Thermische Bewegung in einem Gas: Die Atome fliegen wirr durcheinander. Die mittlere Geschwindigkeit ist der Temperatur proportional. Beispiel: Atome in einem Wasserstoffgas von 100°K haben eine mittlere Geschwindigkeit von 1.4 km/s. Dem entspricht eine Linienbreite von (ungefähr) 14 kHz. Findet man also z.B. eine Linienbreite von 10 kHz, so schließt man auf eine Temperatur von 70°K.

Radiolinien treten meist in Emission auf (das Gas strahlt). Absorptionslinien entstehen dadurch, daß das Gas aus einer dahinterliegenden Kontinuumsquelle Strahlung ausfiltert.

Arten der Linienstrahlung:

a) Die wichtigste Radiolinie ist die des neutralen Wasserstoffatoms bei 1420 MHz (21 cm). Es handelt sich, atomphysikalisch gesehen, um einen Hyperfeinstrukturübergang, wobei der Kernspin gegenüber dem Elektronenspin um 180° umklappt. Spontan passiert dies äußerst selten, nämlich für jedes Wasserstoffatom nur alle 11 Millionen Jahre. Wir sehen die Linie nur, weil es im Weltall so ungeheuer viel Wasserstoff gibt. Wolken aus neutralem Wasserstoff nennt man auch H I-Regionen.

b) Rekombinationslinien: Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton (Kern) und einem Elektron. Trennt sich dieses vom Kern, spricht man von Ionisation. Der umgekehrte Vorgang heißt Rekombination. Er kann offenbar nur in einem ionisierten Gas (sog. H II Region) auftreten. Dabei können (müssen aber nicht)

### 3. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

auch Radiolinien in Emission entstehen.

- c) Moleküllinien: Die von Atomen ausgesendeten Linien liegen fast ausschließlich im optischen und Ultraviolettbereich. Moleküle kann man sich als aneinander gesteckte Kugeln vorstellen, die gegeneinander schwingen und umeinander rotieren können. Die dazugehörigen Energiezustände liegen dicht beieinander. Diese sog. Rotations-Schwingungs-Übergänge sind langwellig (Infrarot oder Radio).

Moleküle entstehen auf Stauboberflächen in interstellaren Dunkelwolken, in denen nur wenig Ultraviolettstrahlung vorhanden ist, die die Moleküle wieder zerstören würde. In der Milchstraße hat man bisher schon fast 100 Moleküle gefunden; die meisten davon sind organische Moleküle. In anderen Galaxien nur wenige (z.B. Wasser), vor allem deshalb so wenige, weil die Intensitäten einfach unbeobachtbar klein sind. Es ist anzunehmen, daß es in fast allen Galaxien Molekülwolken gibt, in denen interstellares Gas vorhanden ist.

Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation): Viele Moleküllinien sind überhell, d.h. um Größenordnungen stärker als man nach der Temperatur des Gases erwarten sollte. Das Gas ist dabei nicht im vollen thermischen Gleichgewicht, sondern gerade derjenige Energiezustand des Moleküls, der zu der Linienemission Anlaß gibt, ist durch Absorption von Strahlung ganz anderer Wellenlänge, die (z.B. durch die Leuchtkraft benachbarter Sterne) im Überfluß vorhanden ist, überhäufig geworden ("Pumpen"). Es gibt auch Absorptionsmaser. - Fast alle extragalaktisch beobachteten Moleküllinien sind maser-verstärkt.

#### IV. DIE MILCHSTRASSE

Sie ist als Prototyp einer Galaxie, die in mancher Hinsicht wegen ihrer Nähe besonders genau untersucht werden kann, auch für die extragalaktische Forschung von großer Wichtigkeit, ebenso wie die Sonne ein äußerst wichtiger Fixstern ist.

Die großräumige Spiralstruktur kann nur radioastronomisch erfaßt werden, da optisch der interstellare Staub große Teile der Milchstraße unseren Blicken entzieht. Man beobachtet den neutralen Wasserstoff (21-cm Linie), und zwar neben der Intensität auch die Dopplerverschiebung und Linienbreite bzw. Linienform - meist findet man, in eine Richtung blickend, sogar mehrere interstellare Wolken mit verschiedenen Verschiebungen und Formen. Die Entfernung der Wolken kann man nicht messen, aber mit Hilfe eines Modells der galaktischen Rotation sozusagen erraten.

Der Wasserstoff ist extrem zur galaktischen Ebene hin konzentriert. Die Schichtdicke beträgt nur zwei- oder dreihundert pc - bei einem Durchmesser der Milchstraße von 30 kpc eine Abplattung von 1:100, vergleichbar einem dicken DIN A4 Karton. Damit ist die galaktische Ebene so gut definiert, daß das seit 30 Jahren benützte "neue" galaktische Koordinatensystem auf radioastronomischen Messungen beruht. Weiter außen nimmt die Dicke zu, bis zu mehr als 1 kpc. Weiters ist der Wasserstoff in der Ebene in langen Filamenten angeordnet, die offenbar die Spiralstruktur wiedergeben. Wegen unvermeidlicher systematischer Fehler, die damit zusammenhängen, daß das Gas nicht in exakten Kreisen, sondern eher auf leicht elongierten Ellipsen um das Zentrum der

#### 4. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

Milchstraße rotiert, ist die genaue Lage der Spiralarme noch nicht bekannt.

Aus der Linienbreite entnimmt man, daß die meisten Wasserstoffwolken ziemlich kalt sind (50-100°K). Sie sind eingebettet in ein viel gleichmäßiger verteiltes sogenanntes heißes Zwischenwolken-gas von bis zu 10<sup>4</sup>K.

Sehr junge Objekte, z.B. massereiche heiße blaue Hauptreihensterne, sind stark auf die Spiralarme konzentriert. Dazu gehören auch H II Regionen. Die darin beobachteten Rekombinationslinien bzw. genauer deren Dopplerschiebung lassen Entfernungsabschätzungen zu. Zusammen mit anderen sogenannten Spiralarmindikatoren tragen sie so zur Kenntnis der lokalen Armstruktur bei.

Die nichtthermische Radiostrahlung der Milchstraße ist von besonderem historischem Interesse. Die Radioastronomie fing 1931 mit ihrer Zufallsbeobachtung an. Das wichtigste Ergebnis der bei mehreren Frequenzen durchgeführten Durchmusterungen des Himmels ist wohl, daß die ganze Milchstraße ziemlich gleichmäßig von Kosmischer Strahlung (das heißt hier, von relativistischen Elektronen) erfüllt ist, und zwar mit derselben Dichte und Energieverteilung, wie wir sie auch bei der direkten Beobachtung der Kosmischen Strahlung, die auf die Erde einfällt, finden können.

Auch der Kern der Milchstraße ist - durch die Radioquelle Sag A - radioastronomisch definiert. Der Kern ist, verglichen mit manchen anderen Galaxien, nur äußerst "sanft" aktiv. Es gibt aber z.B. um das Zentrum herum Gasexpansion, die zweifellos ein temporäres Phänomen sein muß, denn es kann ja nicht immer aus dem Kern nur etwas herauskommen. Ob es im Kern ein kleines Schwarzes Loch oder vielleicht einen supermassiven Stern gibt, ist nicht bekannt.

#### V. NEUTRALER WASSERSTOFF IN ANDEREN GALAXIEN

Beobachtung der 21-cm-Linie. Die Linienintensität läßt auf die Wasserstoffmasse schließen, das Linienprofil (die Verteilung der Intensität auf verschiedene Frequenzen) auf die Kinematik (Bewegung) des Wasserstoffgases. Entfernte Galaxien (bis etwa 50 Mpc) werden von der Teleskopkeule ganz erfaßt; man kann also nur wenig Information gewinnen, vor allem gesamte H I-Menge  $M_H$  und maximale Rotationsgeschwindigkeit. Aber aus dieser folgt die Gesamtmasse  $M$  der Galaxie (je größer die Masse, desto schneller muß das Gas rotieren). Das Verhältnis  $M_H/M$  ist vor allem vom Hubble-Typ der Galaxie abhängig. Für große und kleine Galaxien gilt gleichermaßen: Elliptische Galaxien enthalten wenig H, Spiralgalaxien viel (bis zu 30 % der Gesamtmasse).

Nahe Galaxien lassen Detailuntersuchungen zu: Verteilung des H, Rotationskurve des H (diese ist im wesentlichen identisch mit der Rotationskurve der Sterne, aber in einigen Fällen genauer und weiter in den Außenbereich hinein zu bestimmen als die der Sterne). Die wichtigsten Ergebnisse für Spiralgalaxien sind: Die Zentralbereiche der Galaxien (central bulge) enthalten wenig Gas. In den äußeren Bereichen sind Gas und Sterne etwa gleich verteilt. Gas findet man auch noch weiter außen, wo Sterne (Photographie) nicht mehr nachweisbar sind. Auch dort ist die Rotationskurve noch flach, was bedeutet, daß immer noch nicht die gesamte Galaxienmasse erfaßt ist. Offenbar sind viele Galaxien erheblich größer und massereicher (Faktor 10!) als früher angenommen worden war. Damit verschwindet weitgehend die frühere

## 5. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

Diskrepanz zwischen direkten (Untersuchung der einzelnen Galaxie auf optischem Weg) und indirekten (Virialsatz, Geschwindigkeitsdispersion) Massenbestimmungen in Galaxienhaufen.

### VI. NORMALE GALAXIEN

Darunter versteht der Radioastronom Galaxien, die nur mäßig starke Radiostrahler sind und ein kleiner Verhältnis Radioleistung/Leuchtkraft von  $10^{-4}$  bis höchstens  $10^{-2}$  haben. Etwas willkürliche Grenze:  $10^{34}$  W Radioleistung (etwa  $2 \times 10^7 L_{\odot}$ ). Ein typisches Beispiel ist unsere Milchstraße mit einem mittleren Magnetfeld von 1 Mikrogauß. Ein Magnetfeld ist an das Vorhandensein von interstellarem Gas gekoppelt, da nur darin die nötigen elektrischen Ströme fließen können. Kosmische Strahlung wiederum bedarf eines Magnetfelds, um zusammengehalten zu werden. Daraus folgt bereits das generelle Schema: Elliptische Galaxien enthalten gewöhnlich wenig Gas, daher wenig Magnetfeld und wenig Kosmische Strahlung. Sie sind daher gewöhnlich schwache Radiostrahler (Ausnahme: Radiogalaxien, siehe unten).

Spiralgalaxien enthalten viel interstellares Gas, daher sind sie meist Radiostrahler. Die Strahlung kommt aus dem gesamten Volumen. Es gibt eine starke Korrelation zwischen Größe und Radioleistung. Dementsprechend kann man die Radioleistung aus der optischen Helligkeit voraussagen. Natürlich gibt es Ausnahmen, sodaß man eine solche Voraussage nicht in jedem einzelnen Fall als zutreffend annehmen sollte. Immerhin käme man für etwa die Hälfte aller Spiralgalaxien innerhalb eines Faktors 2 auf die richtige Voraussage.

Warum also überhaupt Radiomessungen solcher normaler Galaxien? Abgesehen von den stets interessierenden Ausnahmen kann man aus der Korrelation einen wichtigen Schluß ziehen. Das Magnetfeld ebenso wie die Kosmische Strahlung ist in den Spiralen ungefähr gleich und füllt das Galaxienvolumen.

Irreguläre Galaxien vom Magellanschen Typ enthalten meist viel interstellares Gas. Entsprechend sind sie mit großer Wahrscheinlichkeit relativ starke "normale" Radiostrahler.

Noch eine weitere interessante Parallele zur Milchstraße läßt sich ziehen. Der spektrale Verlauf der Radiostrahlung läßt sich fast immer durch ein Potenzgesetz beschreiben, d.h. die Radiointensität bei einer Frequenz ist einer Potenz dieser Frequenz proportional,  $I \sim f^{-\alpha}$ . Der Exponent wird auch Spektralindex genannt. Für normale Galaxien liegen die Indizes fast immer nahe bei  $\alpha=0.7$  mit geringer Streuung. Aus der Theorie der Synchrotronstrahlung folgt, daß man dazu in einem konstanten Magnetfeld eine Energieverteilung der strahlenden Elektronen braucht, die ebenfalls einem Potenzgesetz (Zahl der Elektronen  $N$  proportional zu einer Potenz der Energie  $E$ ,  $N \sim E^{-g}$ ) entspricht, wobei  $g=2\alpha+1$ . Für die auf die Erde auffallende Kosmische Strahlung kann dies direkt nachgemessen werden, wobei man etwa  $g=2.5$  findet. Offenbar ist nicht nur die Menge an Kosmischer Strahlung, sondern auch ihre Energieverteilung in allen Galaxien ungefähr gleich. Der Erzeugungsmechanismus für Kosmische Strahlung scheint überall im Weltall außerordentlich ähnlich zu sein.

Bei einigen nahen Galaxien (z.B. M31, M51) kann die Verteilung der Radiostrahlung im Detail studiert werden. Dabei ergibt sich durchwegs gute Übereinstimmung mit der Theorie. In den Spiral-

## 6. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

armen - genauer an der Innenkante der Arme - ist die Materie am stärksten komprimiert. Deshalb ist dort die Sternentstehungsrate am höchsten. Es gibt am meisten helle blaue Sterne. Hier ist der Spiralarm am hellsten. Die heißen Sterne ionisieren den Wasserstoff in der Umgebung. Es gibt dort die meisten und größten H II Regionen und damit auch am meisten thermische Radiostrahlung. Mit dem interstellaren Gas wird auch das Magnetfeld und die Kosmische Strahlung komprimiert. Beides führt zu einer Erhöhung der nichtthermischen Strahlung. Auch deren Maximum folgt dem Verlauf der Arme. Zudem verläuft das Magnetfeld teilweise in Armrichtung, was u.a. durch die Polarisation der nichtthermischen Strahlung nachgewiesen werden kann. Schließlich sei erwähnt, daß der Anteil der thermischen Strahlung in den Außengebieten der Galaxien gegenüber innen erhöht ist. Magnetfeld und Kosmische Strahlung fallen also etwas stärker nach außen ab als die Dichte des interstellaren Gases.

### VII. RADIOGALAXIEN

Einige Galaxien (z.B. häufig elliptische Riesengalaxien im Zentrum von Haufen) zeigen erhöhte Radiostrahlung bis herauf zu etwa  $10^{38}$  W, was etwa der optischen Leuchtkraft großer normaler Galaxien entspricht. Dies ist eigentlich ein sehr seltenes Ereignis. Die genannte Strahlungsleistung findet man z.B. nur bei etwa jeder zehnmillionsten Galaxie, aber wie bei den hellsten Sternen kann man sie noch in so großer Entfernung entdecken, daß eben doch eine ganze Reihe solcher Objekte bekannt sind. Die meisten Radiogalaxien sind jedoch erheblich schwächer.

Man kann, etwas vereinfachend, zwei Gruppen unterscheiden: Galaxien mit einer Radioquelle im Kern (kompakte, opake Quellen, aktive galaktische Kerne = AGN (active galactic nuclei)) und Jetquellen (ausgedehnte, transparente Quellen, deren Emission häufig, wenn auch nicht immer, aus zwei getrennten Bereichen außerhalb des optischen Bildes der Galaxie kommt).

a) Kompakte Quellen: Die meisten Galaxien haben zwar einen kleinen Kern, dessen Ausdehnung höchstens einige pc beträgt, und der, soweit die Winkelauflösung der Beobachtung ausreicht, durch optische Besonderheiten auffällt. Der Kern ist jedoch gewöhnlich nicht oder nur wenig aktiv. Beispielsweise sendet der Kern unserer Milchstraße, die Radioquelle Sag A, nur vergleichsweise sehr schwache Radiostrahlung aus. Manchmal wird aber im Kern ungeheuer viel Energie umgesetzt. Was genau die Aktivität triggert, ist bis heute nicht sicher bekannt. Möglicherweise handelt es sich um Schwarze Löcher. Die Kern-Radioquellen sind häufig opak (optisch dick, d.h. undurchsichtig für Radiostrahlung). Sie haben deshalb ein flaches Radiospektrum ( $\alpha$  ist klein) und sind dementsprechend bei kurzen Wellenlängen besonders auffällig. Viele sind veränderlich mit Zeitskalen von einigen Monaten bis Jahren - sie können also nicht größer sein als einige Lichtmonate bis -jahre.

Als Beispiel sei M87 = Vir A (hellste Radioquelle in Virgo) genannt. Diese elliptische Galaxie ist die hellste Galaxie des Virgoaufens. Aus dem nahezu punktförmigen Kern ist offenbar ein Strahl (jet) mit einer Länge von etwa 1 kpc und mehreren Knoten herausgeschossen worden. Nicht nur die Radiostrahlung des Kerns und des jets, sondern auch das daraus kommende Licht ist

## 7. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

### Synchrotronstrahlung.

Zu dieser Gruppe gehören auch die etwa 100 bekannten Radioquasare, die ja nichts weiter als überhelle Galaxienkerne sind. Der hellste Quasar, 3C273 (das ist die Quelle Nr. 273 im 3. Cambridger Radiokatalog) hat ebenfalls einen Radiojet, der auch Synchrotronlicht aussendet. Er beginnt bei etwa 25 kpc Entfernung vom Zentrum und ist etwa ebenso lang, aber nicht breiter als 1 kpc. Andere Quasare sind "radiatoruhig". Das heißt nicht, daß sie keine Radiostrahlung aussenden, sondern nur, daß ihre Radiostrahlung nicht mehr nachweisbar ist. In den meisten Fällen könnte sie trotzdem weit über der von normalen Galaxien liegen.

b) Jetquellen: Viele Radiogalaxien, darunter die hellsten überhaupt, zeigen eine Doppel- (manchmal auch eine Mehrfach-) - Struktur. Die Strahlung kommt aus zwei Gebieten, die etwa symmetrisch zum Zentrum, aber weit außerhalb des optischen Bereichs der Galaxie liegen, oft bis 100 kpc entfernt. Die Radiogalaxie mit dem Namen DA254 ist eines der größten Einzelobjekte im Weltall: Der räumliche Abstand der beiden Radioquellen dürfte bei 6 Mpc (fast 10mal der Abstand zu M31) liegen. Optisch sind die Quellen (außer in den seltenen Fällen, in denen die Synchrotronstrahlung bis zu den kurzen Lichtwellen reicht) in keinem einzigen Fall nachweisbar. Es scheint dort keine normale Materie (Gas, Sterne) zu geben.

Man stellt sich vor, daß die beiden Radioquellen aus dem Galaxienkern mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen worden sind. Insofern besteht natürlich zwischen den beiden Arten von Radiogalaxien eine enge Beziehung; sie sind eigentlich nur verschiedene Ausdrucksformen ein und desselben Phänomens der Kernaktivität. Das Ausstoßen kann mehrfach geschehen. Ein Beispiel ist NGC5128 - Cen A (eine ungewöhnliche elliptische Galaxie mit einem kräftigen Absorptionsband aus Staub). Die innerste (jüngste) Doppelquelle ist noch in Kernnähe, die nächste am Außenrand der Galaxie. Weitere 3 oder 4 Doppelquellen oder Reste davon sind weiter außen bis zu einer Entfernung etwa des 40fachen Galaxienradius.

Von besonderem Interesse ist Cyg A, die hellste Radiogalaxie überhaupt und das erstgefundene Beispiel einer Doppelstruktur. Sie ist inzwischen in allen Einzelheiten untersucht worden. Wie bei vielen anderen Radiogalaxien auch sind die Emissionsgebiete wesentlich stärker strukturiert als ursprünglich nach ersten Messungen mit kleinen, schlechtauflösenden Teleskopen angenommen worden war. Jedes der Emissionsgebiete hat auf der Vorderseite (der von der Zentralgalaxie weggewandte Seite) ein fast punktförmiges intensives Zentrum ("hot spot"). Daran schließt sich beidseits ein schmaler Emissionstreifen, der als Stoßwelle bei der Wechselwirkung mit intergalaktischem Gas, durch das der Jet mit hoher Geschwindigkeit läuft, gedeutet wird. Ein ausgedehntes und unregelmäßig geformtes Gebiet schwacher Emission schließt sich nach hinten, in Richtung zur Zentralgalaxie, an. Dies ist sozusagen das, was beim Nach-außen-fliegen übrigblieb.

Die Vielfalt der bei Radiogalaxien auftretenden Formen ist verwirrend. Eine große Rolle spielen heute für die Theorie der Wechselwirkung mit intergalaktischem Gas die sogenannten head-tail Quellen, die nur einen Jet mit ausgeprägtem hot spot (Kopf) und langem, schmalen, oft gebogenen Ausläufer (Schwanz) haben.

## 8. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

Einige Radiogalaxien (Cen A war ein Beispiel) haben offenbar mehrere Jet-Ausbrüche hinter sich gebracht. Man findet dann Doppelstrukturen auf verschiedenen Abstandsskalen. Mit einem einzelnen Radioteleskop würde man z.B. die Struktur im Bereich Bogenminuten bis Grade beobachten, mit einem kleinen Interferometer die Struktur im Bereich von Bogensekunden, und mit der interkontinentalen Interferometrie VLBI die innersten Strukturen im Bereich von Millibogensekunden. In den meisten Fällen ist dabei interessanterweise die Strukturachse stets dieselbe über einen Bereich von 1 zu 1 Million (z.B. 1 Mpc bis 1 pc) hinweg. Da ein Jet, der von der Muttergalaxie 1 Mpc (= 3 Mio Lichtjahre) entfernt ist, vor mindestens 3 Millionen Jahren ausgestoßen worden sein muß, heißt dies, daß die Galaxie über Jahrtausende hinweg ein Richtungserinnerungsvermögen haben muß. Die Ursache wird in einer raschen Rotation des Kerns vermutet. Wegen des Satzes von der Erhaltung des Drehimpulses bleibt die Rotationsachse konstant. Die Jets werden in der Richtung dieser Achse ausgestoßen.

Manchmal scheint sich auch die Ausstoßrichtung im Laufe der Zeit zu drehen. Hier könnte es sich um eine Ablenkung der Jet-Richtung durch intergalaktisches Gas handeln.

## VIII. SUPERLUMINALE BEWEGUNG

Darunter versteht man eine relative Bewegung zweier Objekte mit einer die Lichtgeschwindigkeit übertreffenden Geschwindigkeit. So etwas muß natürlich ein Scheineffekt sein, denn nichts kann sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Beobachtet wird folgendes: Einige Radioquellen haben 2 oder 3 (mit VLBI beobachtete) fast punktförmige Komponenten mit Abständen in der Größenordnung von Millibogensekunden, die sich innerhalb weniger Monate bis Jahre deutlich ändern können. Aus der Distanz (erschlossen aus der Rotverschiebung nach Hubbles Gesetz) schließt man auf eine Expansionsgeschwindigkeit  $> c$ . Die anerkannteste Deutung involviert relativistische Jets, d.h. solche, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus dem Kern ausgestoßen worden sind.

## IX. ZÄHLUNGEN, KOSMOLOGIE

Die Radiostrahlung normaler Galaxien kann in größerer Entfernung nicht mehr nachgewiesen werden. Sie sind also im Radiobereich nicht so weit sichtbar wie im optischen Bereich. Bei extremen Radiogalaxien ist dies gerade umgekehrt: Sie verschwinden zuerst im Optischen. Man sieht dann eine Radioquelle ohne optischen Widerpart (sog. Leerfelder).

Solche Beobachtungen haben dazu geführt, daß immer wieder behauptet worden ist, man könne mit Radioteleskopen weiter in den Weltraum schauen als mit optischen. Dies ist offenbar für Radiogalaxien richtig, nicht aber für normale Galaxien. Man könnte argumentieren, daß die am weitesten entfernten Objekte, die man überhaupt auf irgendeine Weise beobachten kann, Radioobjekte seien. Das mag vielleicht sogar richtig sein, aber nachprüfen kann man es nicht, denn aus Radiokontinuumsbeobachtungen kann man keine Entfernung bestimmen. Dazu bedarf es immer der optischen Identifizierung und der Messung der Rotverschiebung

## 9. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien

mittels optischer Linien. Die weitestentfernten Objekte, die wir derzeit kennen, sind jedenfalls (optische) Quasare mit großer Rotverschiebung, von denen einige Radioquellen sind, andere nicht.

Zurück zu den Leerfeldern. Nimmt man an, daß die meisten schwachen Radiopunktquellen solche entfernten Radiogalaxien sind (dies ist allerdings nach wie vor nicht ganz sicher), so kann man durch Zählungen den entfernten Raum ausforschen. Die beobachtbare Helligkeit eines Objekts sinkt mit dem Quadrat der Distanz, das durchmusterte Volumen steigt mit der dritten Potenz der Distanz. Wir erwarten deshalb, daß die Anzahl der Radioquellen mit der Potenz  $3/2=1.5$  der abnehmenden Grenzhelligkeit der Beobachtung zunimmt.

Findet man z.B. zu wenig schwache Objekte, so gibt es 2 Deutungsmöglichkeiten: Entweder ist die Häufigkeit der Objekte in der großen Entfernung, in der sich die meisten dieser schwachen Objekte befinden (genauer: vermutlich befinden!), zu klein (das nennt man kosmologische Entwicklung, da man zugleich in die Vergangenheit zurückschaut, also sagen könnte: Es gab früher weniger Objekte), oder, zweitens, das beobachtete Volumen ist kleiner als angenommen. In diesem Fall ist dann die euklidisch-geometrische Annahme, daß das Volumen einer Kugel mit der dritten Potenz des Radius ansteigt, offenbar falsch. Man würde schließen, daß das Weltall geschlossen ist, und im Prinzip könnte man sogar aus dem Verlauf des Defizits an Objekten auf den Radius des Weltalls schließen.

Trotz zahlreicher Untersuchungen dieser Art ist das Ergebnis bisher unklar. Es ist ja bekannt, daß wir nach wie vor nicht wissen, ob das Weltall offen oder geschlossen ist. Hier liegt das vor allem an den beiden Schwierigkeiten, (a) zwischen kosmologischer Entwicklung und Geometrieeffekten zu unterscheiden und (b) schwache Radioquellen genügend zuverlässig zu zählen. Es ist aber klar geworden, daß es kosmologische Entwicklung gibt. Z.B. muß es früher mehr helle Quasare gegeben haben als heute (was zugleich heißt: als in unserer "näheren" Umgebung).

## X. LITERATUR

Leider gibt es kein einziges Buch in deutscher Sprache, das einen vollständigen Überblick gibt. Einzelnes kann in vielen allgemein-astronomischen Büchern gefunden werden.

Spezialbücher:

J.S.Hey: Das Radio Universum. Verlag chemie/Weinheim 1974

K.Rohlf: Radioastronomie. Wiss.Buchgem.Darmstadt 1980 (Erträge der Forschung Band 137)

K.Rohlf: Tools of Radio Astronomy, Springer Verlag 1986

G.L.Verschuur, K.I.Kellermann: Galactic and Extragalactic Radio Astronomy. Springer Verlag (2. Auflage soll Mai 1988 erscheinen). Dieses Buch ist in Bezug auf die Ergebnisse wohl das ausführlichste Werk.

G.L.Verschuur: The Invisible Universe. Springer 1974

IAU Symposium No 77: Structure and Properties of Nearby Galaxies.

D.Reidel 1978. Herausgeber: E.Berkhuijsen, R.Wielebinski

IAU Symposium No 100: VLBI and Compact Radio Sources. D.Reidel 1984. Herausgeber R.Fanti, K.Kellermann, G.Setti

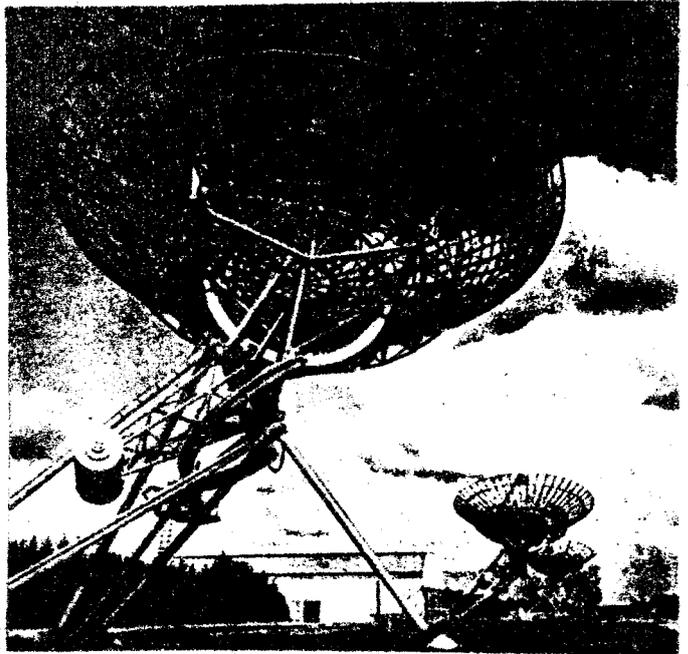
## XI. ABBILDUNGEN ZU DEN ABSCHNITTEN I - IX

10. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien



II.1: 100m - telescope at Effelsberg (MPI für Radioastronomie, Bonn)

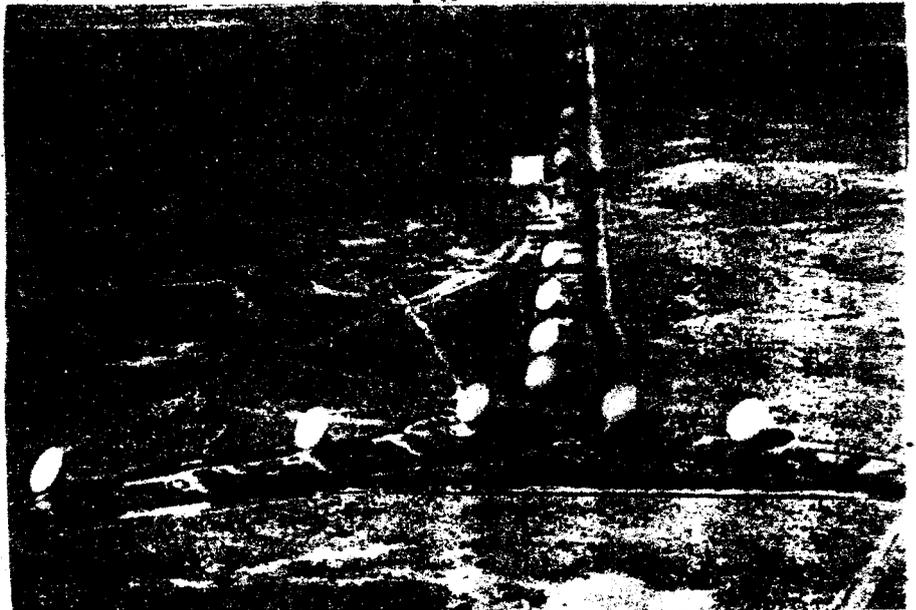
II.2: Large modern mm wave telescope: 30m - telescope at Pico Veleta (MPI für Radioastronomie, Bonn) →



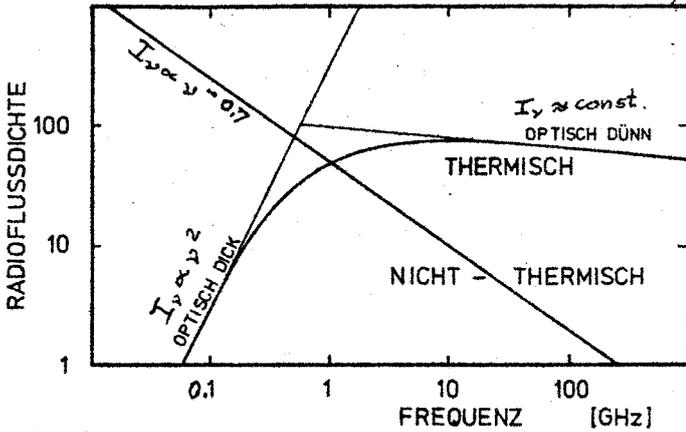
II.3: Westerbork aperture synthesis telescope (WRST).



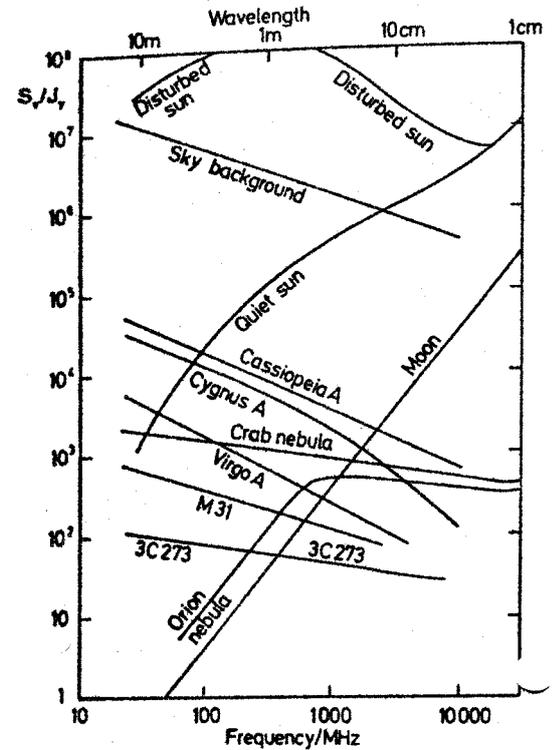
II.4: The Very Large Array at Socorro, New Mexico. Aerial view along SW-arm. The prominent structure is the Antenna Assembly Building. The N-arm branches off to the lower right, S-arm extends to the left. The array is shown in its concentrated configuration. (NRAO/AUI)



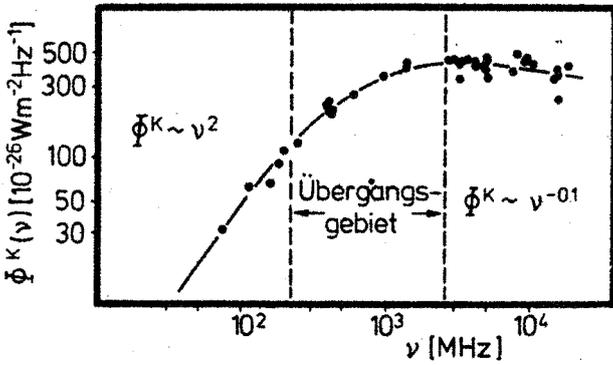
# 11. Fortsetzung Gastvortrag: Radioastrahlung von Galaxien



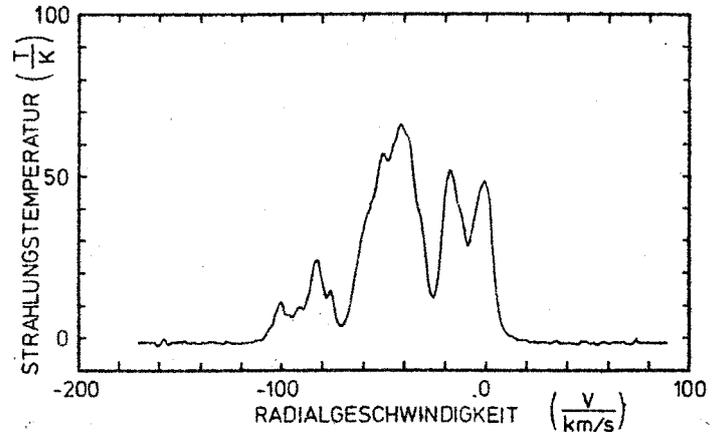
III.1: Radiospektrum einer thermischen und einer nichtthermischen Radioquelle. Die thermische Quelle ist im Bereich niedriger Frequenzen optisch dick und zeigt einen spektralen Verlauf der Flußdichte, wie es das Rayleigh-Jeanssche Gesetz beschreibt. Für Frequenzen oberhalb 10 GHz sind fast alle Quellen optisch dünn und haben dann einen anderen Spektralverlauf. Nichtthermische Quellen mit Synchrotronstrahlung haben meistens ein glattes Potenzspektrum, das allerdings in manchen Fällen bei niedrigen und/oder hohen Frequenzen abknickt.



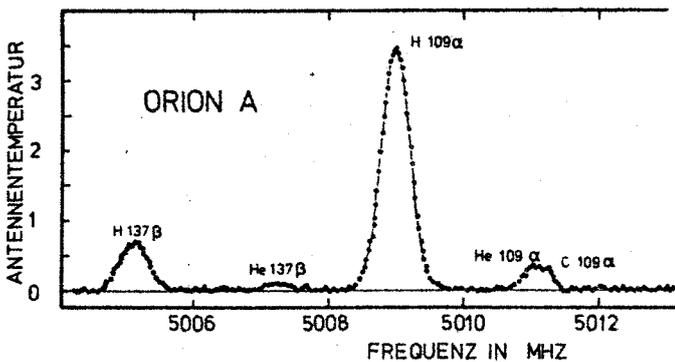
III.3: The spectral distribution of various radio sources



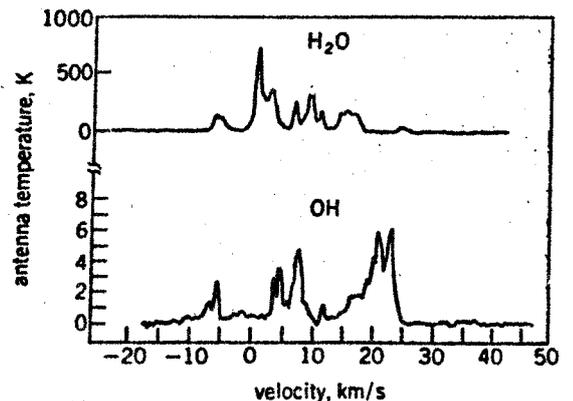
III.2: Spektralverlauf des beobachteten kontinuierlichen Radiostrahlungsflusses vom Orionnebel  $\phi^K(\nu)$ .



III.4: Emissionslinienstrahlung des neutralen Wasserstoffs bei  $\lambda = 21$  cm im Perseus. Die drei großen Maxima zeigen Gas in den drei Spiralarmen an (lokaler Arm  $RV = -10 \text{ km s}^{-1}$ , Perseus-Arm  $RV = -50 \text{ km s}^{-1}$  und der äußere Arm  $RV = -80 \text{ km s}^{-1}$ ), die kleineren Maxima weisen auf Feinstruktur in der Verteilung des Gases und im Geschwindigkeitsfeld hin.

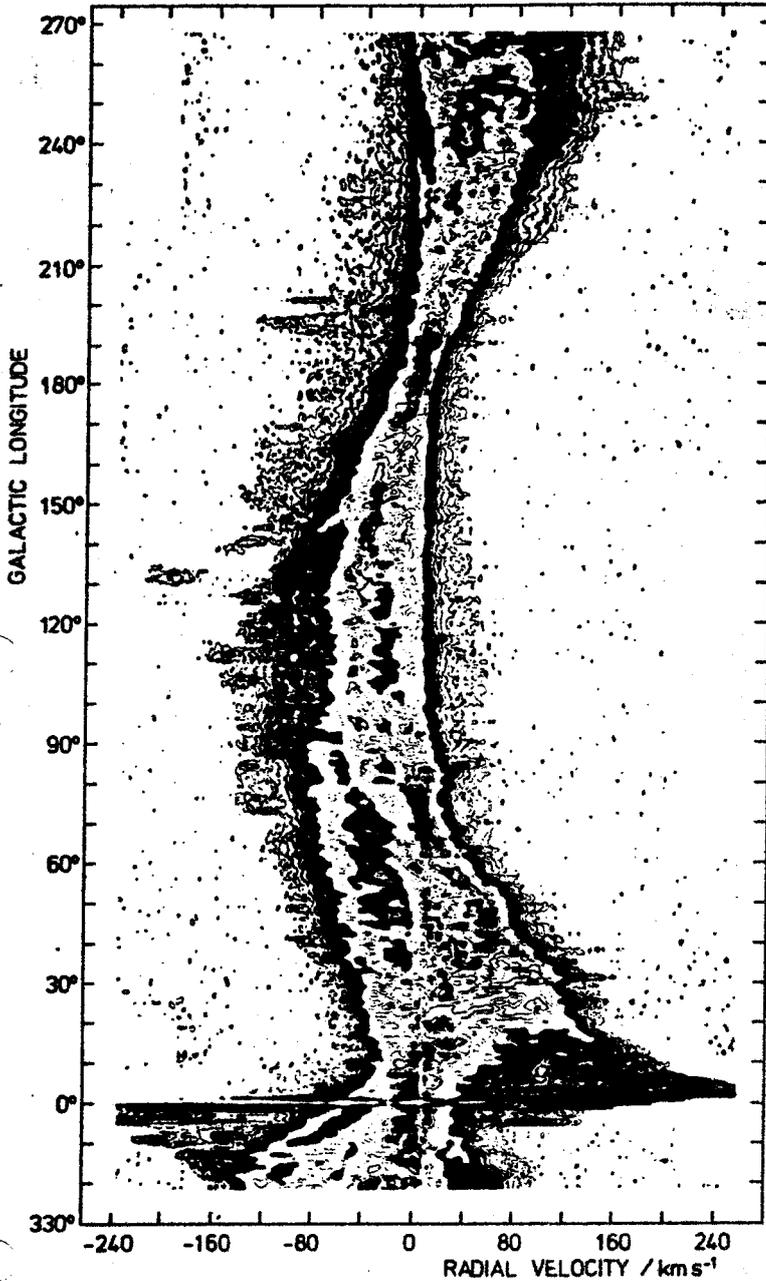


III.5: Rekombinationslinien des Orionnebels bei  $\lambda = 6$  cm. Außer den  $109\alpha$ -Übergängen des Wasserstoffs H, Helium He ist noch die Kohlenstofflinie C  $109\alpha$  angedeutet. Zusätzlich sind noch die  $137\beta$  Übergänge von H und He sichtbar. Die gemessenen Intensitäten und Intensitätsverhältnisse erlauben eine recht genaue Bestimmung von sowohl der Häufigkeitsverteilung der Elemente als auch der Gastemperatur. (Nach Messungen mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg.)

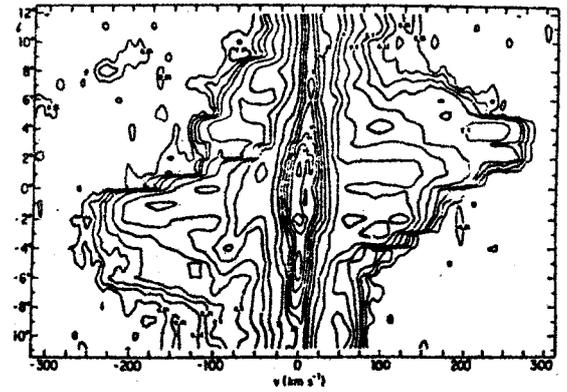


III.6: Maser-amplified spectral lines of hydroxyl (OH) and water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) in the great nebula in Orion. Antenna temperature, a measure of the intensity of radiation received by the radio telescope, is plotted against the radial velocity inferred from the Doppler shift of the source. (National Radio Astronomy Observatory)

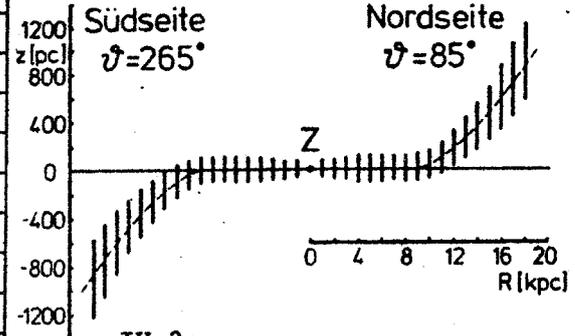
12. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien



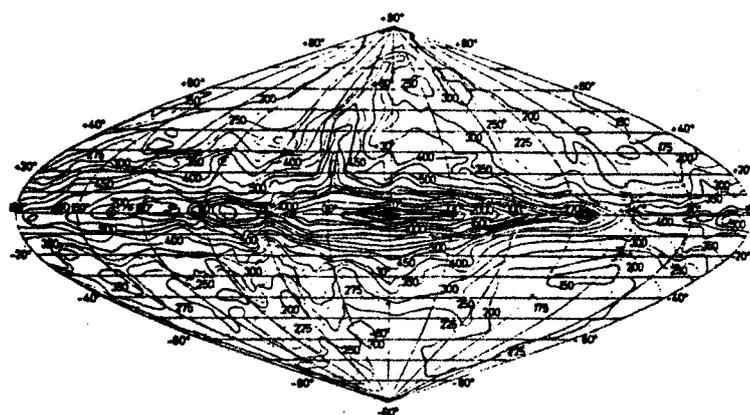
IV. 1: The brightness temperature  $T_b$  as function of radial velocity (relative to LSR) along the galactic equator ( $b = 0$ ). Near  $l = 0$  and  $l = 0.6$  the effects of absorption are clearly seen (after Burton)



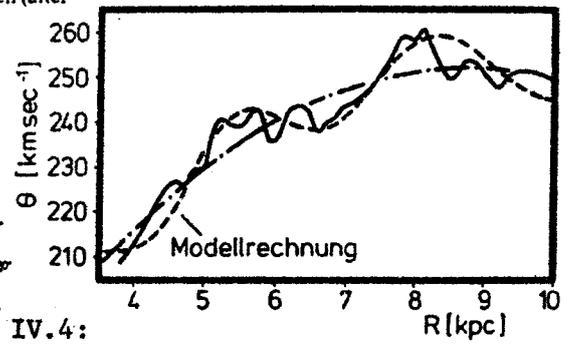
IV. 2: Konturenkarte der Strahlungstemperatur  $T_b(v, l)$  für die 21cm-Linienemission des Zentralgebietes aus Richtungen mit den galaktischen Breiten  $b = -l \text{ tg } 22^\circ$ . (Nach W.B. Burton u. H.S. Liszt).



IV. 3: Schnitt durch das Milchstraßensystem senkrecht zur galaktischen Ebene in den galaktozentrischen Längen maximaler Verbiegung der HI-Schicht  $\vartheta = 85^\circ$  und  $265^\circ$ . Die Ordinatenkala ( $z$ ) ist gegenüber der Abszissenkala ( $R$ ) um den Faktor 10 gedehnt; die Längen der vertikalen Striche entsprechen der Dicke  $2h$  der HI-Schicht. Die Darstellung schematisiert die wirklichen Verhältnisse: Tatsächlich verlaufen sowohl die Verbiegung wie auch die Schichtdicke auf Nord- und Südseite etwas verschieden.

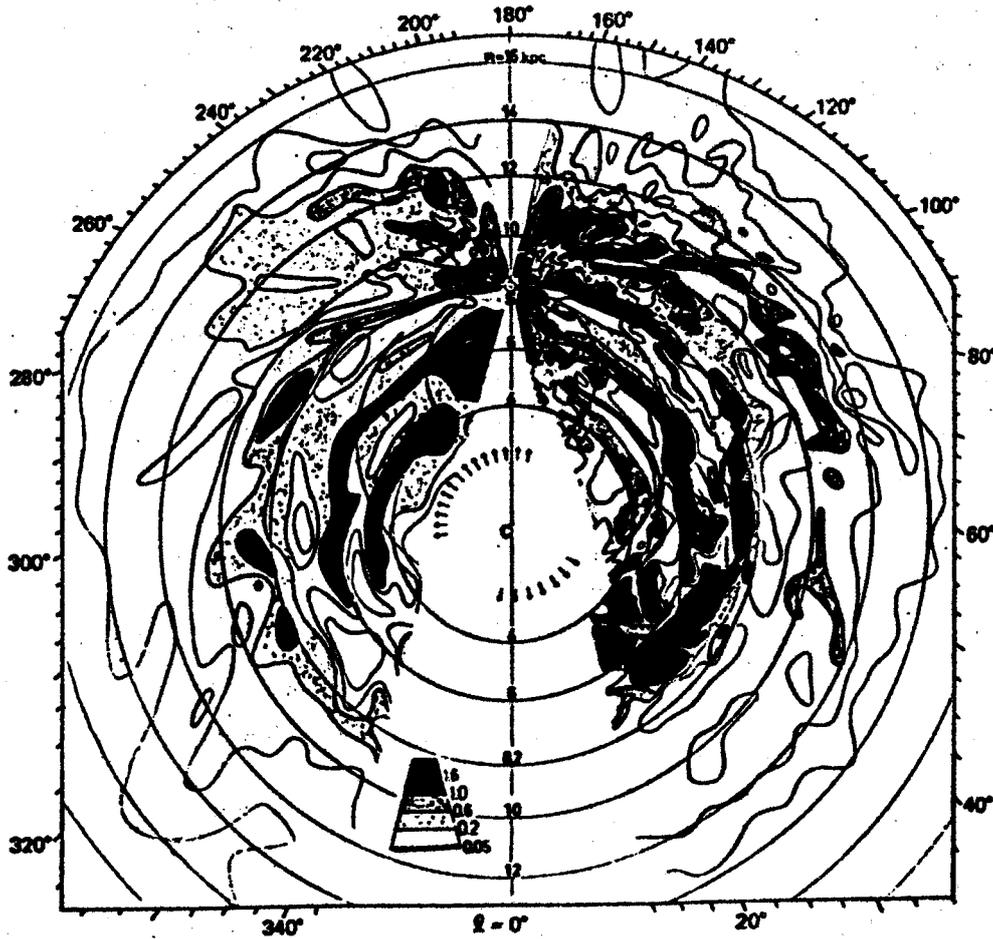


IV. 5: Verteilung der galaktischen kontinuierlichen Radiofrequenzstrahlung des Meterwellenbereiches für  $\nu = 150 \text{ MHz}$  ( $\lambda = 2 \text{ m}$ ) über die ganze Sphäre in galaktischen Koordinaten. Die eingetragenen Zahlen ohne Vorzeichen sind Strahlungstemperaturen [K]. Die Karte ist aus drei Durchmusterungen gewonnen worden, wodurch die Winkelauflösung nicht ganz einheitlich ist und etwa zwischen  $2^\circ$  und  $4^\circ$  liegt. (Nach T.L. Landecker und R. Wielebinski).

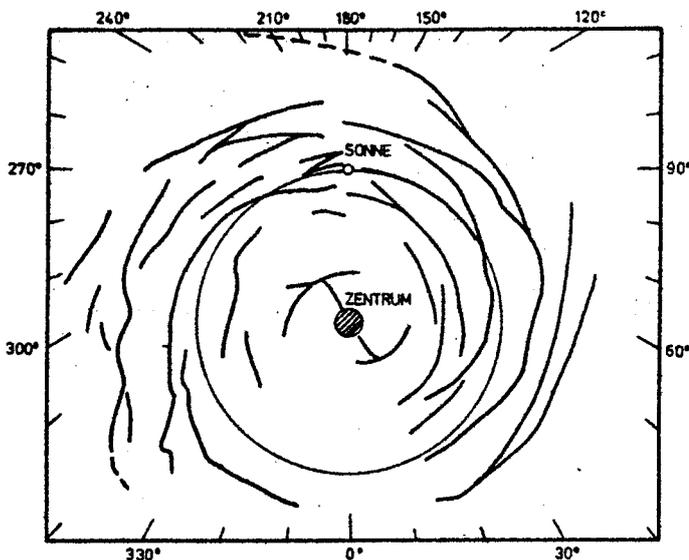


IV. 4: Approximation der aus Beobachtungen im Bereich  $l = 22^\circ \dots 70^\circ$  abgeleiteten Rotationskurve (ausgezogen) durch einen Verlauf (gestrichelt), der sich bei Abweichungen von der mittleren, glatten Kurve (strichpunktirt) ergibt, wie sie nach der Dichtewellen-Theorie der Spiralstruktur zu erwarten sind. (Nach W.B. Burton).

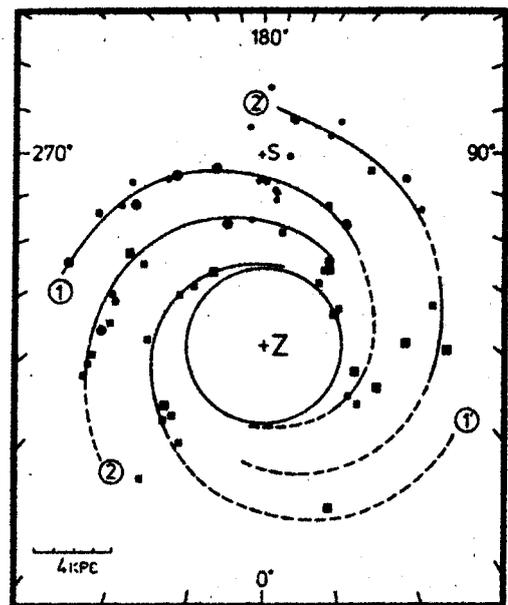
13. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien



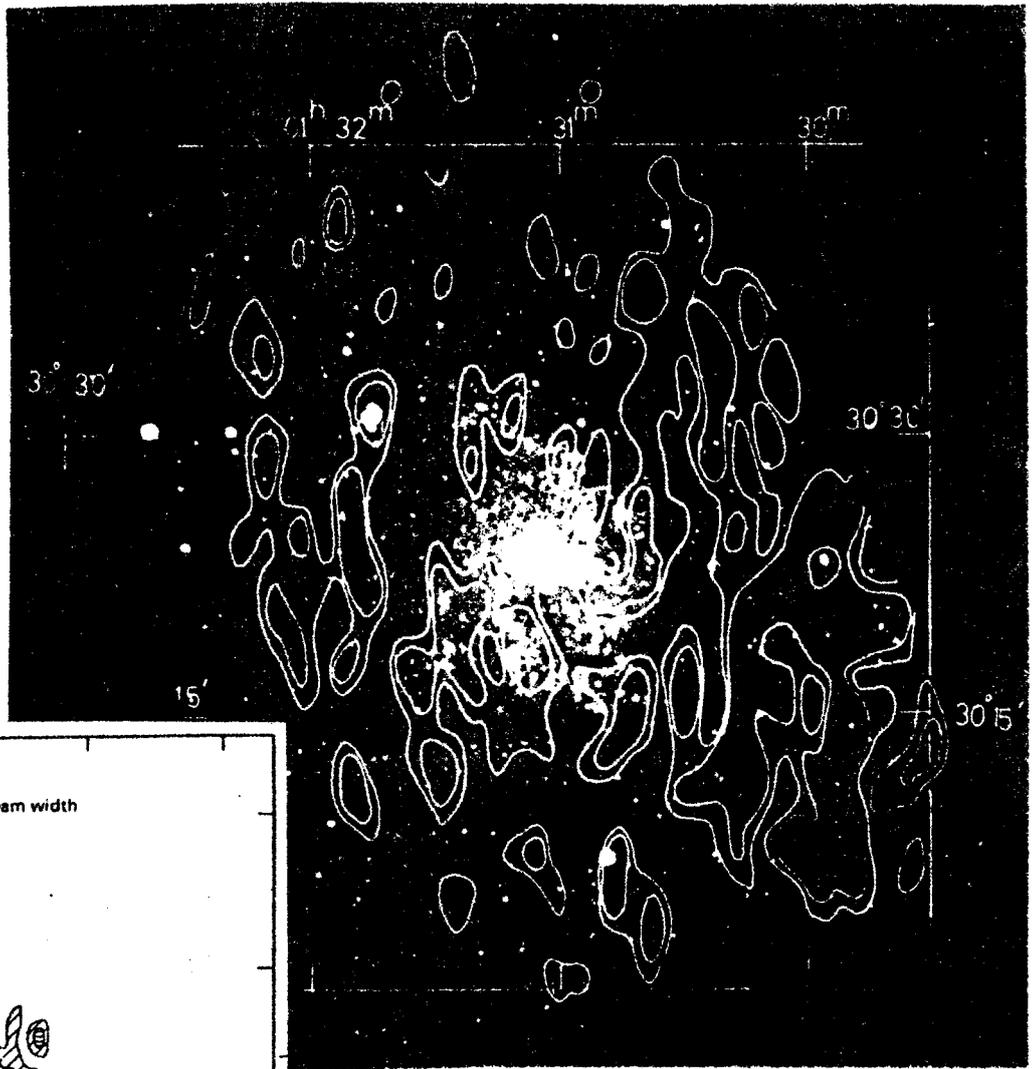
IV.6: Distribution of neutral hydrogen densities in the galactic plane as determined from the Dutch and Australian surveys. This map is difficult to interpret and may contain serious errors. Nevertheless, it would be difficult to produce an improved version valid over the whole galactic plane. (Oort et al., 1958. MNRAS, 118.379).



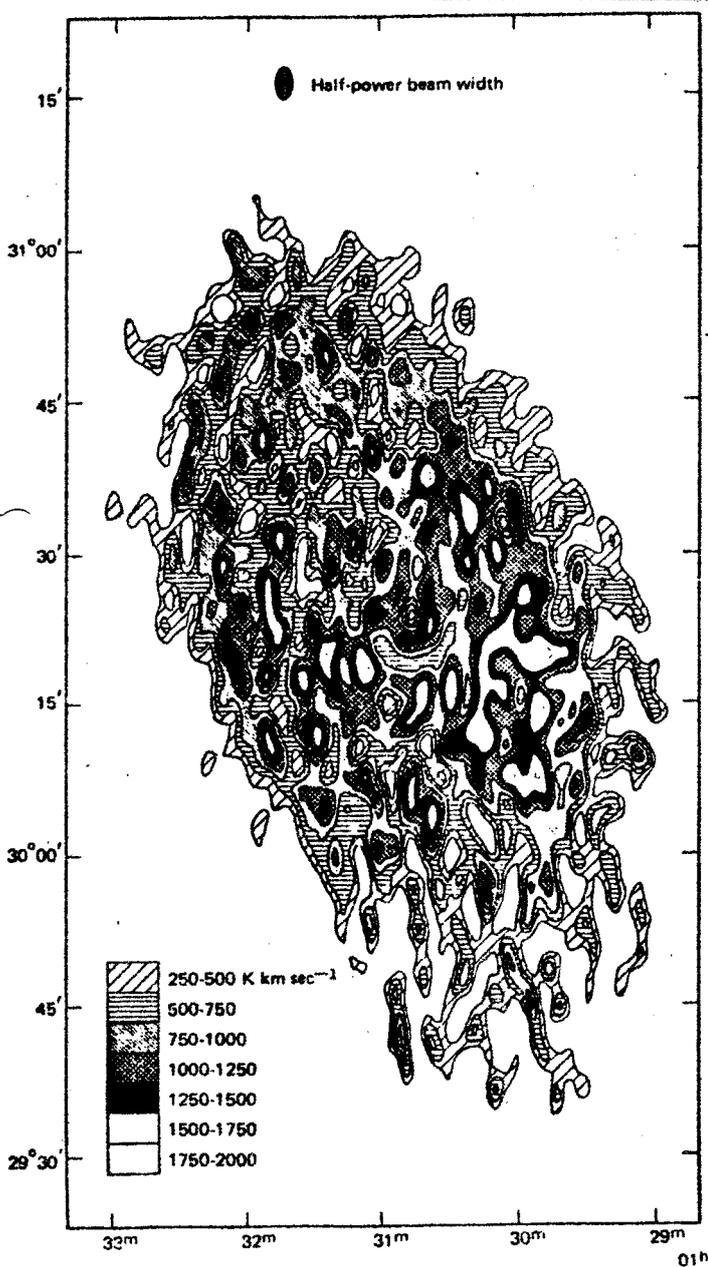
IV.7: Die großräumige Spiralstruktur der Milchstraße aus 21-cm-Linienmessungen des neutralen Wasserstoffs. Da Annahmen über die Struktur des Geschwindigkeitsfeldes in die Aufstellung dieses Diagramms eingehen, ist dies Bild nur als erster Anhalt zu werten.



IV.8: Verteilung von 60 „Riesen-HII-Regionen“ in der galaktischen Ebene. Kreisförmige Symbole: Optisch erfasste HII-Regionen, Quadrate: HII-Regionen mit Entfernungen nach Radiobeobachtungen. Große Symbole: Anregungsparameter  $u > 200 \text{ pc cm}^{-2}$ , kleine Symbole:  $u = 100 \dots 200 \text{ pc cm}^{-2}$ . Die versuchsweise eingepaßten vier Spiralarme sind logarithmische Spiralen in galaktozentrischen Polarkoordinaten:  $R = R^0 \exp(\alpha\theta)$  mit  $\theta =$  galaktozentrische Länge. Der für  $\alpha$  gewählte Wert entspricht einem Neigungswinkel der Spiralen gegen einen konzentrischen Kreis von  $13.5^\circ$  (Winkel  $\psi$  in Abb. V.5). Die üblichen Bezeichnungen der Spiralarme sind: 1 Sagittarius-Carina-Arm, 2 Scutum-Crux-Arm, 1' Norma-Arm, 2' Perseus-Arm. Die Position der Sonne ist durch S bezeichnet. (Nach Y.M. Georgelin, Y.P. Georgelin und J.-P. Sivan):

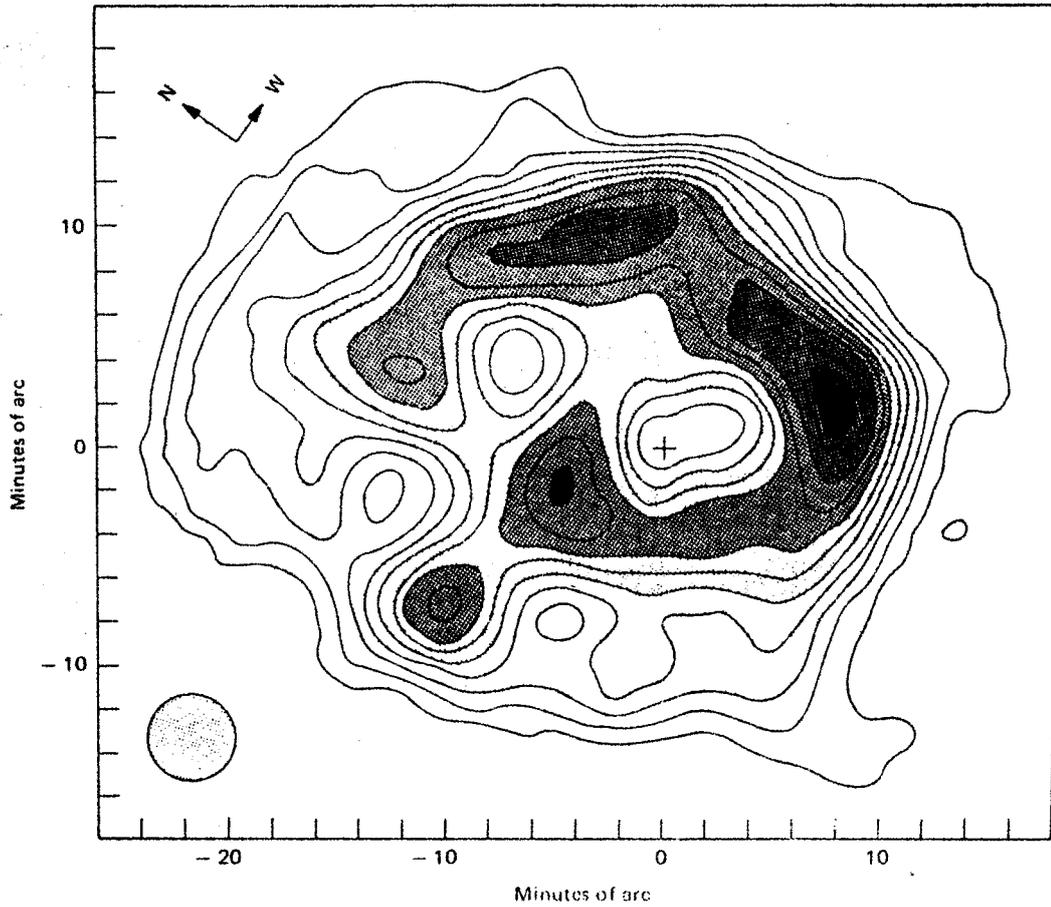


V.2: Superposition of the HI distribution of M33 on a red print showing mainly the HII regions.

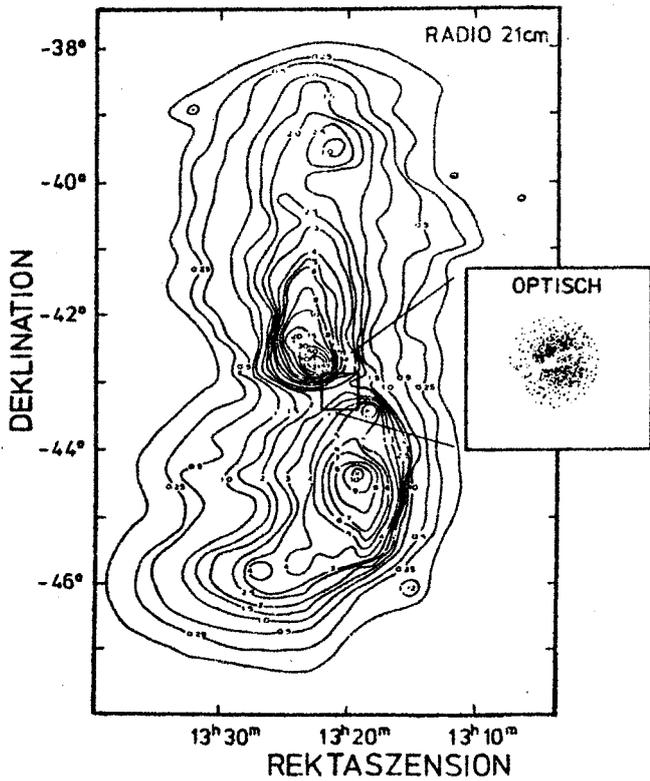


V.1: Integrated HI brightness in M33 to an angular resolution of 1,5 x 3 minutes arc.

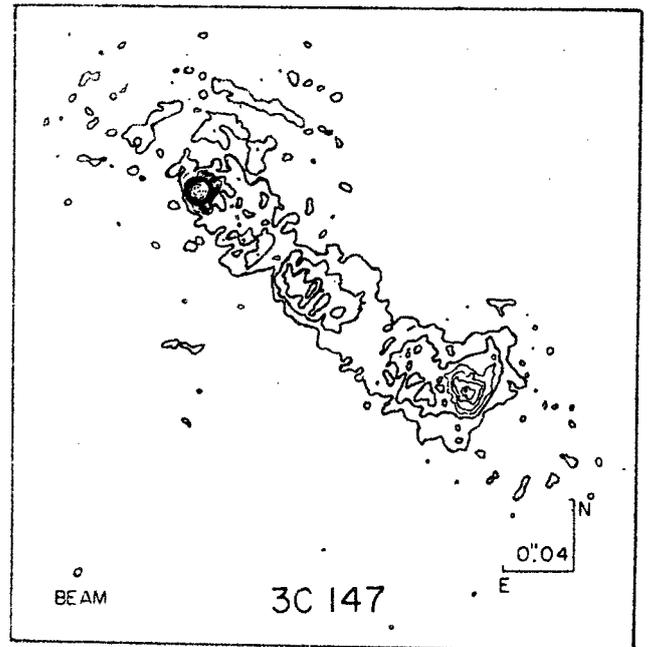
15. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien



V.3: Integrated HI brightness in M101 to an angular resolution of 4 minutes arc.

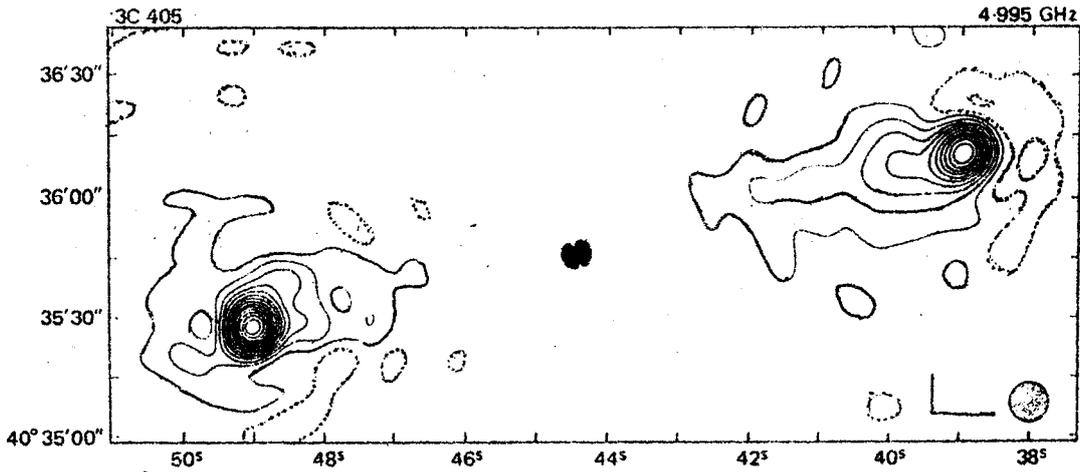


VII. 1: Isophotenkarte der Radiogalaxis Cen A = NGC 5128 bei  $\lambda = 21$  cm. Eine Skizze der optischen Ansicht ist eingefügt. (Nach Messungen mit dem 64-m-Teleskop in Parkes/Australien.)



VII. 3: A VLBI map of the quasar 3C147 at 1.7 GHz made using global fringe-fitting technique of 10 antennas. The resolution is 0.004

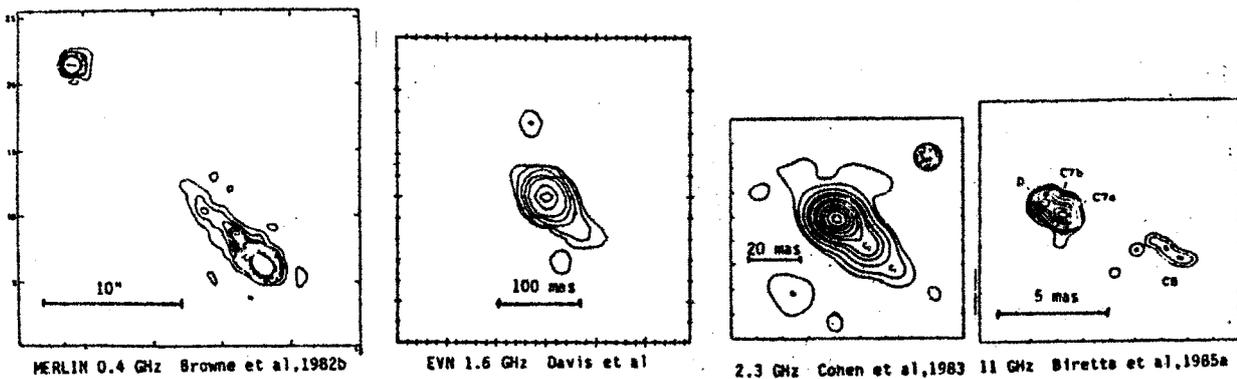
16. Fortsetzung Gastvortrag: Radiostrahlung von Galaxien



VII. 2: Brightness distribution of the intense radio galaxy Cygnus A at 6 cm observed with the 6-second-of-arc beam of the Cambridge 1-mile aperture synthesis radio-telescope. [Taken from Mitton and Ryle (1969), *Monthly Notice Roy. Astron. Soc.* 146:221].

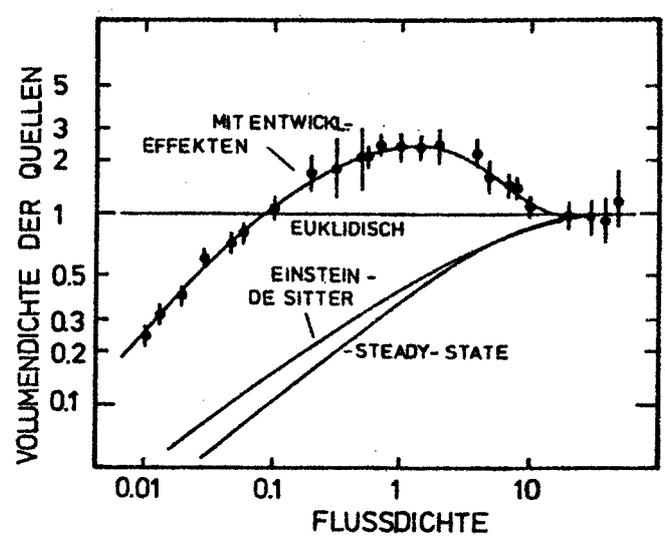
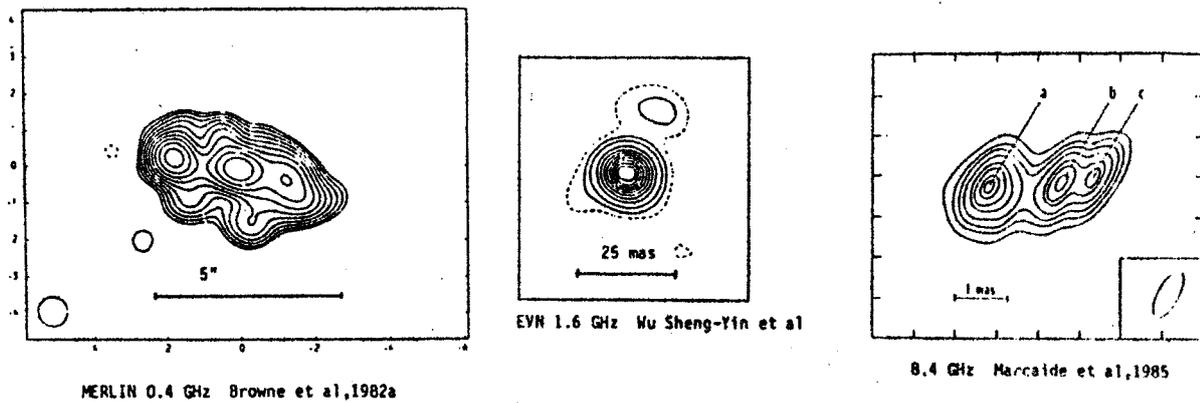
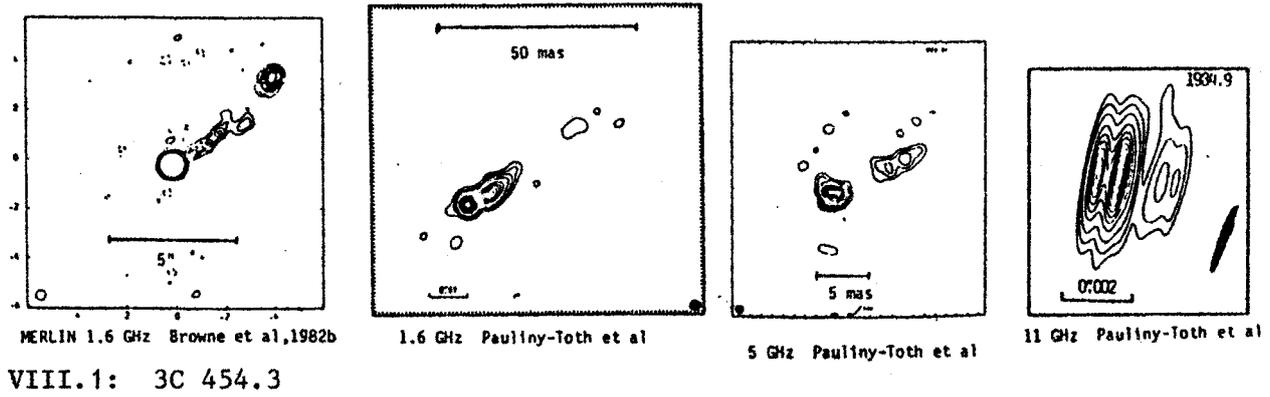


VII. 4: Radio photograph of the sources 3C129 and 3C129.1 obtained with the 21-second-of-arc beam of the Westerbork Synthesis Radio Telescope at 21 cm. (Miley, private communication.)



VII. 5: 3C 273

17. Fortsetzung Gastvortrag: Radioastrahlung von Galaxien



IX. 1: Gang der Volumendichte von Radioquellen mit der Entfernung. Als Maß der Entfernung ist die gemessene Flußdichte einer mittleren Radioquelle aufgetragen. Während in einem Euklidischen Raum ohne Entwicklung diese Dichte konstant sein sollte, muß in einem relativistischen Raum wegen des Zusammenspiels von Raumkrümmung und Lichtausbreitung die scheinbare Dichte abnehmen. Die Beobachtung zeigt einen Verlauf, der nur unter Zuhilfenahme von Entwicklungsannahmen gedeutet werden kann.

Univ. Prof. Dr. Jörg Pfeleiderer  
 Vorstand des Instituts für  
 Astronomie der Universität  
 Innsbruck  
 Technikerstraße 15  
 A-6020 Innsbruck

## Gastvortrag: STAUB IN GALAXIEN

Staub spielt eine wichtige Rolle beim Beschreiben des physikalischen und chemischen Zustandes der interstellaren Materie in Galaxien. Staub enthält einen signifikanten Anteil der interstellaren schweren Elemente und trägt damit zur Kühlung des interstellaren Gases bei. Auch beim Kollaps einer protostellaren Gaswolke beeinflusst Staub die physikalischen Prozesse. In sogenannten *aktiven Galaxien* hat Staub einen wichtigen Anteil an der enormen Infrarot-Leuchtkraft dieser Objekte, die die der Milchstraße oft um das 1000 fache übersteigen.

Zum Leidwesen aller beobachtender Astronomen bewirkt das hohe Absorptionsvermögen von Staub im visuellen und ultravioletten Spektralbereich Unsicherheiten in der physikalischen Interpretation von Strahlungsquellen (Sterne) innerhalb/hinter Staubwolken. Die durch das Absorptionsvermögen des Staubes bedingte Abschwächung des Sternlichtes führt zu einer systematischen Unterschätzung von Helligkeit und somit Entfernung bei astronomischen Objekten.

Im Folgenden soll eine Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften von kosmischen Staub gegeben werden. Als naheliegendes Beispiel bietet sich dafür der Staub in unserer eigenen Milchstraße an. Darauf aufbauend wird die Bedeutung der Staubkomponente in anderen Galaxien erklärt.

### 1. Staub in der Milchstraße

Um die folgende Diskussion über Bedeutung, Struktur und großräumige Verteilung von Staub innerhalb der Milchstraße und anderen Galaxien quantifizierbar zu machen, muß als Grundlage zuerst folgender Fragenkomplex gelöst werden:

- Wie kann man Staub beobachten ?
- Woraus besteht Staub ?
- Wie beeinflusst Staub astronomische Beobachtungen ?
- Was kann man aus der Beobachtung von Staub lernen ?

## 1. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

### 1.1. Grundlagen

Innerhalb unserer Milchstraße finden wir Staub einerseits als diffuse Komponente der interstellaren Materie und andererseits in galaktischen Nebeln. Im letzteren Fall unterscheidet man nach Erscheinungsform *Reflexionsnebel*, in denen Staubkörner das Licht der Sterne reflektieren, und *Dunkelwolken*, in denen keine beleuchtenden Sterne zu finden sind und das Licht der dahinter liegenden Sterne "verschluckt" wird. Ungefähr 30% unserer Milchstraße ist von Dunkelwolken bedeckt und somit unserem Gesichtskreis entzogen.

Unser heutiges Wissen über die chemische Zusammensetzung der Staubkomponente im interstellaren Medium baut auf die Analyse von Spektren der interstellaren Materie auf. Der Staub im interstellaren Medium dürfte hauptsächlich aus Kohlenstoff (Graphit) und Silikate bestehen. In weitaus geringerem Ausmaß sind Silikatverbindungen und Eis ( $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{NH}_3$ ) beobachtet worden. Über 50% der schweren Elemente des interstellaren Mediums sind in Staub kondensiert, d.h. sie liegen in Festkörperform vor. Die größeren Staubkörner (typischerweise  $\phi > 0.01 \mu\text{m}$ ) sind mit einem Eismantel überzogen, der durch Reflexion das Sternenlicht polarisiert. Aus Messungen des Polarisationsgrades von Sternenlicht in Haufen läßt sich so eine Aussage über Verteilung und Dichte von Staub machen.

Der direkte Nachweis von chemischen Elementen in Staub gestaltet sich sehr schwierig, da mit Ausnahme der Absorptionslinie von Kohlenstoff ( $\lambda \approx 2175 \text{ \AA}$ ) alle anderen Linien (Silikate, Eis) im infraroten Spektralbereich ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ) liegen. Da die Erdatmosphäre in diesem Bereich nahezu undurchlässig ist, bzw. Spektrallinien des atmosphärischen Wassermoleküls dominieren, ist man auf Beobachtungen in großer Höhe (hohe Berge, Ballone, Flugzeuge) angewiesen, wo die Erdatmosphäre genügend dünn und durchlässig ist. Die beste, aber auch teuerste und kurzlebigste Möglichkeit sind Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre mit Hilfe von Satelliten.

Staubkörner absorbieren sehr effizient visuelle und ultraviolette Photonen und strahlen im infraroten Wellenlängenbereich ab. Die daraus resultierende hohe Leuchtkraft im Infraroten gibt einen sehr guten Rückschluß nicht nur auf die Existenz von Staub, sondern auch auf seine Temperatur und die in diesen Prozess involvierte Staubmasse. Eines der wichtigsten Beobachtungsinstrumente, dem wir einen guten Teil unseres heutigen Wissens über Struktur und Verteilung von Staub verdanken, war der *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS), der im Jahr 1983, während seiner 300 tägigen Lebensdauer, 96% des Himmels in den Wellenlängen 12, 25, 60 und 100  $\mu\text{m}$  aufgenommen hat.

## 2. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

Die Staubkomponente des interstellaren Mediums bewirkt eine kontinuierliche, mit der Entfernung zunehmende Absorption des Sternenlichtes. Dies hat eine Verfälschung des quadratischen Abstandsgesetzes der Helligkeit zur Folge und ist daher eines der schwierigsten Probleme der Entfernungsbestimmung. Als Faustregel kann für die interstellare Absorption  $A_{\text{visuell}} \approx 0.3 \text{ mag kpc}^{-1}$  angenommen werden. Der Absorptionsgrad ist noch zusätzlich von der beobachteten Wellenlänge abhängig. Im Normalfall kann  $A \propto \lambda^{-1}$  angenommen werden. Diese selektive Absorption bewirkt eine Verfärbung (Rötung) der Sterne, was als *Farbezzess*  $E$  bezeichnet wird. In der Folge betrachtet man das Verhältnis allgemeiner zu selektiver Absorption ( $R = A/E$ ). Als globaler Wert für unsere Milchstraße kann  $R = 3$  angenommen werden, in dichten Gebieten, wie z.B. dem Orionnebel, kann bis zu  $R = 7$  gemessen werden.

Staub wird im allgemeinen als Produkt stellaren Massenverlustes in Form von *Sternwinden* (Analogon zum wohlbekannten Sonnenwind), angesehen. Die Silikate entstammen den Sternwinden sauerstoffreicher M - Sternen. Der Kohlenstoffanteil wird hingegen den expandierenden Hüllen von planetarischen Nebeln sowie dem Massenverlust von Kohlenstoff-Sternen zugeschrieben.

### 1.2. Staub und Sterne

Das folgende Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der komplexen Beziehungen zwischen Staub und Sternen in verschiedenen Phasen ihrer Entwicklung.

Bereits zum Zeitpunkt der Entstehung von Sternen spielt Staub eine signifikante Rolle. Die typischen Gebiete, wo Sterne entstehen, sind charakterisiert durch dichte Wolken aus Gas und Staub, die den eigentlichen Kollapsprozess der protostellaren Wolke und das Einsetzen des Wasserstoffbrennens als erstes Lebenszeichen des "neugeborenen" Sternes sehr gut vor unseren optischen Teleskopen verstecken. Damit wurde die Suche nach Protosternen, also Objekte, die sich noch in der Kollapsphase befinden, zum "Heiligen Gral der Infrarot-Astronomie".

Bis heute konnte noch kein Protostern eindeutig identifiziert werden, aber man kann die Randbedingungen für einen Nachweis sehr gut definieren. Protosterne sind in einer dichten Staubscheibe eingebettet, deren Durchmesser in der Größenordnung  $1 < \phi < 10 \text{ AE}$  liegt und wo eine Absorption von  $30 < A_{\text{visuell}} < 90 \text{ mag}$  zu erwarten ist. Die Staubtemperaturen innerhalb der Staubscheibe variieren zwischen 30 bis 300 K.

In der weiteren Sternevolution spielt Staub eine wichtige Rolle bei der Beobachtung stellaren Massenverlustes (Sternwinde). Massenverlust tritt bei jedem Stern auf, die Bandbreite ist zwischen  $10^{-8}$  bis  $10^{-4} M_{\odot} \text{ Jahr}^{-1}$ , die er im Durchschnitt an das

### 3. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

interstellare Medium abgibt. Überriesen vom Spektraltyp F, G und K, mit einem typischen Massenverlust von  $10^{-5}$  bis  $10^{-4} M_{\odot} \text{ Jahr}^{-1}$ , entwickeln dabei ein expandierende Schale bestehend aus ionisiertem Gas und heißen Staub ( $600 < T_{\text{Staub}} < 1200 \text{ K}$ ). Die Durchmesser solcher Staubschalen können, wie im Fall von R Coronae Borealis, bis zu 28 Lichtjahre betragen.

Auch Novae sind von heißen Staubschalen umgeben ( $T_{\text{Staub}} \approx 900 \text{ K}$ ) mit einer typischen Masse von  $4 \times 10^{-7}$  bis  $4 \times 10^{-7} M_{\odot}$ . In Supernova-Überresten und planetarischen Nebeln spielt interstellarer Staub eine wichtige Rolle bei der Abkühlung der expandierenden Gaswolke. Im Falle der Tycho und der Kepler Supernova wurden  $\approx 13 M_{\odot}$  interstellaren Mediums durch  $\approx 0.3 M_{\odot}$  ausgestoßenen Materials erhitzt. Noch heute mißt man in den Randzonen Staubtemperaturen bis zu 90 K, was bedeutet, daß der Staub immer noch aufgeheizt wird.

#### 1.3. Die räumliche Verteilung von Staub innerhalb der Milchstraße

Staub und Gas treten im interstellaren Medium meist gemeinsam auf. In der Sonnenumgebung ist das Verhältnis  $M_{\text{Gas}}/M_{\text{Staub}} \approx 100$ , d.h. der Staubanteil ist ungefähr 1%. Staub ist hauptsächlich in der galaktischen Ebene zu finden. Als Richtwert für die "Dicke" der Staubschicht kann  $\approx 200 \text{ pc}$  mit einer mittleren Dichte von  $\approx 10^{-26} \text{ g cm}^{-3}$  gelten.

Eine der überraschendsten Entdeckungen von IRAS war die Beobachtung sogenannten "Infrarot-Cirrus"; das sind dünne Staubwolken, die bis in hohe galaktische Ebenen beobachtet werden. Im Durchschnitt beträgt die Absorption  $A_{\text{visuell}} \leq 0.01 \text{ mag}$ , an manchen Stellen aber auch bis zu  $\approx 1 \text{ mag}$ . Die Staubtemperaturen in den Cirrus-Wolken werden auf  $\approx 20 \text{ K}$  geschätzt. Aufgrund des Strahlungsverhaltens müssen die Staubkörner sehr klein sein ( $\phi < 0.01 \mu\text{m}$ ). Ungefähr 20% der Infrarot-Strahlung aus dem interstellaren Medium stammt von diesen Cirrus-Wolken.

## 2. Staub in "normalen" Galaxien

Als "normale" Galaxien werden gemeinhin die Sternsysteme bezeichnet, deren Leuchtkraft durch Kernprozesse in den Sternen dominiert wird (thermische Strahlung). Es wurde erst in den letzten Jahren möglich Staub in anderen Galaxien zu studieren.

#### 4. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

Eines der wichtigsten Ergebnisse ist, daß die Staubkomponente sich nicht grundlegend von Galaxie zu Galaxie unterscheidet. Die Größe der Staubkörner kann allerdings beträchtlich variieren.

##### 2.1. Spiralgalaxien

Bei Spiralgalaxien, wie auch unsere Milchstraße, ist Staub hauptsächlich in der Scheibenkomponente zu finden. Als durchschnittliche Staubtemperaturen beobachtet man in den Spiralarmen  $\approx 60$  K, typisch für Gebiete mit noch andauernder Sternentstehung. Zur Kernregion hin (bulge), wo der Staubgehalt abnimmt, sinken auch die Staubtemperaturen auf  $\approx 20$  K. In normalen Spiralgalaxien, wie z.B. die Milchstraße, M 31 oder M 51, wird ungefähr die Hälfte der gesamten ausgestrahlten Energie durch aufgeheizten Staub im Infraroten abgestrahlt.

Noch bis vor kurzem hat man angenommen, daß die für die Staubaufheizung verantwortlichen Strahlungsquellen vor allem sehr junge Sterne sind, so wie sie im Orionnebel zu finden sind. Doch die IRAS-Beobachtungen zeigten, daß ein signifikanter Anteil von alten Sternen stammt, die das interstellare Medium über ihre Sternwinde aufheizen. In M 31 wird der Komponente aus Sternentstehungsgebieten eine Leuchtkraft von  $L_{IR} \approx 2 \times 10^8 L_{\odot}$  zugeschrieben, der diffusen interstellaren Komponente jedoch  $L_{IR} \approx 1.4 \times 10^9 L_{\odot}$ .

Dieses Zwei-Komponenten Modell findet nun bei allen normalen Spiralgalaxien Anwendung. Aus den bisher beobachteten Objekten konnte man eine durchschnittliche Staubtemperatur von  $\approx 15$  K für die diffuse Staubkomponente ("Cirrus-Wolken") und von  $\approx 60$  K für Sternentstehungsgebiete ableiten. Bezüglich anderer Parameter, wie Staubmasse und Gas zu Staub Verhältnis, zeigte sich, daß unsere Milchstraße eine sehr typische Spiralgalaxie ist, deren Werte auch auf andere Galaxien anwendbar sind.

##### 2.2. Elliptische Galaxien

Traditionsgemäß werden elliptische Galaxien immer wieder als gas- und staubfreie Systeme beschrieben, die aus alten Sternen bestehen. Doch in den letzten Jahren mußte dieses klassische Bild immer mehr und mehr korrigiert werden. Beobachtungen in verschiedenen Spektralbereichen mit hoher räumlicher Auflösung zeigten in vielen elliptischen Galaxien ausgedehnte Gas- und Staubgebiete. Die Morphologie dieser Staubkomponente ist vielfältig: Es wurden Wolken, Filamente und spektakulär wirkende Staubbänder (*dust lanes*) gefunden. In vielen Fällen sind in diesen Gebieten auch junge Sterne zu finden, die den Staub aufheizen und das Gas zum Leuchten anregen. Man nimmt heute an, daß  $\approx 40\%$  aller elliptischen Sternsysteme eine beobachtbare Staubkomponente enthalten. Typischerweise enthalten diese Galaxien  $10^4$  bis  $10^6 M_{\odot}$  an Staub.

## 5. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

Die so oft geleugnete Existenz von Staub in elliptischen Galaxien kann durch zwei Mechanismen erklärt werden:

- stellarer Massenverlust
- Materieeinfall von außen

In einer typischen elliptischen Galaxie, die von einer alten stellaren Population dominiert ist, werden  $\approx 0.015 M_{\odot} \text{ Jahr}^{-1}$  an das interstellare Medium abgegeben. Ein geringerer Anteil der beobachteten Staubkomponente wird Staubschalen von Überriesen zugeschrieben. Die Temperatur des Staubes im interstellaren Medium elliptischen Galaxien ist überwiegend kühl ( $28 < T_{\text{Staub}} < 32\text{K}$ ). Der Anteil an Staubmasse liegt in der Größenordnung von  $\approx 10^4 M_{\odot}$ .

Bei zahlreichen, sonst normal erscheinenden, elliptischen Galaxien werden "Staubbänder" beobachtet, die das Galaxienellipsoid unter verschiedenen Winkeln kreuzen. Das prominenteste Objekt dieser Gruppe ist NGC 5128 (Centaurus A) mit Staubstreifen entlang der kleinen Halbachse des Sternellipsoids. Man beobachtet in diesen Objekten das Resultat einer Galaxienkollision. Ein gasreiches Objekt fällt dabei in das Potential der elliptischen Galaxie hinein. Zum Zentrum hin erreicht das einfallende Material zuerst den Gleichgewichtszustand, während in den äußeren Regionen noch die ursprüngliche Bewegungsrichtung zu erkennen ist. Dieser, noch andauernde, Akkretionsvorgang produziert die charakteristischen Verwerfungen des Staubbandes (*Warps*) wie man sie auch bei NGC 5128 beobachten kann. Ein interessantes Resultat der Kollision ist in diesem Fall, daß Sterne und Gas senkrecht zueinander rotieren. Die Sterne rotieren um die kleine Halbachse der Galaxie, die Gas- und Staubscheibe hingegen um die große Halbachse. So spektakulär diese Staubstreifen auch wirken, ihr Anteil von  $\ll 0.01\%$  an der Gesamtmasse der Galaxie ist verschwindend gering.

Die Staubkomponente in Form von Scheiben und Ringen kann als Indikator für die dreidimensionale Struktur der elliptischen Galaxie benutzt werden. Es gilt jetzt als gesichert, daß die überwiegende Mehrheit der elliptischen Galaxien *nicht durch Rotation abgeflachte Ellipsoide* sind, sondern vielmehr eine triaxiale Sternverteilung (Potential) aufweisen in der die Achsenverhältnisse mit dem Radius variieren. Staub und Gas kann sich aufgrund der Gesetze der Himmelsmechanik und Gasdynamik, nur in einer bestimmten Bahnebene im Kraftfeld der Galaxie bewegen. Ist das Potential triaxial, so liegen diese Bahnen entweder senkrecht zur längsten oder senkrecht zur kürzesten Achse, in einem axialsymmetrischen Potential existiert nur eine stabile Bahnebene, nämlich senkrecht zur Symmetrieachse (Äquatorebene). Aus der Neigung der Staubringe relativ zu den *beobachteten* Ellipsoidachsen der Galaxie, kann man nun den Sichtwinkel bestimmen und damit einen Rückschluß auf die *wahren Achsenverhältnisse* machen.

### 2.3. Irreguläre Galaxien

Bei dieser Objektgruppe ist es schwierig, Gemeinsamkeiten zu finden, außer ihrer Zuordnung zur Gruppe irregulärer Galaxien. Jedes Objekt hat seine bestimmten Peculiaritäten. Das betrifft auch den Staubgehalt und seine großräumige Verteilung. Man kann zwar *cum grano salis* sagen, daß Staub in dieser Objektgruppe, im Vergleich zu Spiralgalaxien, nur eine untergeordnete Rolle spielt, aber wie so oft, heißt es auch hier, daß Ausnahmen die Regel bestätigen. Es wird sicher noch einige Jahre dauern, bis durch mehr Beobachtungen auch in diese Objektgruppe Systematik gebracht wird. Mit dem jetzigen Wissenstand kann man zwar einzelne Objekte gut beschreiben, aber es fehlt noch der Überblick, die beobachteten Eigenschaften als spezifisch für den Galaxientyp zu werten.

Im Folgenden werden die Magellanischen Wolken als naheliegendes Beispiel beschrieben. Staub scheint nur in Verbindung mit Sternentstehungsregionen (H II-Gebiete) zu existieren. Der Nebel 30 Doradus ist ein Beispiel dafür. Die diffuse Cirrus Komponente, wie sie in Spiralgalaxien zu finden ist, scheint in den Magellanischen Wolken zu fehlen. Auch die Sternentstehung scheint, im Vergleich zu Spiralgalaxien, nur "auf Sparflamme" zu laufen. Als typische Staubtemperaturen wurden, wie im Fall von 30 Doradus,  $T_{\text{Staub}} \leq 50$  K gemessen.

Die Größe, Struktur und Zusammensetzung der Staubkörner in den Magellanischen Wolken ist bis heute noch unbekannt. Man ist daher gezwungen, die bekannten Verhältnisse in unserer Milchstraße, die, wie wir gesehen haben, auch für andere Spiralgalaxien gelten, auch auf die Magellanischen Wolken zu übertragen. Wäre jedoch eine von diesen Größen signifikant anders, hätte das einen direkten Einfluß auf die beobachteten physikalischen Prozesse wie z.B. die Aufheizung des Staubes durch Sterne. Hier bieten sich die Magellanischen Wolken als sehr nahe gelegenes Objekt für weitere Studien an.

### 3. Staub in aktiven Galaxien

Im vorigen Kapitel wurden die Staubeigenschaften von nahen Galaxien beschrieben, deren morphologischer Typ (relativ) eindeutig erkennbar ist. Im folgenden Kapitel wollen wir uns extragalaktischen Objekten zuwenden, die durch Peculiaritäten in ihrem Energiehaushalt auffallen. In den meisten Fällen dominieren hoch beschleunigte Teilchen die Energieabstrahlung über das normale Sternenlicht. Der Großteil dieser Galaxien ist jedoch soweit von uns entfernt, sodaß eine Zuordnung zu einem morphologischen Typ nicht immer möglich ist, weil man oft nur mehr eine fast punktförmige

## 7. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

(sternähnliche) Lichtquelle sieht. Die Leuchtkraft dieser Objekte übersteigt die "normaler" Galaxien um ein Vielfaches.

Bereits in den ersten Anfängen der modernen Infrarot-Astronomie erkannte man, daß thermische Emission von Staub eine wichtige Komponente der überaus hohen Leuchtkraft dieser Objekte darstellt. Im Infraroten sind diese Galaxien oft um einen Faktor 1000 leuchtkräftiger als unsere eigene Galaxis. Die Energiequelle, die für die enorme Aufheizung des Staubes verantwortlich ist, ist bis heute unbekannt. Sicher ist nur, daß es *keine* Sterne sein können. Als ein plausibles Modell wird die Akkretion von Materie auf ein massives Schwarzes Loch angesehen.

Das Studium dieser Galaxien bildet einen der Schwerpunkte in der modernen Astronomie. An den großen Teleskopen wird ein signifikanter Teil der zur Verfügung stehenden Beobachtungszeit diesen Objekten gewidmet. Aber man ist noch sehr weit von einem grundlegenden Verständnis der dort stattfindenden physikalischen Vorgänge entfernt. Im Folgenden wird ein Überblick auf einen "Zoo" verschiedener Objekte gegeben, die unter dem Begriff *aktive Galaxien* subsummiert werden können.

### 3.1. Aktive Galaxienkerne (AGN)

Diese Galaxien fallen durch ihre breiten Emissionslinien in der Kernregion auf. Es werden typische Linienbreiten von einigen  $1000 \text{ km s}^{-1}$  in diesen Objekten beobachtet. Die Kernregion ist von sehr dichten und heißen Staubwolken umgeben, die durch hoch beschleunigte Partikel aufgeheizt werden. Der Staub dürfte zum größten Teil aus Silikaten bestehen. Man hat fast keinen Kohlenstoff gefunden, was durch die hohen Temperaturen erklärbar wäre. Im Infraroten dominiert die thermische Abstrahlung des aufgeheizten Staubes die Energieverteilung. Bei nahen Seyfert-Galaxien konnte man aber auch noch eine weitere, sehr kleine Komponente auflösen, die Sternentstehungsgebieten zuzuschreiben ist und nicht mit der Kernregion assoziiert ist.

Ein weiterer Hinweis auf große Staubmassen in der Kernregion ist, daß das Licht dieser Objekte in hohem Maß polarisiert ist. Aber auch hier stecken die Beobachtungen noch in den Kinderschuhen. In der nächsten Zukunft sollte es aber möglich sein, nach Art und örtlichen Auftreten der Polarisation Aussagen über den Emissionsvorgang von Gas aus dem Galaxienzentrum zu machen. Dann wäre man über den Umweg der Staubbeobachtung einen (wichtigen) Schritt näher zur Identifizierung der zentralen Energiequelle.

## 8. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

### 3.2. Quasistellare Objekte (QSOs)

Quasare sind die von uns am weitesten entfernten Galaxien. Aufgrund ihrer Entfernung erscheinen sie uns wie Sterne. Nur an Hand von Spektren erkennt man ihre extragalaktische Natur. Der morphologische Typ von Quasaren ist bis heute Gegenstand zum Teil heftiger Diskussionen, da man normalerweise nur den Galaxienkern sieht.

Infrarot-Beobachtungen zeigen Anzeichen von Staub in sehr heißen Gaswolken. Es ist aber vollkommen unklar, ob diese Staubkomponente Teil des Quasars (= Kernregion) oder zur assoziierten Galaxie gehört. Hier muß man mit weitergehenden Interpretationen zweifellos noch zuwarten, bis man Genaueres über Struktur und physikalische Prozesse nicht nur im Quasar sondern auch in der ihn umgebenden Galaxie in Erfahrung gebracht hat.

## 4. Galaxien in Wechselwirkung

Als letzter Galaxientyp werden Objekte beschrieben, die in gravitativer Wechselwirkung stehen. In dichten Galaxienhaufen sind Galaxienbegegnungen keine Seltenheit. Im Gegenteil, man kann in fast jedem Sternsystem, das Teil eines Haufens ist, Spuren einer Wechselwirkung mit seiner "Umwelt" sehen. Diese Spuren können nun größer oder kleiner sein. In einem Fall, elliptische Galaxien mit Staubstreifen sind ein gutes Beispiel dafür, "verschluckt" eine relativ große Galaxie ein kleineres Objekt. In einem anderen Extremfall, bei sogenannten cD-Galaxien, die sich im Zentrum von Galaxienhaufen befinden, hat man gleich mehrere Überreste von einverleibten kleineren Galaxien gefunden.

Im Fall, daß beide Kollisionspartner ungefähr gleiche Masse habe, kann man sehr interessante Formen der gravitativen Wechselwirkung sehen. Am spektakulärsten sind Wechselwirkungen bei Spiralgalaxien. Die Kernregionen bleiben zwar aufgrund ihres starken Kraftfeldes intakt, die Scheibenkomponente, vor allem Gas und Staub, wird jedoch durch die Interaktion oft bizarr verformt. Ein schönes Beispiel dafür ist der "Antennennebel" und die "Mäuse". Durch Reibung der beiden Gas-/ Staubscheiben wird Gas und Staub erhitzt und es setzt sehr abrupt eine Welle von Sternentstehung in den kollidierenden Gebieten ein.

## 9. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

Eine der wichtigsten Entdeckungen des Satelliten IRAS war der Nachweis, daß im allgemeinen Galaxien, die miteinander in Wechselwirkung stehen, einen Großteil ihrer Energie im Infraroten abstrahlen. Das Verhältnis infraroter zu blauer Leuchtkraft  $L_{IR}/L_B$  kann einige hundert betragen, was bedeutet, daß diese Galaxien im visuellen schwach und unscheinbar erscheinen. Die plausibelste Erklärung für die hohe Infrarot-Leuchtkraft ( $L_{IR} > 5 \times 10^{11} L_{\odot}$ ) ist eine Kombination aus einer Sternentstehungskettenreaktion, bedingt durch das Kollisionsereignis, und einer nicht-thermischen zentralen Energiequelle (Akkretion von Materie auf ein schwarzes Loch), ähnlich wie bei aktiven Galaxien, die den umgebenden Staub aufheizt.

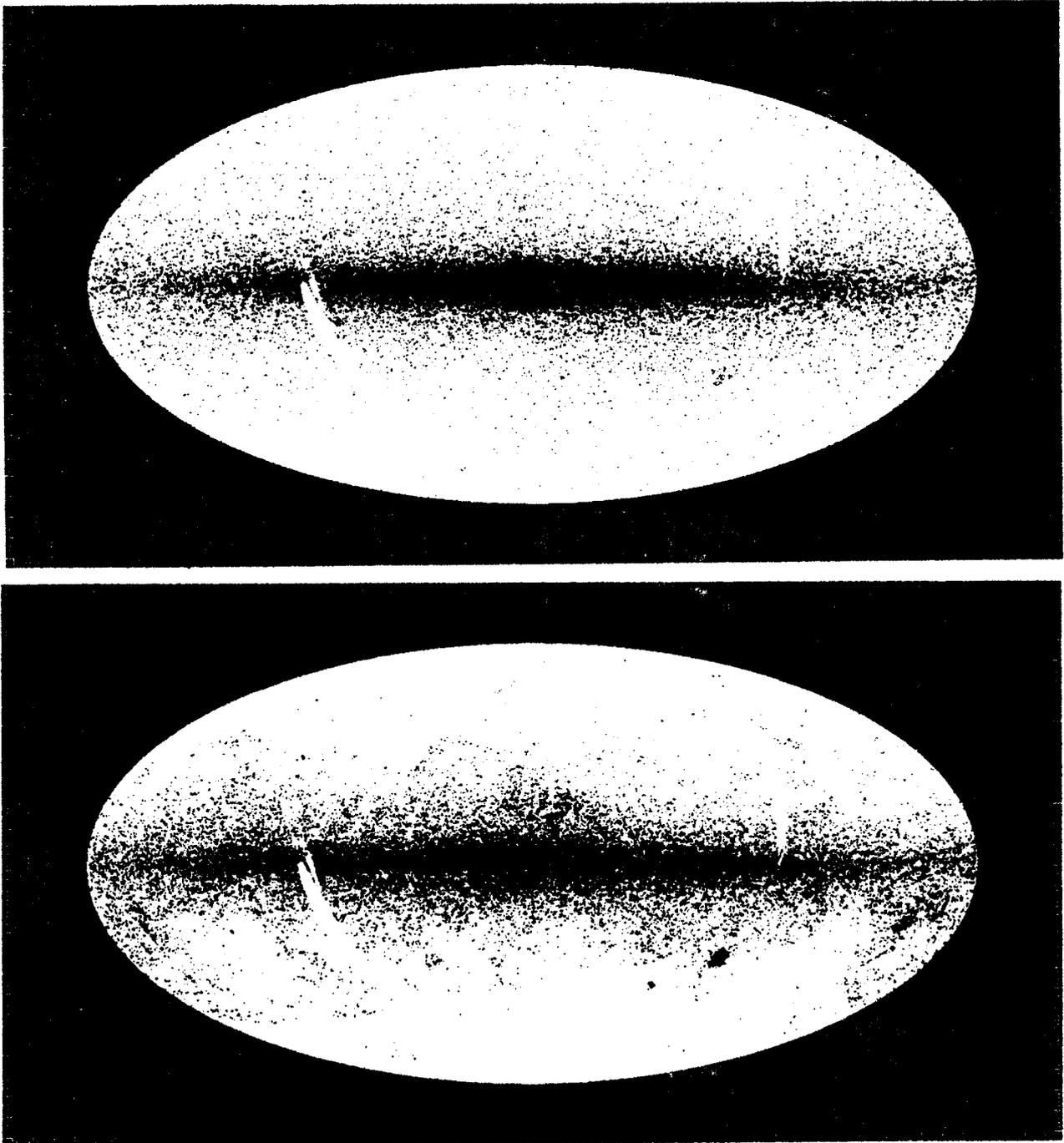
Zur Zeit bemüht man sich diese Interpretation durch eine beobachtete Evolutionssequenz zu verifizieren, d.h. Galaxien in verschiedenen Entwicklungsstadien des Kollisionsvorganges zu finden. Die Kollisionspartner müssen von Haus aus eine signifikante Gas- und Staubkomponente besitzen, auch die nicht-thermische zentrale Energiequelle müßte vor dem Kollisionsereignis existieren. Durch die Kollision setzt explosionsartig eine Kettenreaktion von Sternentstehung ein, die eine Leuchtkraft von  $L_{IR} \approx 3 \times 10^{12} L_{\odot}$  erreichen kann. Im Laufe der Zeit, wenn das vorhandene Gas verbraucht ist und die Staubkomponente, zerstört durch die hohe Strahlungstemperatur, vernachlässigbar wird, dominiert immer mehr die nicht-thermische Energiekomponente. Das Endresultat könnte dann ein Quasar-ähnliches Objekt sein.

## 5. Intergalaktischer Staub (?)

Bis jetzt gibt es keinen direkten Nachweis für Staub im intergalaktischen Raum. Als obere Grenze für die Staubdichte im intergalaktischen Raum kann  $\rho_{Staub} < 10^{-33} \text{ g cm}^{-3}$  angenommen werden. Dies würde eine Extinktion von  $\approx 10^{-4} \text{ mag Mpc}^{-1}$  ergeben, d.h. die entferntesten Quasare würden um eine Größenklasse unterschätzt werden.

Es erscheint jedoch plausibel, eine Staubkomponente im intergalaktischen Raum anzunehmen. Zumindest in Galaxienhaufen, wo Galaxien-Wechselwirkungen häufig sind, sollte Staub im Halo von Galaxien zu finden sein. Der Beobachtungsnachweis ist allerdings sehr schwierig, da diese Materie sehr kühl ist. Man nimmt typische Staubtemperaturen von  $T_{Staub} \ll 10 \text{ K}$  an. Dies erfordert Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre mit Infrarot-Satelliten. Hier muß man auf die Nachfolgenergeneration von IRAS warten, die (hoffentlich) im nächsten Jahrzehnt Antwort auf diese Frage geben wird.

### Abbildungen



In der oberen Abbildung ist in einer Aitoff-Projektion die Verteilung der überwiegend alten Sternpopulation innerhalb unserer Milchstraße an Hand der IRAS Daten gezeigt. Man kann deutlich die Zentralregion (bulge) sehen. In der unteren Abbildung ist die Staubverteilung der diffusen interstellaren Komponente gezeigt ("Cirrus Wolken")

## 11. Fortsetzung Gastvortrag: Staub in Galaxien

### Literatur:

#### Grundlagen und Übersichtsartikel:

- Bender, R. & Möllenhoff, C., 1987. "Elliptische Galaxien" in *Sterne u. Weltraum*, 5, 264.  
Lang, K.R., 1980. *Astrophysical Formulae*, Springer (2. Aufl.).  
Mihalas, D. & Binney, J., 1981. *Galactic Astronomy*, Freeman (2. Aufl.).  
Voigt, H.H., 1975. *Abriss der Astronomie*, Bibliogr. Institut (2. Aufl.).

#### Aktuelle Fachartikel:

- Beichmann, C.A., 1987. "The IRAS View of the Galaxy and the Solar System"  
in *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, 25, 521.  
Savage, B.D. & Mathis, J.S., 1979. "Observed Properties of Interstellar Dust"  
in *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, 17, 73.  
Soifer, B.T., Houck, J.R. & Neugebauer, G., 1987. "The IRAS View of the  
Extragalactic Sky" in *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, 25, 187.  
Stein, W.A. & Soifer, B.T., 1983. "Dust in Galaxies" in *Ann.Rev.Astron.  
Astrophys.*, 21, 177.

Die Forschung des Autors in diesem Gebiet wird vom österreichischen *Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung* (Projekt P 5529) sowie im Rahmen eines Stipendiums der *European Space Agency* (ESA) gefördert.

Dr. Werner W. Zeilinger  
Dipartimento di Astronomia  
Università di Padova  
Vicolo dell' Osservatorio 5  
I-35122 Padova ITALIA

Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Die vorliegende Dokumentation besteht aus zwei Teilen. Im ersten (Im Reich der Nebel) habe ich die wesentlichen Eigenschaften der Galaxien zusammengefaßt. Dabei habe ich Ausschnitte aus meinem Buch "Licht vom Rande der Welt" benutzt. Die unveränderte Übernahme von fertigen Textteilen hat den Nachteil, daß gleich am Anfang die Expansion des Weltalls als gegeben angenommen wird, daß das Blandford-Rees-Modell nicht mehr erklärt wird. (Ich habe auf eine Übernahme des entsprechenden Textteils verzichtet, da das Modell inzwischen nicht mehr diskutiert wird) und daß von der "Großen Durchsichtigkeit" gesprochen wird, die erst im zweiten Teil erklärt wird als der Augenblick, in dem die freien Elektronen sich an die Protonen anlagerten und neutrale Wasserstoffatome bildeten. Dieser zweite Teil, der auf einem von mir gehaltenen Vortrag beruht, handelt vom Olberschen Paradoxon und seiner Lösung. Er erklärt auch, woher man etwa von der Expansion weiß und wie man die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckte, von der schon vorher, bei der Frage nach der Entstehung der Galaxien, die Rede war.

R. Kippenhahn

Das hier genannte Werk "Licht vom Rande der Welt" (Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 3.Auflage, Stuttgart 1984, 384 Seiten) wird von unserem Gastvortragenden und Autor in der Pause des Seminarabends signiert. Red.

## 1. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

### Im Reich der Nebel

Die größte Anhäufung von Nebelflecken des ganzen Firmaments findet sich in der *nördlichen Hemisphäre*. Es ist dieselbe verbreitet: durch die beiden Löwen; den Körper, den Schweif und die Hinterfüße des Großen Bären; die Nase der Giraffe; den Schwanz des Drachen; die beiden Jagdhunde; das Haupthaar der Berenice . . . ; den rechten Fuß des Bootes und vor allem das Haupt, die Flügel und die Schulter der Jungfrau. Diese Zone, welche man die *Nebel-Region der Jungfrau* genannt hat, enthält . . .  $\frac{1}{4}$  der gesamten Nebelwelt.

Alexander von Humboldt. »Kosmos«, 1850

Was immer damals, vor vielleicht 15 bis 20 Milliarden Jahren, geschehen ist, die Materie der Welt fliegt seither auseinander. Wir wissen, daß die Geschwindigkeit, mit der alles aus der Urexplosion herausgeflogen kommt, die Struktur des Raumes bestimmt. Sie entscheidet also darüber, ob unser Weltall geschlossen ist oder nicht. Was aber hat es zu bedeuten, daß die wegfliegende Materie den Raum nicht gleichmäßig erfüllt, sondern in Form von Klumpen, die wir Galaxien nennen? Der ganze Raum ist ja fast leer: Die Materie ist in Form von Spiralnebeln konzentriert, die sich wie Schneeflocken durch den Raum bewegen. Zwischen ihnen scheint nichts zu sein oder zumindest nichts, was sich uns deutlich zu erkennen gibt. Warum ist die Materie in Form von Galaxien ausgeflockt?

Auch wenn wir in das Innere eines Sternsystems schauen, finden wir gleichfalls hauptsächlich leeren Raum, während die Materie zum größten Teil in den Sternen konzentriert ist. Wie auch die Materie beim Urknall entstand, heute ist sie hauptsächlich in den Sternen gesammelt, die sich wiederum lose zu größeren Einheiten, den Galaxien, zusammenschließen, zwischen denen der Raum fast leer erscheint. Wie kam es dazu?

Wie aus der Materie in den Galaxien Sterne werden, glauben wir heute einigermaßen zu verstehen. Wir sehen an einigen Stellen unserer Milchstraße, wie die Sternbildung vor sich geht. Ausgedehnte Gas- und Staubmassen beginnen plötzlich, sich zusammenzuziehen, und werden durch die Schwerkraft dieser eben gebildeten Materiekonzentration weiter in sich zusammengedrückt. Teilbereiche der in sich zusammenstürzenden Wolke bilden noch einmal Teilwolken, die wieder zusammenfallen, bis schließlich ein ganzer Schwarm von Sternen entstanden ist. Als Herr Meyer in Kapitel 3 die Milchstraße im Zeitraffer sah, fiel ihm auf, daß die Sterne nicht gleichmäßig in der ganzen galaktischen Scheibe, sondern hauptsächlich in den Spiralarmen entstehen. Tatsächlich fallen auf den Aufnahmen von Spiralnebeln die einzelnen Spiralarme nur dadurch auf, daß in ihnen junge, gerade erst entstandene Sterne leuchten.

Sollte man nicht erwarten, daß ein Prozeß ähnlich dem der Bildung von Sternen in den Galaxien auch die Galaxien aus der aus dem Urknall herauskommenden Materie entstehen ließ? Wenn vielleicht am Anfang die Materie die Welt einigermaßen gleichförmig erfüllte, sollten dann nicht zufällige Dichteschwankungen die benachbarte Materie anziehen versucht und sich damit verstärkt haben? Und sollten nicht auf diese Weise Gaswolken entstanden sein, die, durch ihre eigene Schwerkraft getrieben, weiter zusammenfielen, um Galaxien zu bilden? Nach einiger Zeit war alle Materie in Galaxien konzentriert, in denen wiederum Sterne entstanden. Da

## 2. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

die ursprüngliche Materie von der Urexplosion her auseinanderflog, so fliegen die daraus entstandenen Galaxien weiter auseinander. Denn ihre gegenseitige Anziehungskraft konnte die Fluchtbewegung bis heute noch nicht merklich vermindern.

Innerhalb einer Galaxie aber reicht die gegenseitige Schwereanziehung der Sterne aus, um sie zu hindern, voneinander wegzufiegen. In den Galaxien ist der beim Urknall mitgegebene Schwung, der eigentlich die Materie auseinanderzutreiben versucht, durch die wechselseitige Schwereanziehung der Sterne gebändigt. Die Galaxien wachsen nicht mit der Expansion des Weltalls mit.

Können wir aus der Existenz der Galaxien etwas über jene frühe Zeit erfahren, in der sich aus einer den Raum recht gleichförmig erfüllenden Gasmasse erste Flecken gebildet haben, aus denen die Spiralnebel wurden? Wann in der Weltgeschichte war das? Wir wissen aus der Radioaktivität der Erdkruste, daß unser Planet etwa vier Milliarden Jahre alt ist; die Sonne ist nicht viel älter. Es gibt in unserem Milchstraßensystem Sternhaufen, die 16 Milliarden Jahre alt sind (vgl. S. 146). Also muß auch unsere Galaxis mindestens so alt sein. Aus der Galaxienflucht müssen wir schließen, daß die Urexplosion vor 15 bis 20 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Also müssen auch schon recht frühzeitig die ersten Sterne und Sternhaufen entstanden sein, nachdem sich Materieflecken von der Masse der Galaxien aus der dem Urknall entstammenden Materie in diesen Gasballen herausgebildet hatten.

### Galaxien rotieren

Kurz nachdem Slipher am Flagstaff-Observatorium in Arizona die Radialgeschwindigkeit des Andromedanebels gemessen hatte, fand er, daß eine Galaxie, die wegen ihres Aussehens »Sombbrero« genannt wird und mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/s von uns wegfliegt (Abb. 9.1), keine einheitliche Radialgeschwindigkeit besitzt. Die eine Seite scheint schneller von uns wegzufiegen als die andere. Er schloß daraus, daß diese Galaxie sich um ihre eigene Achse dreht. Denn wenn eine Galaxie von uns wegfliegt und gleichzeitig rotiert, dann bewegen sich wegen der Rotationsbewegung

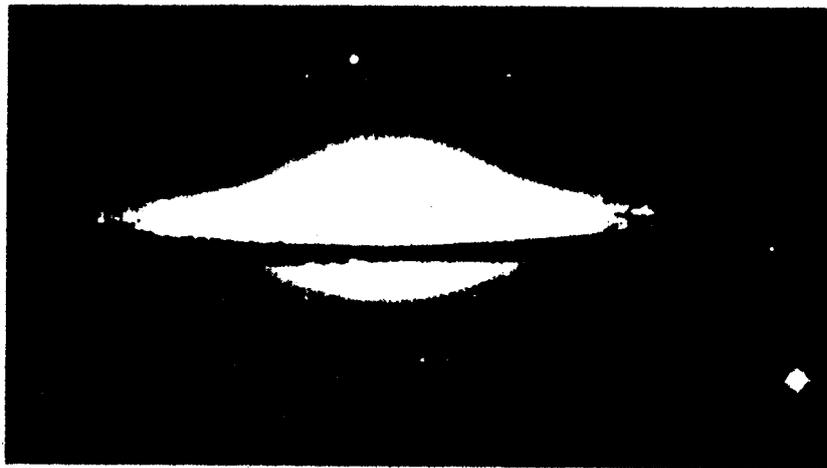


Abb. 9.1: Die Sombrero-Galaxie im Sternbild der Jungfrau fällt besonders durch ihren dunklen Äquatorstreifen auf, der von absorbierenden Staubmassen herrührt. Sie ist wesentlich kleiner als unser Milchstraßensystem, nur 8 kpc ist ihr Durchmesser (Aufnahme: S. Laustsen, European Southern Observatory).

### 3. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Teile von ihr schneller von uns weg als andere (Abb. 9.2). Rotationsbewegungen scheinen bei vielen Galaxien eine wichtige Rolle zu spielen. Auch unsere Galaxis rotiert, das hatten wir schon in unserem Zeitrafferbild in Kapitel 3 gesehen.

Die Sonne bewegt sich mit den Sternen der Scheibe um das Zentrum der Milchstraße. Die Umlaufdauer beträgt etwa 250 Millionen Jahre. Diese Rotationsbewegung hat sich so eingestellt, daß sich, genau wie bei der Bewegung der Planeten um die Sonne, zwei Kräfte gerade die Waage halten: die Fliehkraft, die jeden Stern nach außen zum Rand der galaktischen Scheibe schleudern will, und die Schwerkraft, die ihn in Richtung des Zentrums der Milchstraße zu ziehen versucht. Man kann dieses Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Schwerkraft benutzen, um die Masse der Milchstraße abzuschätzen. Da wir den Abstand der Sonne zum Zentrum kennen, es sind etwa 10 kpc, so können wir aus der Umlaufgeschwindigkeit der Sonne um das Zentrum die Fliehkraft bestimmen. Wir können dann fragen, wieviel Masse uns in Richtung des Zentrums ziehen muß, um die Sonne trotz ihrer Fliehkraft auf eine Kreisbahn zu zwingen. Diese ungenaue Überlegung – der genaue

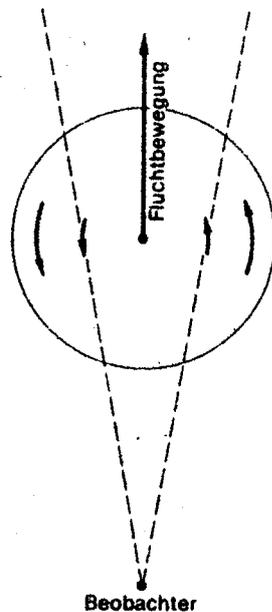


Abb. 9.2: Ein Beobachter sieht eine von ihm wegfliegende Galaxie von der Seite (etwa wie in Abb. 1.4). Er kann die Bewegung nur am Doppler-Effekt erkennen und stellt fest, daß die eine Hälfte der Galaxie (im Bild die rechte) mit größerer Radialgeschwindigkeit von ihm wegfliegt, da dort Fluchtbewegung und Rotation in die gleiche Richtung zielen. Die andere Hälfte (im Bild die linke) hat für ihn eine geringere Radialgeschwindigkeit, da Flucht- und Rotationsbewegung gegeneinander gerichtet sind.

Wert hängt davon ab, wie die Masse im Raum verteilt ist – führt uns auf etwa 100 bis 200 Milliarden Sonnenmassen.

Nach diesem Prinzip und mit einer etwas verbesserten Methode kann man auch die Massen anderer Galaxien bestimmen. Nehmen wir an, wir sehen eine Galaxie von der Seite, etwa so, wie in der Abbildung 1.4 angedeutet ist. Wenn wir mit Hilfe des Doppler-Effektes ihre Fluchtgeschwindigkeit bestimmen, so gibt uns das Hubble'sche Gesetz die Entfernung. Wenn wir aber die Spektren der Galaxie auf beiden Seiten vom Zentrum aufnehmen und die Rotverschiebungen der Spektrallinien messen, so finden wir etwas verschiedene Radialgeschwindigkeiten und können daraus die Rotationsbewegung der Galaxie bestimmen. Dann läßt sich die Fliehkraft in einem bestimmten Abstand vom Zentrum berechnen. Daraus folgt die Schwerkraft, die dieser Fliehkraft das Gleichgewicht hält. So erfahren wir etwas über die Massen anderer Galaxien. In den meisten Fällen scheinen in einer Galaxie 10 Milliarden bis einige 100 Milliarden Sterne von der Masse der Sonne vereinigt zu sein. Im Andromedanebel stehen etwa 400 Milliarden Sonnenmassen.

#### 4. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Warum rotieren Galaxien? Wer hat diese voneinander wegfliegenden Feuerräder in Schwung gesetzt? Es scheint, als ob die im Raum verteilten Galaxien keine bevorzugte Richtung ihrer Rotationsachsen haben. Wir wissen, daß ein sich selbst überlassener Körper weder aus dem Nichts heraus zu rotieren beginnen kann, noch – wenn er von Anfang an rotiert – seinen Drall so ohne weiteres wieder loswird. Wenn wir es etwas exakter ausdrücken wollen und die Sprache unseres Physiklehrers verwenden: Ein sich selbst überlassener Körper behält seinen Drehimpuls bei. Galaxien haben Drehimpuls. Sie müssen ihn also schon von Anfang an mitbekommen haben, Drehimpuls aus der Frühzeit der Welt. Was versetzte damals die Materie der Welt in Drehung, wer hat gerührt?

Wahrscheinlich steckt nichts allzu Tiefes dahinter, daß Galaxien rotieren. Es genügt anzunehmen, daß die Materie, aus der sich die Galaxien bildeten, in einer recht unregelmäßigen Bewegung war, die sich der Expansionsbewegung überlagerte. Wenn sich dann in dieser bewegten Masse Teile aussondern, um zu Galaxien zusammenzufallen, so wird die Bewegung in jeder Teilmasse auch ein wenig Drehimpuls mitbekommen. Denken wir uns zur Veranschaulichung die unregelmäßige Bewegung des Wassers in einem Gebirgsbach, und schöpfen wir ein Glas daraus. Zuerst wird das Wasser im

Glas die turbulente Bewegung im Bach noch widerspiegeln, aber die raschen und kleinräumigen Bewegungen werden bald durch die Reibung langsamer werden. Nach einiger Zeit wird die Flüssigkeit im Glas nur noch eine Rotationsbewegung zeigen. Mit dem Wasser haben wir auch Drehimpuls geschöpft. Wiederholen wir das Experiment, geschieht wieder das gleiche, nur kann es diesmal sein, daß die am Schluß übriggebliebene Rotation jetzt andersherum verläuft als beim ersten Versuch. Die geschöpfte Menge hat jetzt einen anderen Drehimpuls mitbekommen. So lernen wir aus der Rotation der Galaxien, daß die Materie, aus der sie entstanden ist, damals nicht nur expandierte, sondern sich auch noch turbulent bewegte.

Da wir oben sahen, daß die Rotation ein wichtiges Hilfsmittel ist, um die Massen der Galaxien abzuschätzen, sollten wir ergänzen, daß sie nicht das *einzigste* Hilfsmittel ist. Da gibt es Galaxien, die einander so nahe stehen, daß die Anziehungskraft zwischen ihnen sie aneinander bindet. Sie entfernen sich nicht voneinander, wie das Hubblesche Gesetz es befiehlt. Sie ziehen wie ein Doppelsternpaar in unserer Galaxis ihre Bahnen umeinander und fliehen nur gemeinsam von uns. Da man mit Hilfe des Doppler-Effektes ihre Umlaufgeschwindigkeiten um den gemeinsamen Schwerpunkt messen kann, läßt sich wieder ihre Masse aus der Bedingung »Fliehkraft gleich Schwerkraft« ermitteln.

Es gibt auch Galaxien, bei denen man keine Rotationsbewegung findet. Es sind vor allem solche, die keine Spiralen zeigen. Bei ihnen blickt man auf eine diffuse Wolke von Sternen, eine Struktur ist kaum zu erkennen. Auch bei diesen Objekten sind wir nicht ganz verloren (Abb. 9.3). Da solch eine Galaxie nicht rotiert, fallen ihre Sterne in jedem Augenblick zur Mitte der Galaxie. Aber in der Mitte hält sie nichts, deshalb fliegen sie durch das Zentrum hindurch nach der anderen Seite, bis ihr Schwung erlahmt und sie wieder umkehren in Richtung zur Mitte. Die ganze Galaxie besteht aus einem Mückenschwarm von Sternen, die ständig von den äußeren Teilen zur Mitte fallen, auf der anderen Seite wieder herauskommen und durch die Anziehungskraft der Gesamtheit der in der Galaxie stehenden Sterne wieder zur Umkehr gezwungen werden. Wir sehen, wie weit die einzelnen Sterne fliegen können, ehe die Schwerkraft der Galaxie sie zur Umkehr zwingt. Nicht, daß wir das an einzelnen Sternen verfolgen können, aber wir sehen ja, wie weit

## 5. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

hinaus in den Raum noch Sterne leuchten. Der Durchmesser der Galaxie sagt uns also, wo etwa die Sterne von der Schwerkraft der Galaxie wieder zurückgeholt werden. Wenn wir jetzt noch wüßten, wie schnell die Sterne in der Mitte der Galaxie fliegen, dann könnten wir die Masse der Galaxie bestimmen. Denn dann wüßten wir, mit welchem Schwung die Sterne aus dem Zentralgebiet der Galaxie herausgeschossen kommen.

Wieder hilft uns der Doppler-Effekt, die Geschwindigkeit der aus der Mitte herausschießenden Sterne zu bestimmen. Jeder Stern, der in der Galaxis steht, trägt zum Spektrum und zu den Fraunhofer-Linien darin bei. Nun gibt es aber Sterne, die im Augenblick der Beobachtung aus dem Zentrum auf uns zugeschossen kommen, wie auch solche, die gerade von uns weggerichtet in das Zentralgebiet hineinfliegen, um auf der Gegenseite wieder herauszukommen. Die auf uns zugeflogen kommen, zeigen Spektrallinien, die durch den Doppler-Effekt blauverschoben sind, die von uns wegfliegenden sind rotverschoben. Beim Betrachten der Galaxie, die wir im Fernrohr nicht in einzelne Sterne auflösen können, sehen wir beide Effekte gleichzeitig. Die Fraunhofer-Linien sind sowohl rot- wie blauverschoben, das heißt, sie sind *breiter*. Und aus der Verbreiterung können wir auf die Geschwindigkeiten schließen, mit denen die Sterne das Zentralgebiet durchqueren. Das aber war die fehlende Größe, um die Masse der Galaxie zu finden. Wir wissen ja schon, wie weit die Sterne fliegen, ehe die Anziehungskraft der Galaxie sie

Abb. 9.3: Betrachtet ein Beobachter eine entfernte Galaxie, die nicht rotiert, so kann er dennoch ihre Masse ermitteln. An der Linienverschiebung kann er die Fluchtgeschwindigkeit und mit Hilfe des Hubbleschen Gesetzes dann die Entfernung bestimmen. Der Winkel, unter dem ihm die Galaxie am Himmel erscheint, liefert dann den Durchmesser. Da die einzelnen Sterne (schwarze Punkte) in ihr herumschwirren, bewegen sich in jedem Augenblick von der Mitte der Galaxie aus Sterne in seine Richtung wie auch von ihm weg. Wie im Text erläutert, erscheinen dann infolge des Doppler-Effektes die Fraunhofer-Linien der Galaxie verbreitert. Durchmesser und Linienverbreiterung geben einen Hinweis auf die Gesamtmasse der Galaxie.



zur Umkehr zwingt; Reichweite und Geschwindigkeit bestimmen aber die Masse. Mit diesem Verfahren hat man zum Beispiel eine kleine Galaxie nahe am Andromedanebel untersucht (vgl. Abb. 1.1, wo man diese Begleitgalaxie als kleines, nahezu kreisrundes Wölkchen am Rande des Andromedanebels sieht). Mit vier Milliarden Sonnenmassen zählt sie zu den galaktischen Habenichtsen, wenn man sie mit ihrem hundertmal mächtigeren Nachbarn vergleicht.

### Die unsichtbare Materie

Wir hatten gesehen, daß man die Massen der Galaxien auf verschiedene Weise bestimmen kann. Bei der *Methode der inneren Geschwindigkeiten* studiert man Bewegungen in einer Galaxie, zum Beispiel ihre Rotation. Fehlt diese, dann ermittelt man die mittleren Geschwindigkeiten, mit denen sich die Sterne im Schwerfeld der Galaxie bewegen. Bei der anderen Methode – wir wollen sie die *Methode der äußeren Geschwindigkeiten* nennen – benutzt man die Gesamtbewegung der Galaxie in einem anderen Schwerfeld, etwa

## 6. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

in dem einer Begleitgalaxie. Hat man eine *Gruppe* von Galaxien (wir werden weiter unten noch ausführlich von solchen *Galaxienhaufen* sprechen, die durch ihre gemeinsame Schwerkraft aneinander gebunden sind), so zeigen die Geschwindigkeiten, mit denen sie sich gegeneinander bewegen, wie groß die Schwereanziehung der Gruppe ist. Das geht wieder nach dem gleichen Prinzip, nach dem man die Schwereanziehung einer nicht rotierenden Galaxie bestimmen kann: Aus der Geschwindigkeit, mit der sich die Sterne gegeneinander bewegen, und aus dem Durchmesser der Galaxie läßt sich auf die in ihr vereinigte Gesamtmasse schließen. Bei einem Galaxienhaufen nehmen wir die gegenseitige Bewegung der Galaxien und den Durchmesser der ganzen Galaxiengruppe, um etwas über die im ganzen Haufen vereinigte Masse zu erfahren. Man kann daraus auch grob die Massen der einzelnen Galaxien bestimmen.

So hat man also jetzt zwei prinzipiell verschiedene Methoden zur Bestimmung der Masse einer Galaxie: die Methode der *inneren* Geschwindigkeiten und die Methode der *äußeren* Geschwindigkeiten.

Vergleicht man die nach der Methode der inneren Geschwindigkeiten bestimmten Galaxienmassen, bei der also die Bewegungen der Sterne *in* der Galaxie studiert werden, mit den nach der Methode der äußeren Geschwindigkeiten bestimmten, bei der die Bewegung der gesamten Galaxie in einem äußeren Schwerfeld benutzt wird, so stößt man auf eine noch bis heute ungeklärte Diskrepanz: Die inneren Bewegungen lassen auf sehr viel geringere Massen schließen als das Bewegungsverhalten der Galaxien in einem äußeren Schwerfeld. Die Gesamtmasse einer Galaxie, die man aus der Bewegung in einem äußeren Schwerfeld bestimmt, scheint sehr viel größer als das, was man aus der in der Galaxie leuchtenden Materie erwartet.

Erinnern wir uns: Bei der Methode der inneren Geschwindigkeiten wird die Masse bestimmt, die die Sterne zum Zentrum hin zieht. Bei der Methode der äußeren Geschwindigkeiten ermittelt man die Masse der gesamten Galaxie. Sollte es in den Galaxien noch Masse geben, welche die Sterne nicht zum Zentrum hin zieht? Das wäre der Fall, wenn jede Galaxie weiter draußen, dort, wo man nichts sieht, noch große unsichtbare Materievorräte verbergen würde. Sehen wir in jeder Galaxie nur die Spitze eines Eisberges? Die leuchtende Materie einer Galaxie, also die Masse ihrer Sterne, scheint nur ein Zehntel der Gesamtmasse auszumachen. Wo stecken die restlichen 90 Prozent? Die verborgene Masse sitzt sicher nicht in den Zentralgebieten der Galaxien, sondern weiter außen.

Auch unsere Milchstraße scheint aus viel mehr Materie zu bestehen, als wir sehen, das erkennt man an der Umlaufbewegung der Sterne am äußeren Rand. Es scheint, als ob die fehlende Materie in einem Kugelraum steckt, der jede Galaxie umschließt und dessen Durchmesser den der Galaxie weit übertrifft. Gibt es Materie, die auch unser Milchstraßensystem in einem Halo umgibt? Gibt es einen weiteren Halo, gegen den unser bisher bekannter aus Sternen und Kugelsternhaufen nur ein Fliegengewicht ist? Der neue, unsichtbare Halo müßte zehnmals mehr Materie enthalten als die ganze Milchstraße.

Der Fall der unsichtbaren, nicht auffindbaren Materie in den Galaxien hat, wie jeder ungelöste Kriminalfall, immer wieder zu Erklärungsversuchen herausgefordert. Lichtschwache Sterne am Ende ihres Lebens, wie *Weißer Zwerge* oder *Neutronensterne*, in großer Zahl über den Raum verstreut, wurden herangezogen. Auch Legionen von *Schwarzen Löchern* (S. 268) nahm man zu Hilfe. Sie haben den Vorteil, daß sie eine Schwereanziehung ausüben und doch unsichtbar sind, so lange, bis zufällig Materie in sie hineinfällt. In neuerer Zeit bot sich von ganz anderer Seite eine Lösung an (S. 309).

## 7. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

### Der Zoo der Weltinseln

Die Welt der Galaxien ist reich an Formen. Da gibt es wunderbare Spiralen, daneben neblige strukturlose Gebilde. Aber nicht nur helle Spiralarme geben gewissen Galaxien ihr auffallendes Aussehen, wir sehen auch dunkle Streifen über die leuchtende Galaxie gezogen (Abb. 5.1 und 9.1). Der Streifen, der unsere Milchstraße am Himmel in zwei Teilbänder teilt, stammt von Staubmassen, die das Licht der dahinterstehenden Sterne verschlucken. Neben den vielen, verhältnismäßig normalen Galaxien – mögen sie nun Spiralen haben oder nicht – gibt es noch Ausnahmefälle, seltener vorkommende Gebilde, exotische Sonderanfertigungen. Aber versuchen wir zuerst, uns im Bereich der normalen Galaxien zurechtzufinden.

Hubble selbst hat versucht, in die Fülle der Erscheinungen Ordnung zu bringen. Er erfand ein Ordnungsschema, das im Prinzip auch heute noch benutzt wird, wenn auch in ausgefeilterer Form. Das Schema ist in Abbildung 9.4 wiedergegeben und stellt keinesfalls ein Entwicklungsschema dar, das uns andeuten sollte, aus welcher Form sich im Laufe der Zeit welche andere entwickelt. Es beruht einfach darauf, daß man im großen und ganzen drei Haupttypen von Galaxien kennt: elliptische Galaxien, Spiralen und Balkenspiralen.

Von allen mit großen Teleskopen erkennbaren Galaxien gehören 80 Prozent zu den elliptischen, wie die beiden Begleitgalaxien des

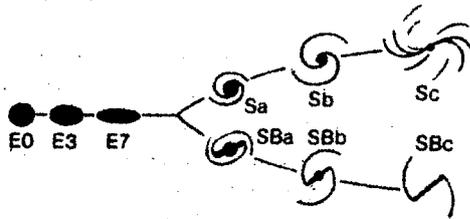


Abb. 9.4: Um in die Vielfalt der Formen, die man an Galaxien beobachtet, Ordnung zu bringen, hat Hubble das hier vereinfacht wiedergegebene Schema benutzt. Mit einigen später hinzugekommenen Verfeinerungen ist es auch heute noch im Gebrauch. Das Schema war nie als eine Entwicklungssequenz gedacht, daß etwa mit zunehmendem Alter eine Galaxie vom links dargestellten Typ sich in einen rechts abgebildeten Typ verwandeln könnte.

Andromedanebels (Abb. 1.1). Ihre Bilder zeigen keine Strukturen. Elliptische Galaxien erscheinen als verwaschene Flecken, kreisrund oder elliptisch, bei denen die Helligkeit von der Mitte her nach außen abfällt. Hubble hat sie nach Unterklassen geordnet, von der kreisrund erscheinenden Klasse E0 mit zunehmender Abplattung bis zu E7. Sind die der Klasse E0 kugelförmig? Oder sehen wir bei ihnen auf eine abgeplattete Linse, die, von der Seite aus gesehen, wie E7 aussieht, von oben her betrachtet aber ein kreisrundes E0-Bild liefert? Es scheint so, als ob unter den E0-Galaxien in Wahrheit alle Typen vorkommen, von kugelförmigen bis zu abgeplatteten, die nur aus einer besonderen Richtung betrachtet kreisrund erscheinen. Es ist aber auch nicht auszuschließen, daß es neben den Linsen noch längliche Formen gibt, wie dicke Zigarren. Wenn wir sie aus ihrer Längsrichtung anblicken, erscheinen sie wie E0, von der Seite erscheinen sie länglich, wie E7.

Die Massen der elliptischen Galaxien erstrecken sich von einigen Millionen Sonnenmassen, also von recht ärmlichen Objekten, bis zu einigen Billionen (also einigen tausend Milliarden) Sonnenmassen.

## 8. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Es fällt auf, daß sie alle im Vergleich zu ihrer Masse verhältnismäßig schwach leuchten. Man könnte in ihnen Sterne vermuten von der Masse der Sonne, aber nur mit einem Hundertstel ihrer Leuchtkraft. Aus unserem Milchstraßensystem kennen wir solche Sterne. Sie haben ihren Kernenergievorrat erschöpft. Als Weiße Zwerge verglühen sie langsam. Diese alten, ausgebrannten Sterne haben geringe Leuchtkraft. Wahrscheinlich enthalten die elliptischen Galaxien viele alte Sterne, so wie unsere Kugelsternhaufen, obwohl die Sterne in diesen noch heller strahlen. Daß die Sterne der Halopopulation unseres Milchstraßensystems den Sternen in den elliptischen Galaxien irgendwie ähnlich sind, kann man vermuten, denn die hellsten Sterne der Halopopulation sind rötlich. Auch die elliptischen Galaxien erscheinen rötlich wie die Kugelsternhaufen unseres Milchstraßensystems. Sind die elliptischen Galaxien vielleicht gigantische Kugelsternhaufen?

Wenn man in unserer Galaxis sieht, daß die Halopopulation eigentlich aus recht langweiligen Sternen besteht, Sterne, welche die besten Jahre bereits hinter sich haben, dann könnte man vermuten, daß auch die elliptischen Galaxien recht langweilige Gebilde sind. Wir werden aber sehen, daß gerade in ihren Zentralgebieten rätselhafte Dinge vor sich gehen. Auch bei denen, welche die besten Jahre schon hinter sich haben, tut sich noch etwas. Da steht im Sternbild der Jungfrau die elliptische Riesengalaxie M87 (Abb. 1.3), aus deren Zentrum mit einer Geschwindigkeit von 300 km/s ein scharfer leuchtender Gasstrahl herausgeschossen kommt – Herr Meyer hatte ihn in seinem ersten Traum gesehen. Was geht im Zentrum dieses Riesen vor?

Elliptische Galaxien scheinen sonst kaum Gas- und Staubmassen zu enthalten. Deshalb bilden sich auch keine neuen Sterne. Man darf sich also nicht wundern, daß die Sterne dort schon alt sind, der Nachwuchs fehlt, die Population vergeist.

Nun zu den *Spiralgalaxien*. Bei ihnen scheint es zwei Familien zu geben. Da sind zum einen die normalen Spiralen, bei denen aus einem runden Mittelteil heraus an entgegengesetzten Seiten zwei Arme austreten und sich nach außen winden. Hubble ordnet diese Familie in drei Untergruppen Sa, Sb und Sc, wobei in Sa die Spiralen sehr dicht gewickelt sind, während sie bei Sc weit geöffnet erscheinen. Hand in Hand mit dem Fortschreiten von Sa nach Sc wird auch der Zentralteil immer unscheinbarer. Der Andromedanebel (Abb. 1.1) liegt in der Gruppe Sb, die Galaxie M101 von Abbildung 1.2 gehört zu Sc. Da wir mitten in unserer eigenen Galaxis sitzen und den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen, ist es für uns schwer, unser Milchstraßensystem einzuordnen. Zwar wissen wir, daß es eine Spiralstruktur hat, aber über die Öffnung seiner Spiralarme können wir nur Vermutungen anstellen. Allgemein glaubt man, daß es wie der Andromedanebel zur Gruppe Sb gehört.

Neben der Familie der gewöhnlichen Spiralen gibt es noch die der *Balkengalaxien*. Bei ihnen kommen die Arme nicht aus dem Zentrum, sondern vielmehr aus einem zigarrenförmigen Balken (Abb. 9.5). Hubble teilte sie – nach der Öffnung ihrer Spiralarme – wieder in drei Untergruppen auf: SBa, SBb, SBc. Auch hier verliert der Zentralteil der Galaxie mit dem Fortschreiten in der Gruppe von a bis c zusehends an Bedeutung.

Ganz allgemein kann man sagen, daß im Hubbleschen Schema von links nach rechts Gas- und Staubmassen immer wichtiger werden. In den Galaxien der Mitte und rechts können sich, wenn die Gasdichte genügend groß ist, heute noch Sterne bilden. Dies geschieht in den Spiralarmen. Warum die Sterne gerade in den Spira-

## 9. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

len entstehen, ist bis heute noch nicht vollständig verstanden, doch hat man recht plausible Modelle dafür.

Neben den aufgeführten Klassen und Gruppen gibt es noch Ga-

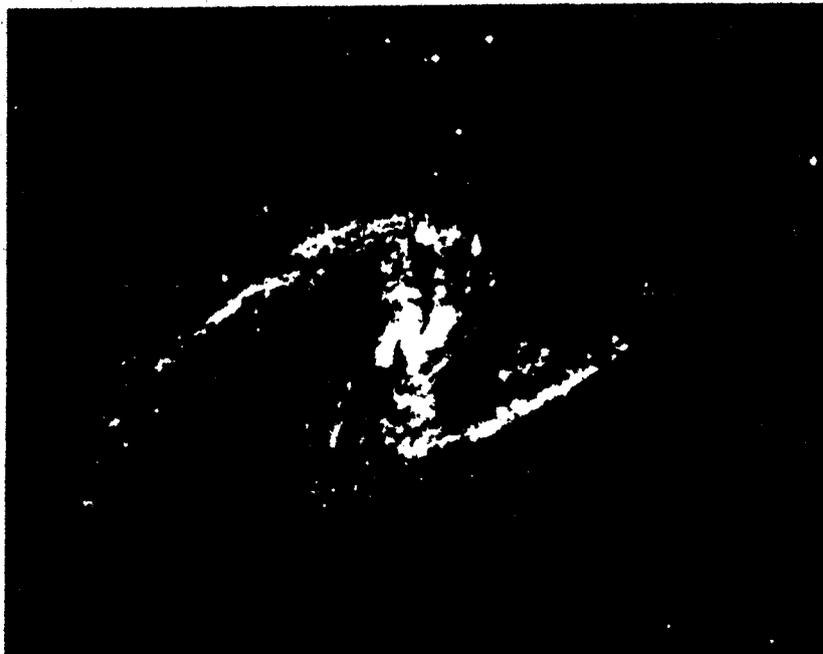


Abb. 9.5: Die Balkengalaxie NGC 1365 (Aufnahme: P. O. Lindblad, European Southern Observatory).

laxien, die in das Schema nicht hineinpassen. Sie sind nicht strukturlos wie die elliptischen, zeigen aber auch keine Spiralen. Die beiden Magellanschen Wolken, die unsere Milchstraße begleiten, sind Beispiele für diese irregulären Galaxien. Sie haben keinen Kern und keine Spiralen, obwohl ihre Sterne mehr denen in Spiralen ähneln. In ihnen scheinen noch heute Sterne zu entstehen – kein Wunder, denn sie enthalten viel Staub und Gas. Zu den irregulären Galaxien zählt man darüber hinaus auch noch solche, die man anderswo nicht unterbringt.

Wenn man von den Spiralgalaxien und den irregulären nach den oben beschriebenen Methoden die Massen bestimmt und mit ihren Leuchtkräften vergleicht, dann scheint es, als ob bei den Irregulären auf eine Sonnenmasse nur ein Drittel der Sonnenleuchtkraft kommt. Das erwarten wir bei nicht zu alten Sternen. Sehr viele leben dann noch von ihrer Kernenergie und decken daraus ihre Leuchtkraft. Daß sie im Mittel weniger strahlen als die Sonne, liegt

darin, daß es in diesen Galaxien, wie auch in unserer Milchstraße, sehr viel mehr Sterne von geringerer Masse als die Sonne gibt. Solche Sterne strahlen sehr viel schwächer.

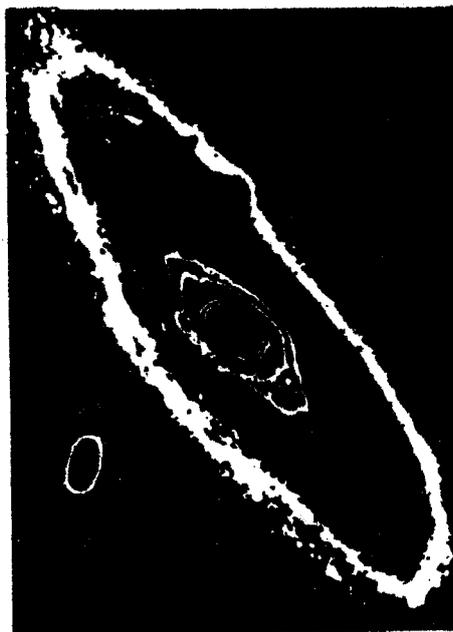
### Kerne von Galaxien

In den Kapiteln 1 und 3 lernten wir das Zentrum unseres Milchstraßensystems kennen. Von unserem Beobachtungsort in unserer Galaxis aus betrachtet, verbirgt es sich hinter dicken Staubwolken. Bei anderen Galaxien blicken wir von außen auf das Zentralgebiet, sehen es also offen vor uns. Dabei beobachten wir in den Kerngebieten der Galaxien unerklärliche Dinge.

In vielen Spiralgalaxien erkennt man in der Mitte einen fast sternartigen Kern. Meist ist auf den Fotografien das Zentralgebiet

## 10. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

**Abb. 9.6:** Eine Isophotenkarte des Andromedanebels zeigt, daß Galaxien in ihren Zentralgebieten nahezu punktförmige Konzentrationen enthalten: galaktische Kerne. Die Grenzlinien zwischen verschiedenen grauen Bereichen des Bildes verbinden Punkte einer Fotografie des Andromedanebels, die gleiche Schwärzung haben, sie sind also Linien gleicher Helligkeit. Man erkennt, daß sie von ihrer großen Unregelmäßigkeit in den äußeren Bereichen nach innen immer regelmäßiger werden und einen kleinen Fleck im Zentrum umschließen. Das ist die hellste Stelle, der Kern der Andromedagalaxie. Man beachte, daß auch die beiden Begleitgalaxien, auf die wir schon bei Abbildung 1.1 hingewiesen haben, durch die Isophotenlinien deutlich hervorgehoben werden (Aufnahme: Zentralinstitut für Astrophysik, Potsdam, Karl Schwarzschild-Observatorium Tautenburg, DDR).



überbelichtet, so daß man den Kern gar nicht erkennt. Am Observatorium in Tautenburg in der DDR hat man eine spezielle Technik entwickelt, um Strukturen fotografisch sichtbar zu machen, wenn starke Helligkeitsunterschiede die gleichzeitige Abbildung heller und schwacher Teile eines Bildes verhindern. Abbildung 9.6 zeigt eine mit dieser Technik gewonnene Aufnahme des Andromedanebels, in der man das nahezu punktförmige Zentrum erkennen kann.

Das Gebilde im Zentrum des Andromedanebels ist aber kein Stern. Man kann deutlich eine räumliche Ausdehnung erkennen, die auf einen Durchmesser von einigen pc schließen läßt. Dort wird – wie das Spektrum zeigt – heißes Gas aus dem Kern herausgeblasen, jährlich etwa ein Zehntel der Masse der Sonne.

Was steht nun dort, von wo aus die Gasmassen in den Raum strömen? Es sieht so aus, als ob es sich um einen riesigen Sternhaufen handelt, wahrscheinlich stehen dort 13 Millionen Sonnenmassen. Dieser Riesensternhaufen im Herzen des Andromedanebels dreht sich in 400 000 Jahren um seine eigene Achse. Das ist schnell. Bedenken wir doch, daß die Umlaufzeit der Sterne in der Scheibe einer Galaxie nach Hunderten von Millionen Jahren gemessen wird.

In anderen Spiralgalaxien findet man noch aktivere Kerne, Ansammlungen von heißen Sternen, die das umgebende Gas erhitzen und nach außen blasen.

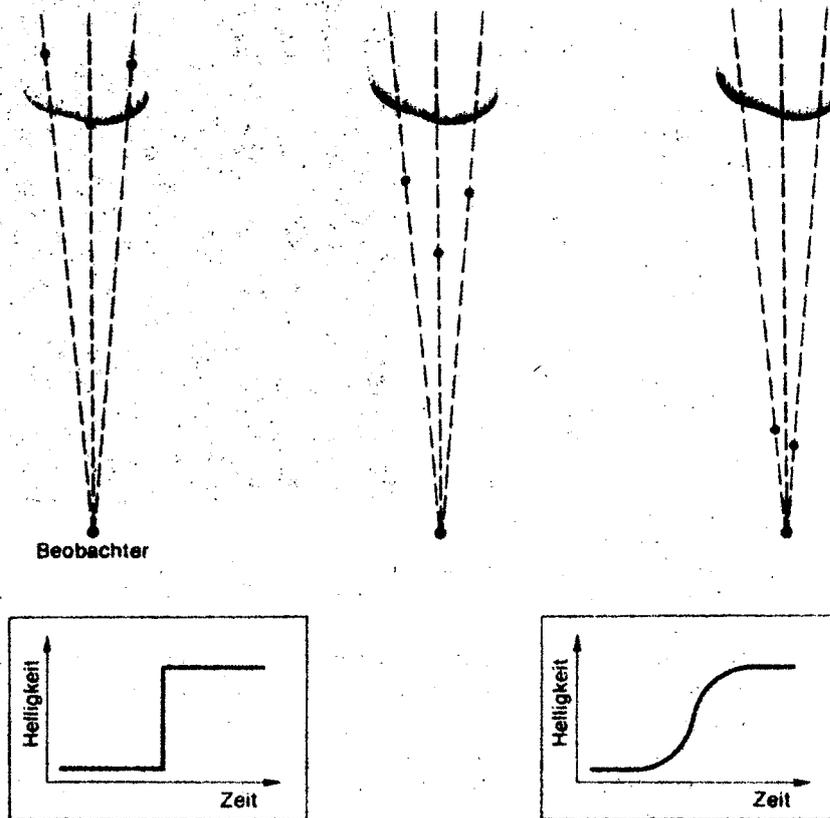
### Seyfert-Galaxien

Im Jahre 1943 untersuchte der amerikanische Astronom Carl Seyfert auf dem Mt. Wilson zwölf Galaxien, die ihm wegen ihrer Kerne aufgefallen waren. Er kam nach dem Krieg bei einem Autounfall ums Leben und hat niemals erfahren, welches Aufsehen seine Galaxien noch erregen würden.

Seyferts Galaxien hatten viel hellere Kerne als normale Spiralnebel: im Fernrohr sieht man zuerst den sternartigen hellen Kern, dann erst die ihn umgebende Galaxienscheibe. Die Durchmesser der Kerne scheinen bei einigen hundert pc zu liegen. Später fiel auf, daß in diesen Kernen Gas von extrem hoher Temperatur steht. Den

## 11. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Gasatomen dort wurden von der heißen Strahlung Elektronen weggerissen. Man findet Eisenatome, denen 13 Elektronen fehlen! Vom Kern jeder Seyfert-Galaxie kommt starke Wärmestrahlung, oft



**Abb. 9.7:** Wenn ein Körper, der von einem Beobachter so weit entfernt ist, daß dieser ihn nur als einen Punkt sieht, schlagartig heller wird (linke untere Tafel), so nimmt der Beobachter nur ein allmähliches Hellerwerden wahr (rechte untere Tafel). Das rührt daher, daß das Licht von verschiedenen Stellen des aufleuchtenden Körpers zum Beobachter verschieden lange Wege zurückzulegen hat und daß deshalb die Signale vom Aufleuchten erst allmählich eintreffen, wie das in den oberen Teilzeichnungen an den Lichtsignalen von drei Stellen der Wolke angedeutet ist. Links werden drei Signale von der Wolke ausgesandt. Rechts hat das erste fast den Beobachter erreicht, während die beiden anderen etwas später eintreffen werden.

strahlt er im Infraroten soviel ab wie alle Sterne unserer Milchstraße zusammengenommen in allen Spektralbereichen. Dabei scheint sich die Stärke dieser Strahlung zu ändern. Manchmal steigt sie innerhalb weniger Wochen auf das Doppelte an, um danach wieder abzusinken.

Aus dem Tempo, mit dem sich die Helligkeit des uns punktförmig erscheinenden Kerns ändert, können wir etwas über seine Größe lernen. Nehmen wir an, ein ausgedehntes Raumgebiet möge von jeder Stelle Strahlung zu uns senden (Abb. 9.7), doch plötzlich würde sich die Strahlungsleistung jedes Gramms der Materie verzehnfachen. Nehmen wir weiter an, wir beobachten den Vorgang aus großer Entfernung, von so weit draußen, daß uns die ausgedehnte Strahlungsquelle im Fernrohr nur als Punkt erscheint. Die Nachricht von der Verzehnfachung der Strahlungsleistung erreicht uns von den verschiedenen Stellen der Quelle zu etwas verschiedenen Zeiten. Zuerst empfangen wir die verstärkte Strahlung von der nächsten Stelle, dann von den weiter entfernt stehenden Bereichen der Quelle. Obwohl sich die Strahlungsleistung schlagartig erhöht

## 12. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

hat, nehmen wir nur ein langsames Ansteigen wahr. Die Zeitspanne, innerhalb der für uns die Quelle zehnmal heller wird, entspricht etwa der Zeit, welche das Licht benötigt, um den Durchmesser der Quelle zu durchlaufen.

Wenn der Kern einer Seyfert-Galaxie für uns seine Helligkeit innerhalb von zwei Wochen verdoppelt, so muß die Strahlung aus einem Bereich kommen, dessen Durchmesser nicht merklich größer ist als die Strecke, die das Licht in zwei Wochen zurücklegt, das sind elf tausendstel pc und damit weniger als ein Hundertstel der Entfernung des nächsten Fixsterns von der Sonne, also eine kleine Entfernung innerhalb einer Galaxie. Und aus diesem kleinen Raum kommt eine Strahlungsleistung, vergleichbar der unserer ganzen Galaxis mit ihren 100 Milliarden Sternen. Bei einer Seyfert-Galaxie hat man sogar Schwankungen ihrer Röntgenhelligkeit innerhalb von 100 Sekunden beobachtet (vgl. S. 273).

Welch ungeheuerere Energiequelle steckt in den Kernen der Seyfert-Galaxien! Wir werden später sehen, daß diese Objekte viele Ähnlichkeiten mit einer scheinbar ganz anderen Art von Gebilden haben, den sogenannten *Quasaren*, mit denen wir uns in Kapitel 11 befassen werden.

### Haufen von Spiralnebeln

Nicht nur die einzelnen Galaxien bergen Rätsel in ihrem Inneren, auch die Galaxien in ihrer Gesamtheit zeigen unerklärliche Eigenschaften.

Schon Alexander von Humboldt war aufgefallen, daß die von Herschel beobachteten Nebelflecken am Himmel nicht gleichförmig verteilt sind. In seinem 1850 erschienenen »Kosmos« erwähnte er den Virgo-Haufen, den wir Herrn Meyer schon in seinem ersten Traum sehen ließen.

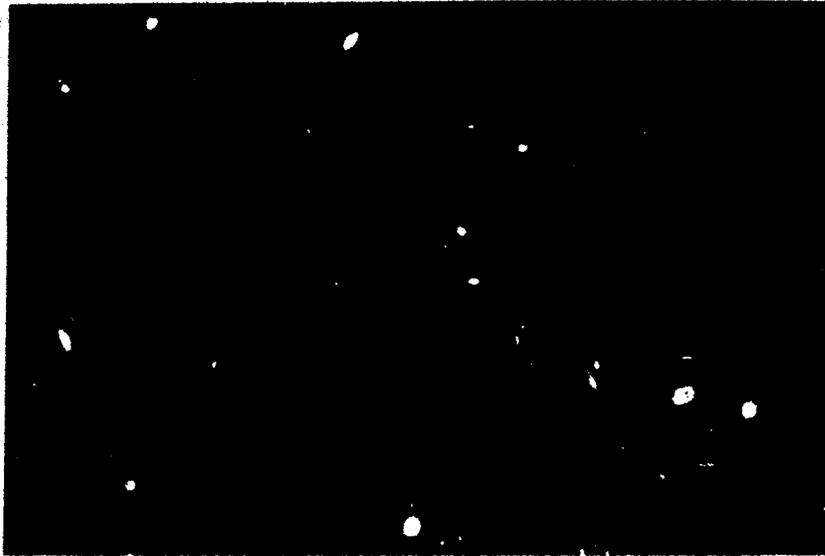
Daß die Galaxien den Raum nicht gleichförmig erfüllen, hängt damit zusammen, daß sie sich gegenseitig anziehen. Wir hatten schon gesehen, daß es Galaxien gibt, die sich umeinander bewegen, durch ihre gegenseitige Anziehung aneinander gebunden. Gelegentlich kommen sich Galaxien gegenseitig so nahe, daß sie einander Sterne zu stehlen versuchen. Eine Galaxie zieht eine ganze Kette von Sternen aus der anderen heraus, so daß es aussieht, als hätten die Galaxien Schwänze. Das aber sind Einzelfälle, die nicht so wichtig sind wie die Vorliebe der Galaxien, in Gruppen aufzutreten.

Unser eigenes Milchstraßensystem steht nicht isoliert im Raum. Es gehört zu einer Familie, die wiederum aus drei Untergruppen besteht. Die eine bilden wir mit den beiden Magellanschen Wolken und einigen kleineren Systemen. In 670 kpc steht der Andromedanebel mit seinen Begleitgalaxien. Zu dieser Gruppe gehört auch die Sc-Galaxie M33 mit mehreren kleineren Galaxien. Schließlich gibt es noch eine Untergruppe aus weniger prominenten Sternsystemen. Alles zusammen sind es an die 30 Familienmitglieder. Gut die Hälfte der schwächeren Objekte sind *Zwerggalaxien*, kleine Ansammlungen von verhältnismäßig wenig Sternen. Man ist versucht, sie als etwas zu groß geratene Kugelsternhaufen anzusehen. Das ist nicht richtig, denn das System Fornax, eine dieser Zwerggalaxien, hält sich selbst mindestens fünf eigene Kugelsternhaufen. Aber die Familie aller dieser Objekte, die *lokale Gruppe*, die sich über etwa 2 Mpc erstreckt, ist ein recht armseliges Gebilde.

In 24 Mpc Entfernung in Richtung des Sternbildes der Jungfrau steht eine weit prächtigere Ansammlung von Galaxien, der *Virgo-*

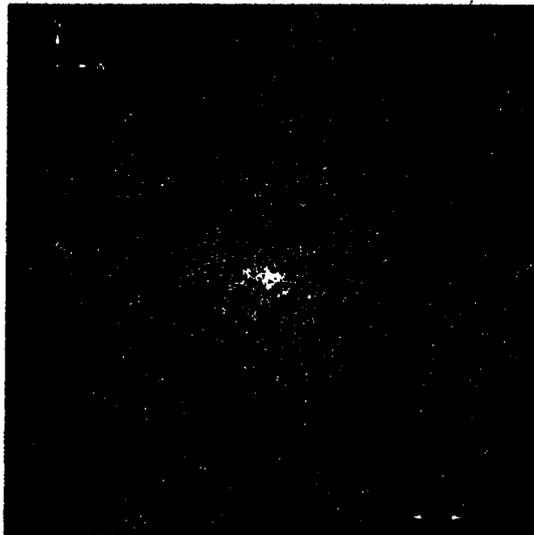
### 13. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

*Haufen* (Abb. 9.8, Herr Meyer hat ihn in Kapitel 1 erlebt). Es sind 2500 Galaxien in einem Gebiet von etwa 5 Mpc Durchmesser, durch ihre gegenseitige Schwerkraft zusammengehalten. Dieser Ga-



**Abb. 9.8:** Der innere Teil des Virgo-Haufens. Da alle Mitglieder des Haufens etwa gleichweit von uns entfernt sind, entsprechen die verschiedenen Größen der Galaxien im Bild tatsächlichen Größenunterschieden. Die scharfen Punkte sind Sterne in unserer Galaxis, sie stehen also im Vordergrund (Aufnahme: Deutsch-Spanisches Astronomisches Zentrum).

**Abb. 9.9:** Die Verteilung der hellsten Mitglieder des Coma-Haufens am Himmel. Jeder Punkt stellt eine Galaxie dar. Die rechts unten angegebene Strecke veranschaulicht den Durchmesser des Vollmonds (nach F. Zwicky).



Galaxienhaufen bewegt sich als Ganzes mit der Fluchtbewegung, die ihm nach dem Hubbleschen Gesetz zukommt, von uns weg, etwa mit 1000 km/s. Die einzelnen Galaxien aber bewegen sich in wirrem Flug umeinander, einem riesigen Bienenschwarm gleich, der trotz der gegenseitigen Bewegung zusammenbleibt. Er ist so groß, daß man die Fläche, die er am Nachthimmel einnimmt, trotz seiner ungeheuren Entfernung nur knapp mit der ausgestreckten Hand verdecken kann. Die Galaxien dieses Haufens sind so schwach, daß man die hellsten unter ihnen nicht einmal mit dem Feldstecher ausmachen kann. Man benötigt mindestens ein größeres Amateurteleskop.

In der siebenfachen Entfernung des Virgo-Haufens steht ein weiterer, noch reicherer Galaxienhaufen im Sternbild Coma Berenices (Abb. 9.9), der nun schon fast mit 7000 km/s vor uns flieht.

## 14. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Man hat den Himmel gründlich nach Galaxien abgesucht und fand, daß Galaxienhaufen etwas durchaus Normales sind. Wahrscheinlich stehen 70 Prozent aller Galaxien in Haufen. Der kalifornische Astronom George Abell (1927–1983) hat 1958 eine Liste von 2712 Galaxienhaufen veröffentlicht, von denen die meisten mehr als 50 Galaxien enthalten. Die fernsten Galaxienhaufen des Abellschen Katalogs sind etwa 300 Mpc weit draußen im Raum.

In vielen Haufen scheint es eine Art Obergalaxie zu geben, die alle anderen an Masse und Helligkeit übertrifft und deshalb im Verdacht steht, sich auf Kosten anderer bereichert zu haben.

### Kannibalismus unter Galaxien

In den Zentralgebieten großer Galaxienhaufen stehen sich die einzelnen Sternsysteme oft so nahe, daß ihr gegenseitiger Abstand mit ihrem Durchmesser vergleichbar wird. Da sind Zusammenstöße unvermeidbar. Galaxien prallen aufeinander! Was geschieht dann?

Auf den ersten Blick nichts, denn die Galaxien bestehen ja hauptsächlich aus Sternen, zwischen denen der Raum fast leer ist. Wenn zwei Galaxien zusammenstoßen, dann durchdringen sie einander, ohne daß die Sterne einzeln aufeinandertreffen. Sie sind so winzige Punkte im leeren Raum, daß, von unwichtigen seltenen Einzelfällen abgesehen, jeder Stern der einen Galaxie an den Sternen der anderen vorbeifliegt. Die Gas- und Staubmassen dagegen prallen mit großer Geschwindigkeit aufeinander, doch den Galaxien dürfte das nicht allzuviel ausmachen. In der letzten Zeit begann man, die gegenseitige Durchdringung zweier Galaxien auf Computern nachzuvollziehen.

Der Zusammenstoß einzelner Sterne spielt dabei keine Rolle. Das wußte man schon, bevor man mit dem Problem auf den Computer ging. Es ist die Schwerkraft, mit der sich die Sterne der beiden Galaxien beeinflussen. Es kann durchaus sein, daß ohne einen einzigen Sternzusammenstoß die kleinere Galaxie in der größeren steckenbleibt. In einem Galaxienhaufen kann also eine Galaxie eine andere auffressen. Ja mehr noch, sie kann nacheinander immer wieder Galaxien verzehren und so zur dicksten und fettesten Galaxie, wir

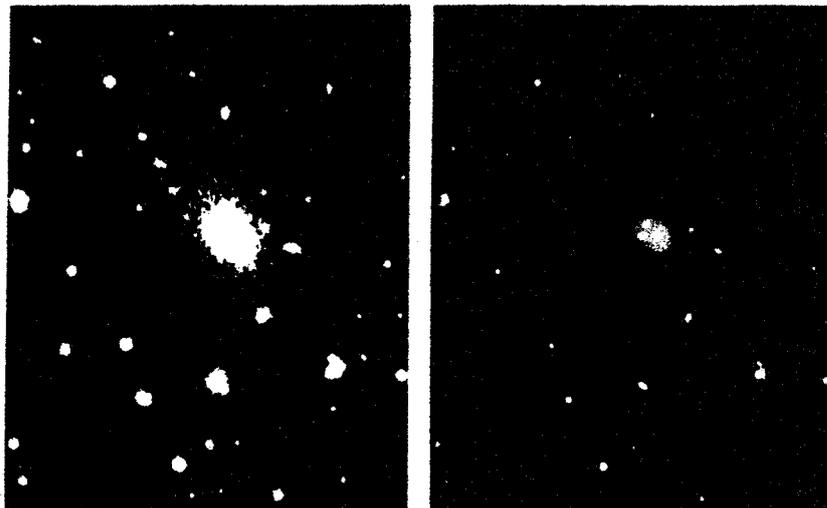


Abb. 9.10: Die Kannibalengalaxie im Galaxienhaufen Abell Nr. 2199. Die körnige Struktur des linken Bildes rührt von der benutzten fotografischen Platte her, aus der es vergrößert worden ist. Die Galaxie NGC 6166 ist im linken Bild in der Mitte als unscharfer heller Fleck zu sehen. Rechts erkennt man, daß

## 15. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

sie aus drei Verdichtungen besteht. Hat die Galaxie zwei kleinere »verschluckt«, deren dichte Zentralgebiete sich noch nicht aufgelöst haben und die daher als helle »Knoten« in der Galaxie zu erkennen sind? Man beachte im rechten Bild die zahlreichen Galaxien, die sich als diffuse Flecken, oft von länglicher Form, von den kreisrunden, recht scharf begrenzten hellen Bildern der Vordergrundsterne unterscheiden (linkes Bild: © 1960 National Geographic Society – Palomar Sky Survey. Reproduced by permission of the California Institute of Technology; rechtes Bild: B. Loibl, Deutsch-Spanisches Astronomisches Zentrum).

nannten sie Obergalaxie, des Häufens werden. Wie ein junger Kuckuck sitzt sie im Nest und dominiert den Galaxienhaufen.

Im Haufen Nr. 2199 aus Abells Katalog steht eine solche Galaxie, so groß und beherrschend, daß auf sie der Verdacht fällt, sie habe sich in der Vergangenheit des öfteren schon an Schwestergalaxien gelabt. Tatsächlich gelang es, diese Riesengalaxie zu überführen. Man muß sie nur mit so kurzer Belichtungszeit fotografieren, daß auf der Platte das helle Zentralgebiet, das normalerweise überbelichtet ist und nur als Fleck erscheint, durchsichtig wird. Dann sieht man, daß in ihrem Magen zwei kleine Galaxien liegen, noch unverdaut wie Wackersteine (Abb. 9.10).

In Galaxienhaufen scheint es überhaupt aufregender zuzugehen, als es auf den ersten Blick aussieht. Das merkte man, als man Empfänger für Röntgenstrahlung mit Hilfe von Raketen über die dafür undurchsichtige Erdatmosphäre schoß und den Himmel nach Röntgenquellen absuchte. Viele Galaxienhaufen »glühen« im Röntgenlicht. Nicht nur von den Galaxien des Häufens, sondern auch vom leeren Raum zwischen ihnen erhalten wir Strahlung. In den Innengebieten der Galaxienhaufen scheint Gas zu stehen, das eine Temperatur von Millionen Grad hat und das thermische Strahlung (vgl. S. 60) aussendet. Bei dieser Hitze entsteht Röntgenstrahlung. Woher kommt das Gas, das zwischen den Galaxien steht? Es sind wahrscheinlich Gasmassen, welche die Galaxien im Haufen verloren haben. Es scheint, als ob keine Galaxie ihre Gasmassen ganz für sich behalten kann. Sie blasen Gaswolken in den Raum, vor allem, wenn sie aktive Kerne haben. Normalerweise strömen diese Gasmassen in den Raum zwischen den Galaxien und verdünnen sich bis zur Unmerklichkeit. In Galaxienhaufen müssen sie sich aber dort sammeln, wo die Schwerkraft sie hinzieht, also in der Mitte des Häufens. Sie werden wahrscheinlich durch die mit hoher Geschwindigkeit darin herumfliegenden Sternsysteme so aufgeheizt, daß sie im Bereich der Röntgenstrahlung leuchten.

### Galaxienhaufen sammeln sich zu Superhaufen

Die Galaxienhaufen sind nicht die größten Komplexe, in denen sich die Materie der Welt zusammenklumpt. In Richtung des Sternbildes Herkules stehen in einer Entfernung von etwa 200 Mpc mehrere Galaxienhaufen in einem Raumgebiet, das etwa 100 Mpc Durchmesser hat. Im Unterschied zu den Galaxienhaufen reicht die Schwerkraft bei diesem sogenannten *Superhaufen* nicht aus, um ihn gegen die Hubble-Expansion zusammenzuhalten. Der Superhaufen im Herkules vergrößert sich im Laufe der Zeit.

Unser lokales System von Galaxien gehört zu einem Komplex von Galaxienhaufen, in dessen Mitte der Virgo-Haufen steht. Auch diese Ansammlung von Galaxiengruppen dehnt sich mit der Expansion des Weltalls aus. Wir sahen bereits, daß der Virgo-Haufen von uns wegfliegt. Allerdings scheint es, als ob der Virgo-Komplex infolge seiner großen Anziehungskraft die Hubble-Bewegung sei-

## 16. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

ner Mitglieder, also auch die unserer Galaxis, merklich stört. Das ist ein Umstand, der uns bei der Bestimmung der Hubble-Zahl Schwierigkeiten bereitet. Der Virgo-Haufen selbst dehnt sich aber nicht mit der Hubble-Bewegung aus. Seine Mitglieder stehen so dicht beieinander, daß die wechselseitige Schwerkraft sie zusammenhält.

Superhaufen sind dünner gepackt als Galaxienhaufen. Wahrscheinlich sind alle Galaxienhaufen zu Superhaufen gebündelt. Man glaubt, daß es außerhalb der Superhaufen keine Galaxien gibt. Ist eine Galaxie schon einmal eine Einzelgängerin und ist sie kein Mitglied eines Galaxienhaufens, dann steht sie aber – nach allem, was wir heute wissen – wenigstens in einem Superhaufen. Außerhalb der einzelnen Superhaufen steht nichts, zwischen ihnen sind große leere Räume. Es scheint aber keine Super-Superstrukturen zu geben. Die größten Strukturen in der Verteilung der Materie im Weltall lassen Durchmesser von 50 bis 100 Mpc erkennen. Der Herkules-Superhaufen ist der größte zur Zeit bekannte. Wenn also die Materie der Welt in Sternen, in Galaxien, in Galaxienhaufen und in Superhaufen konzentriert ist, so scheint es doch, als ob die Superhaufen das Weltall gleichförmig erfüllen. Man kann also sagen, daß die Welt im Großen überall gleich ist und nichts dem kosmologischen Prinzip widerspricht.

Das Wort Superhaufen ist irreführend, da es ein mehr oder weniger kugelförmiges Gebilde suggeriert. Das ist nicht richtig. Es scheint eher so zu sein, daß Galaxienhaufen im Raum wie durch »Stege« und »Wände« miteinander verbunden sind. In ihnen stehen Galaxien, während der Raum dazwischen leer ist. So haben wir eher eine Waben- oder Zellenstruktur.

Der Holländer Jan Oort schrieb 1982: »Das Universum besteht aus vielen aneinanderstoßenden Zellen. Das Innere dieser Zellen ist leer (das heißt, es enthält keine leuchtende Materie), die Zellwände bestehen aus einer dünnen Schicht von Galaxien. An einigen Stellen sind die Wände in Form von Haufenketten verstärkt. Diese Ketten laufen in sehr galaxienreichen Knoten zusammen, in deren Zentrum meist ein hervorstechender Galaxienhaufen (Perseus-Haufen, Virgo-Haufen, . . .) steht.« Soweit einer der bedeutendsten Astronomen unseres Jahrhunderts. Die Durchmesser der Zellen, von denen er spricht, liegen bei 50 bis 100 Mpc, sie sind die größten Strukturen, die wir in unserer Welt kennen.

Obwohl die einzelnen Galaxien kleine Störbewegungen zeigen, welche der gleichmäßigen Hubble-Expansion überlagert sind, so sind diese doch gering. Die Superstrukturen »zerfließen« durch diese Bewegungen nicht im Laufe der Zeit. Ihre Mitglieder, die Galaxien und Galaxienhaufen, füllen nicht im Laufe der Zeit die leeren Räume zwischen den »Zellwänden« auf. Das Weltalter ist viel zu kurz, die Störbewegung viel zu gering. So müssen wir annehmen, daß die Anhäufungen von Materie, die wir in den Superstrukturen sehen, seit dem Anfang der Welt da sind und daß sie mit der Expansion der Welt lediglich ihren Durchmesser vergrößert haben.

So weit wir in den Raum hineinsehen können, erkennen wir Galaxien, in Haufen und Superstrukturen gesammelt. Wo ist das Ende? Die vorläufige Grenze wird uns durch unsere Teleskope gesetzt. Je weiter draußen eine Galaxie steht, um so mehr wird ihre bei uns ankommende Strahlung verrötet und durch den Verdünnungseffekt geschwächt. Um so schwieriger wird es, sie auf einer Himmelsaufnahme vom Himmelsuntergrund zu trennen, von dem sie sich kaum mehr abhebt. Daß weiter draußen noch andere Himmelskörper stehen, das haben wir erst durch Radiowellen aus dem Weltall erfahren.

## 17. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

### Radiogalaxien

Man kennt heute viele Galaxien, die starke Radiostrahler sind, und im Vergleich zu ihnen senden normale Galaxien wie die unsere oder der Andromedanebel so gut wie nichts im Radiobereich aus. Wie bei der Radiogalaxie Cygnus A machen sich diese Galaxien als starke Strahler bemerkbar, selbst wenn sie so weit draußen stehen, daß ihr optisches Bild unscheinbar geworden ist. Ja, man kann erwarten, daß Radiogalaxien dem Radioastronomen noch auffallen, wenn sie so weit entfernt sind, daß sie optisch gar nicht mehr wahrnehmbar sind. Aber viele Radioquellen sind mit sichtbaren Galaxien identifiziert worden. Als die Radioteleskope besser wurden, konnte man genauer erkennen, von welchen Bereichen einer Radiogalaxie die Strahlung eigentlich zu uns kommt. Da kam die nächste Überraschung, wir hatten sie bei Cygnus A schon erwähnt. Die Radiogalaxien sind Doppelquellen. In vielen Fällen stammt die Strahlung gar nicht aus der Galaxie selbst, sondern vom leeren Raum daneben! Zwar kommt Radiostrahlung direkt von der Stelle, wo die zu Cygnus A gehörige Galaxie steht, aber das meiste kommt aus zwei Gebieten, die als helle Radioflecken in etwa 50 kpc vom Zentrum der Galaxie entfernt nach beiden Seiten hin stehen. Beide Flecken sind also vier Durchmesser unseres Milchstraßensystems voneinander entfernt (Abb. 10.4).

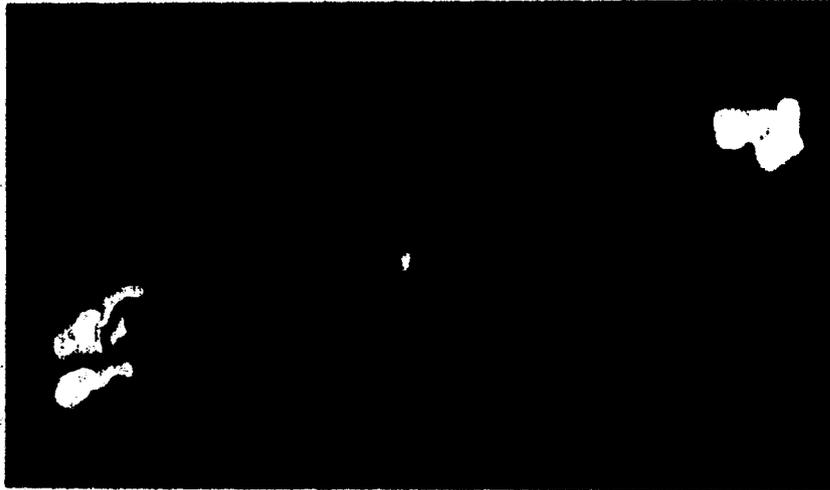
Bald sollte sich herausstellen, daß das bei Radiogalaxien so üblich ist. Ihre Radiostrahlung kommt aus Bereichen, die scheinbar leer sind. Sollten die Galaxien irgend etwas ausgeschleudert haben, was nun zwar unsichtbar, aber immer noch aktiv in der Nachbarschaft steht und strahlt? Da auch die Strahlung der Radiodoppel-  
flecken Synchrotronstrahlung ist, müssen an den Orten der ausgeschleuderten Ballen Magnetfelder und rasch fliegende Elektronen sein. Bei der intensiven Strahlung, die wir aus diesen sonst leeren Blasen erhalten, muß man sich fragen, wie es möglich ist, daß dort noch immer rasch bewegte Elektronen strahlen, obwohl sie sich doch gerade wegen ihrer Abstrahlung hätten verlangsamen müssen. Es wird noch aufregender!

Bei manchen Galaxien entdeckte man nicht nur zwei, sondern vier solche Strahlungsblasen. Die beiden äußeren wurden offensichtlich lange vor den beiden inneren ausgeschleudert. Dabei fällt auf, daß die Galaxie das zweite Wolkenpaar in dieselben beiden entgegengesetzten Richtungen geschleudert hat wie das erste. Dazwischen müssen lange Zeiträume verstrichen sein, über die sich die Galaxie diese Richtungen »gemerkt« haben muß.

Woher beziehen die Radioblasen der Galaxien ihre ungeheure Energie, die sie noch intensiv strahlen läßt – vielleicht Millionen Jahre –, nachdem sie ihrer Muttergalaxie in den leeren Raum entkommen sind? Warum folgen ihnen später ausgestoßene Blasen wie im Gänsemarsch? Ein erster Schritt zur Lösung kam 1975 von zwei jungen Theoretikern in Cambridge (England), Roger Blandford und Martin Rees. Blandford lehrt heute am California Institute of Technology in Pasadena, Kalifornien, Rees war schon damals auf dem berühmten Plumian-Lehrstuhl der Universität Cambridge. Bereits in jungen Jahren war er dem großen Fred Hoyle auf diesen Lehrstuhl gefolgt.

Die beiden sagten voraus, daß die Blasen durch dünne Strahlen hochenergetischer Materie am Leben erhalten werden, die ihnen ständig von der Muttergalaxie Energie nachliefern, so wie ein Flug-

## 18. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie



**Abb. 10.4:** Die beiden Radioflecken von Cygnus A (nach H. van der Laan). Der kleine Fleck, etwa in der Mitte zwischen den beiden Radioflecken, ist die von Walter Baade gefundene Galaxie. Die hier dargestellte Struktur ist am Himmel sehr klein, und die Vollmondscheibe, im gleichen Maßstab dargestellt, hätte einen Durchmesser von 1.5 Metern!

zeug ein anderes in der Luft durch einen dünnen Schlauch auftanken kann. Das Blandford-Rees-Modell werden wir später besprechen. Hier ist erst einmal wichtig, daß die von den Cambridger Astrophysikern vorausgesagten dünnen Strahlen kurz danach wirklich gefunden worden sind.

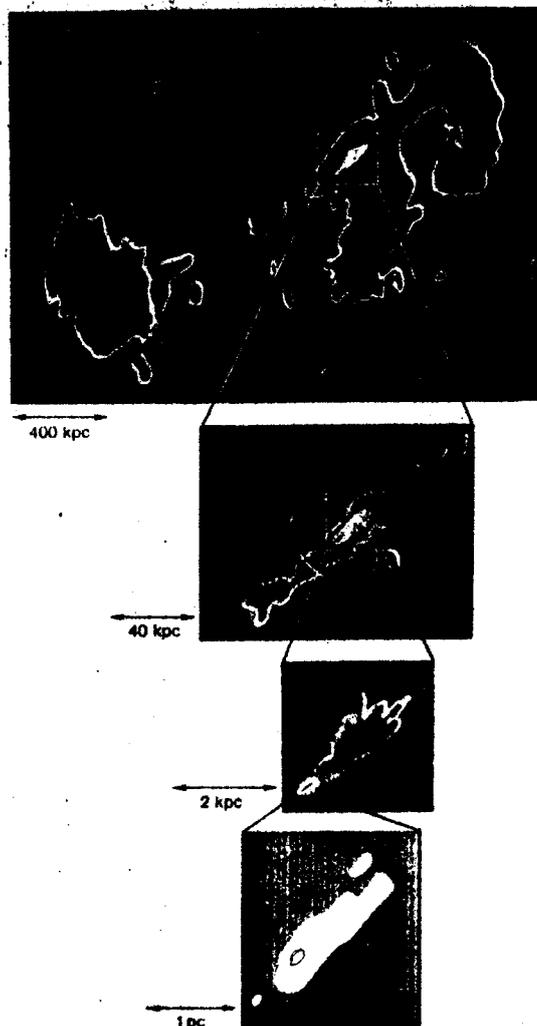
Von Galaxien gehen tatsächlich nach zwei entgegengesetzten Richtungen Strahlen, *Jets* genannt, aus. Wir erhalten von ihnen Radiowellen. Die beiden Richtungen, in welche die Jetstrahlen in unmittelbarer Nähe der Galaxie zeigen, erkennt man auch an den größeren Strukturen. Die beiden winzig kleinen Strahlen von Parsek-Dimensionen setzen sich fort in großräumige Strukturen, die sich über Hunderte von kpc erstrecken können (Abb. 10.5). Die Quelle der beiden gigantischen Strahlungsfahnen, die zu beiden Seiten der Galaxie in den Raum flattern, sitzt in ihrem Zentrum. Auch der scharfe Strahl, den man im sichtbaren Licht aus dem Zentrum der Galaxie M87 im Virgo-Haufen herauskommen sieht (Abb. 1.3), fällt mit einem Radiostrahl zusammen.

Die langen, in den Raum reichenden Radiofahnen der Radiogalaxien lassen erkennen, daß sich die Richtung, in der die Galaxie die Magnetfelder und die rasch fliegenden Elektronen ausstößt, mit der Zeit nicht ändert. Galaxien haben ein Langzeitgedächtnis. In allen Fällen, in denen man an der flachen Form oder an Staubstreifen in der Mittelebene erkennen kann, wie ihre Rotation erfolgt, scheinen die Radioblasen nach beiden Richtungen entlang der Rotationsachse ausgestoßen worden zu sein.

So hat man Galaxien gefunden, denen man im sichtbaren Licht nichts Besonderes anmerkt. Sie scheinen sich nicht von anderen zu unterscheiden. Parallel zu ihrer Rotationsachse stoßen sie jedoch Materie mit hoher Energie aus, so energiereich, daß die Radiostrahlung von der wegfliegenden Masse so stark ist wie die Strahlung unserer ganzen Milchstraße in allen Wellenlängenbereichen zusammengekommen. Weder der Andromedanebel noch unsere eigene Galaxis zeigen solch eine Aktivität.

## 19. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

**Abb. 10.5:** Die Feinstruktur in der Nähe der Radiogalaxie NGC 315. In der obersten Tafel sieht man die Gesamtansicht des Radiobildes, das die beiden Radioflecken rechts oben und links unten zeigt. Die Galaxie selbst steht in der Bildmitte. Man erkennt bereits einen Strahl, der von der Galaxie zum rechten oberen Flecken geht. Das zweite Teilbild zeigt das Zentralgebiet achtmal vergrößert. Von der Galaxie gehen zwei scharfe Strahlen nach rechts oben und links unten. Die ovale Linie gibt den Rand der Galaxie im sichtbaren Bereich wieder. Noch einmal sechszwanzigfach herausvergrößert (drittes Teilbild) erkennt man, wie fein der Strahl ist, der nach rechts oben geht. Die untere Tafel schließlich zeigt in nochmaliger 1600facher Vergrößerung die längliche Struktur des Strahls, dessen Durchmesser hier kleiner ist als ein pc. Neben jeder Tafel sind Strecken und die ihnen in Wirklichkeit entsprechenden Wegstrecken angegeben. Man beachte, daß das unterste Teilbild gegenüber dem obersten 330 000fach vergrößert ist (nach K. I. Kellermann und I. K. Pauliny-Toth).



Das Weltall, das ist nicht nur der fast leere Raum mit seinen Galaxien und Quasaren, nicht nur die noch gestaltlose Materie vor Beginn der großen Durchsichtigkeit. Das Weltall, das sind auch wir, die wir uns aus den kurz nach dem Urknall gebildeten Atomen geformt haben, und die wir nun begonnen haben, über das Weltall nachzudenken, von dem wir nur ein kleiner Teil sind. Neben uns gibt es vielleicht gleichzeitig noch andere, zum Denken befähigte Formen der Weltmaterie. Das Weltall hat begonnen, über sich selbst nachzudenken.

Ohne Galaxien gäbe es kein Nachdenken, denn ohne sie wären keine Sterne, ohne Sterne keine Planeten, ohne Planeten wären wir nicht da.

### Woher kommen Galaxien und Quasare?

Der Rand der Welt, den wir mit der 3-K-Strahlung sehen, ist so weit von uns entfernt, daß sich die Materie dort praktisch mit Lichtgeschwindigkeit von uns wegbewegt. Alle Galaxien und Quasare stehen deutlich näher bei uns, im durchsichtigen Bereich der Welt. Sie

sind wahrscheinlich später entstanden, nach der Befreiung der Strahlungsquanten aus ihrem Elektronengefängnis.

Wir glauben zu wissen, wie die Materie zu kompakteren Gebilden zusammengerückt ist. Wenn in einem den Raum gleichförmig ausfüllenden Gas plötzlich an einer Stelle eine kleine Verdichtung entsteht, zieht die Schwerkraft noch mehr Materie an, die Verdichtung verstärkt sich weiter. Hat dieser Prozeß erst einmal begonnen, dann ist kein Halten mehr. Solange die Welt noch undurchsichtig war (erinnern wir uns: damals spielte die Strahlung noch die tragende Rolle), konnte sich die Materie nur verdichten, wenn sie die in ihr eingeschlossene Strahlung mitnahm, auch die Strahlung mußte mit verdichtet werden. Nun stellt aber Strahlung ein recht schwer komprimierbares Medium dar, sie wehrt sich mit starken Druckkräften dagegen. Deshalb hinderte sie in der undurchsichtigen Phase des Weltalls die Materie daran, solche in sich selbst zusammenfallende Konzentrationen zu bilden. Später, als die Welt durchsichtig geworden war, konnte sich die Materie kondensieren, ohne daß die Strahlung mit zusammengedrückt werden mußte. Sie hemmte die Verdichtung nicht mehr. Deshalb glauben wir, daß aus anfänglichen kleinen Unregelmäßigkeiten heraus die Materie allmählich Galaxien und Quasare bildete.

Leider hat die Sache einen Schönheitsfehler. Nicht, daß es anfangs an Unregelmäßigkeiten gefehlt hätte. Allein die gegenseitigen Bewegungen der Atome bewirken, daß immer einmal an einer Stelle die Materiedichte etwas größer ist als anderswo. Es braucht aber eine gewisse Zeit, um aus einer anfänglichen kleinen Verdichtung der Materie eine handfeste Galaxie werden zu lassen. Je kleiner die anfängliche Störung, um so länger dauert es, bis Großes daraus wird. Die rein zufälligen Dichteschwankungen sind zu klein. Hätten wir in der Welt nur sie gehabt, bis heute wäre noch keine einzige Galaxie fertig.

Wenn bei Beginn der großen Durchsichtigkeit Dichteschwankungen von mindestens einem zehntel Prozent da waren, können sich innerhalb vernünftiger Zeiträume Galaxien und Galaxienhaufen herausbilden. Aber solche Dichteschwankungen sind viel zu stark, um zufällig zu entstehen. In der noch undurchsichtigen Welt können sie noch schwerer entstehen, wegen der Strahlung, die sich gegen Kompression sperrt.

So bleibt eigentlich nichts anderes übrig, als mit dem sowjetischen Astrophysiker Yakov Zeldovich anzunehmen, daß die Dichteschwankungen schon mit dem Urknall da waren. Sehr befriedigend ist es nicht, den Schwarzen Peter dem lieben Gott zuzuschreiben und anzunehmen, daß er bei der Entstehung der Welt auch gleich die Dichteschwankungen mitgeliefert haben soll, die später zu Galaxien führten. Wenn aber schon von Anfang an Dichteschwankungen dagewesen sein sollen, muß die Materie auch zu dem Zeitpunkt ungleichförmig verteilt gewesen sein, als die Uruppe durchsichtig wurde. Deshalb ist es wichtig nachzuprüfen, wie isotrop die kosmische Hintergrundstrahlung wirklich ist. Denn wenn die Materie von Anfang an, also auch in der undurchsichtigen Phase der Welt, Dichteschwankungen zeigte, dann müßten wir an der Innenwand der Kugel von 3000 K, die so schnell von uns weg-

## 21. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

fliegt, daß wir ihr Licht als 3-K-Strahlung sehen, auch eine gewisse Fleckigkeit erkennen. Sieht man von der Ungleichmäßigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung infolge des Fahrtwindes bei unserer Bewegung durch den Raum ab (vgl. S. 295), so ist keinerlei Fleckigkeit in ihr wahrzunehmen, die auf Verdichtungen hinreichender Stärke in der kosmischen Ursuppe bei Beginn der großen Durchsichtigkeit hinweist. Unser Wissen vom Entstehen der Galaxien ist also noch in einem recht desolaten Zustand.

Es wird kaum besser, wenn wir annehmen, daß die Neutrinos eine so große Ruhmasse haben, daß sie heute das Weltall dominieren. Zwar können sie sich zusammen mit der Materie und der Strahlung schon in der undurchsichtigen Phase der Welt zusammenklumpen, aber diese Ungleichförmigkeit müßte man heute an der 3-K-Strahlung sehen. Doch alles, was während der Durchsichtigkeit geschieht, wird durch die Neutrinos eher gehemmt. Wenn man unsere heutigen Galaxien erklären will, muß man schon bei Beginn der Durchsichtigkeit so starke Dichteknoten annehmen, daß sie in der 3-K-Strahlung noch heute gesehen werden müßten. Die Neutrinos nehmen nämlich nicht so leicht an sich verstärkenden Dichteschwankungen teil. Hat man eine Verdichtung von Materie und Neutrinos, so fliegen die Neutrinos sofort mit großer Geschwindigkeit wieder weg. Dann bleibt wieder nur die Dichtekonzentration der atomaren Materie übrig. Das Tempo der sich selbst verstärkenden Wirkung der Schwerkraft hängt aber von der relativen Dichteverteilung der *gesamten* Materie ab, die aus Ruhmasse von Atomen *und* Neutrinos besteht. Da sich die Neutrinos nicht so leicht mit verdichten, ist eine um so größere anfängliche Dichteschwankung der atomaren Materie nötig, um die Galaxienbildung in der zur Verfügung stehenden Zeit abzuschließen. Man müßte die Dichteschwankungen in der Fleckigkeit der 3-K-Strahlung sehen.

Sind aber die Galaxien erst einmal fertig, dann ist in ihrer Nachbarschaft die Schwerkraft so stark, daß sich um jeden Galaxienhaufen oder Superhaufen ein ganzer Schwarm von Neutrinos ansammelt. Vielleicht steckt der Hauptteil der Masse, die zu unserer Galaxis gehört, nicht in sichtbarer Materie, sondern in einem Halo, den sich unser Milchstraßensystem zusammen mit den Galaxien der lokalen Gruppe und denen des Virgo-Haufens aus Neutrinos zugelegt hat. Leider hilft uns das nicht bei der Frage, wie sich unser Milchstraßensystem aus der kosmischen Materie-Strahlungs-Suppe herausgeschält hat.

Bis heute hat noch niemand eine einleuchtende und mit allen beobachteten Fakten übereinstimmende Theorie von der Entstehung der Galaxien aufgestellt. Wie an so vielen Stellen in diesem Buch sind wir an die Grenzen unseres gegenwärtigen Wissens und unseres Verständnisses gestoßen. Ich glaube, man sollte das nicht bedauern. Eine Wissenschaft ist nur dann lebendig, wenn man in ihr auf offene Fragen stößt. Auch wenn in ihr Vorstellungen in relativ rascher Folge durch neuere, bessere ersetzt werden, ist das meist ein Zeichen dafür, daß sie noch nicht steril geworden ist.

---

## Der dunkle Nachthimmel und der Anfang der Welt

Es ist bekannt, daß Astronomen für ihre Arbeiten normalerweise kostspielige Gerätschaften benötigen. Da ist es wohlthuend zu wissen, daß es auch astronomische Beobachtungen gibt, die nichts kosten und trotzdem für unsere Wissenschaft wichtig sind. Denn manchmal ist die Hürde, die man zu überwinden hat, nicht die Entwicklung eines raffinierten empfindlichen Gerätes, vielmehr liegt sie darin, daß man erst erkennen muß, daß das, was man beobachtet, nicht selbstverständlich ist; daß die Beobachtung wert ist, darüber verwundert zu sein. Wir alle machen täglich eine wichtige astronomische Beobachtung, ohne wahrscheinlich zu beachten, daß sie nicht selbstverständlich ist; die Tatsache nämlich, daß es abends dunkel wird (heute war es wieder so). Es ist schwer zu rekonstruieren, wer als erster bemerkte, daß wir aus diesem Beobachtungsbefund etwas lernen können.

Als Kopernikus die Sonne im Weltall auf ihren richtigen Platz gesetzt hatte, war es nicht weit bis zur Erkenntnis, daß auch die Sterne Sonnen sein könnten. Und als dann Galilei durch sein Fernrohr erkannte, daß es sehr viel mehr Sterne gibt, als man bis dahin glaubte, da erschrak Kepler vor dem Gedanken einer bis in alle Weiten mit Sonnen angefüllten Welt.

Etwa 100 Jahre nach Kepler grübelte Edmund Halley - wir kennen ihn von dem nach ihm benannten Kometen - darüber nach, warum eine unendliche Zahl von Sternen den Nachthimmel nicht strahlend hell macht.

## 23. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Dann boten im Abstand von 79 Jahren zwei Astronomen nahezu dieselben Lösungsversuche an. Im Jahre 1744 versuchte der 26jährige Schweizer Loys de Cheseaux den dunklen Nachthimmel zu erklären. Der Bremer Arzt und Astronom Wilhelm Olbers schrieb 1823 eine Arbeit zum gleichen Thema. Obwohl Olbers nahezu 80 Jahre später kam, nennt man das Rätsel vom dunklen Nachthimmel heute das Olbers'sche Paradoxon.

Es geht so: Wäre die Welt seit eh und je gleichförmig mit helleuchtenden unbewegt stehenden Sternen erfüllt, dann sähen wir, gleichgültig ob es Tag ist oder Nacht, in welche Himmelsrichtung wir auch unseren Blick wenden, immer wieder auf die Oberflächen von leuchtenden Sternen. Der ganze Himmel wäre zusammengesetzt aus vielen Milliarden kleiner sich teilweise überdeckender Sternscheibchen, es wäre gleißend hell wie die Sonnenoberfläche. Daß die Welt nicht seit Ewigkeit bis in die Unendlichkeit gleichförmig von unbewegten Sternen ausgefüllt sein kann, das beweist uns jeden Abend das Hereinbrechen der Nacht.

Damals wußte man bereits von der Ausbreitung des Lichtes so viel, daß man nicht einem naheliegenden Fehlschluß verfiel: Die Helligkeit der Sterne mit der Entfernung ab. Die entfernteren Sterne müssen also lichtschwächere Scheibchen zeigen, so daß sie letztlich nichts mehr zur Himmelhelligkeit beitragen. Müßte nicht deshalb der Nachthimmel ganz selbstverständlich schwarz erscheinen? Die Antwort ist: Nein! Das Licht eines Sterns nimmt zwar mit der Entfernung ab, die Fläche seines Sternscheibchens am Firmament aber auch. Für beide gilt die

## 24. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

gleiche Gesetzmäßigkeit: Bei doppelter Entfernung sind bei uns ankommende Strahlungsleistung und Fläche des Scheibchens viermal kleiner, bei dreifacher neunmal und so weiter.

Daraus folgt, daß die Flächenhelligkeit des Scheibchens, also die bei uns ankommende Strahlung, auf die Fläche des Scheibchens verteilt, unabhängig von der Entfernung, *gleich ist*

Die Flächenhelligkeit des Fixsterns Alpha Centauri, dessen Scheibchen uns selbst in den allergrößten Fernrohren nur als Punkt erscheint, ist dieselbe wie die der Sonne, dabei steht jener Stern so weit draußen im Raum, daß sein Licht zu uns mehr als vier Jahre unterwegs ist. Demgegenüber erreicht uns das Sonnenlicht in acht Minuten.

Cheseaux und Olbers hatten eine einfache Lösung: Der Raum zwischen den Sternen ist mit Gas- und Staubmassen angefüllt, diese schwächen das Sternlicht wie eine Nebelbank die dahinterstehende Sonne. Das Licht aller Sterne, vor allem das der entferntesten, wird dadurch so geschwächt, daß es nur noch wenig zur Aufhellung des Nachthimmels beiträgt. Es war eigentlich eine recht einfache Lösung.

"Licht kann leicht beseitigt werden. Ist es einmal absorbiert, dann ist es für immer verschwunden und bereitet uns keine Sorgen mehr" schrieb der Astronom John Herschel 1848. Aber so kann man nur schreiben, wenn man noch nichts vom Satz von der Erhaltung der Energie weiß. Dieser wurde erst um 1850 Allgemeingut der Wissenschaftler. Vorher wußte man nicht, daß Licht eine Energieform ist. Als aber die Wärmelehre entstand lernte man, daß die absorbierenden Wolken im Weltall das Olbers'sche Paradoxon nicht lösen. Wäre nämlich die Welt seit unendlicher Zeit mit Sternen

## 25. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

ausgefüllt, würden die Wolken das Sternlicht zwar schwächen, sie hätten sich aber durch die absorbierte Lichtenergie so aufgeheizt, daß ihre Temperatur gleich der der Sternoberflächen wäre. Die Wolken würden den Nachthimmel gleißend hell machen. Mit dem Energiesatz hatte das Paradoxon wieder im Nacken sitzen.

Es gab einen naheliegenden Ausweg: Vielleicht ist die Welt nicht bis in alle Unendlichkeit mit Sternen ausgefüllt? Man beachte aber, daß man mit der Annahme, das Weltall sei mit Galaxien angefüllt, von denen jede aus Sternen besteht, das Olberssche Paradoxon sofort wieder auf den Plan ruft. Wenn auch der Raum zwischen diesen Sternsystemen in weiten Bereichen leer ist, in welche Richtung wir auch zum Himmel schauen, wir blicken immer auf einen Stern in einem solchen System.

So blieb also in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts und auch am Anfang des jetzigen nur die Möglichkeit, entweder an die Einmaligkeit unseres Milchstraßensystems zu glauben oder weiter nach einem Ausweg aus dem Olbers'schen Paradoxons zu suchen.

Es scheint, als ob der erste Schritt zur Lösung des Rätsels von einem Mann kam, von dem heute kaum jemand weiß, daß er sich auch mit astronomischen Problemen befaßt hat:

Am 3. Februar 1848 fand in der Society Library in New York eine zweistündige Vortragsveranstaltung statt. Der Titel "Über die Kosmogonie des Weltalls". Der Redner war der 39jährige Edgar Allen Poe. Es war ein Jahr vor seinem Tod. Obwohl die Vorlesung bei der Presse gut ankam, hatte das daraus entstandene Buch mit dem Titel "Eureka, ein

## 26. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Prosagedicht" nur eine Auflage von 500 Stück. Damit wurde der Inhalt von Poes Vorlesung eher geheimgehalten als bekanntgemacht.

Das Werk enthält viele Spekulationen, die für den Fortgang der Wissenschaft keine Bedeutung hatten. An einer Stelle aber widmet er sich dem Olbers'schen Paradoxon und man sollte Poe dort vielleicht etwas mehr Aufmerksamkeit widmen:

"Wäre die Folge der Sterne ohne Ende, dann würde der Himmel uns gleichförmig erhellt erscheinen, etwa wie die Milchstraße, denn es gibt dann am Himmel keinen Punkt, an dem nicht ein Stern steht." und er fährt kurz danach fort:

"Der einzige Ausweg wäre anzunehmen, daß der Abstand zu diesem nicht sichtbaren Hintergrund so groß ist, daß uns von dort noch kein Lichtstrahl erreicht hat."

Man beachte, die völlig neue Wendung: Hier wird implizit angenommen, die Welt habe einen Anfang vor endlicher Zeit gehabt. Das Licht der Sterne erreicht uns erst nach langer Zeit. Je weiter sie entfernt sind, um so länger ist ihr Licht zu uns unterwegs. Nehmen wir an, im ganzen Weltall würden nach einer Periode der Finsternis plötzlich schlagartig überall Sterne aufleuchten. Ein Jahr nach diesem Ereignis sähen wir nur die Sterne, die näher als ein Lichtjahr von uns entfernt sind, das Licht der entfernteren würde uns noch nicht erreichen. Von Jahr zu Jahr würden mehr der aufgeleuchteten Sterne für uns sichtbar.

Das ist tatsächlich der Ausweg aus dem Paradoxon. Wenn schon die Welt bis in alle Entfernung gleichförmig mit Sternen ausgefüllt ist, dann darf sie nicht gleichzeitig auch seit unendlicher Zeit so beschaffen sein wie heute.

## 27. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

War der zitierte Satz von Edgar Allen Poe auch in der sonst etwas wirren Schrift "Eureka" verborgen, so hat doch bald danach der in Dorpat arbeitende Astronom Johann Heinrich Mädler, ein geborener Berliner, in einem populären Astronomiebuch eine saubere Lösung des Paradoxons mit der Annahme eines Beginns der Welt vor endlicher Zeit geliefert. Die Annahme eines Weltanfangs vor endlicher Zeit ging den Menschen damals durchaus ein. Die Lehre der Kirche hatte das denken seit langem darauf vorbereitet.

Es gab in der Astronomie der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts weder einen Beweis, daß die Spiralnebel Sternsysteme sind, noch den Hinweis, daß die Welt vor endlicher Zeit ihren Anfang genommen hat.

Ich erwähnte schon, daß man seit den 20er Jahren dieses Jahrhunderts weiß, daß die Spiralnebel aus Sternen bestehen. Daß die Welt vor endlicher Zeit entstanden ist und die Lösung schließlich in der Richtung von Poe und Mädler liegt, erfuhr man später.

Der Anstoß zur Lösung kam im Jahre 1929 von dem amerikanischen Astronomen Edwin Powell Hubble. Ursprünglich als Jurist und im Amateurboxsport erfolgreich, wandte er sich sehr früh der Astronomie zu. Darin promovierte er mit 25 Jahren und hatte dann wenige Jahre danach das Glück, mit dem damals größten Teleskop der Welt auf dem Mount Wilson arbeiten zu können. Kurz zuvor hatte er entdeckt, daß die anderen Galaxien aus Sternen bestehen mit all den gleichen Eigenschaften wie die in unserer eigenen Milchstraße. Doch nun fand er, daß die Welt auseinanderfliegt. Alle entfernten Galaxien bewegen sich von uns weg und wir von Ihnen.

## 28. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Wie konnte Hubble das feststellen? Erinnern wir uns an den Physikunterricht unserer Schulzeit: Wenn ein Körper Schwingungen aussendet, etwa die Hupe eines Autos, so hören wir den Ton nur richtig, wenn die Tonquelle in Ruhe ist. Bewegt sich das Auto auf uns zu, erscheint uns der Ton höher, bewegt es sich von uns weg, ist er tiefer. Den Wechsel von hoch und tief können wir hören, wenn das Auto erst auf uns zukommt, dann an uns vorbeifährt und dann sich von uns entfernt. Auch die Rundfunkaufnahmen von Autorennen, bei denen sich die Sportwagen erst dem Mikrofon nähern und dann von ihm entfernen, lassen einen deutlichen Wechsel der Tonhöhe des Motorengeräusches vernehmen. Das nennt man den Dopplereffekt. Was für Schallwellen recht ist, ist den Lichtwellen billig. Eine Lichtquelle, die bei einer ganz bestimmten Wellenlänge Licht aussendet, scheint uns, wenn sie sich auf uns zubewegt, mit einer kürzeren Wellenlänge abzustrahlen als im Ruhezustand, mit einer längeren, wenn sie sich von uns entfernt. Warum das so ist, will ich an einem Beispiel erläutern:

Der Vorsitzende eines Vereins der Brieftaubenzüchter geht auf die Reise und verspricht seiner Familie, täglich einmal zu schreiben und dazu in 24-stündigem Abstand jeweils eine Taube loszulassen. Seine Tauben kommen, während er sich immer weiter von den Seinen entfernt, in größerem Abstand zuhause an, denn jedes Tier hat einen längeren Weg zurückzulegen als sein Vorgänger. Während er am Tagungsort verweilt, kommen die Tiere alle im 24stündigen Abstand an, ~~während sie~~ während er auf dem Nachhauseweg ist, kommen sie

## 29. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

in kürzerem Abstand zurück, denn jedes Tier hat einen kürzeren Weg zurückzulegen als sein Vorgänger.

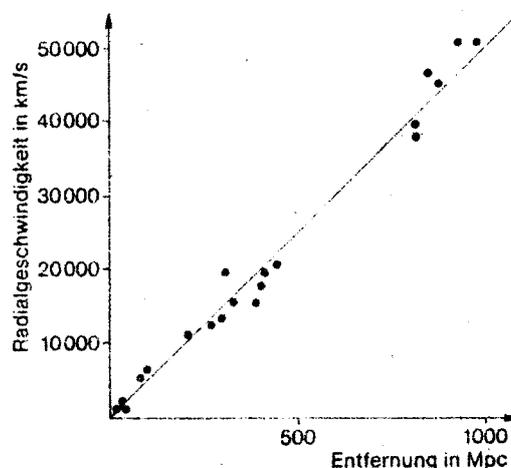
Hätte seine Frau die Ankunftszeiten der Tauben genauer registriert und hätte sie etwas Mathematik gekonnt, so hätte sie durch eine einfache Integration herausfinden können, ob sich ihr Mann wirklich immer an den Orten aufgehalten hatte, die er in seinen Briefen angab.

Was für Brieftauben gilt, das ist auch für die in gleichem Zeitabstand ausgesandten Schallverdichtungen in der Luft richtig und es gilt auch für die vor einer Lichtquelle ausgesandte Strahlung, die aus in regelmäßigem Abstand ausgesandten Wellenbergen besteht. Das ist der Dopplereffekt. Bei Sternen kann man ihn benutzen, um ihre Geschwindigkeit auf uns zu oder von uns weg zu bestimmen. Die verschiedenen Atome der Sternmaterie senden und absorbieren Licht bei ganz bestimmten Wellenlängen. In den Spektren der Sterne, in denen das Licht nach seiner Farbe, das heißt nach seiner Wellenlänge zerlegt ist, sieht man daher oft dunkle Linien: Bestimmte Wellenlängen, bei denen kein Licht vom Stern zu uns kommt, weil gerade dieses Licht von den äußersten Schichten des Stern zurückgehalten wird. So prägen zum Beispiel die Atome des Wasserstoff dem Spektrum ganz charakteristische Linien bei ganz bestimmten Wellenlängen auf. Wenn sich der Stern von uns weg bewegt, scheint es so, als ob dort etwa das Wasserstoffatom Licht mit größerer Wellenlänge aussendet beziehungsweise verschluckt als ein Wasserstoffatom im Laboratorium, das sich relativ zu uns in Ruhe befindet. Diesen Effekt kann man benutzen, um die Geschwindigkeit eines Stern zu bestimmen.

### 30. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Hubble untersuchte in den 20er Jahren die Spektren von Galaxien und fand aus dem Dopplereffekt ihrem Licht Galaxien, daß sie nicht nur alle von uns weg fliegen, sondern daß darüber hinaus noch eine einfache Gesetzmäßigkeit besteht: Je größer die Entfernung um so größer die Fluchtgeschwindigkeit. Geschwindigkeit und Entfernung sind einander proportional: Doppelte Entfernung, doppelte Fluchtgeschwindigkeit.

Abb. 6.2: Das Hubblesche Gesetz. Je größer die Entfernung (nach rechts aufgetragen), um so größer ist die Fluchtgeschwindigkeit (nach oben aufgetragen). Die hier dargestellte Beziehung entspricht dem in diesem Buch benutzten Wert von 50 für die Hubblesche Zahl, nicht dem ursprünglich von Hubble ermittelten Wert von 500 (zur Geschichte dieser Zahl vgl. Abb. 6.6).



Die Hubblesche Entdeckung hat zwei wichtige Folgen: Aus der der Geschwindigkeit, mit der sich zwei Galaxien bekannter Entfernung voneinander wegbewegen, kann man errechnen, wann diese beiden Objekte und mit ihnen alle Materie der Welt zusammen war. Man findet dann - bei all der Unsicherheit, die dem genauen Zahlwert anhaftet, daß die Flucht vor 10 bis 20 Milliarden Jahren begonnen haben muß. Es kommt nicht so sehr darauf an, daß wir genau wissen wann alles begann, das Wichtigste ist, daß wir nun wissen, daß alles vor endlicher Zeit begonnen hat.

### 31. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Als man wußte, daß alle Galaxien von uns wegfliegen, drängte sich aber eine andere Frage auf. Wir scheinen an einer besonders ausgezeichneten Stelle zu stehen, nämlich dort, von wo alle Galaxien wegfliegen. Wir an einer ausgezeichneten Stelle im Weltall? Das geht jedem Kopernikaner gegen den Strich. Der englische Astrophysiker Sir Arthur Eddington formulierte deshalb: Was haben wir denn an uns, daß alle Galaxien von uns reißaus nehmen, als wären wir eine Pestbeule im Weltall?

Aber Eddington wußte auch die Antwort, er wußte, das das nur ein Scheinproblem ist. Ich will dazu ein einfaches Beispiel nehmen, eines aus der Küche.

Stellen wir uns vor, wir wollten einen Kuchen herstellen, aus Hefeteig. Der Teig sei nun fertig, es herrsche die richtige Temperatur und der Teig gehe jetzt auf. Im Teig seien Rosinen. Versetzen wir uns in die Lage einer Rosine, die ihre Mitrosinen beobachtet. Während der Teig aufgeht bewegen sich alle von ihr fort, die entfernteren schneller, als die näheren: Doppelte Entfernung, doppelte Geschwindigkeit. Die Rosine beobachtet ein Hubblesches Gesetz. Daraus darf sie aber nicht schließen, daß sie in der Mitte des Teiges sitzt, denn jede Rosine beobachtet, daß alle von ihr wegfliegen.

So geht es auch uns: aus der Tatsache, daß sich alle Galaxien von uns wegbewegen, dürfen wir nicht schließen, daß wir die Rosine in der Mitte der Welt sind.

Können wir also sagen, daß vor etwa 20 Milliarden Jahren der Anfang der Welt war? Es sieht so aus, denn es sprechen noch andere Befunde dafür. Wir sind heute in der

### 32. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Lage, mit gänzlich anderen Methoden das Alter von Sternen zu bestimmen und finden, daß die ältesten von ihnen vor etwa 16 Milliarden Jahren entstanden sind. Auch das Alter von Sonne und Erde wird in Milliarden Jahren gemessen und man hat bis heute noch keinen Himmelskörper gefunden, der älter als vielleicht 18 Milliarden Jahre ist. Das scheint mit dem aus der Galaxienflucht herleitbaren Weltalter in Einklang zu stehen. Nehmen wir also an, vor 20 Milliarden Jahren wären alle die Galaxien zusammen mit der unsrigen eng zusammengedrängt gewesen. Seither fliegen sie auseinander.

Mit der Entdeckung der Fluchtbewegung der Spiralnebel kam eine Erklärung des Olbers'schen Paradoxons auf, die noch heute in vielen Büchern herumspukt. Ich will sie hier bringen: Wenn wir Licht von entfernten Galaxien erhalten, so ist seine Energie durch den Dopplereffekt geschwächt. Jedes Lichtteilchen, der Photonen, erscheint uns langwelliger als es ausgesandt wurde. Die einzelnen Photonen kommen in größerem Zeitabstand bei uns an, als sie ausgesandt worden sind, so wie die Tauben des sich von zuhause entfernenden Züchters. Beide Effekte schwächen das Licht der Galaxien, der entfernteren um so mehr, da sie schneller von uns wegfliegen. Die Sterne entfernterer Galaxien erscheinen uns schwächer. Deshalb ist der Nachthimmel schwarz. Das ist einleuchtend, steht oft in Büchern und ist falsch. Wenn man genau die Schwächung des Lichtes infolge der Fluchtbewegung der Galaxien durchrechnet, dann findet man, daß der Nachthimmel zwar nicht so hell wie die Sonne, aber doch nur wenig schwächer leuchten würde.

Die Lösung liegt genau dort, wo Poe und Mädler vermuteten. Wenn vor 20 Milliarden Jahren die Welt begann, dann

### 33. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Können wir in 20 Milliarden Lichtjahren Entfernung keine Sterne mehr sehen, denn Sternlicht von dort wäre ausgesandt worden, als es noch gar keine Sterne gab. Das Licht der Sterne, die in einer Entfernung von, sagen wir, 21 Milliarden Lichtjahren stehen, hat uns heute noch nicht erreicht. Lange bevor wir so weit in den Raum hinaussehen, daß sich die Sternscheibchen gegenseitig zu verdecken beginnen, sind wir in Entfernungen, aus denen das Licht zu uns länger als das Weltalter benötigt.

So wäre die Welt eigentlich in Ordnung. Wir blicken zum Nachthimmel, sehen Sterne, blicken aber fast immer an den Sternscheibchen vorbei und schauen hinaus in einen dunklen Anfang der Welt, in dem es noch keine Sterne gab. Das wäre die Lösung des Paradoxons, wenn der Anfang der Welt dunkel gewesen wäre. Aber er war es nicht.

War die Hubblesche Entdeckung der Expansionsbewegung die wohl größte kosmologische Entdeckung der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts, so kam in den sechziger Jahren eine weitere aufregende Nachricht - und wiederum kam sie aus den USA.

Im Jahre 1964 entdeckten Arno Penzias und Robert Wilson, die beide bei den Bell-Laboratorien in New Jersey arbeiteten, daß ihr Empfänger, der Radiowellen von 7.35 Zentimetern aufnehmen konnte, eine gleichmäßig aus dem Raum kommende Strahlung registrierte, die unverändert blieb, in welche Richtung sie auch ihre Antenne zum Himmel drehten. Strahlung kam also gleichförmig aus allen Richtungen. Es war Wärmestrahlung, die einer Temperatur von etwa  $3^{\circ}$  Kelvin entsprach. Die verdünnte, erkaltete, langwellig gewordene

### 34. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

Strahlung des Urknalls! Sie gibt uns vorher nicht geahnte Einblicke in die Jugend unseres Kosmos.

Dazu wollen wir ein Gedankenexperiment machen. Denken wir uns die Materie der Galaxien gleichmäßig über den Raum verteilt, dann kämen auf eine Kugel vom Volumen der Sonne 560 Gramm Materie. Natürlich ist die Kugel dann auch von der Penzias-Wilsonschen Strahlung erfüllt. Da Strahlung Energie ist, und da Energie auch Masse ist, können wir die in der Kugel in Form von Strahlungsenergie enthaltene Masse bestimmen und finden, daß die Kugel ein Gramm Strahlung enthält. Das ist etwa so viel, wie 1945 bei der Atombombe von Hiroshima verstrahlt wurde. Masse und Strahlung in unserem gedachten Sonnenvolumen sind dabei in ganz normalem Zustand, die Atome so, wie wir ihnen heute überall begegnen, die Strahlung so, wie wir sie in unseren Mikrowellenherden benutzen, nur viel verdünnter. Mit dem Stoff, den wir in unserer Kugel haben, sind wir gewohnt umzugehen.

Also beginnen wir ein Experiment. Drücken wir die Materie in der Kugel zusammen und sehen wir, was dabei geschieht. Da wir die Eigenschaften unseres in der Kugel eingefangenen Weltstoffes kennen, wissen wir auch, was beim Zusammendrücken geschieht. Beachten Sie bitte, daß wir beim Zusammendrücken den Vorgang der Expansion der Welt umkehren. Das Verhalten unseres Weltstoffes dabei zeigt uns dann, wie die Welt früher war. Im Prinzip können wir die Kugel immer mehr zusammendrücken und uns immer näher an die frühesten Zustände der Welt, ja vielleicht bis nahe an den Urknall herantasten.

Drücken wir also mutig unsere Kugel vom Radius der Sonne zusammen. Die Dichte der Materie und die der Strahlung

### 35. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

nehmen beide zu. Die Strahlung wird aber dabei immer wichtiger. Bald merken wir, daß in der Vergangenheit die Strahlung, die heute ein recht unwesentlicher Bestandteil des Weltgemisches ist, eine entscheidende Rolle gespielt haben muß. Drücken wir die Kugel auf ein Tausendstel der ursprünglichen Größe zusammen.

Kugeldurchmesser	Masse in Form von Protonen, Neutronen und Elektronen	Masse in Form von Photonen	Temperatur	Zeit seit dem Urknall
1 400 000 km	280 g	1 g	3 K	20 Mia Jahre (heute)
1 400 km	280 g	1000 g	3000 K	300 000 Jahre
4.66 m	280 g	300 t	900 Mio K	230 s

Tab. 12.1: Ergebnis des Gedankenexperiments mit der Weltmaterie in einer Kugel vom Durchmesser der Sonne. Die erste Spalte gibt den jeweiligen Durchmesser unserer gedachten Kugel an, die zweite und dritte Spalte geben den jeweiligen Massenanteil von Materie und Strahlung (in Gramm oder Tonnen), die vierte und fünfte Spalte die Temperatur und die seit dem Urknall vergangene Zeit, der der Zustand des in unserer Kugel gefangenen Weltgemisches entspricht.

In ihr sind immer noch unsere 560 Gramm Materie, aber die Strahlung ist wichtiger geworden. Alle Arbeit, die wir aufgebracht haben, um die Kugel zusammenzudrücken, ist in Strahlung übergegangen. Die Masse der Strahlung in der Kugel ist jetzt dieselbe wie die der Materie, Strahlung und Materie sind gleichberechtigte Partner geworden! Die Temperatur in der Kugel hat sich von 3 Grad auf 3000° erhöht. Der Zustand in der Kugel entspricht dem des Weltalls 300 000 Jahre nach dem Urknall.

Wir könnten weitergehen, ich möchte aber bei diesem Zustand unserer Testkugel verweilen. Er entspricht auch noch aus einem anderen Grund einem Wendepunkt in der Geschichte des Weltalls, als Strahlung und Materie noch heißer waren als 3000°, da gab es noch keine richtigen Atome.

## 36. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

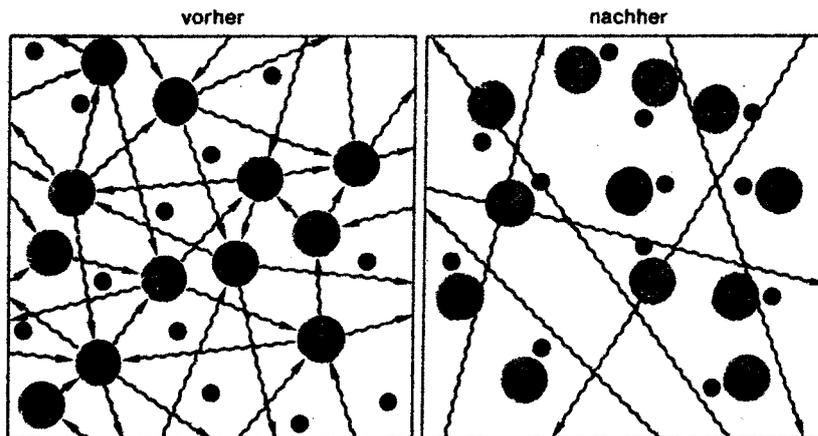


Abb. 12.2: Das folgenschwere Ereignis, das etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall stattfand. Vorher (links) behinderten die Elektronen (graue Scheibchen) die Strahlungsquanten (gewellte Pfeile) in ihrer Ausbreitung. Jedes Quant konnte nur ein relativ kurzes Stück ungehindert fliegen, bis es wieder abgelenkt wurde. Danach (rechts) waren die Elektronen an die Protonen (dunkle Punkte) gebunden und behinderten die Strahlungsquanten nicht mehr - die Welt war durchsichtig geworden.

Die Atomkerne hatten keine Elektronenhüllen. Atomkerne und Elektronen flogen unabhängig voneinander durch den Raum. Als die Temperatur von  $3000^{\circ}$  unterschritten wurde, schlossen sich Protonen und Elektronen zu Wasserstoffatomen zusammen. Da Wasserstoff das häufigste Element in der Urmaterie war, hatte das schwerwiegende Folgen. Frei herumfliegende Elektronen stellen für die Strahlung ein starkes Hindernis dar, an einen Atomkern gefesselte Elektronen nicht. Anfangs war das Weltall wegen der freien Elektronen undurchsichtig, aber als es sich auf  $3000^{\circ}$  abgekühlt hatte, wurde es durchsichtig.

Wir dürfen uns aber nicht vorstellen, daß man im Augenblick des Beginns der großen Durchsichtigkeit schlagartig von einem Augenblick zum anderen bis in alle Entfernungen des Weltalls blicken konnte.

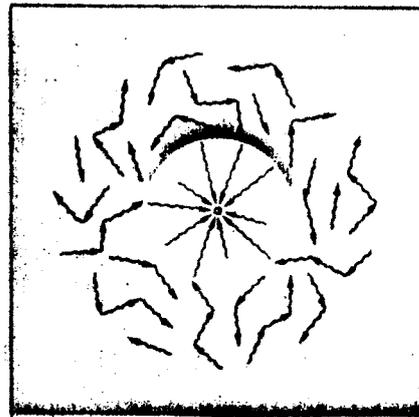
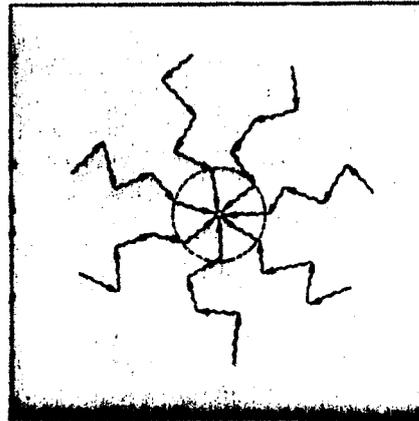
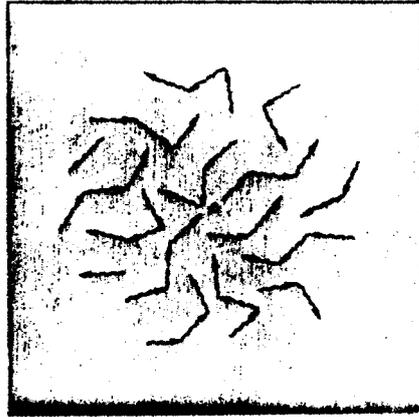


Abb. 12.3: Im undurchsichtigen Weltall beschrieben die Strahlungsquanten noch unregelmäßige Zickzacklinien (oben, vgl. auch Abb. 12.2 links). Die Strahlungsquanten, die einen Beobachter erreichten, kamen direkt aus seiner unmittelbaren Umgebung (Mitte). Als das Weltall die Temperatur von 3000 K unterschritt, lagerten sich die Elektronen an die Protonen an und bildeten mit ihnen Wasserstoffatome. Das Weltall wurde durchsichtig. Da das Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet, erreichen den Beobachter (Punkt in der Mitte) Lichtquanten aus jener Zeit, als das Weltall gerade durchsichtig wurde. Alles, was näher steht, ist für ihn sichtbar, denn das Licht, das ihn von dort erreicht, ist ausgesandt worden, als die Welt schon durchsichtig war (unten, weiße Kreisfläche). Alles, was weiter steht, kann er nicht sehen.

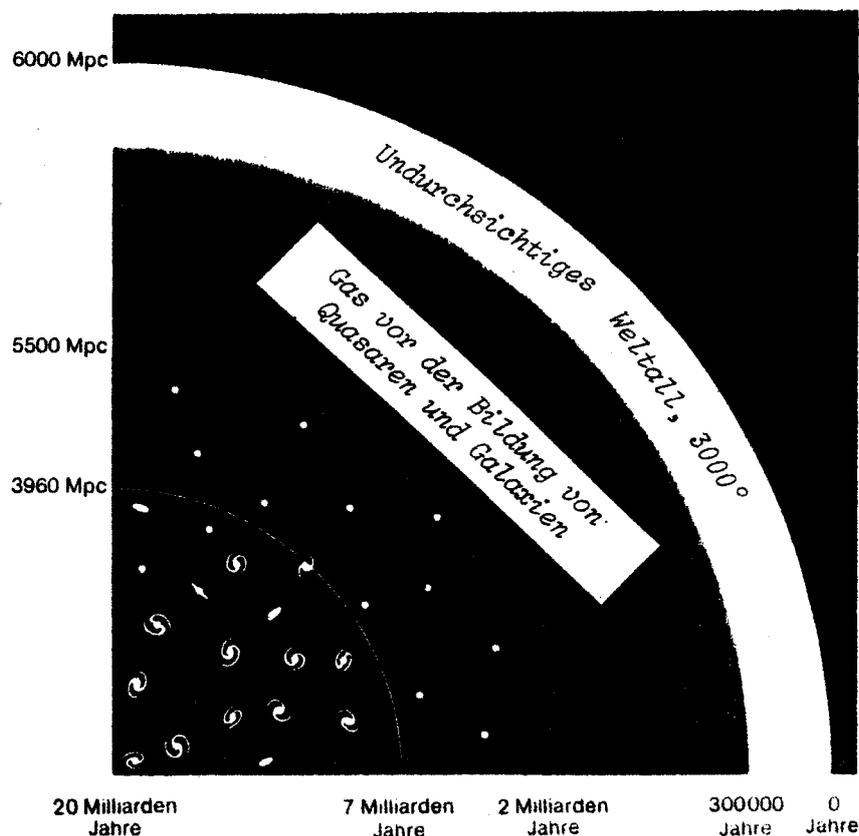
So blickten wir ein Jahr nach dem Beginn der Durchsichtigkeit genau bis in eine Entfernung von einem Lichtjahr und blicken dort auf eine Wand, an der sich die Elektronen gerade an die Atomkerne des Wasserstoff anlagern. Wir wissen schon, daß die zugehörige Temperatur  $3000^\circ$  beträgt. In der folgenden Zeit erweiterte sich dieser Horizont immer mehr, aber bis heute blicken wir auf eine Wand von  $3000^\circ$ , weiter hinaus reicht unser Blick nicht, denn weiter hinaus heißt gleichzeitig, weiter in die Vergangenheit zurück und in

### 38. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

jener Zeit war die Materie undurchsichtig, sie versperrt uns noch heute den Blick.

Wenn wir heute in den Raum hinausblicken, dann sehen wir in Gegenden, von denen das Licht Jahrtausenden und Jahrtausenden zu uns unterwegs ist. Es zeigt uns den Zustand des Weltalls wie er in der Vergangenheit war. So sehen wir im Universum nicht nur die räumliche Verteilung der kosmischen Objekte sondern auch gleichzeitig ihre Geschichte.

**Abb. 12.4:** Unser Anblick vom Weltall schematisch dargestellt. Wir sitzen in der linken unteren Ecke des Bildes und blicken in den Raum hinaus und damit zurück in der Zeit. Am linken Bildrand ist die Entfernung von uns angeschrieben, am unteren Rand das ungefähre Alter der Welt, bei dem das Licht ausgesandt wurde, das uns heute von dort erreicht. In unserer Nachbarschaft sehen wir Galaxien bis hinaus zu einer Entfernung von 3960 Mpc. Dort steht die entfernteste bisher beobachtete Galaxie. Wenn wir sie ansehen, blicken wir 13 Milliarden Jahre in die Vergangenheit zurück. Bei einem angenommenen Weltalter von 20 Milliarden Jahren hatte die Welt, als das Licht dort ausgesandt worden ist, ein Alter von nur sieben Milliarden Jahren. Bei 5500 Mpc sehen wir die Welt im Alter von zwei Milliarden Jahren. Dort steht der Quasar, der zur Zeit den Entfernungsrekord hält. Weiter draußen blicken wir auf Materie, die noch nicht zu Quasaren und Galaxien ausgeklumpt ist. Noch weiter draußen stößt unser Blick auf die Innenseite der undurchsichtigen Wand von 3000 K (vgl. Abb. 12.3). Wäre sie durchsichtig, so würden wir noch Licht sehen, das seit dem Urknall zu uns unterwegs ist. (Das Bild ist nicht maßstabsgetreu.)



### 39. Fortsetzung Gastvortrag: Galaxien und Kosmologie

So also sieht das Weltall aus: Wir sehen in der Nachbarschaft unseres Milchstraßensystems Galaxien. Weiter draußen, dort wo wir in die Vergangenheit der Welt zurückblicken, als es noch keine Galaxien gab, sehen wir nur sogenannte Quasare. Sind sie die Anfangsstadien der Galaxien? Noch weiter draußen finden wir nicht einmal Quasare. Die Materie zeigt noch keine Verdichtungen. Was ist noch weiter draußen? Wo ist der Rand der Welt? Das Licht vom Rande der Welt ist das Licht von ihrem Anfang. Da die Materie anfangs undurchsichtig war, blicken wir draußen auf eine undurchsichtige Wand von  $3000^{\circ}$ . Nicht, daß die Materie heute dort undurchsichtig wäre, nein, damals, als sie das Licht zu uns aussandte, das uns heute erreicht, war sie undurchsichtig.

Wir blicken auf eine Wand von  $3000^{\circ}$  Grad. Aber da sich die Materie der Welt von jeher ausdehnte, bewegt sich diese Wand mit großer Geschwindigkeit von uns weg. Die Lichtquanten kommen deshalb spärlicher zu uns, wie die Tauben des sich von zuhause entfernenden Züchters, und jedes Lichtquant ist langwellig und energiearm geworden. Da sich die Materie dort nahezu mit Lichtgeschwindigkeit von uns wegbewegt, erscheint sie unserem Auge pechschwarz, nur die Radioastronomen messen ihre Strahlung als die von allen Seiten gleichmäßig bei uns eintreffende kosmische Hintergrundstrahlung. Sie ist das Licht vom Rande der Welt. Und das ist letztlich der Grund, warum der Nachthimmel schwarz ist: Weil die Welt sich ausdehnt. Wir sehen die Expansionsbewegung, die das Weltalls seit Anbeginn ausführt, nachts mit freiem Auge.

Univ. Prof. Dr. Rudolf Kippenhahn  
Max Planck Institut für Astronomie und Astrophysik  
Karl Schwarzschild Str. 1, D-8046 Garching / München

Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Ohne Zweifel bilden exakt definierte und realisierte Koordinatensysteme die wesentliche Grundlage für neue Entwicklungen und Erkenntnisse in den Bereichen der Astronomie und der Geowissenschaften. Um allen Anforderungen gerecht zu werden, ist sowohl die Schaffung eines erdgebundenen Systems als auch die Realisierung eines (Quasi)-Inertialsystems notwendig, in dem alle Bewegungen des terrestrischen System aufgezeichnet werden können. Die vielfältigen Probleme in der Definition und Transformation dieser Systeme und ihre derzeit bestmögliche Realisierung in Form eines Katalogs extragalaktischer Radioquellen sollen Inhalt des vorliegenden Referats sein.

Die wesentliche Eigenschaft eines Inertialsystems der klassischen Mechanik wird uns durch das Newton'sche Trägheitsgesetz dargelegt.

" Jeder Körper verharrt in Ruhe oder in gleichförmiger, geradliniger Bewegung, solange keine Kräfte auf ihn wirken"

z.B. keine rotierende Koordinatensysteme. In Quasi-Inertialsystemen sind zusätzlich Beschleunigungen des Ursprungs erlaubt. In der Relativitätstheorie verloren die Inertialsysteme ihren privilegierten Status. Die Newton'schen Bewegungsgleichungen wurden durch die Feldgleichungen ersetzt und diese sind invariant in Bezug auf Koordinatentransformationen. Somit gibt es keine globalen hervorgehobenen Systeme, sehr wohl jedoch "lokale Inertialsysteme". Genauer gesagt, es ist möglich in jedem Punkt eines beliebigen Gravitationsfeldes ein lokales Inertialsystem so zu wählen, daß in ihm die klassischen Naturgesetze mit erstaunlich hoher Genauigkeit gelten. Es kann also in Inertial- bzw. Quasi-Inertialsystemen gearbeitet werden, solange die Effekte der Relativitätstheorie durch kleine Korrekturen der Orts- und Zeitbeobachtungen

Bereich  $10^{-8}$  x Erdradius  $\approx$  6 cm

Berücksichtigung finden.

Solcherart ausgezeichnete Referenzsysteme (CIS ... Conventional Inertial Systems) können nun auf zwei verschiedenen Wegen definiert werden.



## 2. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

a) kinematisch: Grundlage ist eine Annahme über das statistische Verhalten der Eigenbewegungen der Referenzkörper. Im Falle extragalaktischer Quellen wird gesetzt:

$$\text{Rotationskomponente der Eigenbewegungen} = 0$$

b) dynamisch : Grundlage sind die Bewegungsgleichungen von Körpern des Sonnensystems: Planeten, Mond oder künstliche Satelliten. Das Referenzsystem wird durch die Ephemeriden der Himmelskörper realisiert.

### 1. CTS-Systeme (Conventional-Terrestrial-System)

CTS-Systeme stellen das Bindeglied zwischen Beobachtungen auf der rotierenden und ständigen Änderungen unterworfenen Erdoberfläche und den CIS-Systemen dar. Sie werden durch Koordinaten jener Observatorien definiert, die sowohl durch ihre technische Ausrüstung als auch ihren Standpunkt in der Lage sind als Referenz für ein CTS-System zu dienen (z.B. VLBI-CTS, LLR-CTS, Doppler\_CTS, etc.).

Die Verbindung zu den Inertialsystemen wird durch die Rotation

$$[\text{CTS}] = \text{SNP} [\text{CIS}]$$

beschrieben, wobei gilt

P ... Rotationsmatrix infolge Präzession

(berechnet mit dem neuen 1976 festgelegten Konstantensystem)

N ... Rotationsmatrix infolge Nutation

(berechnet mit der 1979 festgelegten Nutationstheorie; Wahr'sche Nutationstheorie)

S ... Rotationsmatrix infolge Erdrotation

(berechnet aus Polbewegung und Rotationsdauer; BIH-Werte)

Desweiteren gewannen in den letzten Jahren auf Grund der gestiegenen Meßgenauigkeit ( $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$ ) verfeinerte Modelle zur Beschreibung der Erdzeiten, der Plattentektonik und jahreszeitlich bedingter Deformationen der Erdoberfläche an Bedeutung.

### 3. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Den Referenzstationen können somit keine feste Koordinaten mehr zugewiesen werden, vielmehr leiten sich ihre Relativbewegungen nunmehr aus oben genannten Modellen ab.

### 2. CIS-Systeme (Conventional-Inertial-System)

a) Stellar-System: Dieses System wird in erster Linie durch die Sterne im zugehörigen Katalog repräsentiert, d.h. die zu einer gewissen Epoche festgelegten Rektaszensionen und Deklinationen definieren den Äquator und den Frühlingspunkt. Desweiteren ist der Begriff System nur in Verbindung mit einem zugehörigen mathematischen Modell, welches die Koordinatenänderungen mit der Zeit möglichst vollständig beschreibt, zu sehen (z.B. Nutationstheorie, Satz astronom. Konstanten, Eigenbewegungen usw.). Der seit 1984 in Gebrauch stehende 5. Fundamentalkatalog FK5 besteht vorerst aus den neu beobachteten Positionen und Eigenbewegungen der 1535 Sterne des Vorgängerkatalogs FK4 und soll demnächst um ca. 1500 weitere Sterne mit visuellen Helligkeiten zwischen  $7.5^m$  und  $9.2^m$  ergänzt werden. Die Genauigkeit der Örter wird mit ca.  $0.02''$  angesetzt. Ein Zusatzband FK5sup wird unter anderem die FK5-Koordinaten einiger extragalaktischer Radioquellen enthalten, welche das Stellar-Inertialsystem und das Radio-Inertialsystem mit einer Genauigkeit von ca.  $0.1''$  verbinden. Von dem ab 1989 verfügbaren Astrometriesatelliten HIPPARCHOS sind anfangs der 90-er Jahre über 100000 Sternpositionen auf  $0.0015''$  genau und jährliche Eigenbewegungen auf  $0.002''$  in einem Beobachtungszeitraum von 2.5 Jahren zu erwarten. Eine weitere Mission 10 Jahre später könnte die Eigenbewegungen um einen Faktor 5 verbessern.

### b) VLBI-System:

Prinzip: Erfassung der Strahlung einer starken Radioquelle (Bereich  $1\text{mm} < \lambda < 30\text{m}$ ;  $10\text{MHz} < f < 300\text{GHz}$ ) an zwei räumlich getrennten Teleskopen. Aufzeichnung des Signals gemeinsam mit hochgenauen Zeitmarken (z.B. Wasserstoff-Maser; Stabilität ca.  $10^{-14}$ ) auf Magnetband. Korrelation der Banddaten und Bestimmung der Aufnahmezeitdifferenz korrespondierender Signale.

#### 4. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Ziel -- hohe Auflösung der Radioquelle

bei 3cm und Stationsabstand  $\approx$  Erdradius ca. 0.001"

-- Raumstrecke zwischen den Beobachtungsstationen  
im cm-Bereich

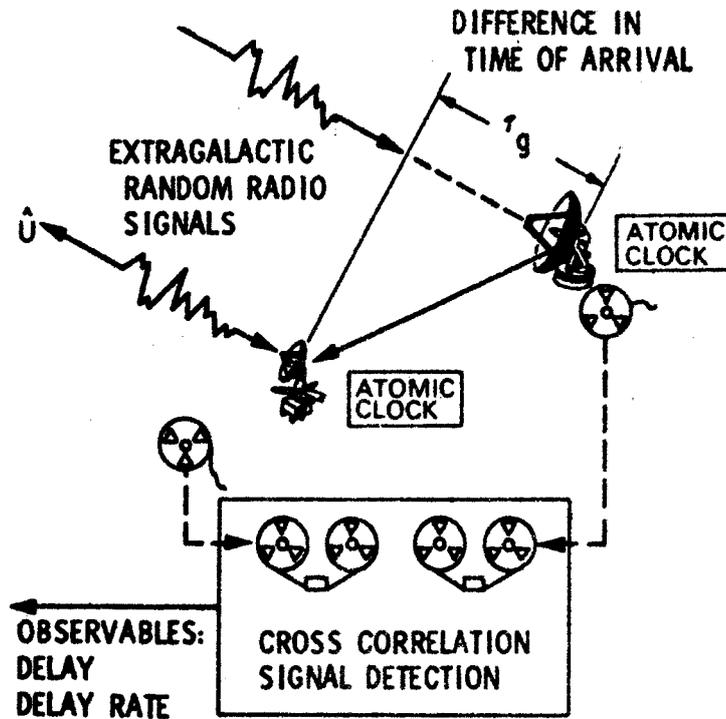


Abb.2: VLBI-Konfiguration

Datenaufnahme: Filterung des ankommenden Signals (GHz-Gegend)  
bis auf die Bandbreite 0 MHz- B MHz  
B ... Bandbreite des Aufnahmesystems

System	Gebrauch	Sample Rate Megabit / s	Bandlaufzeit Minuten
Mark I	1967-68	0.72	3
Mark II	1971-	4	64-246
Mark III	1977-	112	13
Mark III-A	1984-	112	164

## 5. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Das VLBI-System wird generell durch Radioquellen repräsentiert, wobei entweder Quasare oder ferne Galaxienkerne in Frage kommen. Beträgt die Querbewegung der ca. 12 Milliarden Lichtjahre entfernten Quelle immerhin 2000 AU/Jahr (3% der Lichtgeschwindigkeit), so würde die Quelle von der Erde gesehen in 1000 Jahren die Richtung nur um 0.001" ändern. Mittels VLBI wird sowohl die Deklination der extragalaktischen Objekte bezogen auf die momentane Rotationsachse der Erde bestimmt, als auch die Rektaszensionsdifferenz zu einer ausgewählten Referenzquelle (3C273 oder NRAO-140, etc.). Zusätzlich geben die Messungen Auskunft über Änderungen des Erdrotationsvektors. Die mittleren Koordinaten zu einer frei wählbaren Standard epoche (1950.0, 2000.0) sind natürlich vom Transformationsmodell (SNP) abhängig. Ist dieses Modell korrekt, gibt es keinen Grund für nicht radiale Relativbewegungen der Quellen. Das Referenzsystem kann somit zumindest als Quasi-Inertialsystem bezeichnet werden.

Die innere Genauigkeit des VLBI-Systems liegt derzeit bei ca. 0.01". Ein Wert, der in den nächsten Jahren auf 0.001" = 1 mas verbessert werden soll. Die Hauptprobleme liegen in der Verdichtung der Radioquellenkataloge und in ihrer Verbindung mit anderen Systemen. Somit konzentriert sich die Arbeit gegenwärtig auf die folgenden Aufgabenbereiche

- a) Auffinden weiterer punktförmiger starker Radioquellen
- b) Auffinden der Quellen im optischen Bereich
- c) Verbindung von Quasaren mit engen optischen Nachbarsternen (Space-Teleskop)
- d) Verbindung von Quasaren mit Radiosternen unserer Galaxie durch das Hipparchos-Programm (ca. 20 Radiosterne im Meßprogramm)
- e) Verbindung zu dynamischen Systemen über Asteroidenbeobachtung durch Hipparchos

JAN designation	Common name	Average obs. epoch	No. of sessions	Observations		Right ascension				Declination				RA, dec correl.
				Delay	Delay rate	h	m	s	Error(σ)	d	m	s	Error(σ)	
0814+425	0F 425	1977.83	19	23	27	8	18	16.00000	0.00023	42	22	45.4144	0.0018	-0.532
0823+093	P 0823+093	1980.01	8	13	13	8	25	50.33852	0.00018	3	9	24.5131	0.0033	-0.644
0827+249	R2 0827+24	1979.76	8	10	11	8	30	52.08663	0.00034	24	10	59.8106	0.0044	-0.841
0831+557	4C 55.16	1977.58	6	4	7	8	34	54.90177	0.00182	55	34	21.1328	0.0228	-0.279 R
0836+710	4C 71.07	1979.64	8	15	15	8	41	24.36650	0.00043	70	53	42.1699	0.0020	0.319
0851+202	0F 287	1978.04	15	37	41	8	54	48.87506	0.00014	20	6	30.6364	0.0018	-0.469
0859-140	P 0859-14	1977.80	11	16	16	9	2	16.83077	0.00082	-14	15	30.8847	0.0123	-0.953
0859+470	0F 499	1977.92	5	6	6	9	3	3.99137	0.00076	46	51	4.1265	0.0052	-0.650
0923+392	4C 39.25	1978.52	29	78	83	9	27	3.01394	0.00013	39	2	20.8497	0.0012	-0.156
0952+179	AD 0952+17	1979.98	5	5	5	9	54	56.82356	0.00078	17	43	31.2228	0.0126	-0.951
1004+141	GC 1004+14	1980.01	6	16	15	10	7	41.49848	0.00047	13	56	29.5912	0.0064	-0.920
1034-293	P 1034-293	1980.00	6	10	10	10	37	16.07922	0.00030	-29	34	2.8182	0.0042	-0.403
1038+064	GL 064.5	1980.01	2	6	6	10	41	17.16237	0.00020	6	10	16.9223	0.0382	-0.597
1040+123	3C 245	1980.03	6	7	6	10	42	44.60596	0.00036	12	3	31.2537	0.0049	-0.767
1055+018	P 1055+01	1979.73	10	23	25	10	58	29.60516	0.00011	1	33	58.8175	0.0025	-0.281
1104-445	P 1104-445	1977.74	10	15	15	11	7	8.69333	0.00047	-44	49	7.6226	0.0047	-0.398
1111+149	GC 1111+14	1980.03	6	11	11	11	13	58.69532	0.00048	14	42	26.9450	0.0061	-0.901
1116+128	P 1116+12	1980.11	3	4	4	11	18	57.30154	0.00031	12	34	41.7094	0.0064	-0.651 R
1123+264	P 1123+26	1980.02	8	21	21	11	25	53.71196	0.00019	26	10	19.9738	0.0023	-0.662
1127-145	P 1127-14	1978.70	22	51	51	11	30	7.05233	0.00016	-14	49	27.3941	0.0033	-0.330
1128+385	GC 1128+38	1980.15	1	3	3	11	30	53.28215	0.00047	38	15	18.5472	0.0037	-0.854 R
1130+009	P 1130+009	1980.05	3	3	3	11	33	20.05386	0.00741	0	40	53.4573	2.2097	-0.999 R
1144-379	P 1144-379	1978.73	15	40	40	11	47	1.37022	0.00022	-38	12	11.0304	0.0034	0.307
1148-001	P 1148-00	1978.09	10	15	15	11	50	43.87056	0.00040	-0	23	54.2101	0.0064	-0.905
1222+037	P 1222+037	1980.03	7	13	13	12	24	52.42221	0.00021	3	30	50.2808	0.0038	-0.738
1226+023	3C 273	1978.62	20	54	57	12	29	6.69970	...	2	3	8.5915	0.0025	...
1228+126	3C 274	1980.04	7	12	12	12	30	49.42342	0.00031	12	23	28.0376	0.0043	-0.850
1244-255	P 1244-255	1980.02	6	16	16	12	46	46.80182	0.00025	-25	47	49.2953	0.0037	-0.333
1253-055	3C 279	1978.24	6	14	14	12	56	11.16647	0.00038	-5	47	21.5320	0.0063	-0.884
1308+326	R2 1308+32	1980.02	10	24	24	13	10	28.66381	0.00013	32	20	43.7789	0.0016	-0.356
1313-333	OP-322	1978.15	9	16	16	13	16	7.98529	0.00031	-33	38	59.1781	0.0041	-0.328
1334-127	DW 1335-12	1977.96	10	20	21	13	37	39.78287	0.00028	-12	57	24.7028	0.0043	-0.684
1342+663	GC 1342+663	1980.12	3	5	5	13	44	8.67956	0.00053	66	6	11.6365	0.0025	-0.177
1349-439	P 1349-439	1980.11	2	4	4	13	52	56.53523	0.00061	-44	12	40.4002	0.0057	-0.583 R
1354+195	P 1354+19	1980.02	11	22	22	13	57	4.43660	0.00017	19	19	7.3665	0.0027	-0.628
1418+546	GC 1418+54	1980.13	2	6	6	14	19	46.59754	0.00020	54	23	14.7823	0.0015	-0.089
1430-178	OQ-151	1980.05	4	9	9	14	32	57.68946	0.00054	-18	1	35.2438	0.0080	-0.872
1458+718	3C 309.1	1979.61	4	7	7	14	59	7.33712	0.12839	71	40	20.4457	0.6308	-0.203 S
1502+106	OR 103	1979.35	18	39	40	15	4	24.97966	0.00011	10	29	39.1945	0.0023	-0.370
1510-089	P 1510-08	1978.18	6	15	15	15	12	50.53332	0.00051	-9	5	59.8408	0.0079	-0.918

Tabelle 1: JPL 1983-3 Radioquellen-Katalog

7. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Table 2 VLBI Antennas Used for Astrometry (Ma, 1988)

<i>Location</i>	<i>Size</i>
Gilmore Creek, Alaska, USA	26 m
Goldstone Deep Space Station, California, USA	64
Hartebeesthoek Radio Observatory, So. Africa	26
Hat Creek Radio Observatory, California, USA	26
Harvard Radio Astronomy Station, Texas, USA	26
Haystack Observatory, Massachusetts, USA	37
Kashima Space Research Center, Japan	26
Koike Tracking Station, Hawaii, USA	9
Kwajalein Atoll, Marshal Islands	26
Madrid Deep Space Station, Spain	64
Mojave Base Station, California, USA	12
National Radio Astronomy Observatory, West Virginia, USA	43
Onsala Space Observatory, Sweden	20
Owens Valley Radio Observatory, California, USA	40
Richmond, Florida, USA	18
Tidbinbilla Deep Space Station, Australia	64
Westford, Massachusetts, USA	18
Wettzell, Fed. Repub. Germany	20

Table 3 J2000.0 Catalogues of Extragalactic Compact Sources

<i>Organization</i>	<i>Instrument</i>	<i>Baseline Length (km)</i>	<i>No. of Sources</i>	<i>Uncertainties mas</i>	<i>Reference</i>
NRAO	CEI	35	36	20-40	Wade & Johnston, 1977
NRAO	CEI	35	16	10	Kaplan et al., 1982
JPL	Mark II	8000-11000	836	300	Morabito et al., 1982-86
NSF	VLA	<27	700	20-100	Perley, 1982
JPL	Mark II	8000-11000	117	1-5	Fanselow et al., 1984
NASA	Mark III	800-6000	85	0.3-13	Ma et al., 1986
NGS	Mark III	800-6000	26	0.5	Robertson et al., 1986

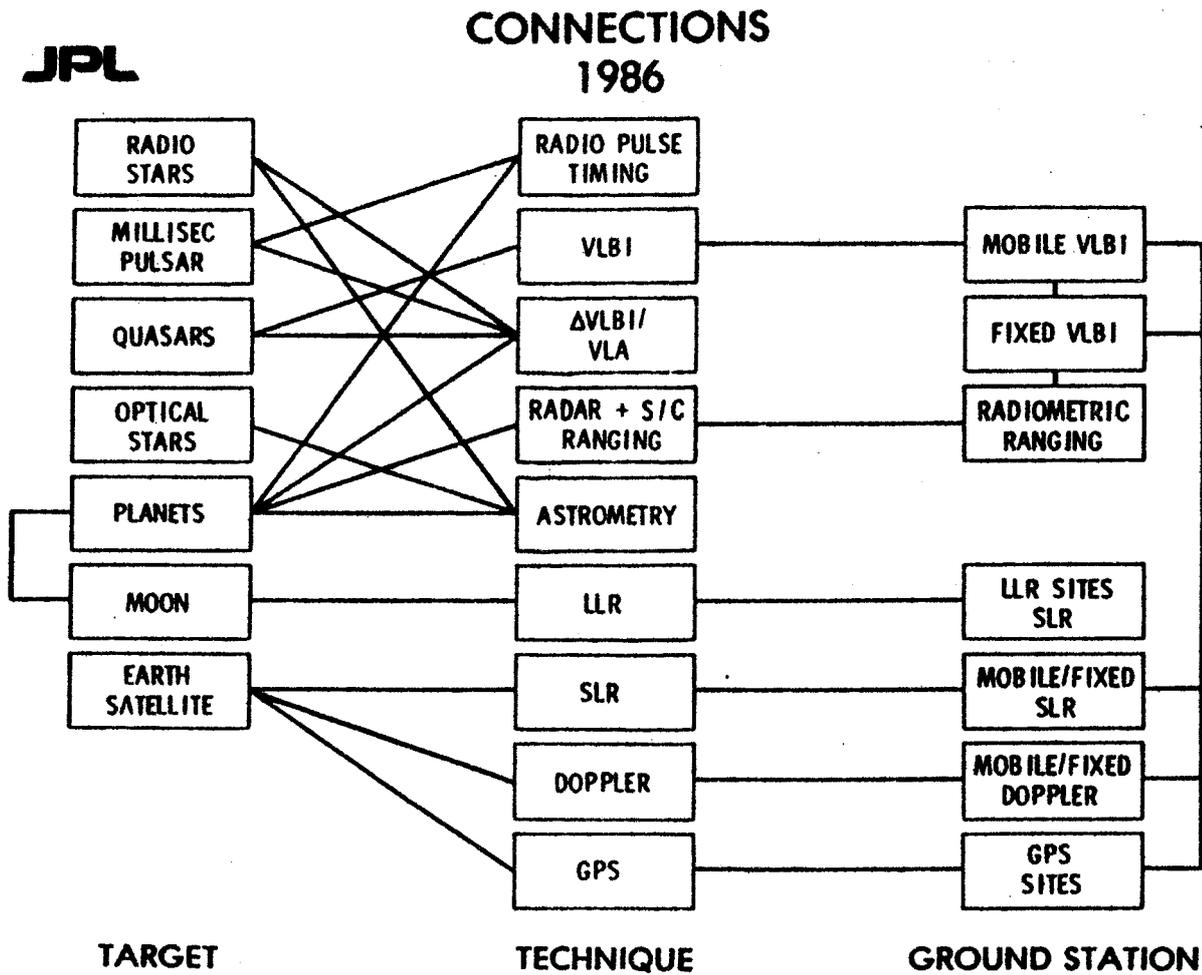


Abb.3: Verbindungen zwischen den Beobachtungssystemen

### 3. Zusammenfassung

Das derzeit präziseste und langfristig stabilste Fundamentalsystem basiert auf extragalaktischen Radioquellen. Als Grundlage dienen VLBI-Messungen.

Weitere Systeme (FK5, dynamische Systeme) sind zwar weniger genau, aber leichter zugänglich (geringerer Meßaufwand, einfachere Zielfindung).

Eine Vereinheitlichung der verschiedenen VLBI-Quellkataloge (unterschiedliche Quellen, differierende Auswertemodelle, verschiedene Beobachtungsstationen) wäre für die angestrebte Genauigkeit von 1 mas unbedingt nötig.

## 9. Fortsetzung Referat: Zum extragalaktischen Fundamentalsystem

Mit Sicherheit wird die Präzision der Winkelmessung in den nächsten 100 Jahren weiter gesteigert werden und sehr bald wesentlich besser als bei 1 mas liegen. Somit wird auch das System der extragalaktischen Radioquellen den Genauigkeitsansprüchen als Referenzsystem nicht, über einen langen Zeitraum gesehen, entsprechen können. Seine momentane Realisierung liefert jedoch die Basis zu einem besseren Verständnis und einer neuen Modellbildung in Fragen der Drift der Kontinentalplatten, der Verlagerung der Erdrotationsachse, der Bewegung der Erde unter den Himmelskörpern und der Ortsänderungen jener Himmelskörper selbst.

### Literatur:

Highlights of Astronomy

Volume 7

D. Reidel Publ. Company, Dordrecht 1985

On the Principles, Assumptions and Methods of Geodetic VLBI

Frits J.J. BROUWER

Netherlands Geodetic Commission

Publications on Geodesy, Vol. 7, Num. 4, Delft 1985

Lectures in Celestial Mechanics

J. KOVALEVSKY

Assisi 1988

Reference Coordinate Systems

Ivan I. MUELLER

Assisi 1988

Radio Interferometric Determination of Source position  
utilizing deep Space Network Antennas

FANSELOW et al.

The Astronomical Journal

Vol. 89, Num. 7, July 1984

Inertial Systems- Definitions and Realizations

H. EICHHORN

Dipl. Ing. Robert Weber

Höchstmannweg 22

1220 Wien

## **Referat: Finden schwacher Objekte mit elektronischer Hilfe - das CAT**

CAT steht für Computer Aided Telescope und bedeutet "rechnerunterstütztes Fernrohr". Es handelt sich dabei um ein Gerät, das mittels optoelektronischer Winkelencoder die Position des Teleskops erfaßt. Die Entfernung vom angewählten Objekt in  $\alpha$  und  $\delta$  wird mit kreuzförmig angeordneten Leuchtbalken angezeigt. Die Empfindlichkeit dieser Anzeige nimmt mit kleiner werdender Entfernung vom Objekt zu. Der Beobachter kann das Fernrohr nach diesen Leuchtbalken einfach und genau einstellen.

### **Aufbau**

Das CAT besteht im Wesentlichen aus 3 Elementen:

1. Den beiden Encodern für Rektaszensions- und Deklinationsachse.
  2. Einem Katalog von
    - a. 7840 nichtstellaren Objekten (zum größten Teil aus dem RNGC),
    - b. 251 Sternen heller als  $3^m$ ,
    - c. 100 schönen Doppel- und Mehrfachsternen.
  3. Einem Rechner, der die Encoder abliest und den Zugriff auf den Objektkatalog ermöglicht.
- Der Rechner ist zusammen mit dem Objektkatalog in der Konsole untergebracht, die auch die 14 Tasten für die Eingabe und die Anzeigeelemente enthält. Zwei Kabel verbinden die Konsole mit den Encodern.

### **1. Die Encoder**

Entsprechend dem Fernrohrtyp werden Befestigungselemente mitgeliefert, welche die einfache nachträgliche Montage der Encoder an der Fernrohrmontierung ermöglichen. Diese gibt es z.B. für Celestron C8, C11, C14, Meade M8 und M10. Beim Celestron Powerstar wird durch die Montage des  $\alpha$ -Encoders die Bewegung des Rohres bei  $t=6^h$  und  $t=18^h$  eingeschränkt.

Aus den Encodern werden 7200 Schritte pro Umdrehung abgeleitet; das entspricht einer Winkelauflösung von  $3'$ . Die Encoder werden mittels Zahnscheiben/Zahnriemen zusätzlich mechanisch übersetzt, sodaß sich für die  $\alpha$ -Achse eine Auflösung von  $1,5' = 0,1$  Zeitminuten und für die  $\delta$ -Achse eine Auflösung von  $1'$  ergibt.

Pro Umdrehung liefert jeder Encoder einen Indexpuls (bei  $t=0^h$  bzw.  $\delta=90^\circ$ ), der als Referenzmarke nach dem Einschalten des Gerätes dient.

Bevor man das CAT benutzen kann, müssen die Encoder so eingestellt werden, daß die Indexpulse mit der Fernrohrposition übereinstimmen. Diese Einstellung ist nur einmal erforderlich, nachdem die Encoder am Fernrohr montiert wurden.

### **2. Der Objektkatalog**

Er ist in elektronischer Form in einem EPROM gespeichert und enthält:

- a. Die äquatorialen Koordinaten für das Jahr, in dem das Gerät gekauft wurde. Die Präzession wird nicht berücksichtigt. Man sollte daher etwa alle drei Jahre beim Hersteller ein neues EPROM anfordern, das dann am letzten Stand ist.
- b. Eine Qualitätseinstufung ("Benotung") des Objekts. Bei den schönsten Objekten ist diese Benotung durch Beobachtung ermittelt worden. Für die Vielzahl der schwächeren Objekte wurde eine Note errechnet, basierend auf einer Bewertung von Objekttyp, Größe und Helligkeit. Leider gibt diese errechnete Note den tatsächlichen Eindruck nicht immer gut wieder.
- c. Die Ausdehnung des Objekts. Im Falle von nicht kreisförmigen Objekten ist die größte Ausdehnung gespeichert.
- d. Die Helligkeit des Objekts.
- e. Den Objekttyp (Galaxie, Offener Sternhaufe, Planetarischer Nebel,...).
- f. Verschiedene Angaben: Ob das Objekt im RNGC, Sky Catalogue 2000, oder Tirion Sky Atlas enthalten ist; ob die Benotung der Objektqualität durch Beobachtung gewonnen worden ist.

### **3. Der Rechner**

Er stellt die Verbindung zwischen den Encodern, dem Objektkatalog und dem Beobachter her. Eine Auswahl der Möglichkeiten, die zur Verfügung stehen:

- Das CAT zeigt die Fernrohrkoordinaten an: Elektronische Teilkreise (Befehl DISP COORD).
- Das CAT führt den Beobachter zum gewählten Objekt. Die Objektauswahl kann auf mehrere Arten erfolgen, indem:
  - die Katalogbezeichnung (NGC, M, Stern-Nummer) eingegeben wird;
  - das Objekt auf Grund von Beschreibungen (Objekttyp, größer oder kleiner als, heller oder schwächer als, Benotung besser als, höher über dem Horizont als) vom CAT gesucht wird. Auf Wunsch findet das CAT weitere Objekte, die den angegebenen Bedingungen genügen und reiht sie so, daß der Weg zum nächsten Objekt möglichst kurz ist (Befehl FIND).

## 1. Fortsetzung Referat: Finden schwacher Objekte mit elektronischer Hilfe - das CAT

- Das CAT findet das Objekt, das sich am nächsten zur Gesichtsfeldmitte befindet und zeigt an, wieviele weitere Objekte sich im Gesichtsfeld befinden (Befehl FIELD).

### Einnorden der Fernrohrmontierung

Das Einnorden wird durch das CAT wesentlich erleichtert. Nach dem Einschalten gibt man das Datum und die Zeit (GMT) und den Beobachtungsort ( $\lambda$ ,  $\varphi$ ) ein. Dann wird das Rohr bewegt, bis die beiden Indexmarken vom CAT erkannt wurden. Das CAT zeigt dann die Soll-Lage des Polarsterns an. Man bewegt das Fernrohr bis die Leuchtbalken die korrekte Lage des Fernrohres anzeigen. Dann verstellt man Azimut und Polhöhe der Montierung, bis der Polarstern in der Gesichtsfeldmitte ist. Das CAT gibt daraufhin einen Stern in Meridiannähe vor, den man im Fernrohr einstellt. Als letzter Schritt werden die Fernrohrkoordinaten gleich den Sternkoordinaten gesetzt.

Um die Einnordung weiter zu verbessern, kann diese Prozedur wiederholt werden, wobei die Eingabe von Zeit und Ort entfallen kann.

### Positionierungsgenauigkeit

Sie hängt ab von

- der Stabilität der Fernrohrmontierung und des Rohres (Durchbiegung, Spiegelkipfung, Achsen nicht senkrecht aufeinander). Diese Fehler können bei transportablen Geräten (z.B. C8) etwa 15...20' betragen. Geräte mit permanenter Aufstellung können hier wesentlich bessere Werte liefern.
- der Genauigkeit der Encoder (etwa 1').
- dem Fehler durch den Zahnriemen und die Zahnscheiben (etwa 1...5'). Der Hersteller liefert das CAT auf Wunsch auch so programmiert, daß die Zahnriemen/Zahnscheiben nicht erforderlich sind, und die Encoder direkt an die Achsen einer Montierung gesetzt werden können. Die erzielbare Auflösung ist dann 3'.
- der Genauigkeit der Einnordung.

Ich konnte mit meinem C8 einen maximalen Positionierungsfehler von 12' (Fernrohr in Normallage) bzw. 20' (Fernrohr umgelegt) über den gesamten Himmel beobachten. Dabei war die Hälfte aller Sterne weniger als 7' (Fernrohr in Normalposition) bzw. 12' (Fernrohr umgelegt) von der Gesichtsfeldmitte entfernt.

Die Genauigkeit über kleinere Winkelabstände kann durch Verwendung des SYNC-Befehls wesentlich verbessert werden. Dabei stellt man ein bekanntes Objekt (z.B. einen Stern) in die Mitte des Gesichtsfeldes und teilt dem CAT durch Drücken der SYNC-Taste mit, daß dieses Objekt nun genau zentriert ist. Dabei werden die Teleskopkoordinaten gleich den Objektkoordinaten gesetzt.

### Verschiedenes

Die Anzeigenelemente können durch den Befehl OPT - ausgeschaltet werden. Damit eliminiert man das bei der Beobachtung schwacher Objekte störende Licht der Anzeigen.

Ein programmierbarer Timer gibt ein akustisches Signal ab, wenn die eingestellte Zeit abgelaufen ist.

Gegen Aufpreis ist das CAT mit serieller RS232 Schnittstelle erhältlich, womit man einen Rechner anschließen kann. Im Lieferumfang ist ein über 80 Seiten starkes englisches Handbuch, das die Montage und Bedienung ausführlich beschreibt, sowie ein Ausdruck des Objektkatalogs enthalten.

### Bewertung

#### PLUS

Große Hilfe bei der Einstellung von lichtschwachen Himmelsobjekten.

Ermöglicht eine sehr schnelle und genaue Einnordung der Montierung.

Einfache Bedienung.

#### MINUS

Teuer.

Der Objektkatalog ist nicht fehlerfrei. Da die Daten in elektronischer Form in einem EPROM gespeichert sind, ist deren Korrektur nicht ohne weiteres möglich. In meinem CAT sind die Koordinaten von 6 aus 250 Sternen fehlerhaft.

### Technisches

Abmessungen der Konsole:

20x11x3cm.

Erforderliche Stromversorgung:

9..12V Gleichspannung bei

maximal 1A Stromaufnahme.

Mikroprozessor: Intel 8032.

EPROM: Intel 27010.

### Hersteller

ATI Advanced Technology Instruments

P.O. Box 246

Carmel Valley, CA 93924

USA

Preis: ca. US\$ 1500,-

Ing. Michael Pietschnig  
Diefenbachgasse 45-47/1/9  
1150 WIEN