

akzent

Gábor Szécsényi-Nagy

Jenseits der Milchstraße





Gábor Szécsényi-Nagy

Jenseits der Milchstraße

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Szécsényi-Nagy, Gábor
Astronomisches Institut der
Lóránd-Eötvös-Universität Budapest

Originaltitel: Túl a Tejútrendszer határain.
Gondolat Zebkönyvek, Budapest 1976
Übersetzer: Johannes Arndt

1. Auflage 1979.

1.–30. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

© Szécsényi-Nagy, Gábor, 1976

Gemeinschaftsausgabe des Verlages Gondolat, Budapest, und
des Urania-Verlages Leipzig,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur

VLN 212-475/23/79. LSV 1499

Lektor: Ewald Oetzel

Zeichnungen: Karoly Miklós

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typographie: Claus Ritter

Printed in German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig – III/18/97

Best.-Nr.: 653 5879

DDR 4,50 M



Fotos: Hale-Observatorium (71o., 120); Mount-Stromlo-Observatorium (102); Verlag Snanije, Moskau (25); Observatorium Abastumani (38); Archiv des Urania-Verlages (41, 44, 73, 123); Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg (61). Alle anderen entstammen dem Archiv des Autors bzw. sind dessen Aufnahmen.

Inhalt

Blick in größere Fernen 5

Erkenntnisse aus dem Altertum 5

Ein neues Weltbild 12

Glanzzeiten astronomischer Forschung 17

Wichtige Grundbegriffe der Astronomie 27

Die scheinbare Helligkeit der Sterne 27

Die absolute Helligkeit der Sterne 29

Sternspektren 32

Leuchtkraftklassen 36

Der Dopplereffekt 40

Was wissen wir

über das Milchstraßensystem? 43

Das Bild unserer Galaxis 43

Zwischen Zentrum und Spiralarm 50

Sternhaufen in den Spiralarmen 58

Interstellare Materie in unserer Galaxis 65

Supernovae in unserem Milchstraßensystem 72

Aus welchen chemischen Elementen besteht unser Sternsystem? 77

Populationen in der Galaxis 79

Organische Moleküle im interstellaren Raum 81

Die extragalaktischen Objekte 82

Geheimnisvolle Nebelflecke 82

Die Klassifizierung der Galaxien 84

Die integrierte Helligkeit der Galaxien 89

Die charakteristischen Sterntypen in den Galaxien	91
Die Masse der Galaxien	93
Die Radiostrahlung der Galaxien	94
Die bekanntesten Galaxien	95
Die große Magellansche Wolke	95
Die Kleine Magellansche Wolke	96
Der Andromedanebel (M 31)	97
Der Triangulumnebel (M 33)	100
Der Wirbelnebel M 51	100
Die Spiralgalaxie M 81	100
Die Spiralgalaxie M 101	100
Der Somberronebel (M 104)	103
Die Verteilung der Galaxien	104

Strahlende Welten 116

Radiogalaxien	116
Seyfertgalaxien	118
Quasare	120

Blick in größere Fernen

Erkenntnisse aus dem Altertum

Seit wann wissen wir, daß am Himmel nicht nur Sonne, Mond und Sterne zu sehen sind? Bereits *Pythagoras* (580–500 v. u. Z.) unterschied zwischen Planeten und Sternen. Da er jedoch nicht als Entdecker dieser Erkenntnis zu betrachten ist, war diese Tatsache sicherlich bereits damals allgemein bekannt. Planeten – auch Wandelsterne genannt – bewegen sich nicht nur zwischen den relativ zueinander unbeweglich »stehenden« (Fix-)Sternen, sondern durchlaufen von Zeit zu Zeit auch schleifenförmige Bahnen zwischen den Sternen. Überlieferungen aus der Zeit des Pythagoras weisen darauf hin, daß der Mond bereits als der der Erde am nächsten stehende Himmelskörper bekannt war, während den Sternen auch schon eine größere Entfernung von der Erde als den Planeten zugemessen wurde. Die Einteilung der Sterne nach ihrer Helligkeit hat ebenfalls im Altertum ihren Ursprung, und es ist sicher, daß zur leichteren Orientierung am Himmel die Sterne seit uralten Zeiten in Sternbilder eingeteilt werden.

Dennoch erschien es den Menschen des Altertums als selbstverständlich, daß sich das »Ende der Welt« auf der anderen Seite der unermeßlich weiten Ozeane befand. Es ist interessant, daß das Wort Ozean, das griechischen Ursprungs ist, Weltmeer bedeutet!

Wissenswert sind auch die Vorstellungen unserer Vorfahren darüber, was unseren Planeten im riesigen Weltenraum hält. In der griechischen Mythologie wurde diese Rolle Atlas zugeordnet: Er trug die Erde auf seinen Schultern. Indische Philosophen des Altertums erklärten



Altpersische Darstellung der Welt

die Welt ganz anders: Auf dem Rücken eines riesigen Delphins stehe eine große Schildkröte und auf deren Panzer ein Elefant. Auf ihnen allen ruhe die gesamte Last unserer Erde.

Die Griechen der Antike teilten die geometrischen Formen auch nach ihrer »göttlichen Vollkommenheit« ein; eine besonders große Bedeutung maßen sie dem vollkommensten Körper, der Kugel, zu, weil jeder ihrer Grenzpunkte in der gleichen Entfernung von ihrem Mittelpunkt liegt. Übrigens hatte auch die Erde eine besondere Bedeutung im damaligen Weltbild. Daraus ergab sich leicht die – im Endergebnis richtige – Schlußfolgerung, daß unser Planet eine kugelförmige Gestalt haben müsse.

Unsere Erde, wie sie die vom Mond zurückkehrenden Astronauten sehen



Unter Verwendung der Argumente des *Aristoteles* bestimmte der griechische Philosoph *Eratosthenes*, den man zu Recht auch als Astronomen bezeichnen könnte, den Umfang der Erde – also die Länge des Äquators. Durch seine prinzipiell richtige, mit großer Sorgfalt, aber noch ohne jegliche Meßgeräte durchgeführte Bestimmung erhielt er ein viel genaueres Ergebnis als 1762 Jahre später *Ch. Kolumbus* bei seinem Versuch, die Welt zu umsegeln. Das Ergebnis des griechischen Gelehrten der Antike weicht noch nicht einmal um 10% von dem heute durch exakte Messungen ermittelten Wert ab.

Sonne und Planeten vermochten die griechischen Philosophen der Antike noch nicht auf Grund der gemessenen Entfernungen in eine genaue Reihenfolge einzuordnen. Erste Spuren unserer gegenwärtigen Vorstellungen findet man in der Theorie von *Aristarchos*, der im 3. Jahrhundert v. u. Z. gelebt hat. Der Weise aus Samos lehrte nämlich, daß sich die helleren Himmelskörper – die fünf auch mit bloßem Auge erkennbaren Planeten, der Mond und die Erde – auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen. Dieses Bild vom Sonnensystem wich jedoch so stark von dem damals allgemein anerkannten Weltbild ab, daß niemand diese Vorstellungen weiter verfolgte. Die in ihrer Grundlage richtige Theorie geriet über viele Jahrhunderte hinweg in Vergessenheit.

Als für die Praxis am besten geeignet erwies sich das Weltbild des bekannten Naturwissenschaftlers *Ptolemäus* (120 bis 180 u. Z.). Sein gewaltiges Werk, das uns unter dem Titel »*Almagest*« in arabischer Übersetzung erhalten geblieben ist, ist auch heute noch studierenswert. In diesem Werk hat er fast alle wissenschaftlichen Ergebnisse seiner Zeit zusammengefaßt; man findet darin ebenso eine Beschreibung des Weltsystems wie eine Landkarte des damals bekannten Teils der Erde. Besonders interessant ist auf dieser Landkarte, daß er auch für unbekannte Gebiete Raum gelassen hat, um so spätere Ergänzungen zu ermöglichen. Der Grundgedanke des Ptolemäus bestand darin, daß sich die das Leben tragende Erde im Mittelpunkt des Sonnensystems befinden muß. Wir nennen deshalb sein Weltbild *geozentrisch*. Er beschrieb im einzelnen, in welcher Reihenfolge die Himmelskörper mit zunehmender



Arabischer Himmelsglobus aus dem Jahre 1279

Entfernung von der Erde aufeinanderfolgen. Jeder Himmelskörper bewegt sich nach seiner Theorie auf einer kreisförmigen Bahn. Aber manche von ihnen vollziehen ihren Umlauf auf einem zweiten Kreis, dessen Mittelpunkt sich gleichförmig auf dem ersten Kreis bewegt. Diese Kreise stellt man sich als durchsichtige Kristallkugeln vor, die nicht wahrgenommen werden. Inzwischen wissen wir,

daß sich die Planeten in Wirklichkeit auf elliptischen Bahnen um die Sonne bewegen; durch eine Erhöhung der Anzahl der Sphären und durch eine geschickte Wahl der Umlaufperioden konnte man jedoch diese Bewegungen auch mit Hilfe von Kreisbahnen interpretieren. Gerade deshalb war es so schwer, das *ptolemäische Weltbild* zu stürzen, weil man auf seiner Grundlage verhältnismäßig leicht und recht genau voraussagen konnte, welchen Weg die Planeten, die Sonne und der Mond am Himmel nehmen werden.

Ein neues Weltbild

Als *N. Copernicus* anderthalbtausend Jahre später seine Theorie über das heliozentrische Planetensystem (die Sonne befindet sich im Mittelpunkt) entwickelt hatte, wurde sie von vielen nicht anerkannt. Auf der Grundlage des alten geozentrischen Modells konnte man Himmelserscheinungen zunächst noch genauer voraussagen. Die neuen Vorstellungen konnten so lange keine Gleichwertigkeit mit den alten erlangen, bis sie nicht wenigstens deren Genauigkeit erreicht hatten. Auf der Grundlage der Beobachtungen der Planeten, die man damals noch ohne Fernrohr anstellte, gelang es *J. Kepler*, die Ellipsenbahnen der Planeten um die Sonne zu berechnen; dabei stützte er sich vor allem auf die Marsbeobachtungen von *T. Brahe*. Kepler fand die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Planetenbewegung, die heute nach ihm Keplersche Gesetze genannt werden. Diese besagen, daß sich jeder Planet auf einer elliptischen Bahn bewegt, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet. Mit Hilfe dieser Gesetze kann man angeben, wie groß die Geschwindigkeit der einzelnen Himmelskörper in den verschiedenen Punkten dieser Bahn ist und in welcher Beziehung die Entfernungen der Planeten von der Sonne mit ihren Umlaufperioden stehen. Die mit großer Sorgfalt ausgearbeitete Theorie war nun so weit vervollkommenet, daß sie das mit den göttlich vollkommenen Kreisen und Kugeln vollgestopfte geozentrische Modell endgültig zu überwinden vermochte.

Eine Sache müssen wir jedoch hervorheben: Auch Copernicus war der Ansicht, daß sich die Fixsterne –



Kometendarstellung auf dem Gobelin von Bayeux aus dem 11. Jahrhundert

abgesehen von der Sonne – in gleicher Entfernung vom Mittelpunkt des Systems auf der Oberfläche einer Kugel befinden. Auf seinen Zeichnungen ist die Entfernung zwischen dem damals bekannten äußersten Planeten, dem Saturn, und der festen Sphäre der Sterne recht gering. Vor 400 Jahren war also für die Menschheit das Universum noch kleiner als das uns heute bekannte Sonnensystem.

Kepler kam auf den Gedanken: Die Sonne kann keine Ausnahmestellung im Weltall einnehmen. Wenn sie ebenso ein Stern ist wie die übrigen vielen tausend Fixsterne, die man bereits mit bloßem Auge erkennen kann, dann erscheint sie uns sicher deshalb so hell, weil sie uns wesentlich näher steht als die übrigen Sterne. Kepler nahm an, daß die Dichte der Sterne gleichmäßig ist und daß sie so angeordnet sind, als ob sie in irgendein Kristallgitter ein-



Mittelalterliches Astrolabium, ein Gerät, das zur Bestimmung der Planetenörter diente

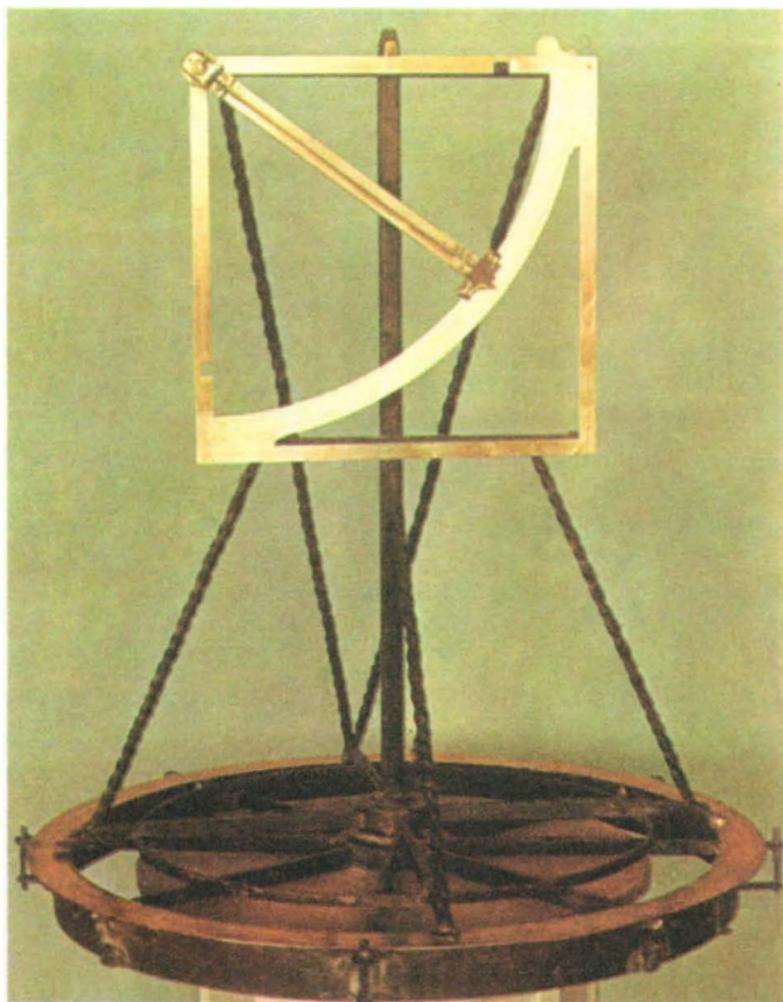
gebaut wären. Von der Milchstraße glaubte Kepler, daß sie einen aus zahllosen Sternen bestehenden gewaltigen Ring darstellt, in dem irgendwo in der Gegend seines Mittelpunktes das Planetensystem mit der Sonne liegt. Da es keine Beweise durch Beobachtungen gab, gerieten diese Vorstellungen wieder in Vergessenheit.

Als man die ersten Fernrohre fertiggestellt hatte und eines davon 1608 auch in die Hände Galileis gelangte, stellte der große italienische Astronom fest, daß das schwach leuchtende Band der Milchstraße tatsächlich das zusammenfließende Licht einer unermesslich großen Zahl schwach leuchtender Sterne darstellt. Damals zeigte es sich bereits deutlich, daß die Ahnung Keplers, der sich

noch nicht auf Beobachtungen hatte stützen können, nicht weit von der Wahrheit entfernt war. Die Welt hatte sich also plötzlich sehr stark erweitert. Obwohl die Entfernungen der Sterne noch nicht bekannt waren, konnte man schon annehmen, daß viele von ihnen sehr weit vom Sonnensystem entfernt sind.

Bereits der arabische Astronom *Al-Sufi*, der 903 bis 986 u. Z. lebte, kannte den heute als Andromedanebel bezeichneten schwach leuchtenden Fleck am Himmel. Mit zu-

Gerät zur Bestimmung des Standorts von Himmelsobjekten aus dem Mittelalter



nehmender Verbreitung des Fernrohrs wurden dann immer mehr Himmelserscheinungen entdeckt, die den Sternen nicht mehr ähnlich waren. Der Orionnebel wird 1610 erstmalig in einem schriftlichen Dokument erwähnt, und zwar in einem Werk von *Cysatus*. Diesem Astronomen gelang es mit einem Fernrohr aus der Anfangszeit der Entwicklung dieser Hilfsgeräte der Astronomie, die schöne Emissionswolke zu entdecken.

Der deutsche Astronom *S. Marius (Mayr)*, auch ein bekannter beobachtender Astronom dieser Zeit, führte bereits 1612 mehrere diffuse Objekte (Nebel) an.

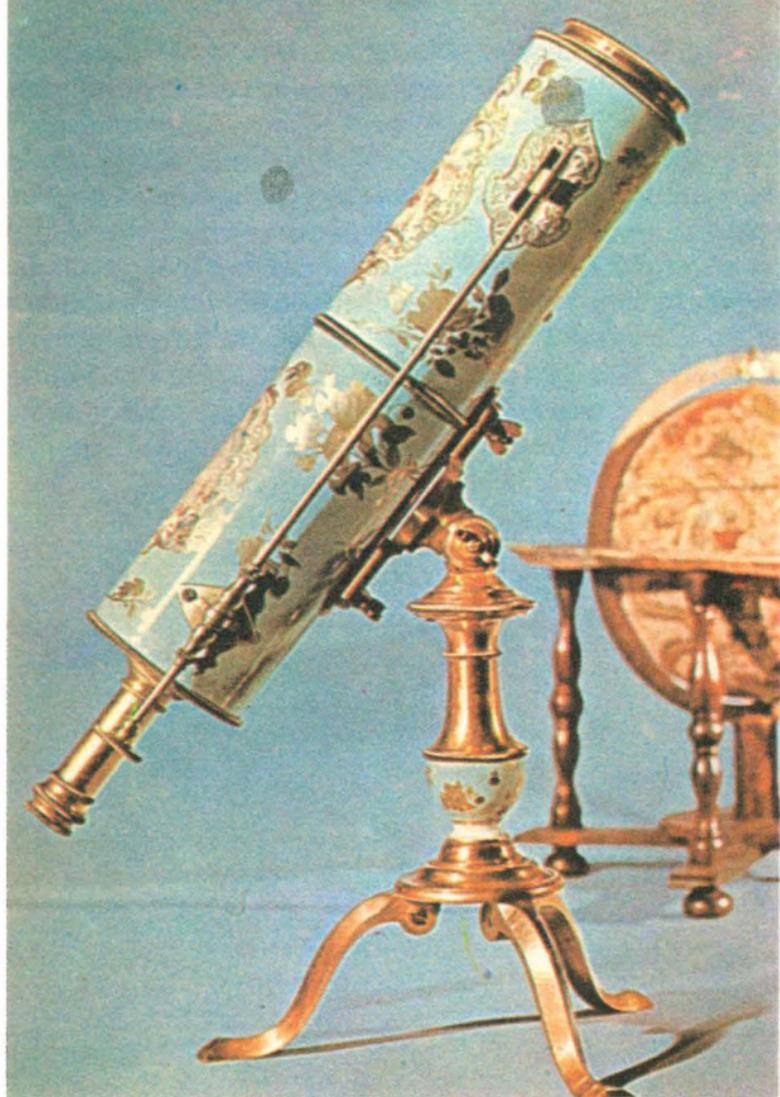
Das Fernrohr Galileis. Es ist in Florenz aufbewahrt.



Mit der Deutung der ständig zunehmenden Entdeckungen begannen sich die Philosophen jener Zeit zu befassen. Als erster versuchte der Schwede *E. Swedenborg*, danach der englische Wissenschaftler *T. Wright* und der deutsche Philosoph *I. Kant*, die Natur der lichtschwachen Nebelflecke zu erklären. Bemerkenswert ist die Überlegung des englischen Naturwissenschaftlers, nach der auch die Sterne in den fernen Bereichen des Weltalls Sphären bilden, die aus sehr großer Entfernung als schwach leuchtende Fleckchen erscheinen. Das Milchstraßensystem hielt er für eine flache Schicht gewaltiger Ausdehnung, in der die schwach leuchtenden Sterne gleichmäßig verteilt sind. Die helleren Sterne liegen dagegen in einer Kugel, die auch das Sonnensystem enthält; diese Kugel befindet sich wiederum in der Symmetrieebene der genannten Schicht. Durch diese Theorie wurde das erkennbare Bild des Firmaments überzeugend beschrieben. Die Ansichten Kants wichen von diesen Vorstellungen nur wenig ab. Der wesentliche Unterschied bestand darin, daß der deutsche Philosoph sich bereits unsere Galaxis als ein System von endlicher Ausdehnung vorstellte, als eine verhältnismäßig abgeflachte Scheibe, in deren Zentrumsnähe das Sonnensystem liegt. Er meinte, daß auch die Sterne ähnlich den Planeten innerhalb dieser Scheibe um ihren Mittelpunkt kreisen. Dies war eine reine Annahme, weil es damals noch überhaupt keine Beobachtungsdaten über eine derartige systematische Bewegung der Sterne gab.

Glanzzzeiten astronomischer Forschung

Im 18. Jahrhundert nahm jener Zweig der Astronomie einen großen Aufschwung, der sich mit der Untersuchung der kosmischen Nebel befaßte. Im Jahre 1706 gelang es dem Engländer *E. Halley*, endgültig zu entscheiden, daß die Kometen keine in der Erdatmosphäre entstehenden Lichterscheinungen sind, sondern echte Himmelskörper, die sich auf meist langgestreckten Bahnen im Sonnensystem zwischen den Planeten bewegen. Er bestimmte auch die Bewegung mehrerer Sterne relativ zu einigen in ihrer näheren Umgebung befindlichen Himmelskörpern.



Spiegelteleskop mit Porzellanverkleidung aus dem Jahre 1750

In den Jahren um 1770 forschte der Franzose *Ch. Messier* mit großer Ausdauer nach Kometen. Dabei erfaßte er solche flächenhaften Objekte, durch die – infolge ihrer Ähnlichkeit mit den Kometen – alle Astronomen und Amateure getäuscht werden konnten, die mit den noch nicht sehr vollkommenen Fernrohren nach Kometensuchten. In dem 1784 herausgegebenen Messierkatalog sind 103 Objekte beschrieben. Mehrere davon sind zwar offene

oder Kugelsternhaufen, aber man findet darunter auch eine beträchtliche Anzahl heller Gaswolken und – wie wir heute wissen – auch extragalaktische Nebel. Später wurde dem Katalog noch eine Galaxie zugefügt, so daß es insgesamt 104 Messierobjekte gibt. Sie werden mit dem Buchstaben M und einer laufenden Nummer bis 104 gekennzeichnet (z. B. M 3, M 41).

F. W. Herschel, der von 1779 an bereits in England arbeitete, ist – in seiner Zeit – der namhafteste Erforscher der nichtstellaren Himmelskörper. Mit seinen selbstgefertigten Fernrohren entdeckte er mehr als 2000 Haufen und Nebel, die er beschrieb. Er war der erste Astronom, der durch ein zielbewußt zusammengestelltes Programm versuchte, die Gestalt des Milchstraßensystems zu bestimmen. Dabei wendete er folgendes Verfahren an: Zuerst zählte er in vorher sorgsam ausgewählten Richtungen die Sterne, die im Gesichtsfeld seines Fernrohres zu erkennen waren. Dann berechnete er daraus, bis zu welcher Entfernung die Sterne in einem gegebenen Feld den Raum auszufüllen vermögen. Als Ergebnis der sich über mehrere Jahre erstreckenden Arbeit konnte er feststellen, daß das Milchstraßensystem eine endliche Ausdehnung hat und das Verhältnis zwischen seinem größten und seinem kleinsten Durchmesser 5:1 beträgt. Nach seinen Ergebnissen sollte das Sonnensystem in der Nähe des Milchstraßenzentrums liegen. Der Nachteil seines Verfahrens bestand darin, daß er – unter den damaligen Bedingungen zwangsläufig – zwei Annahmen machen mußte, die sich später als unrichtig erwiesen. Einerseits stimmt es nicht, daß die Sterne die gleiche absolute Helligkeit haben, andererseits variiert ihre räumliche Verteilung sehr stark – und noch dazu bei den einzelnen Sterntypen unterschiedlich. Wundern wir uns deshalb also nicht, daß das Bild, das Herschel vom Milchstraßensystem gewonnen hatte, dem heutigen nicht sehr ähnlich ist. Die Untersuchung der Nebel wurde von seinem Sohn *J. Herschel* fortgesetzt, der den Objekten am südlichen Himmel besondere Beachtung schenkte. In seinem 1864 herausgegebenen Werk, dem *Allgemeinen Katalog*, sind die Koordinaten von mehr als 5000 Objekten angegeben.

Im Jahre 1888 erschien der *Neue Allgemeine Katalog*

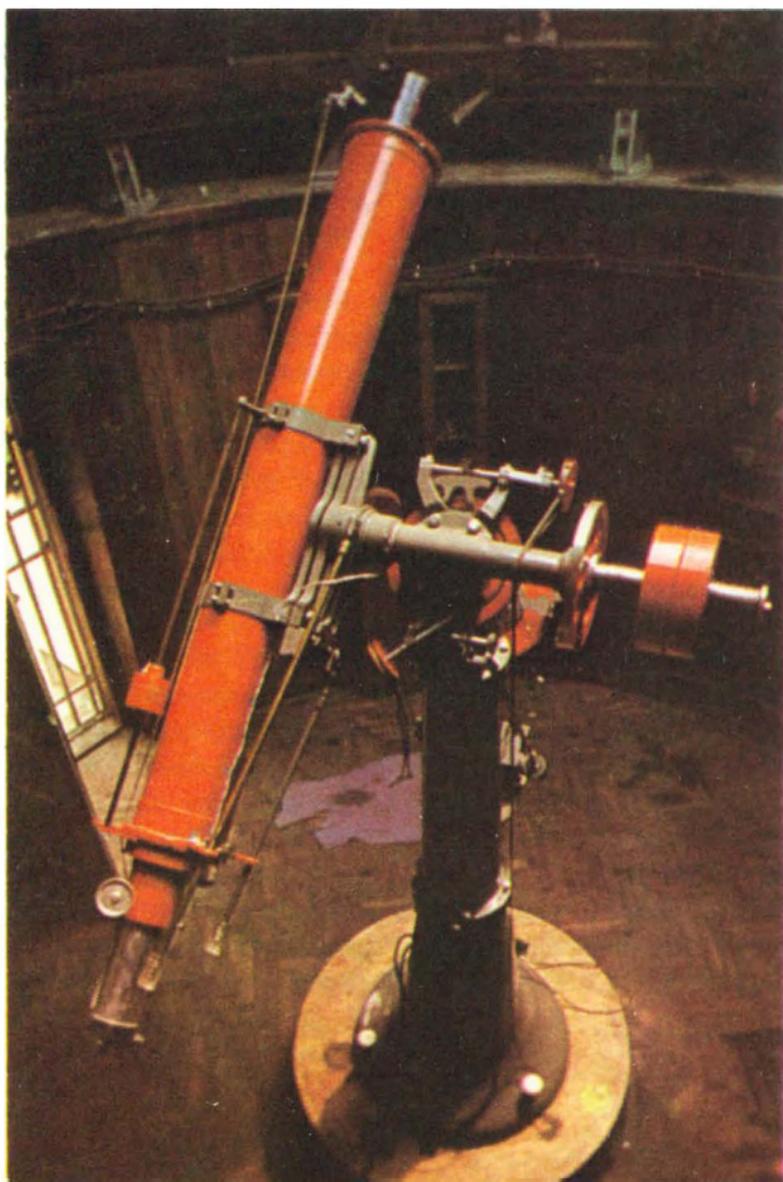
(abgekürzt NGC – New General Catalogue), der von dem irischen Astronomen *J. Dreyer* zusammengestellt worden war und auch noch heute häufig benutzt wird. In diesem Verzeichnis sind bereits 7840 Objekte erfaßt und auch schon Ergebnisse der astronomischen Fotografie enthalten. Zu dieser Zeit hatte sich die Diskussion um die Natur der nicht in Sterne auflösbaren Nebel verschärft. Manche Astronomen vertraten die Ansicht, daß alle diese Nebel zur Galaxis gehören, andere dagegen dachten, sie hätten eine der Galaxis ähnliche Größe und erschienen nur wegen ihrer gewaltigen Entfernung so klein. Damals wurden auch spektralanalytische Verfahren in die Astronomie eingeführt. Mit ihrer Hilfe konnte recht bald festgestellt werden, daß man die Nebelflecken in zwei Gruppen einteilen kann, deren Eigenschaften stark voneinander abweichen. Die eine ist dadurch charakterisiert, daß die Spektren dieser Objekte Linienstrukturen ähnlich wie die von verdünnten Gasen aufweisen. Demgegenüber sind die Spektren der zur anderen Gruppe gehörenden Nebel kontinuierlich; höchstens vereinzelt findet man darin helle oder dunkle Spektrallinien. Diese Spektren sind somit den Sternspektren sehr ähnlich. Die Gasnebel wurden als »grüne Nebel«, die Nebel jedoch, deren Spektren denen der Sterne ähnlich sind, als »weiße Nebel« bezeichnet. Allgemein wurde die Auffassung anerkannt, nach der die »weißen Nebel« zum großen Teil aus Sternen bestehen und vielleicht eine geringe Menge diffuser Materie enthalten.

Im Jahre 1885 gelang es, im Andromedanebel (M 31) eine Supernovaexplosion zu beobachten. Dieses Ereignis wurde als Beweis dafür angesehen, daß M 31 aus Sternen aufgebaut ist.

Die Fertigstellung des ersten wirklich großen Spiegelteleskops am Mount-Wilson-Observatorium bedeutete für die Astronomie einen gewaltigen Schritt nach vorn. Man konnte mit ihm bereits die hellsten Sterne in den Armen der Spiralnebel M 31 und M 33 erkennen. *E. P. Hubble* fand 1923 darunter auch Objekte, deren scheinbare Helligkeit sich periodisch veränderte. An Hand einer Helligkeitskurve, die den Verlauf der Helligkeitsänderungen veranschaulicht, wurde festgestellt, daß diese Himmelskörper zu dem im Milchstraßensystem bekannten

Stern *Delta Cephei* gehören, von dem man wußte, daß die Periode der Helligkeitsänderung in enger Beziehung zur absoluten Helligkeit des Sterns steht. Unter Berücksichtigung der scheinbaren Helligkeiten und der Perioden des Lichtwechsels der beiden hellsten Cepheiden, die im Spiralnebel gefunden wurden, berechnete Hubble die Entfernung dieser Nebel. Für beide erhielt er einen so großen Wert, daß ihm niemand glauben wollte.

Parallaktisch montiertes Fernrohr aus dem vergangenen Jahrhundert mit einer Linse von acht Zoll Durchmesser



Zu dieser Zeit erkannten die Astronomen allgemein an, daß sich das Sonnensystem nicht im Mittelpunkt des Milchstraßensystems befindet, sondern vielmehr weit außerhalb steht. Gleichzeitig waren viele Wissenschaftler jedoch nicht geneigt, sich die durch zahlreiche Beobachtungsergebnisse gestützte Behauptung zu eigen zu machen, daß der Durchmesser der Galaxis nicht 30 000, sondern 300 000 Lichtjahre beträgt!

Durch die Erkenntnis Hubbles wurde auch die Erforschung des Milchstraßensystems vorangetrieben, weil man aus einem Vergleich der Meßergebnisse darauf schließen konnte, daß die beiden benachbarten Spiralgalaxien ähnliche Ausdehnungen haben wie unsere Galaxis.

Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Auffassung zum Allgemeingut geworden, daß die sich vom Zentrum am weitesten entfernt bewegenden Kugelsternhaufen die Grenzen der Galaxis markieren. Auf diesen Erkenntnissen, die wir im wesentlichen *H. Shapley* verdanken, beruht auch unser heutiges Bild von der Milchstraße: Sie stellt eine flache Scheibe mit dem Kern in der Mitte und dem das ganze System einhüllenden Halo dar. *J. H. Oort* und *B. Lindblad* haben 1926 bewiesen, daß unser Sternsystem tatsächlich rotiert. Die Auswertung der Beobachtungen ergab, daß diese Rotation weder mit der starrer Körper – die Winkelgeschwindigkeit der Sterne um das Milchstraßenzentrum ist nicht überall gleich – noch mit der der Planeten zu vergleichen ist, deren Bewegung durch die Keplerschen Gesetze beschrieben wird. Untersucht man die Geschwindigkeitsverteilung der Masse in der gesamten Galaxis, kommt man zu dem Schluß, daß sich die Objekte in den zentralen Bereichen so bewegen, als ob die Himmelskörper starr miteinander verbunden wären. Mit zunehmender Entfernung vom Kern der Milchstraße dagegen nimmt die Winkelgeschwindigkeit kontinuierlich ab. Außerhalb des Übergangsbereichs bewegen sich in einer Entfernung von mehreren zehntausend Lichtjahren vom Zentrum die interstellaren Wolken und die Sterne auf Bahnen wie die Planeten um die Sonne.

Bei der Untersuchung von astronomischen Aufnahmen war bereits um die Jahrhundertwende die Möglichkeit in Erwägung gezogen worden, daß die Galaxis ein dem An-



Ein 1880 erbautes astronomisches Observatorium (Astrophysikalisches Observatorium der Akademie der Wissenschaften in Liège)

dromedanebel M 31 oder dem Dreiecksnebel M 33 ähnliches Spiralsystem darstellt. Als erster veröffentlichte *C. Easton* 1900 derartige Vorstellungen. Es gelang auch, festzustellen, daß die Sonne auf einem Drittel der Strecke zwischen dem Kern und den Randgebieten der Galaxis liegt, und zwar näher beim Kern, der sich nach damaligen Ergebnissen in der entgegengesetzten Richtung zu den Sternbildern Adler (Aquila) und Schwan (Cygnus) befindet.

Im zweiten Viertel des 20. Jahrhunderts war den Astronomen die Grobstruktur des Milchstraßensystems bekannt. Auch wußte man, daß sich in großen Entfernungen von der Galaxis dem unseren ähnliche Sternsysteme befinden. Jedoch führte die damals noch ungenügende Kenntnis der interstellaren Materie zu widersprüchlichen, nur schwer zu erklärenden Ergebnissen. Bei der Untersuchung der Verteilung und der Häufigkeit der offenen Haufen erkannte der im Lick-Observatorium arbeitende Astronom *R. J. Trümpler*, daß sich entlang der Symmetrieebene der Milchstraße eine bedeutende Menge Materie befindet, die eine Lichtabsorption verursacht. Er

konnte noch nicht viel über die Natur dieser Materie sagen. Doch man nahm bereits an, daß interstellare Gas- oder Staubwolken die Ursache dieser Erscheinung sein könnten. Durch die interstellare Absorption wird die scheinbare Helligkeit geringer – zahlenmäßig größer –, als man es nach der Entfernung und der absoluten Helligkeit eines Sterns erwarten sollte. Ohne Kenntnis der interstellaren Absorption muß man daher für die untersuchten Objekte größere als die tatsächlichen Entfernungen abschätzen.

Mit dem zweiten Viertel des 20. Jahrhunderts kam die Glanzzeit der modernen Astronomie. Bei der Untersuchung der Spektren der bereits bekannten extragalaktischen Systeme fiel es *E. P. Hubble* auf, daß die Spektrallinien nur in den seltensten Fällen an den aus Laboratoriumsmessungen bekannten Stellen auftreten und offenbar viel öfter in den roten Spektralbereich verschoben sind als in das kurzwelligere blaue Wellenlängengebiet. Da diese Verschiebung nicht sehr groß ist, lag die Erklärung auf der Hand: Ihre Ursache ist der Dopplereffekt. Die fernen Sternsysteme bewegen sich relativ zur Erde, und dadurch ändert sich ihr Spektrum. Diese Erscheinung wurde aber dann für ihren Entdecker und für alle Astronomen zu einer Überraschung, als es sich immer mehr herausstellte, daß zwischen den scheinbaren Helligkeiten der fernen Galaxien und ihren Geschwindigkeiten, mit denen sie sich von der Erde entfernen (Expansionsgeschwindigkeit), eine enge Beziehung besteht. Niemand zweifelte daran, daß die scheinbaren Helligkeiten der Sternsysteme wesentlich von ihren Entfernungen abhängen. Vergleicht man diese Feststellung mit den Beobachtungsdaten, dann muß man zu der Schlußfolgerung gelangen, daß die Expansionsgeschwindigkeit der Galaxien eine Funktion ihrer Entfernung von uns ist. Dieses Ergebnis erschien unglaublich. Seinem Entdecker wurde von vielen vorgeworfen, er hätte ein neues geozentrisches Weltsystem geschaffen, nur ein wesentlich größeres als das alte. Bald aber gelang es, die Zweifler zu überzeugen, daß hiervon keine Rede sein kann. Überlegen wir nur einmal, was geschieht, wenn man einen

Das mit dem größten Spiegelteleskop der Welt ausgestattete sowjetische Observatorium Selentschuk im Kaukasus



kugelförmigen Luftballon, auf den man Pünktchen gemalt hat, langsam aufbläst. Die Pünktchen entfernen sich voneinander, ganz gleich, ob man die Entfernung an der Oberfläche oder im Raum mißt. Außerdem ist es auch gleich, auf welchen Punkt man die Entfernung der übrigen bezieht. Das gleiche gilt auch für die Sternsysteme; unabhängig davon, auf welcher Galaxie sich ein Beobachter befindet, wird er immer feststellen, daß sich alle anderen Galaxien von ihm entfernen.

Seitdem wurden neue große Teleskope in vielen Observatorien der ganzen Welt aufgestellt, und die damit vorgenommenen Beobachtungen haben die Gültigkeit des Hubbleschen Gesetzes bewiesen. Durch diese Beziehung wurde den Astronomen ein Mittel in die Hand gegeben, mit dessen Hilfe sie auch die Entfernung selbst Milliarden von Lichtjahren entfernter Sternsysteme zu bestimmen vermögen.

Nach dem zweiten Weltkrieg hat sich ein neuer Zweig der Astronomie herausgebildet, der *Radioastronomie* genannt wird, weil er die Radiostrahlung der Himmelskörper untersucht. Eine der überraschendsten Entdeckungen der sechziger Jahre wurde gerade von diesem jungen Wissenschaftszweig im Zusammenhang mit den Quasaren gemacht, die eine besonders starke Rotverschiebung zeigen. Vermutlich sind sie die am weitesten von uns entfernten Objekte, die wir zu erkennen vermögen, so daß unser heutiger astronomischer »Horizont« bei ihren entferntesten Vertretern liegt. Obwohl man jeden Tag interessante Nachrichten in den Zeitungen lesen kann, ist es für einen Astronomen dennoch am aufregendsten, wenn er eine Neuigkeit findet, die sein Fachgebiet betrifft. So erging es uns auch im Sommer 1973, als wir hörten, daß eine Radioquelle entdeckt wurde, die nahezu 15 Milliarden Lichtjahre von unserem Milchstraßensystem entfernt ist. Das ist eine unvorstellbar große Entfernung, die fast bis in die Frühphase des Weltalls reicht.

Wichtige Grundbegriffe der Astronomie

Die scheinbare Helligkeit der Sterne

Wie bei der Bestimmung einer jeden physikalischen Menge ist auch für die Messung der Helligkeit der Sterne eine Skala (Maßeinteilung) unerlässlich. Solange es kein exaktes Verfahren zur Messung der Helligkeit gab, erhielt das menschliche Auge bei jeder Methode der Helligkeitsmessung Bedeutung. Gerade deshalb konnte man auch die Physiologie des Sehens nicht unberücksichtigt lassen, als man die Klassifizierung nach der Helligkeit verbesserte.

Nach dem Weber-Fechnerschen Gesetz der Psychophysik bewirkt die Änderung eines Licht- oder Schallreizes nur eine logarithmische Änderung der Reizwirkung. Betrachtet man z. B. 1, 10 oder 100 Kerzen aus der gleichen Entfernung, dann empfindet man ihre Helligkeit als Gruppe in den Verhältnissen 1:2:3. (Obwohl durch Versuche mit modernen Geräten nachgewiesen wurde, daß das Gesetz in dieser Form nicht gilt, wird in der Schall- und Helligkeitsmessung auch heute noch eine logarithmische Skala benutzt.) Auf der Grundlage dieses Gesetzes wurde also die Helligkeitsskala festgelegt: Die Differenz der scheinbaren Helligkeit zweier punktförmiger Lichtquellen – Sterne – dm ist gleich dem Logarithmus des Quotienten der Intensität der von beiden Sternen auf die Erde treffenden Strahlung:

$$dm = m - m' = k \cdot \lg \frac{I}{I'}$$

m und m' sind die *scheinbaren Helligkeiten* der Sterne (Lichtquellen), I und I' bedeuten ihre Intensitäten. Der

Proportionalitätsfaktor k kann frei gewählt werden, und damit die alten Sternkarten, -kataloge und -beobachtungen auch weiterhin benutzt werden können, wurde für ihn der Wert $-2,5$ vereinbart. Da für die Berechnungen der Briggsche Logarithmus (Zehnerlogarithmus) verwendet wird, bedeutet diese Beziehung, daß dm gerade dann 5 betragen wird, wenn der Wert von I' das Hundertfache des Wertes von I beträgt. Wir müssen uns also merken, daß ein Stern, der hundertmal heller ist als ein anderer (auf den seine Helligkeit bezogen wird), einer um den Betrag 5 niedrigeren Helligkeitsklasse zuzuordnen ist. Diese ungewöhnliche Einteilung hat ihre Ursache in dem negativen Proportionalitätsfaktor. Sie war notwendig, weil bereits lange vorher die hellsten Sterne den zahlenmäßig kleineren Größenklassen, die weniger hellen den zahlenmäßig größeren Größenklassen zugeordnet wurden. Die Helligkeit der hellsten Sterne – der Sonne, des Mondes und einiger Planeten – kann dadurch durch eine negative Zahl angegeben werden, während die scheinbare Helligkeit der schwächsten Sterne von der 20. bis 25. Größenklasse sein kann.

Bei der Festlegung des Nullpunkts der astronomischen Helligkeitsskala (also der scheinbaren Helligkeit) mußten auch die bereits früher eingeführten Helligkeitsklassen berücksichtigt werden. Gleichzeitig mußte man auch gewährleisten, daß dieser Nullpunkt als Eichmaß jedem zugänglich ist. Dieser Forderung entsprach am besten der Polarstern (Nordstern), der von der ganzen nördlichen Halbkugel unserer Erde aus zu sehen ist. Seine Helligkeit wurde mit 2^m12 festgelegt. Die so definierte Einteilung wurde – da sie *N. R. Pogson* erarbeitet hatte – Pogsonsche Helligkeitsskala genannt.

Welche Beziehungen bestehen zwischen der scheinbaren Helligkeit der Lichtquellen und der Intensität des von ihnen ausgestrahlten Lichts? Durch Versuche kann bewiesen werden, daß die scheinbare Helligkeit punktförmiger Lichtquellen dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Untersucht man also einen Stern aus der zehnfachen Entfernung, wäre er um 5 Größenklassen weniger hell; seine scheinbare Helligkeit wäre also um 5^m größer. (Das stimmt deshalb, weil der Wert des Quadrats von 10 gerade 100 beträgt.)

Die absolute Helligkeit der Sterne

Auf der Grundlage des oben beschriebenen Gesetzes kann man eine Helligkeitseinteilung vornehmen, bei der berücksichtigt wird, welche Beziehungen zwischen den von den einzelnen Objekten ausgestrahlten Lichtleistungen bestehen. Diese sogenannte absolute astronomische Helligkeitsskala ist für die Astronomen mindestens ebenso von Nutzen wie ihre Vorgängerin, durch die die scheinbaren Helligkeitsverhältnisse der Himmelskörper beschrieben werden. Besonders dem Astrophysiker geben die absoluten Helligkeiten der Himmelskörper wertvolle Informationen.

Die tatsächliche Lichtleistung der Strahlenquellen kann man am einfachsten miteinander vergleichen, indem man sie in eine gleiche Entfernung vom Auge bringt und so ihre Helligkeit prüft. Leider ist dieses Verfahren aus verständlichen Gründen in der Astronomie nicht anwendbar, man muß sich also auf andere Weise helfen. Deshalb muß man zuerst die scheinbare Helligkeit der interessierenden Sterne ermitteln und ihre Entfernung bestimmen.

Wie gewinnt man aber nun die Entfernungen der Sterne? Man wendet das gleiche Verfahren wie in der Geodäsie an, wenn wegen eines Hindernisses nicht mit einem Meßband gemessen werden kann. In solchen Fällen werden von den Endpunkten einer Strecke bekannter Länge aus die Winkel gemessen, die die Richtungen zu dem betreffenden Punkt mit der Basisstrecke bilden; dann wird die gesuchte Entfernung mit Hilfe der bekannten trigonometrischen Formeln berechnet. So verfahren auch die Astronomen; nur sind die Maße der Erde außerordentlich klein, und dadurch erscheinen selbst an zwei einander gegenüberliegenden Punkten unseres Globus (die mehr als 10000 km voneinander entfernt sind) die hellsten – und der Erde vielleicht am nächsten liegenden – Sterne als in der gleichen Richtung liegend.

Aus diesem Grunde muß man eine größere Bezugsstrecke wählen. Geeignet dafür erschien den Astronomen die Strecke Erde–Sonne, mit deren Hilfe man mit einer sehr hohen Genauigkeit Messungen über Entfernungen von mehreren Lichtjahren ausführen kann. (Ein Lichtjahr



Bild eines hellen Sterns auf einer astronomischen Aufnahme. Das kreuzförmige und das ringförmige Gebilde treten wegen der Lichtbeugung an Teilen des Teleskops (Fernrohrs) auf; ihre Entstehung kann nicht verhindert werden.

ist die Entfernung, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von 300 000 km/s in einem Jahr zurücklegt.) Die mittlere Entfernung Erde–Sonne wird als *Astronomische Einheit* (AE) bezeichnet; sie beträgt angenähert 150 Millionen km. Dadurch ergibt sich für die größte Bezugs- oder Basisstrecke, die man mit unseren Fernrohren innerhalb eines halben Jahres verwenden kann, die Entfernung von 300 Millionen km. Die Entfernung, aus der 1 AE bei senkrechter Draufsicht gerade unter einem Winkel von einer Bogensekunde erscheint, bezeichnet man als Parsec (Parallaxensekunde, Kurzzeichen pc); $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$.

Nach dem hier beschriebenen Verfahren kann man nur die Entfernung von Sternen bestimmen, die nicht weiter als 100 pc von der Erde entfernt sind. Für weiter entfernte Sterne reicht die Meßgenauigkeit nicht aus. Man kann also sagen, daß die maximale Entfernung, die man nach dem trigonometrischen Verfahren der Geodäsie noch messen kann, etwa 300 Lichtjahre beträgt.

Doch kommen wir wieder auf unser obiges Problem zurück, auf die Ermittlung der absoluten Helligkeiten der Sterne. Da uns nunmehr eine Möglichkeit der astronomischen Entfernungsmessung bekannt ist, können wir vereinbaren, daß wir als *absolute Helligkeit* den scheinbaren Helligkeitswert betrachten, den ein Stern aus einer Entfernung von 10 pc (32,6 Lichtjahren) haben würde. Das bedeutet gleichzeitig, daß der Zahlenwert der scheinbaren Helligkeit von Sternen, die näher als 10 pc sind, kleiner (!), der von weiter entfernten größer als ihre absolute Helligkeit ist. Die vom Sonnensystem gerade 10 pc entfernten Sterne leuchten am Firmament mit einer ihrer absoluten Helligkeit gleichen scheinbaren Helligkeit.

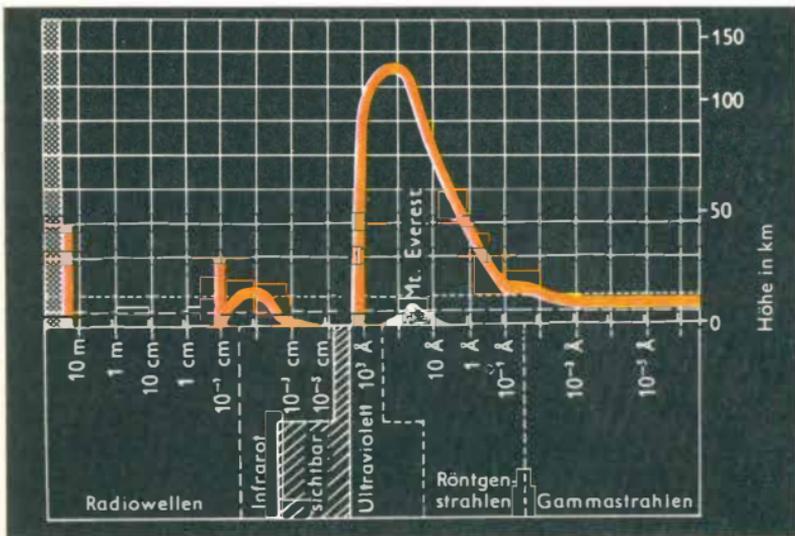
Die absoluten Helligkeiten der Sterne – aus denen man bereits auf die Größe der von einem Himmelskörper ausgestrahlten Lichtleistung schließen kann – können ebenfalls sehr verschiedene Werte haben. Die absolute Helligkeit der leuchtkräftigsten Überriesensterne kann sogar -9 Größenklassen erreichen, während es unter den Weißen Zwergen schwach leuchtende Sterne gibt, denen absolute Helligkeiten von mehr als $+15$ Größenklassen zuzuordnen sind. Man kann sich leicht ausrechnen, daß das

Verhältnis zwischen den Lichtintensitäten dieser beiden Sterntypen ungefähr 10^{10} beträgt, d. h. 10 Milliarden. Wieviel mehr sagt uns das als die Feststellung, welcher Stern uns um wieviel heller erscheint! Gerade weil die absolute Helligkeit so wichtig für die Astronomie ist, wird sie zur Unterscheidung von der scheinbaren mit dem Buchstaben M gekennzeichnet (z. B. $M = 12^m.3$ oder $M = -0^m.43$).

Sternspektren

Untersuchen wir nun den auf die Erde gelangenden Teil der Strahlung der Sterne etwas genauer! Wer hätte wohl noch niemals etwas davon gehört, daß das Licht des uns am nächsten liegenden Sterns – der Sonne –, das wir einfach als weiß bezeichnen, eine Mischung der Farben des Regenbogens in einem bestimmten Verhältnis darstellt? Mit Hilfe von Meßgeräten wurde darüber hinaus festgestellt, daß die Sonne nicht nur mit dem Auge gut wahrnehmbare Strahlen aussendet, sondern daß auch Infrarot- (Wärme-), Ultraviolett- und Radiostrahlung auf unsere Erde auftrifft. Mit Hilfe von Raketen konnte weiterhin gefunden werden,

Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für die elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlänge



welche Strahlungsarten unsere Atmosphäre nicht zu durchdringen vermögen. Dadurch wissen wir bereits, daß auch Röntgen- und Gammastrahlung von der Sonne in die Nähe unseres Planeten gelangt. Auch folgen alle diese Strahlungsarten zweifellos den gleichen Gesetzmäßigkeiten, wenn sie an die Grenzfläche zweier Medien bzw. in ein elektrisches oder in ein magnetisches Feld gelangen. Allesamt sind elektromagnetische Strahlen, und sie verhalten sich nur deshalb unterschiedlich beim Kontakt mit anderen Formen der Materie, weil die für sie charakteristische Größe, die Wellenlänge – die gleichzeitig auch ein Maß für ihre Energie darstellt – verschieden ist. Die kürzeste Wellenlänge haben die Gammastrahlen, die längste die Radiowellen.

Wenn man weiß, daß diese im wesentlichen gleichen Strahlungsarten von den Sternen ausgesandt werden, kann man die Frage stellen, in welchen Verhältnissen sie in den Strahlungen der Himmelskörper miteinander gemischt sind. Die Astronomen suchen nach einer Antwort gerade auf diese Frage. In welcher Weise? Das Verfahren – die Spektralanalyse – war bereits Ende des vorigen Jahrhunderts bekannt. Anfangs konnte man lediglich den sichtbaren Bereich der Sonnenstrahlung untersuchen, weil es noch keine Geräte gab, mit denen man auch andere Strahlungsarten hätte nachweisen können. Später ist man darauf gekommen, daß sich die Infrarotstrahlung bereits mit einem Thermometer messen läßt; man muß die das Quecksilber enthaltende Kugel nur gut mit einer Rußschicht bedecken. Im 20. Jahrhundert wurden dann immer mehr solche Detektoren entwickelt, mit denen nunmehr das gesamte elektromagnetische Spektrum abgetastet, d. h. vermessen werden konnte. Es ist allgemein bekannt, daß Röntgenstrahlen fotografische Filme schwärzen, Radiowellen mit Hilfe von Antennen empfangen sowie nach elektrischer Verstärkung und Umwandlung hörbar oder meßbar gemacht werden können.

Die Experimentalphysiker haben bewiesen, daß jeder Körper elektromagnetische Wellen aussendet, noch dazu solche, aus denen man auf das Material, aus dem dieser Körper aufgebaut ist, auf seinen Aggregatzustand und auf seine Temperatur schließen kann. Die in der Astronomie



Durch die dichteren (der Erdoberfläche am nächsten liegenden) Schichten der Atmosphäre wird die Richtung der Lichtstrahlen stärker verändert. Diese als Refraktion bezeichnete Erscheinung kann man z. B. an der Änderung der Gestalt der untergehenden Sonne gut beobachten.

Man sieht auch dann noch die Sonne, wenn sie in Wirklichkeit bereits ganz unter dem Horizont verschwunden ist – gerade wegen der Refraktion.



zu untersuchenden Himmelskörper sind recht groß und im allgemeinen auch sehr heiß. Diese letztgenannte Eigenschaft ist für uns von besonderem Vorteil, denn die Energiemenge, die ein Körper pro Zeiteinheit abstrahlt, ist um so größer, je höher seine Temperatur ist, und um so auffälliger ist ein solcher Körper.

Himmelskörper mit einer verhältnismäßig niedrigen Temperatur werden von den mit Infrarotteleskopen arbeitenden Astronomen untersucht. Sterne mit Temperaturen über 2500 K können mit dem Auge gesehen werden. Übersteigt die Oberflächentemperatur eines Sterns 10000 K, dann verläßt der überwiegende Anteil der Strahlung den Himmelskörper im ultravioletten Spektralbereich. Man kann bereits gewisse Unterschiede in der Farbe der Sterne erkennen, die auf die Sterntemperaturen zurückzuführen sind. Es gibt blaue, weiße, gelbe und sogar ausgesprochen rote Sterne. Mit Geräten zur Spektralanalyse (Spektrografen), die an große Fernrohre montiert werden können, lassen sich Nuancen unterscheiden. Durch die mit solchen Geräten erzielten Ergebnisse wurden die Astronomen veranlaßt, die Sterne auf der Grundlage ihrer spektralen Kennwerte in Klassen einzuteilen. Diese Arbeiten wurden vor allem im Harvard-Observatorium vorangetrieben; deshalb bezeichnet man diese Spektralklassen auch als *Harvard-Klassen*. Die häufigsten Spektraltypen tragen die Buchstabenbezeichnungen O, B, A, F, G, K, M.

Zwischen den Oberflächentemperaturen und den Spektralklassen der Sterne besteht eine Beziehung. Die mit O gekennzeichneten Sterne sind die heißesten, die vom Typ M die kältesten. Die oben angegebenen Spektralklassen umfassen einen Temperaturbereich von etwa 30000 bis 3000 K. Um feinere Unterschiede angeben zu können, wurde jede Klasse dezimal unterteilt, gekennzeichnet durch eine dem Buchstaben nachgestellte arabische Ziffer. Auf diese Weise ergab sich eine Vielzahl von verschiedenen Typen. Durch die ständig vervollkommneten Beobachtungsverfahren wurden immer mehr Sterne entdeckt, die man keiner dieser Klassen zuzuordnen vermochte. Man mußte deshalb in die ursprüngliche Klassifikation noch weitere Typen einarbeiten.



Spektrum der hellsten Sterne des Siebengestirns

Noch genauere Untersuchungen zeigten außerdem, daß sich innerhalb der einzelnen Klassen Sterne mit weit voneinander abweichenden physikalischen Eigenschaften befinden. Daher suchte man solche Linien oder Banden in den Spektren, die eine Unterscheidung der einzelnen Objekte gestatten. So entstand die heute gebräuchliche zweidimensionale Klassifizierung, deren einen Kennwert die Harvard-Spektralklasse, deren anderen jedoch die von *W. W. Morgan* und *Ph. C. Keenan* vorgeschlagene *Leuchtkraftklasse* darstellt, die die vom Stern austretende Lichtleistung charakterisiert. Außerdem weist sie auch auf die Größe des Sternes hin. Im allgemeinen sind bei einem leuchtkraftstarken Stern die Spektrallinien schmaler und schärfer als bei einem Stern geringerer Leuchtkraft des gleichen Spektraltyps.

Leuchtkraftklassen

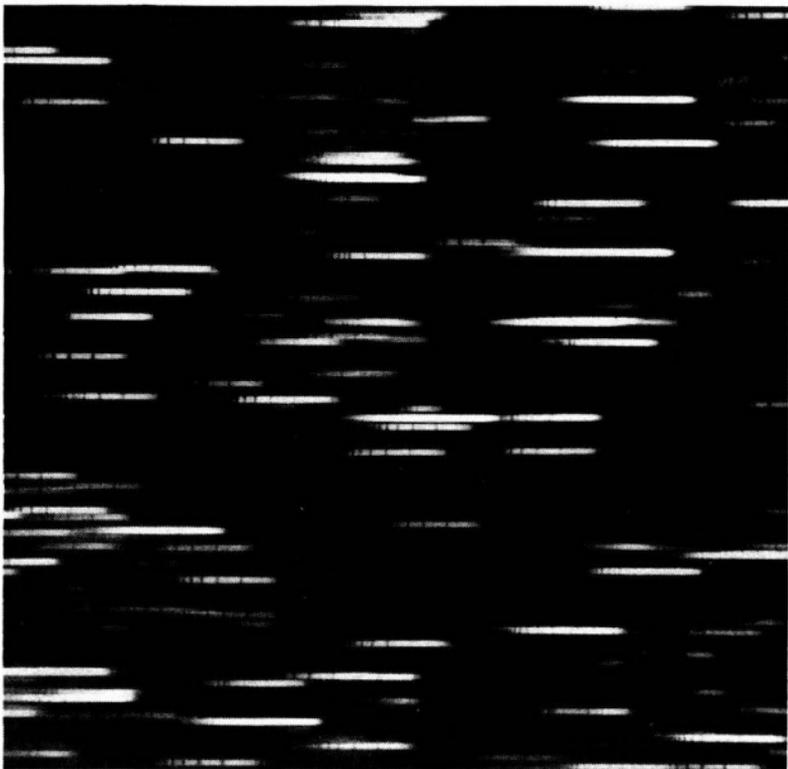
- I. Überriesen
- II. Helle Riesen
- III. Normale Riesen
- IV. Unterriesen
- V. Zwerge (Hauptreihensterne)
- VI. Unterzwerge
- VII. Weiße Zwerge

Steht nach dem Symbol eines Sterns z. B. die Angabe A 5 III, dann bedeutet dies, daß die Oberflächentemperatur dieses Sterns etwa 8 600 K beträgt, in seinem Spektrum die Wasserstofflinien sehr stark sind und das bezeichnete Objekt einen normalen Riesen darstellt.

Zum großen Leidwesen der Astronomen ist es jedoch nicht möglich, von jedem Stern ein gut aufgelöstes Spektrum aufzunehmen. Je weiter nämlich das Spektrum eines Sterns gespreizt wird, um so geringer ist die Energiemenge

Extrafokale Aufnahme von Sternen verschiedener Farbe





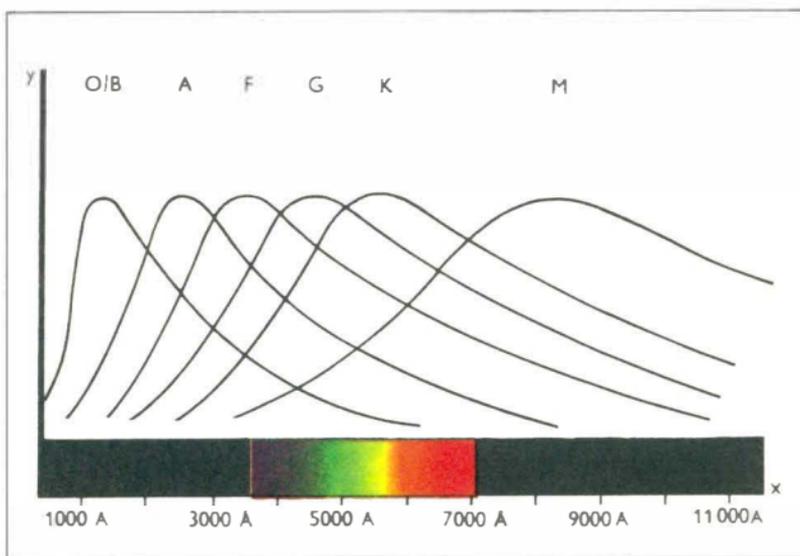
Spektralaufnahme, die von einem Milchstraßenfeld mit einem Objektivprisma gemacht wurde.

je Flächeneinheit des Spektrums. Dadurch kann es vorkommen, daß ein Objekt mit den heute üblichen Meßgeräten nicht nachgewiesen werden kann. Aus diesem Grunde wird zur statistischen Untersuchung der schwach leuchtenden Sterne ein anderes Verfahren angewendet, die sogenannte Mehrfarbenfotometrie (Helligkeitsmessung in mehreren Farbbereichen). Das Wesentliche dieses Verfahrens besteht darin, daß nur bestimmte charakteristische Bereiche des Spektrums eines Sterns untersucht werden. Es ist allgemein üblich, Helligkeitsmessungen in drei Bereichen des Spektrums vorzunehmen, und zwar im ultravioletten, im blauen und im sichtbaren Bereich. Als sichtbarer Wellenlängenbereich wird derjenige bezeichnet, in dem die Empfindlichkeit des menschlichen Auges am höchsten ist. Sein Schwerpunkt liegt bei $5\,500\text{ \AA}$. Die Ergebnisse der Messungen werden wie folgt angegeben:

$m_U = 6,12$; $m_B = 5,88$; $m_V = 5,37$. Die Indizes entsprechen den Anfangsbuchstaben der englischen Bezeichnung der gewählten Spektralbereiche (U ultraviolett, B blue, V visual). Berechnet man die absoluten Helligkeiten, so wird die folgende Symbolik gewählt: M_U , M_B , M_V .

Wir müssen aber noch einen anderen Begriff kennenlernen. Bildet man die Differenz zwischen den in den verschiedenen Spektralbereichen berechneten absoluten Helligkeiten, erhält man die sogenannten *Farbenindizes*. Bei einem Dreifarbensystem sind zwei dieser Farbenindizes unabhängig und werden häufig in der Form $U - B$ und $B - V$ (U minus B, B minus V) angewendet. Durch die Benutzung der Farbenindizes wird die Untersuchung der Entwicklung von Sternen erleichtert; sie stellen eine Hilfe bei der Bestimmung von Entfernung und Alter der Sterne dar. Außerdem kann man aus ihrer Kenntnis auch auf eine eventuelle Lichtabsorption im interstellaren Raum schließen. Darüber hinaus haben sie die vorteilhafte Eigenschaft, daß sie in Analogie zum Spektraltyp mit der Oberflächentemperatur eines Himmelskörpers in enger Be-

An der y-Achse kann man die Intensitätsverteilung der Strahlung von Sternen unterschiedlichen Spektraltyps ablesen, und zwar bei jeder Spektralklasse auf ein für diese charakteristisches Maximum bezogen.



ziehung stehen; sie ändern sich monoton mit ihr. Bei O- und B-Sternen ist die Differenz zwischen Blauhelligkeit und visueller Helligkeit z. B. negativ, bei den A-Typen ist sie null, bei den zu den Gruppen F, G, K und M gehörenden Sternen nimmt sie immer größer werdende positive Werte an.

Der Dopplereffekt

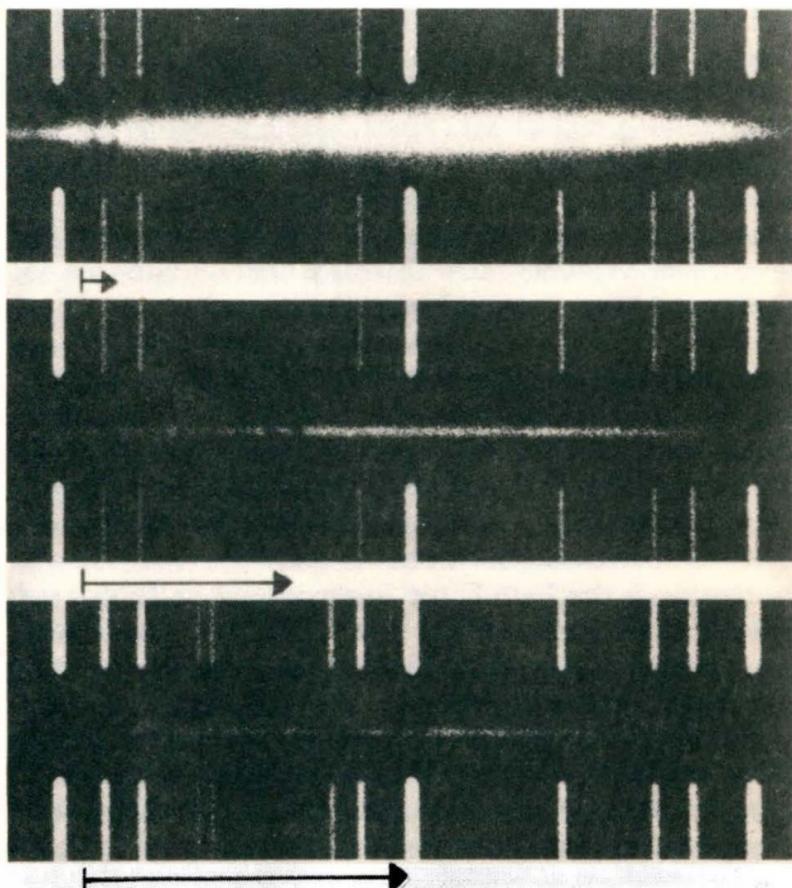
Sicherlich hat jeder einmal beobachtet, wie sich der Sirenton eines an ihm vorbeifahrenden Feuerwehr- oder Rettungsaautos ändert. Nähert sich das Fahrzeug, wird er immer schärfer und höher, entfernt es sich, wird er immer tiefer und dumpfer. Jeder weiß, daß der Schall eine Wellenerscheinung und die Wellenlänge der verschiedenen hohen Töne – damit naturgemäß auch ihre Frequenz (Schwingungszahl) – unterschiedlich ist. Warum ändert sich die Frequenz des Sirentonens?

Die Frequenzänderung ist eine Folge der Geschwindigkeitsänderung. Aber wieso ändert sich die Geschwindigkeit, wenn das Fahrzeug augenscheinlich mit der gleichen Beschleunigung fährt? Die Frage ist berechtigt. Möglicherweise ändert sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs nicht, aber für diesen Effekt, nach seinem Entdecker *Ch. Doppler* als Dopplereffekt bezeichnet, ist nur die *relative* Geschwindigkeit zwischen Schallquelle und Beobachter maßgebend. Und diese ändert sich, wenn das Fahrzeug an ihm vorbeifährt; die Relativgeschwindigkeit in unserer Richtung geht gegen Null und nimmt danach immer größer werdende positive Werte an. Durch Laboratoriumsuntersuchungen konnte bewiesen werden, daß eine solche Frequenzänderung bei allen Wellenerscheinungen auftritt. Aber warum sehen wir nicht die Scheinwerfer eines auf uns zufahrenden Autos in einer anderen Farbe als die eines von uns wegfahrenden? Weil die Geschwindigkeit des Lichts unvergleichlich größer ist als die des Schalls. Die sich aus der relativen Geschwindigkeit des Fahrzeugs ergebende Frequenzänderung ist so klein, daß man sie nicht wahrnehmen kann.

In der Astronomie hat die folgende Kennzeichnung sehr große Verbreitung gefunden: $z = d\lambda/\lambda_0$, dabei sind λ_0 die in

einem Laboratorium gemessene Wellenlänge einer bestimmten Spektrallinie, $\Delta\lambda$ die Differenz zwischen der Wellenlänge der betreffenden Spektrallinie im Spektrum eines Himmelskörpers und λ_0 und z die für diesen Himmelskörper charakteristische Dopplerverschiebung. Ist z

Rotverschiebung in den Spektren von drei Galaxien (von oben nach unten): eines Sternsystems im Virgohaufen (Radialgeschwindigkeit 1200 km/s; etwa 22 Millionen Lichtjahre entfernt); im Galaxienhaufen Corona Borealis (Radialgeschwindigkeit 21 000 km/s; etwa 400 Millionen Lichtjahre entfernt); im Booteshaufen (Radialgeschwindigkeit 39 000 km/s; 700 Millionen Lichtjahre entfernt). Die Spektren sind die hellen horizontalen Streifen von links nach rechts. Darüber und darunter sind zum Vergleich die Linien des Eisenspektrums angebracht. Die beiden dunklen vertikalen Linien im oberen Spektrum links sind die K- und H-Linien des Kalziums. Ihre Verschiebung zum Roten hin (im Spektrum nach rechts) ist durch einen Pfeil markiert.



positiv, dann spricht man von einer *Rotverschiebung*, weil in diesem Fall die Spektrallinien in Richtung des roten Bereichs des Spektrums verschoben werden. Im entgegengesetzten Fall werden die Spektrallinien nach Blau bzw. Ultraviolett verschoben. Die Beziehung zwischen der Linienverschiebung und der Relativgeschwindigkeit ist:

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

In dieser Gleichung ist c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, v die Relativgeschwindigkeit zwischen Lichtquelle und Spektroskop, also die Geschwindigkeit der Lichtquelle in der Sichtlinie des Beobachters. v ist dann positiv, wenn sich die zwischen Lichtquelle und Spektroskop gemessene Entfernung vergrößert, negativ dagegen, wenn sich diese Entfernung verringert. Dieser Formel kann man entnehmen, daß in den Fällen, in denen v kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit c , der Betrag der Linienverschiebung endlich ist. Einer der Grundpfeiler der allgemeinen Relativitätstheorie besteht gerade in der Erkenntnis, daß man die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen weder erreichen noch übertreffen kann. Die Spektrallinien können sich also nicht über die Grenzen des Spektrums hinaus verschieben.

Für kleine Relativgeschwindigkeiten vereinfacht sich diese komplizierte Formel zu ihrer Näherung:
 $z = v/c$.

Diese vereinfachte Form kann man anwenden, wenn der absolute Wert der Radialgeschwindigkeit nicht größer ist als etwa ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit. Bei den Sternen, die von der Erde aus beobachtet werden können, ist dies auch der Fall. Ferne Sternsysteme entfernen sich jedoch so schnell von der Erde, daß man ihre Radialgeschwindigkeit hinreichend genau nur mit Hilfe der ersten Formel berechnen kann.

Die Geschwindigkeit heller Sterne kann mit Hilfe des Dopplereffekts mit einer Genauigkeit von einigen hundert m/s ermitteln, bei fernen und lichtschwachen Galaxien dagegen kann der Fehler auch mehrere tausend km/s betragen.

Was wissen wir über das Milchstraßensystem?

Das Bild unserer Galaxis

Versuchen wir, unsere weitere Heimat im Weltall, das Milchstraßensystem, mit den Augen eines Beobachters zu erfassen, der aus einer Richtung auf dieses System schaut, aus der möglichst alle seine charakteristischen Eigenschaften erkennbar sind. Diese Forderung bedeutet, daß unsere Betrachtungsrichtung nicht mit der Symmetrieachse der Galaxis zusammenfallen darf. (Als Galaxis bezeichnen wir immer das Milchstraßensystem, handelt es sich dagegen um ein anderes Sternsystem oder auch um einen Bereich des Universums, dessen Dichte über dem Durchschnitt liegt und einen Durchmesser von mehreren tausend pc (kpc) hat, sprechen wir von Galaxien oder extragalaktischen Objekten!)

Wir betrachten also das Milchstraßensystem aus einer Richtung, die keinerlei Besonderheiten aufweist. Das Auffälligste, das wir erkennen, ist das Leuchten eines hellen Flecks in der Mitte des schwach leuchtenden Objekts. Diesen Bereich bezeichnen wir als das Zentralgebiet des Systems, den Bereich mit der höchsten Dichte als Kern der Galaxis. Dieser Kern ist von einem kugelsymmetrischen Halo (kugelförmige Lichterscheinung) umgeben, der keine scharfe Begrenzung aufweist. Diese Kugel enthält im wesentlichen das gesamte System. Der scheinbare Durchmesser des galaktischen Halos beträgt etwa das Zwanzigfache des Kerndurchmessers. Im Inneren der Kugel fällt uns eine leuchtende Scheibe auf. Sie stellt ein flaches, an einen Diskus erinnerndes Gebilde dar, dessen Durchmesser 60% des Halodurchmessers beträgt, wäh-



Teil der Milchstraße im Sternbild Adler mit der Schildwolke

rend ihre Dicke kaum ein Zehntel des Durchmessers der zentralen dichten Zone ausmacht.

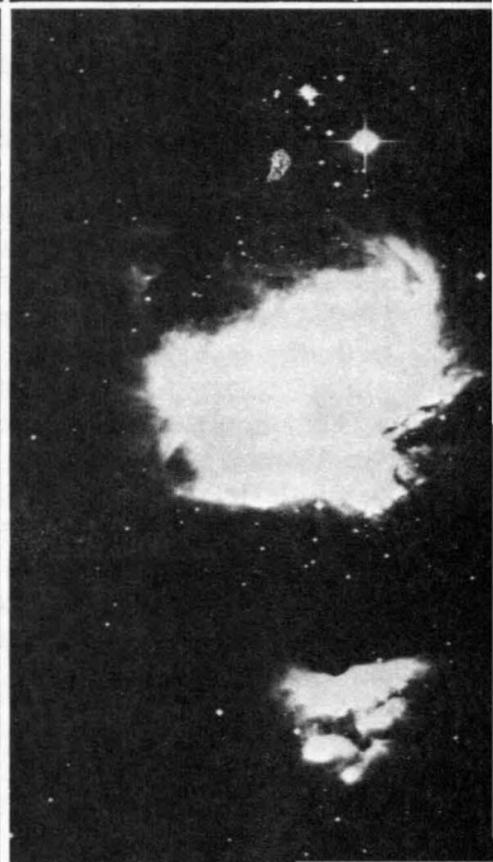
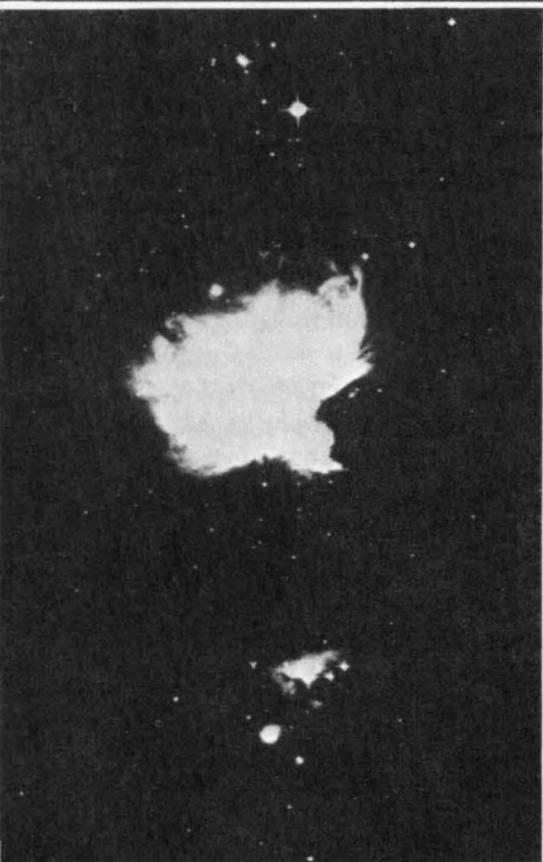
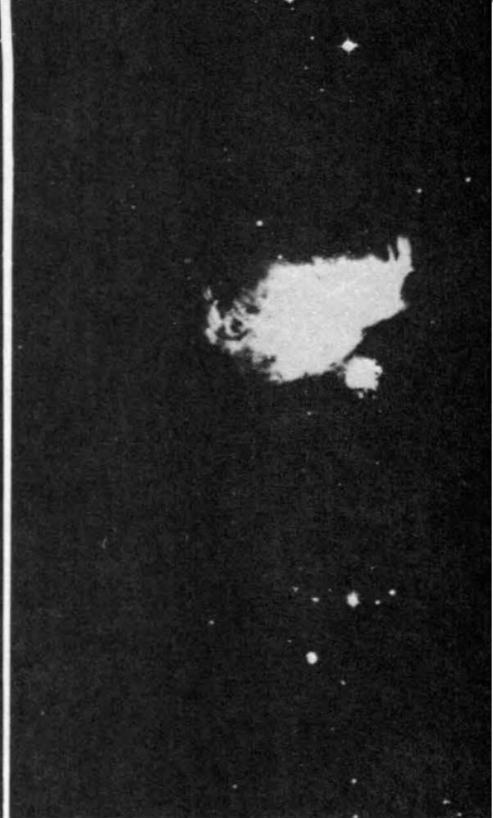
Eine eingehendere Untersuchung läßt auch erkennen, daß die Scheibe nicht überall gleich hell ist. Man erkennt in ihr hellere Streifen und Spiralen, die durch dunklere Zonen voneinander getrennt sind. Diese Gebilde scheinen vom Kern des Systems auszugehen und umgeben ihn in Form von Armen, die allgemein als *Spiralarme der Galaxis* bezeichnet werden. Entlang dieser Arme erkennt man jedoch nicht nur dunkle Flecken, sondern auch leuchtende Wolken, die eigenartige Formen aufweisen können. Im allgemeinen haben sie keine scharfen Grenzen, weshalb sie auch *diffuse Nebel* genannt werden.

Auch kaum wahrnehmbare blasse, kleine Flecken sind interessante Bausteine des Milchstraßensystems, die man sowohl im zentralen Bereich der Galaxis als auch im Halo findet. Das sind *Kugelsternhaufen* (Kugelhaufen), von denen man gleichzeitig rund hundert beobachten kann.

Wird das Milchstraßensystem über einen genügend langen Zeitraum beobachtet, ist man nicht nur in der Lage, seine Struktur kartographisch zu erfassen, sondern kann auch viel über seinen Bewegungszustand erfahren. Die Kugelsternhaufen bewegen sich z. B. auf Ellipsenbahnen, deren Ebenen beliebige Lagen besitzen können; aber in einem der beiden Brennpunkte der Ellipsen befindet sich immer das Zentrum des Milchstraßensystems. Auch die in der Scheibe sichtbaren Objekte bewegen sich, ihre Bahn ist im allgemeinen näherungsweise kreisförmig und liegt im wesentlichen in der Symmetrieebene. Ihre Umlaufperiode ist um so kürzer, je näher am Kern der Galaxis sie sich befinden.

Nachdem wir in großen Zügen das Bild unseres Sternsystems umrissen haben, wollen wir auch die Elemente, aus denen es aufgebaut ist, etwas näher betrachten. Bereits die Bezeichnung Sternsystem weist darauf hin, daß seine wichtigsten Bausteine diejenigen Himmelskörper darstellen, die Licht und elektromagnetische Strahlung anderer Wellenlängen aussenden, die es uns überhaupt ermöglichen, das System zu untersuchen. Die Gesamtmasse des Milchstraßensystems beträgt ungefähr das 220milliardefache der Masse der Sonne M_{\odot} (im folgenden: $2,2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$). Mehr als 90% dieser gewaltigen Materiemasse konzentriert sich in den Sternen, der Rest ist die sogenannte interstellare Materie. Die Anzahl der Sterne des Milchstraßensystems läßt sich nur abschätzen. Es ist bekannt, daß es in diesem System kleinere und größere Sterne gibt als die Sonne; aber in den letzten Jahren wurde es immer klarer, daß die meisten eine wesentlich geringere Masse haben und dadurch wesentlich leuchtschwächer sind als die Sonne.

Nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen dürfte die mittlere Sternenmasse nicht wesentlich über $0,1 M_{\odot}$ liegen. Daraus ergibt sich die Anzahl der Sterne in der Galaxis zu mindestens 10^{12} . Doch dürfen wir uns auch nicht darüber wundern, wenn wir in den nächsten Jahren noch größere Zahlen lesen werden, denn mit der Vervollkommnung der Hilfsmittel der Astronomie erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung noch schwächer leuchtender Objekte.



Wie verteilen sich diese Sterne in der Galaxis? Schauen wir einmal in einer klaren Nacht zum Himmel! Wir sehen, daß es sehr wenige auffallend helle Sterne gibt und daß diese auch recht unregelmäßig – einmal dichter, einmal weniger dicht – angeordnet sind. Die mit dem bloßen Auge noch gut sichtbaren, aber schon bedeutend weniger hellen Sterne sind scheinbar gleichmäßig am Firmament verteilt, während die Sterne mit einer sehr geringen Helligkeit, die man fast nur noch mit dem Fernrohr beobachten kann, zu einem schwach leuchtenden Band, zur Milchstraße, zusammenfließen. Aber wie sind sie tatsächlich im Raum verteilt, und aus welcher Richtung schauen wir auf sie, daß wir gerade diese Form sehen? Auf die erste Frage wissen wir bereits die Antwort: Die Sterne sind hauptsächlich in einer flachen Scheibe angeordnet. Aber wie ist es möglich, daß wir nicht eine solche Scheibe, sondern ein schmales Band sehen? Gerade dieses Band beweist uns, daß wir in der Scheibe des Milchstraßensystems leben. Betrachtet man die Galaxis von innen, dann hat sie die Form eines leuchtenden Gürtels am Himmel. Obwohl man bei uns nur einen Teil dieses Gürtels sieht, können wir doch bereits feststellen, daß die Milchstraße nicht genau längs eines Großkreises verläuft: Sie geht nicht durch zwei einander entgegengesetzt liegende Punkte des Firmaments. Unsere Beobachtung können wir nur unter der Annahme erklären, daß das Sonnensystem nicht in der Symmetrieebene der Scheibe liegt. Ausgehend davon, daß die Milchstraße an der südlichen Himmelskugel länger ist als an der nördlichen, gelang es den Astronomen, festzustellen, daß wir uns auf der Nordseite in einem Abstand von rund 15 pc oberhalb der Symmetrieebene der Milchstraße befinden.

Helle Gaswolke im Sternbild Orion – der Orionnebel – auf einer vier Minuten belichteten Aufnahme (links oben)

Der Orionnebel auf einer acht Minuten belichteten Aufnahme (links unten)

Der Orionnebel auf einer sechzehn Minuten belichteten Aufnahme (rechts oben)

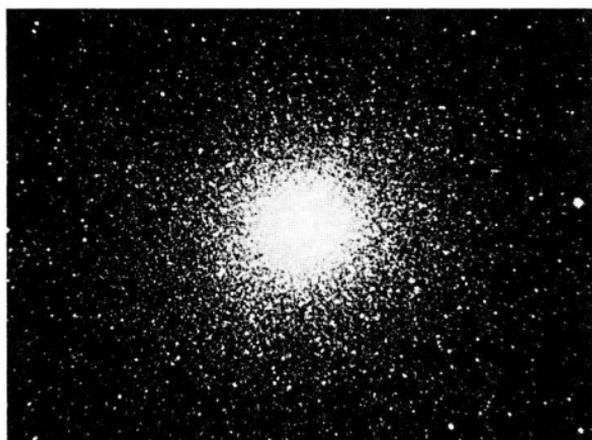
Der Orionnebel auf einer zweiunddreißig Minuten belichteten Aufnahme. Auf den aufeinanderfolgenden Bildern sind immer um 0.8 mag lichtschwächere Objekte zu erkennen. Durch solche Aufnahmeserien kann man die innere Struktur der Emissionsnebel aufklären. (rechts unten)

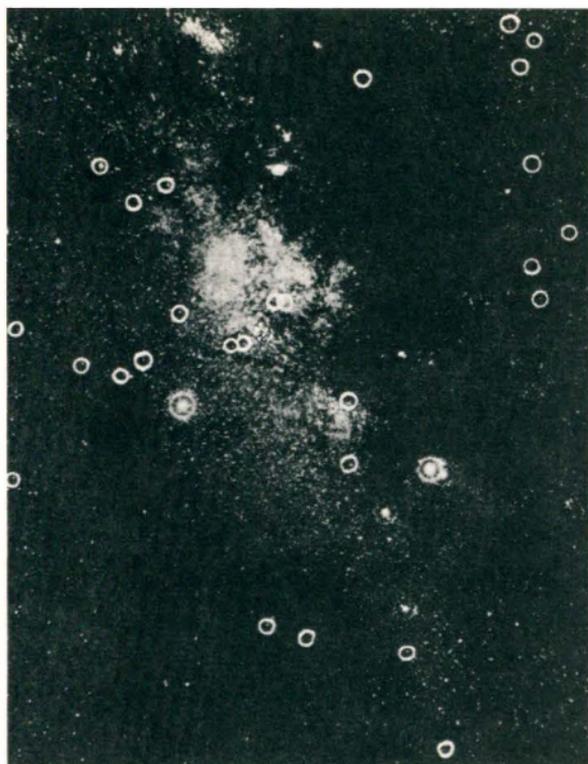
Betrachten wir nun einmal die folgende kleine Tabelle, in der die durchschnittliche Anzahl der Sterne je Quadratgrad angegeben ist. Die heller sind als bestimmte Grenzhelligkeiten. Die Angaben beziehen sich auf die Milchstraße, auf ein Gebiet in einem Abstand von 40° von der Milchstraße sowie in Richtung zum Pol der Milchstraße.

Grenzhelligkeit	In der Milchstraße	In 40° Abstand von der Milchstraße	In Richtung zum Pol der Milchstraße
5^m	0,045	0,018	0,013
9^m	2,80	1,07	0,72
13^m	146	42	21
17^m	4 780	744	288
21^m	73 600	5 000	1 670

Die mit bloßem Auge gerade noch erkennbaren Sterne haben eine scheinbare Helligkeit von 6^m . Nunmehr läßt sich auch aus den Zahlen schlußfolgern, daß es in der Verteilung der noch gut zu sehenden Sterne keine großen Unterschiede gibt. Sie sind in der Milchstraße nur zweieinhalbmal häufiger als im Abstand von 40° . Demgegenüber beträgt die Häufigkeit der mit dem Fernrohr noch gut fotografierbaren Sterne der scheinbaren Helligkeit 21^m in der Milchstraße das 15fache der Häufigkeit in der galaktischen Breite 40° und mehr als das 44fache des an den Polen der

Das Objekt M 13, ein Kugelsternhaufen im Sternbild Herkules





Kugelsternhaufen treten im Zentrum der Galaxis häufiger auf als in weiter außen liegenden Bereichen. In jedem der weißen Ringe auf der Aufnahme, die das Sternbild Schütze zeigt, befindet sich ein Kugelhaufen.

Galaxis gemessenen Werts. Dieser kleinen Tabelle kann man weiterhin entnehmen, daß sich auch in den einzelnen Spalten die Häufigkeit erhöht. Selbst in der letzten Spalte, in der der Anteil am geringsten ist, sind mehr als hunderttausendmal soviel Sterne bis zur scheinbaren Helligkeit 21^m vorhanden als solche bis zur Helligkeit 5^m . Die erste Spalte beweist eindeutig, daß die Milchstraße ihren Sternenreichtum den schwach leuchtenden Sternen verdankt. Überlegen wir nur: Auf einer lange belichteten Aufnahme, die mit einem Fernrohr mittleren Bildfeldes gemacht wurde, kann man bereits eine halbe Million Sterne identifizieren. Während mit bloßem Auge am Nachthimmel, beide Hemisphären zusammengerechnet, nur ungefähr 6000 Sterne erkennbar sind, lassen sich mit großen Instrumenten insgesamt etwa 2 Milliarden Sterne beobachten.

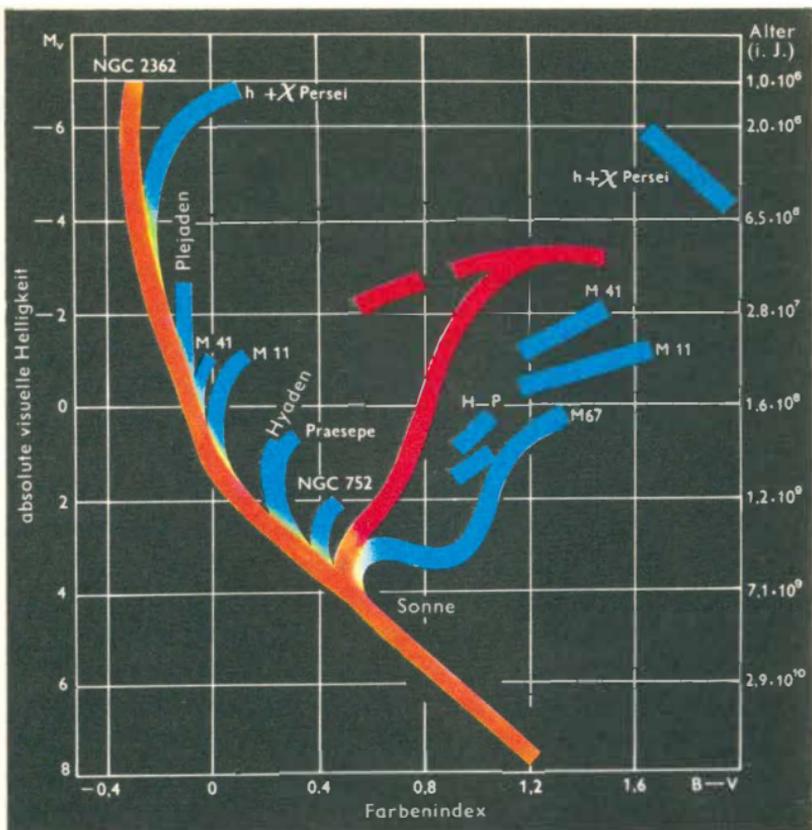
Zwischen Zentrum und Spiralarm

Nicht nur die Häufigkeit hinsichtlich der scheinbaren, sondern auch die der absoluten Helligkeit ist interessant. Diese Verteilung zu ermitteln ist jedoch wesentlich schwieriger, und es gelang auch erst in den letzten Jahren mit befriedigender Genauigkeit. Heute ist man der allgemeinen Auffassung, daß die meisten Sterne eine absolute Helligkeit um $+15^m$ haben und daß die Zahl der Sterne, die der Sonne ähnlich sind, verhältnismäßig gering ist. Noch seltener als die sonnenähnlichen Sterne sind die Sterne mit einer negativen absoluten Helligkeit. Andererseits kann es nach den Berechnungen Sterne der absoluten Helligkeit jenseits von $+28^m$ bis $+30^m$ gar nicht geben.

Wir wissen bereits, daß es nicht genügt, zur Charakterisierung der Sterne ihre absoluten Helligkeiten anzugeben, weil man daraus noch nicht einmal auf ihre Oberflächentemperatur schließen kann. Es muß vielmehr ein wichtiger Kennwert bekannt sein: ihr Spektrum. Untersuchen wir nun die Frage, welchem Spektraltyp die häufigsten Sterne zuzuordnen sind. Hierzu gibt die folgende kleine Tabelle Auskunft, in der – bezogen auf den Spektraltyp A – die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der übrigen Klassen angegeben ist.

Spektraltyp	O/B	A	F	G	K	M
Häufigkeit	0,1	1	6	9	45	580

Man erkennt deutlich, daß kaum 1% aller Sterne den sogenannten frühen Spektralklassen (O, B, A und F0) zuzuordnen ist; am häufigsten sind die Sterne der Spektralklassen K und M. Die absoluten Helligkeiten der diesen beiden Spektralklassen zugehörenden Sterne liegen im Bereich von $+13^m$ bis $+15^m$. Der dänische Wissenschaftler *E. Hertzsprung* und der amerikanische Wissenschaftler *H. N. Russell* haben bereits zu Beginn unseres Jahrhunderts erkannt, daß zwischen der absoluten Helligkeit der Sterne und ihrer Spektralklasse eine enge Beziehung besteht. Nach diesen beiden Astrophysikern wurde auch das Diagramm benannt, dem man entnehmen kann, welche



Farben-Helligkeits-Diagramme von Sternhaufen. Sehr charakteristisch für die einzelnen Haufen ist der Punkt, in dem ihre Sterne von der Hauptreihe abzweigen. Wenn man auf der Skale rechts auf dem Bild die Lage dieses Punktes abliest, erhält man das Alter des Haufens. Die rote Linie stellt die für Kugelsternhaufen charakteristische Farben-Helligkeits-Beziehung dar.

absoluten Helligkeiten die den einzelnen Spektraltypen (bzw. dem gegebenen Farbenindex oder der Oberflächentemperatur, beide sind der Spektralklasse äquivalent) zugehörigen Sterne haben. Seitdem hat es sich zwar herausgestellt, daß diese Beziehung nicht immer eindeutig ist – es gibt nämlich Bereiche des Diagramms, in denen zum gleichen Farbenindex (Spektraltyp oder Oberflächentemperatur) mehrere absolute Helligkeitswerte gehören. Trotzdem stellt dieses Diagramm eines der nützlichsten Hilfsmittel für die Astronomen dar, beispielsweise für die Untersuchung der Sternentwicklung, der Ver-

änderlichen Sterne und für die Ermittlung des Alters von Sternhaufen.

Bei der Beschreibung der Spektraltypen wurde bereits der Begriff Leuchtkraftklassen verwendet. Zum Anteil der einzelnen Leuchtkraftklassen an der Gesamtzahl der Sterne kann man folgendes sagen: Die Häufigkeit der hellen Riesen, der normalen Riesen und der Unterriesen erreicht zusammen kaum 1 % der Anzahl der Zwerge, die die Leuchtkraftklasse V ausmachen. Es gibt ungefähr zehnmal soviel Weiße Zwerge wie Riesen insgesamt. Von den Riesensternen sind die G- und K-Typen, von den Weißen Zwergen sind die Sterne vom Spektraltyp A am häufigsten.

Bereits mit dem unbewaffneten Auge kann man feststellen, daß der mittlere Deichselstern des Großen Wagens (Großer Bär), Mizar, mit seinem Begleiter Alkor ein *Doppelsystem* (Doppelstern) bildet. Diese Tatsache ist seit langem bekannt. Seit geraumer Zeit beschäftigt jedoch die Astronomen die Frage, wieviel uns allein erscheinende Sterne wohl einen lichtschwachen, mit dem bloßen Auge nicht erkennbaren Begleiter haben. Seit den fünfziger Jahren wird die Ansicht vertreten, daß jeder zweite leuchtende Punkt am Himmel aus mindestens zwei Sternen besteht. Die meisten dieser Doppelsterne sind vor allem deshalb nicht zu trennen, weil die Winkelabstände zwischen den Komponenten kleiner sind als das Auflösungsvermögen unseres Auges bzw. unserer Ferngläser. Heute können wir in vielen Fällen mit Hilfe des Spektroskops entscheiden, ob eine punktförmige Lichtquelle aus mehreren Sternen besteht oder nicht. Da sich diese mehrgliedrigen Systeme um ihren gemeinsamen Massemittelpunkt bewegen, erleiden die Absorptions- (evtl. auch Emissions-) Linien der Strahlung ihrer einzelnen Komponenten eine unterschiedliche Dopplerverschiebung, so daß man die einzelnen Komponenten auf diese Weise unterscheiden kann. In einem besonders günstigen Fall können sich die beiden Sterne eines Doppelsterns in ihren Spektraltypen so stark unterscheiden, daß man nicht einmal die Linienverschiebung zu berücksichtigen braucht. In einem solchen Falle treten nämlich in einem einzigen Spektrum Linien auf, die in der Atmosphäre ein und desselben

Sterns nicht hätten stehen können. Mit Hilfe der Spektroskopie lassen sich aber nur Doppelsternsysteme erkennen, deren Komponenten einander vergleichbare absolute Helligkeiten aufweisen.

Unter Einsatz der modernen spektroskopischen Verfahren ist es gelungen, neuere Angaben über die Häufigkeit von Doppel- und Mehrfachsternen zu ermitteln. Wahrscheinlich bestehen 70% der am Himmel beobachtbaren punktförmigen Strahlungsquellen aus mehreren Komponenten. Jede dritte dieser Strahlungsquellen hat zumindest drei Mitglieder. Auch sind zwei Sechsfachsysteme bekannt. Eines davon ist der hellste Stern im Sternbild Zwillinge, Alpha Geminorum oder Castor. Die Mitglieder der aus diesen vielen Komponenten aufgebauten Systeme bewegen sich in verschiedenen großen elliptischen Bahnen um einen gemeinsamen Masseschwerpunkt. Die Umlaufperiode von Doppelsternen kann einige Tage, aber auch mehrere tausend Jahre betragen.

Dreifachsysteme bestehen im allgemeinen aus einem Doppelsternsystem, dessen beide Komponenten eng beieinander liegen, sowie aus einem diesen Doppelstern umkreisenden dritten Objekt. Der Bahndurchmesser dieses weiter entfernten Sterns übersteigt oft den Abstand der Doppelsternkomponenten mehrere hundert Mal.

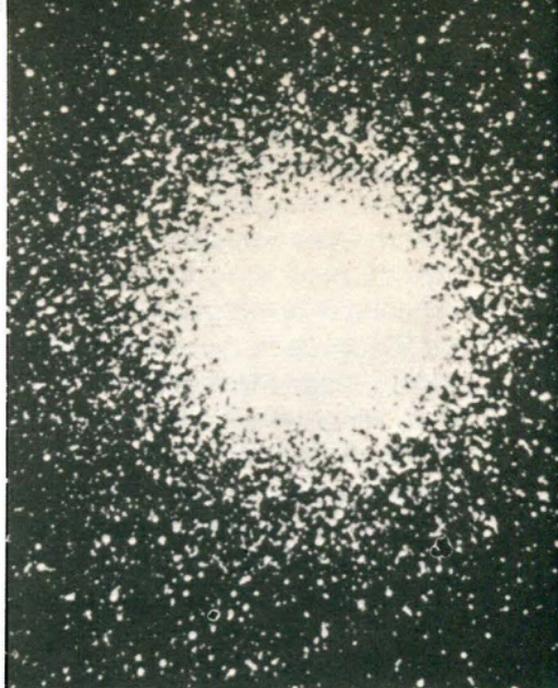
Vielfachsterne können unterschiedlich aufgebaut sein. So können sie aus zwei weit voneinander entfernten Doppelsternen bestehen. Es ist aber auch möglich, daß es sich um einen engen Doppelstern handelt, den die beiden anderen auf Bahnen mit einem größeren und einem kleineren Radius umlaufen.

Untersuchen wir nun, in welchen Bereichen der Galaxis Sterne zu finden sind! Obwohl in den einzelnen Gebieten die Häufigkeit unterschiedlich ist, gibt es überall Sterne, selbst wenn man berücksichtigt, daß wir vom Kern des Milchstraßensystems heute noch wenig wissen. Die Stern-dichte im galaktischen Halo ist am geringsten, in ihm sind die Sterne aber am gleichmäßigsten verteilt. Nur hin und wieder findet man in ihm kugelsymmetrische Sternanhäufungen, die sogenannten *Kugelsternhaufen*. Diese Objekte, deren Durchmesser etwa hundert Parsec betragen, enthalten manchmal bis zu einer Million Sterne, die kleinsten

Riesiger Kugelsternhaufen M 3 im Sternbild Jagdhunde (links)

Der kleinere Kugelsternhaufen M 92 (Mitte)

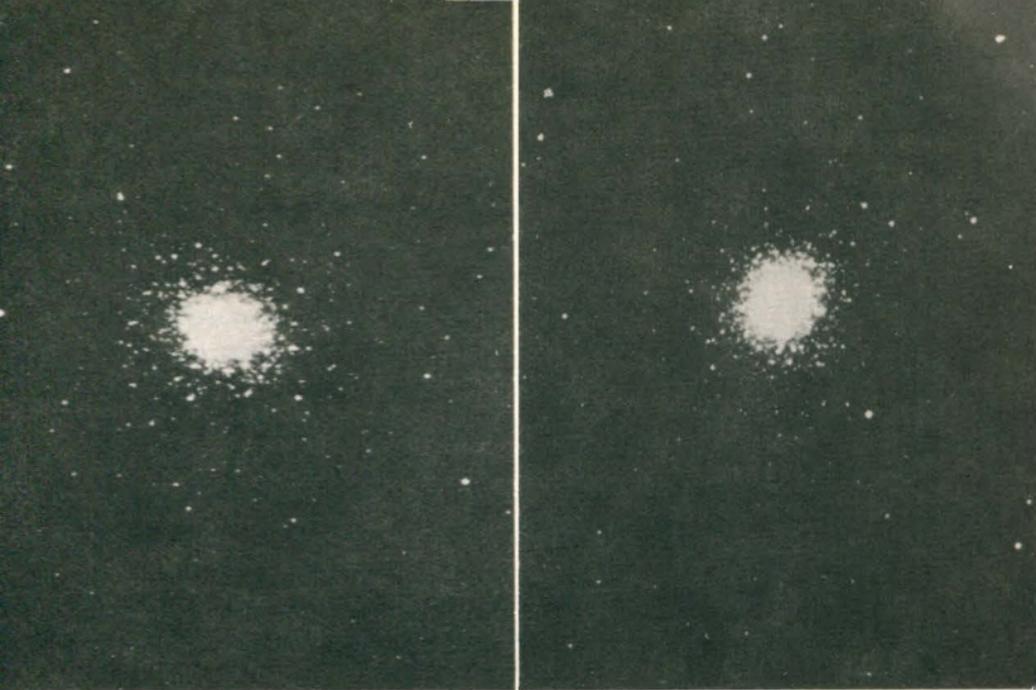
Einer der am stärksten abgeflachten Kugelsternhaufen, das Objekt M 2. Er hat eine deutlich erkennbare elliptische Form (rechts).



Kugelhaufen mehrere zehntausend. Einige von ihnen kann man auch mit bloßem Auge erkennen. Leider sind die hellsten von ihnen von Europa aus niemals zu beobachten. Sie befinden sich im Sternbild Centaur am Südhimmel.

Untersucht man die astronomischen Aufnahmen, stellt man bald fest, daß es ein aussichtsloses Unterfangen wäre, die lichtschwachen Objekte in den Zentren der Kugelsternhaufen einzeln untersuchen zu wollen, weil sie so dicht beieinander stehen, daß sie selbst auf den Aufnahmen, die mit Fernrohren der größten Brennweiten gemacht wurden, ineinanderfließen. Aus diesem Grunde beschränkt sich die Erforschung von Kugelsternhaufen im wesentlichen auf die Beobachtung und Analyse ihrer äußeren Bereiche.

Gegenwärtig sind 120 Kugelsternhaufen bekannt. Berücksichtigt man die Einflüsse, die ihr Erkennen beeinträchtigen, dann kommt man zu dem Schluß, daß es in unserem Sternsystem ungefähr 200 bis 220 Kugelsternhaufen gibt, die sich in Richtung zum Zentrum der Galaxis stark konzentrieren. Etwa 30% der Kugelsternhaufen liegen um den Kern innerhalb einer Kugel, die einen Radius von nur 5 kpc hat; die restlichen 70% zeigen eine zufällige Verteilung im galaktischen Halo. Da die Bestimmung der



Entfernung von Einzelsternen um so ungenauer ist, je weiter sie entfernt sind, gelang es, die »Grenzen« des Halos des Milchstraßensystems gerade durch die Beobachtung der Kugelsternhaufen quantitativ zu erfassen. Diese Objekte haben nämlich absolute Helligkeiten zwischen -8^m und -12^m und sind dadurch auch aus großen Entfernungen gut zu beobachten.

Die hier betrachteten Haufen bewegen sich nach den Keplerschen Gesetzen in Bahnen um das Zentrum des Milchstraßensystems, wobei einige von ihnen Umlaufzeiten von mehr als 300 Millionen Jahren aufweisen. Die Kugelsternhaufen haben in der extragalaktischen Astronomie eine große Bedeutung erlangt, weil es nicht zuletzt mit Hilfe der in ihnen entdeckten veränderlichen Sterne gelungen ist, die Entfernung ferner Sternsysteme mit befriedigender Genauigkeit zu bestimmen.

Wohl noch wichtigere Sternkonzentrationen stellen die *Spiralarms* des Milchstraßensystems dar. Dabei handelt es sich um Gebilde, die in der Symmetrieebene der Galaxis in einer Scheibe mit einer Dicke von nicht mehr als 500 pc angeordnet sind. Die Dichte ist in ihnen besonders hoch, da die Häufigkeit der Sterne mehr als das Hundertfache

derjenigen in den Zwischenarmbereichen beträgt. Die Dicke der Spiralarme beträgt kaum 200 pc, ihre Breite – grob gerechnet – 1 kpc. Die Länge der Spiralarme ist uns nicht bekannt, da wir nur einen kurzen Abschnitt der Arme beobachten können. Unter den Astronomen, die die Struktur des Milchstraßensystems untersuchen, hat sich heute die allgemeine Ansicht verbreitet, nach der die Galaxis paarzahlige – vermutlich zwei – Spiralarme hat. Es ist wahrscheinlich, daß sich diese Arme mehrmals um das Zentrum des Systems winden. Für diese Annahme spricht, daß es gelang, mit Hilfe der uns zur Verfügung stehenden optischen Hilfsmittel von vier Armbögen Informationen zu beschaffen. Jedoch ist es auch möglich, daß die beobachteten Armsegmente Verzweigungen eines großen Arms darstellen.

Die beobachteten Spiralarme können durch theoretische Überlegungen begründet werden. So stellt die Stoßwellentheorie von *C. C. Lin* und *F. H. Shu* folgende These auf: In einem flachen, scheibenförmigen Gebiet beiderseits der Symmetrieebene des Milchstraßensystems bewegt sich die Materie entsprechend dem Gravitationsgesetz auf schwach abgeflachten elliptischen Bahnen um den Kern der Galaxis. In dieser Materiewolke hat sich eine – auf Grund einer noch nicht geklärten Wirkung – selbsterhaltende Stoßwelle ausgebildet. Diese Stoßwelle, die bezüglich ihrer Gravitationswirkung einen Potentialgraben darstellt, verhält sich wie ein starrer Körper; sie bewegt sich also ohne eine Deformation kreisförmig auf der galaktischen Scheibe. Ihre Umlaufzeit stimmt gut mit den Umlaufperioden von 200 bis 250 Millionen Jahren überein, die nach anderen Methoden ermittelt wurden. Es gibt eine Zone im Milchstraßensystem, in der die Periode des freien Umlaufs der Materie gerade mit der der Stoßwelle übereinstimmt. In dieser Zone bewegt sich die einmal in den Potentialgraben gelangte Materie immer gemeinsam mit der Stoßwelle. In anderen Bereichen wiederum »fallen« die Sterne sowie interstellares Gas oder Staub – je nachdem, welche Geschwindigkeit größer ist – von vorn oder von hinten in diesen spiralförmigen Gräben, verdichten sich an seinem gegenüberliegenden Rand, um dann wieder aus ihm herausgeschleudert zu werden.

Die Theorie von *C. C. Lin* und *F. H. Shu* kann auch für die Astrophysik, die die Entwicklung der Sterne erforscht, Bedeutung erlangen, weil vielleicht der Potentialgraben den äußeren Stoß darstellt, durch dessen Wirkung die Kontraktion der gewaltigen Wasserstoffwolken eingeleitet wird. Um diese Annahme zu beweisen, werden immer wieder neue Beobachtungsprogramme aufgestellt.

Noch vor 20 Jahren hatten wir eine völlig andere Meinung über die Spiralarme des Milchstraßensystems. Es gab verschiedene Auffassungen über ihre Anzahl; aber man war allgemein der Ansicht, daß die Arme durch ein sich in ihnen entlangziehendes Magnetfeld zusammengehalten werden. Die Existenz eines solchen Magnetfeldes konnte nach mehreren Verfahren nachgewiesen werden, selbst bezüglich der Feldstärke erhielt man übereinstimmende Ergebnisse. Der wahrscheinlichste Wert der Feldstärke in den Spiralarmen ergab sich – bei Zulassung kleiner lokaler Schwankungen – zu $5 \cdot 10^{-10}$ Tesla. Heute ist es bereits klar, daß diese Feldstärke nur eine recht geringe Bedeutung für die Ausbildung der Spiralstruktur gehabt haben kann. Berechnet man die magnetische und die mechanische Energie je Volumeneinheit, dann ergibt sich für die mechanische Energiedichte fast das Tausendfache des entsprechenden Wertes für die magnetische Energiedichte. Bei diesen Energieverhältnissen kann man nicht erwarten, daß das Magnetfeld etwas gegen den »Willen« des Gravitationsfeldes und des Bewegungszustands der Materie bewirken kann.

Nach unseren gegenwärtigen Auffassungen waren magnetische Kräfte vielleicht an der Herausbildung von weniger wesentlichen Kenndaten der Struktur beteiligt. Man kann sich vorstellen, daß die Entstehung des galaktischen Magnetfeldes eng mit dem Mechanismus in Zusammenhang steht, durch den die Gravitationsstoßwelle angeregt wurde. Heute ist die Struktur dieses Feldes bereits recht gut bekannt. Wir wissen, daß die Richtung der Feldstärke in den Spiralarmen dem Verlauf der Arme folgt und daß die Feldstärke auf den beiden Symmetrieebenen eines Arms gerade einander entgegen gerichtet ist, in der Mittellinie der Arme jedoch den Wert Null hat. Es gelang aber noch nicht zu erklären, ob sich die Feldstärkelinien

innerhalb des Milchstraßensystems oder im intergalaktischen Raum schließen.

Interessant ist auch die Frage, ob auch außerhalb der Spiralarme ein Magnetfeld existiert. Wenn ja, dann ist es gewiß außerordentlich schwach, weil man selbst mit den empfindlichsten Meßverfahren bisher davon nichts fand.

Sternhaufen in den Spiralarmen

Kommen wir nun, nachdem wir etwas über das Magnetfeld der Galaxis erfahren haben, wieder zurück zu den Sternen; untersuchen wir, ob sie vielleicht innerhalb der Spiralarme gleichmäßig verteilt sind. Die Antwort kann man auf der Grundlage der bisherigen Darlegungen bereits erahnen: Nein! In diesen Armen kann man charakteristische Sternknoten beobachten, Sterngruppen, die aus einigen hundert, höchstens jedoch einigen tausend Sternen aufgebaut sind. Diese haben keinerlei Symmetrieeigenschaften, sind nur schwer zu umgrenzen und können wegen ihrer im allgemeinen nicht allzu großen Gesamthelligkeit von fern auch nicht wahrgenommen werden. Gegenwärtig sind ungefähr tausend solche – *offene Sternhaufen* genannten – Objekte bekannt. Unter Berücksichtigung der Schwierigkeiten bei ihrer Erkennung nehmen wir jedoch an, daß es in der Galaxis 15 000 bis 20 000 solche Sternhaufen geben könnte. Sie konzentrieren sich sehr stark in Richtung zur Symmetrieebene des Systems und innerhalb dieser in den Spiralarmen. Ihre bekanntesten Vertreter sind die Plejaden (Siebengestirn), die im Sternbild Taurus (Stier) zu erkennen sind. Ein sehr schöner offener Haufen dieses Sternbilds sind auch die Hyaden (Regengestirn). In einer dunklen, klaren Nacht erkennt man leicht den Doppelhaufen im Sternbild Perseus, $h + \chi$ Persei. Alle diese Objekte sind nicht sehr weit von uns entfernt; sie gehören zu dem gleichen Spiralarm wie wir oder – im Fall $h + \chi$ Persei – zum nächsten weiter außen liegenden Arm.

Die offenen Haufen verdienen in zweierlei Hinsicht besondere Beachtung. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die in ihnen erkennbaren Sterne nahezu gleichzeitig und an der gleichen Stelle entstanden sind. Ihre gegenwärtigen Unter-



Durch ein Rotfilter gewonnene Aufnahme der Plejaden, des Siebengestirns, 425 Lichtjahre entfernt (NGC 1434, M 45)

schiede kann man damit erklären, daß sie entsprechend ihrer jeweiligen Masse verschiedene Entwicklungswege durchlaufen haben. Daher hatten sie auch unterschiedliche Leuchtkräfte, wodurch bei den Sternen mit der größten Masse die nuklearen Brennstoffvorräte viel früher aufgebraucht waren als bei den leichteren. Deshalb gelangten sie rascher in eine »Energiekrise«, die sich in gewissen Entwicklungsphasen durch die ungleichmäßige Lichtemission äußert. In mehreren Dutzend offenen Haufen wurden Sterne mit veränderlicher Helligkeit inzwischen bereits entdeckt.

Es wurden bisher recht viele offene Haufen untersucht. Auf der Grundlage der Ergebnisse kann man behaupten, daß sie verschiedenes Alter haben und auf einem unterschiedlichen Entwicklungsstand stehen. Trotz des ungleichmäßigen »Alterns« der in ihnen enthaltenen Sterne kann man in den offenen Haufen (sie werden auch als

galaktische Haufen bezeichnet, da sie in der Milchstraße auftreten) neben charakteristischen Unterschieden gewisse Gemeinsamkeiten entdecken. Die Altersunterschiede zwischen den einzelnen Haufen kann man aus den Farben-Helligkeits-Diagrammen bestimmen, die dem Hertzsprung-Russell-Diagramm entsprechen. Trägt man die Punkte, die die Sterne der Haufen symbolisieren, in ein Farben-Helligkeits-Diagramm ein, bemerkt man, daß die Hauptreihe zu großen Leuchtkräften hin bei unterschiedlichen Farbenindizes abbricht. Bei jüngeren Haufen liegt der Abknickpunkt bei größeren Leuchtkräften und kleineren Farbenindizes als bei älteren Objekten. Trägt man in ein und dasselbe Diagramm Sterne von verschiedenen alten galaktischen Haufen auf, kann man den Gang der Entwicklung gut verfolgen. Die offenen Haufen sind also von großer Bedeutung für die Untersuchung früher Abschnitte der Sternentwicklung. Sie spielen aber auch eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der Struktur des Milchstraßensystems und der physikalischen Eigenschaften der interstellaren Materie.

Wie wir bereits dargelegt haben, kann man das Alter der offenen Haufen befriedigend genau bestimmen; somit kann man aus ihrer beobachteten Geschwindigkeit darauf schließen, welchen Weg sie seit ihrer Entstehung zurückgelegt haben. Aus ihrer heutigen Verteilung kann man feststellen, wie sie zum Zeitpunkt ihrer Entstehung angeordnet waren, und man erhält ein Bild davon, in welchem Bereich der Galaxis die Sterne entstehen. Wir sind sicherlich nicht weit von der Wahrheit entfernt, wenn wir die Behauptung der Stoßwellentheorie akzeptieren, wonach die Sterne entlang den dichtesten Konturen der Spiralarme gebildet werden. Glücklicherweise gibt es unter den Mitgliedern der offenen Haufen immer solche mit gleichen absoluten Helligkeiten; daher kann man durch einen Vergleich der scheinbaren Helligkeiten der Mitglieder verschiedener Haufen ihre Entfernungsverhältnisse bestimmen. Da man bei den der Erde am nächsten liegenden galaktischen Haufen nach anderen Methoden die Entfer-

Aufnahme des Siebengestirns mit einem Spezialfilm, 20 Minuten belichtet. Hell leuchtet der interstellare Staub im Licht der Sterne.



nung ermitteln kann, sind uns im Endergebnis die Positionen der offenen Haufen der Milchstraße recht genau bekannt.

Diese Haufen eröffnen uns auch die Möglichkeit zur kartographischen Erfassung der Verteilung der interstellaren Materie. Durch die da und dort im interstellaren Raum auftretenden Gas- und Staubwolken wird die Intensitätsverteilung der Wellenlängen der zu uns gelangenden Strahlung der Sterne sehr stark verzerrt, weshalb man die Sterne in einer anderen Farbe sieht, als sie sie wirklich haben. Diese als *interstellare Absorption* bezeichnete Erscheinung bereitet den Astronomen viele Sorgen, denn man kann sie nur dann genau genug ermitteln, wenn Sterne bekannten Spektraltyps hinter dem lichtschwächenden Nebel liegen. Von solchen Sternen weiß man, wie die Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Farbe (oder Wellenlänge) verteilt ist. Dadurch kann man klären, wie stark die Absorption in den einzelnen Spektralbereichen ist. Heute weiß man, daß von der kurzwelligeren Strahlung bedeutend weniger auf die Erde gelangt als von der langwelligen. Weil uns daher die Sterne röter erscheinen, ist es auch üblich, dieses Phänomen als *interstellare Verrötung* zu bezeichnen.

Die Mitglieder der jungen offenen Sternhaufen entsprechen den Wünschen der Astronomen. Eigentlich ist es hauptsächlich durch ihre Untersuchung gelungen, das Streuverhalten der interstellaren Materie zu klären. In den offenen Haufen befinden sich große Mengen an Gas und Staub; dadurch gelangt die Strahlung der auf der uns zugewandten Seite der Haufen liegenden Sterne durch eine dünnere Wolkenschicht zu uns als die Strahlung, die von den auf der gegenüberliegenden Seite sich befindenden Mitgliedern ausgeht. Nach der Lage im Milchstraßensystem und den Masseverhältnissen ist das die dritte Eigenschaft, durch die sich Kugelsternhaufen und offene Haufen voneinander unterscheiden. In den Kugelhaufen ist es nämlich nicht gelungen, interstellare Materie nachzuweisen.

Wenn man das Milchstraßensystem untersucht, darf man noch eine andere Art von charakteristischen Sterngruppierungen nicht unerwähnt lassen – die *Assoziationen*.



Der sehr viel interstellares Gas und interstellaren Staub enthaltende offene Haufen M16. Man erkennt auch deutlich die Ionisationsfronten.

Man unterteilt sie nach dem Spektraltyp ihrer Mitglieder in den OB-Typ bzw. nach den in ihnen beobachtbaren veränderlichen T-Tauri-Sternen in T-Assoziationen. Alle diese Objekte gehören zu den jüngsten Sternengesellschaften der Galaxis. Die bekanntesten Assoziationen befinden sich im Sternbild Stier (Taurus) und im Sternbild Orion.

Es war bereits erwähnt worden, daß die Sterne vom frühen Spektraltyp wegen ihrer großen absoluten Helligkeit überdurchschnittlich gut zu sehen sind. Daher kann man den OB-Assoziationen ähnliche Sternkonzentrationen – die sogenannten blauen Knoten – auch in anderen



Dunkle interstellare Wolke im Sternbild Schlange (Serpens)

Galaxien erkennen. Die absolute fotografische Helligkeit solcher Knoten kann um -9^m bis -10^m liegen. Gelingt es nachzuweisen, daß diese Sterngruppierungen in den benachbarten Galaxien die gleichen Eigenschaften haben, dann gewinnt man ein gutes Hilfsmittel für die Bestimmung der Entfernung von extragalaktischen Objekten.

Untersuchen wir nun die Lage der Sterne im Zentrum des Milchstraßensystems. Fotografiert man mit einer langen Belichtungsdauer den Teil des Firmaments, in dem der Mittelpunkt unseres Sternsystems liegt – das Sternbild Schütze (Sagittarius) –, dann findet man auf der entwickelten Platte eine außerordentlich große, leuchtende Stern-

wolke, auf der man gerade in der Milchstraßenebene eine Vielfalt von unregelmäßigen schwarzen Flecken feststellt, die durch die Absorptionswirkung der interstellaren Materie entstehen. Den im sichtbaren Bereich durchgeführten Messungen kann man soviel entnehmen, daß die Stern-dichte in der das Zentrum des Milchstraßensystems umgebenden Kugel mit dem Durchmesser von 5 kpc wesentlich größer ist als in den Spiralarmen. Was sich aber im Innersten – in unmittelbarer Zentrumsnähe – verbirgt, kann man nur mit Hilfe der Untersuchung von Radiowellen, die auch durch die Staubwolken »hindurchleuchten«, und der Infrarotstrahlung klären. Soviel ist bereits gewiß, daß das Spektrum der von dort auf die Erde gelangenden elektromagnetischen Strahlung von dem der normalen Sterne abweicht, wobei vor allem im infraroten Bereich ein Überschuß auftritt. Die aus dem Kern mit seinem Durchmesser von weniger als 10 pc austretende Energie ist der Energieproduktion von mindestens 10 Millionen Sonnen gleichwertig. Wenn man die Entstehung der Entwicklung des Milchstraßensystems untersucht, muß man berücksichtigen, daß dieses »kleine« Objekt in der Lage ist, eine derartige Leistung abzugeben – und das über einen noch langen Zeitraum.

Interstellare Materie in unserer Galaxis

Nur etwa 90% der Gesamtmasse der Milchstraße haben sich in Sterne umgewandelt, während die restlichen 10% in Form von Gas- oder Staubwolken im Gravitationsfeld unserer Galaxis »umherschwimmen«. Diese interstellare Materie mit einer Masse von insgesamt etwa $2 \cdot 10^{43}$ g befindet sich in der Symmetrieebene der galaktischen Scheibe in einer 200 pc dicken Schicht. Ihre mittlere Dichte beträgt $1,3 \cdot 10^{-9}$ g/km³ – oder anders ausgedrückt: In einem Bereich mit einem Volumen von 750 Millionen km³ befindet sich ein einziges Gramm solcher Materie.

In welchem Aggregatzustand befindet sich nun diese so außerordentlich stark verdünnte interstellare Materie? Rund 99% liegen als Gas, 1% als Staub vor. Diese beiden Aggregatzustände kann man jedoch nirgendwo voneinan-



Der Hufeisennebel. Er wurde 1746 von De Chéseaux entdeckt. Seine Masse beträgt etwa 800 Sonnenmassen. Seinem Spektrum kann man entnehmen, daß er fast nur aus Wasserstoff aufgebaut ist.

der trennen, sie kommen immer gemeinsam vor; nur ist die relative Häufigkeit beider Komponenten von Ort zu Ort verschieden. Zur Beobachtung der interstellaren Materie im sichtbaren Bereich gibt es zwei Möglichkeiten. Einmal kann man die Erscheinung ausnutzen, daß sie die Strahlung von Himmelskörpern, die sich hinter einer Wolke befinden, abschwächt; zum anderen kann man sie aber auch als helle Flecke in den Fernrohren beobachten, wenn sie im eigenen Licht strahlen oder das Licht von in ihrer Nähe befindlichen Sternen reflektieren. Die dunklen Wolken kann man mit bloßem Auge gut erkennen, wenn man die Milchstraße in einer klaren Nacht näher betrachtet. Besonders auffallend sind die länglichen Gebilde, die sich durch die Sternbilder Schwan (Cygnus) und Cassiopeia hindurchziehen. Die bekannteste Absorptionswolke ist der sich am südlichen Himmel befindende Kohlsack, in dessen dichtesten Bereichen das Licht der dahinter liegenden Sterne um mehrere Größenklassen geschwächt wird.

Die leuchtenden Nebel sind am Himmel viel schwerer zu erkennen als die dunklen Wolken; bemühen wir uns deshalb in Winternächten, ihren hellsten Vertreter, den Großen Orionnebel, zu suchen. Mit einem kleinen, gewöhnlichen Fernrohr kann man bereits recht gut seine Gestalt ausmachen; es darf aber niemand damit rechnen, daß er eine ähnliche Sehenswürdigkeit zu sehen bekommt, wie sie astronomische Aufnahmen bieten. Dies ist einfach dadurch zu erklären, daß solche Aufnahmen auf außerordentlich empfindlichen fotografischen Platten mit einem Teleskop, das gegebenenfalls eine hunderttausendmal größere Öffnung hat als die menschliche Pupille, oft bei einer Belichtungsdauer von mehreren Stunden gewonnen werden.

Der Lagunennebel (M 8) in Richtung zum Zentrum der Galaxis. Er ist eine der dichtesten Gaswolken in unserer Galaxis und auch eine starke Radioquelle.





Der Rosettennebel im Sternbild Einhorn (Monoceros). Die Ionisationsfronten sind deutlich zu erkennen. Die hellsten Sterne gehören zum Spektraltyp 09.

Neben den im eigenen Licht leuchtenden Nebeln gibt es die sogenannten *Reflexionsnebel*. Ein gutes Beispiel für diese Objekte ist das in der Nähe der hellen Sterne des Siebengestirns (Plejaden) erkennbare bläulich schimmernde fadenförmige Wolkensystem. Mit Hilfe der Spektralanalyse kann man leicht entscheiden, zu welcher Gruppe ein leuchtendes Fleckchen gehört. Von den wirklich selbst leuchtenden sogenannten *Emissionsnebeln* erhält man immer ein für ihre Zusammensetzung charakteristisches Spektrum, aus dem man feststellen kann, aus

welchen Gasanteilen der Nebel besteht. Die Spektren der Reflexionsnebel weichen dagegen kaum von denen der Sterne ab, von denen sie angestrahlt werden; höchstens ihre Intensitätsverteilung ändert sich, weil das Reflexionsvermögen der Bestandteile der Wolken im allgemeinen erheblich von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung abhängt. Detaillierte Untersuchungen zeigten, daß die Gaswolken vor allem aus Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Neon und Helium bestehen. In diesen Gemischen kommt jedoch auch eine nennenswerte Anzahl von Kohlenstoffatomen vor. Demgegenüber besteht der Staub, der in den Dunkelwolken besonders häufig ist, vermutlich aus Silikat- und Kohlenstoffteilchen, in die erhebliche Mengen an Kalzium, Eisen und Sauerstoff eingebaut sind. Auf diesen kleinen festen Teilchen lagern sich, wie vermutet wird, mehratomige Verbindungen ab, die eine dünne Eisschicht bilden.

Auf die Zusammensetzung der interstellaren Staubwolken sowie auf die Größe und Form ihrer Teilchen kann man außer durch die Analyse des Spektrums des von ihnen reflektierten oder des sie durchdringenden Lichts auch durch die Untersuchung der Polarisationsverhältnisse der auf die Erde gelangenden Strahlung schließen. Die Forscher sind zu dem Ergebnis gelangt, daß die Teilchen kleinen Zylindern mit der charakteristischen Länge von $2\ \mu\text{m}$ ähnlich sind.

Die interstellaren Wolken bewegen sich ebenso in Bahnen um das Zentrum der Galaxis wie die Sterne in der galaktischen Scheibe. Außerdem kann man noch Bewegungen in ihrem Inneren beobachten, die turbulente Masseströme darstellen. Solche inneren Ströme haben meist einen gut erkennbaren Vorposten, eine sogenannte Stoßfront. Ein derartiges Geschwindigkeitsfeld entsteht dann, wenn einer oder mehrere heiße Sterne in die Wolke oder in deren Nähe gelangen. Dann wird durch die Ultraviolettstrahlung der Sterne das Gas zunehmend ionisiert und entfernt sich durch die Wirkung des Strahlungsdrucks immer schneller von der Energiequelle. In den Zonen, in denen die Dichte des Nebels höher ist, verläuft die Ionisierung langsamer, und die Beschleunigung durch den Strahlungsdruck ist geringer. Dadurch entstehen auch die

kapriziös geformten, auf der einen Seite leuchtenden, auf der andern dunklen gestreckten Gebilde, die in der Fachliteratur als *Elefantenrüssel* bezeichnet werden. Man kann zeigen, daß sich die Ionisationsfront hinter einem solchen Gebilde abschnüren kann, wenn es sich sehr in die Länge streckt. Somit kann dieses kleine dunkle Säckchen eine selbständige Existenz beginnen. Im ersten Schritt versucht es wahrscheinlich, eine kugelsymmetrische Gestalt anzunehmen, weil diese den besten Schutz gegen die Außenwelt bietet, denn bei der Kugelgestalt ist die angreifbare Oberfläche bei gleichem Volumen am geringsten. Im dann folgenden Schritt zieht es sich vielleicht zusammen. Nach Ansicht vieler Wissenschaftler entsteht im Ergebnis dieser Kontraktion ein Protostern. Für die abgeschnürten Elefantenrüssel, die eine kugelförmige Gestalt angenommen haben, hat sich die Bezeichnung *Globulen* eingebürgert.

Die interstellare Materie besitzt noch eine sehr charakteristische und recht häufige Erscheinungsform. Auf den astronomischen Aufnahmen erkennt man beim ersten Hinsehen kleine Ringe, bei deren genauerer Untersuchung man feststellen kann, daß sie die Projektionen kugelschalenförmiger Gebilde darstellen. Betrachten wir das Bild auf der nächsten Seite, dann fällt uns sofort ins Auge, daß die Oberflächenhelligkeit dieser Ringe nicht gleichmäßig ist, sondern nach innen und nach außen kontinuierlich abnimmt. Charakteristisch ist, daß im geometrischen Mittelpunkt dieser Gebilde immer Sterne sind.

Noch eigenartiger ist das Bild, das man von diesen Himmelskörpern erhält, wenn man vor das Objektiv des Fernrohrs ein Prisma setzt. Die Fotoplatte zeigt dann eine Serie parallel verschobener, relativ scharf begrenzter, gleichgroßer Ringe. Analysiert man diese Ergebnisse, gelangt man zu folgender Schlußfolgerung: Die zentralen (im Mittelpunkt liegenden) Sterne sind von einer kugelsymmetrischen Gasschicht umgeben; das Gas befindet sich

*Planetarischer Nebel NGC 6781 im Sternbild Adler (Aquila)
Der Ringnebel (M 57) im Sternbild Leier, ein Planetarischer Nebel.
Aus seiner Expansionsgeschwindigkeit von 6."8 je Jahrhundert folgt, daß er durch eine Novaexplosion vor 3 000 bis 4 000 Jahren entstanden ist.*



im angeregten Zustand und emittiert intensive Spektrallinien, die für die Elemente, aus denen es besteht, charakteristisch sind. Den Ringspektren kann man entnehmen, daß Wasserstoff der häufigste Bestandteil des Gases ist.

Diese *Nebelringe* nennt man *Planetarische Nebel*. Heute weiß man auch, wie diese eigenartigen Objekte entstehen können. Wenn der Wasserstoffvorrat eines Sterns mit einer nicht sehr großen Masse (d. h. mit einer Gesamtmasse von weniger als $1,4 M_{\odot}$) in den zentrumsnahen Gebieten infolge der Kernfusionsreaktionen nahezu erschöpft ist, stellt der Stern sowohl mechanisch als auch bezüglich seiner Energieproduktion kein stabiles Gebilde dar; seine charakteristischen Größen ändern sich kontinuierlich. Kann der Brennstoffmangel des Sterns in keiner Weise mehr gedeckt werden, dann ist er bestrebt, die infolge Abstrahlung auftretenden Verluste durch Kontraktion und Freisetzung von Gravitationsenergie auszugleichen. Sind Temperatur und Druck im Innern des Sterns zu gering, um dieser Kontraktion entscheidend entgegenwirken zu können, dann entsteht ein sehr dichter Himmelskörper, ein *Weißer Zwerg*. Der letzte Schritt einer solchen Kontraktion verläuft jedoch keineswegs »friedlich«. Eine gewaltige Explosion, ein *Novaausbruch*, läßt dieses Ereignis unvergeßlich werden. In solchen Fällen erhöht sich die Helligkeit des Objekts vorübergehend auf mehr als das Zehntausendfache; gleichzeitig wird ein bedeutender Anteil der Masse des Sterns als eine sich schnell vergrößernde Kugelschale abgetrennt. Die Helligkeit der Nova nimmt mit kleineren Schwankungen, jedoch mehr oder weniger regelmäßig ab – in den ersten 10 Tagen sehr schnell, nach 50 Tagen gleichmäßig und kann dann noch ein bis zwei Jahre verfolgt werden. Durch Beobachtungen über mehrere Jahre oder Jahrzehnte kann man auch die Erweiterung der Kugelschale gut studieren.

Supernovae in unserem Milchstraßensystem

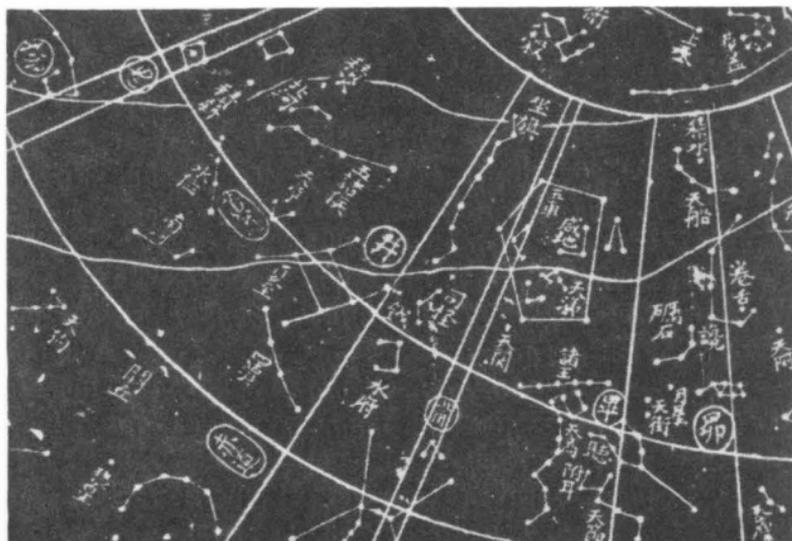
Die Entstehung der Planetarischen Nebel ist zudem noch ein Beispiel dafür, wie die interstellaren Wolken entstanden sein konnten. Es ist wahrscheinlich, daß nur ein kleiner

Anteil des heute beobachtbaren interstellaren Gases und Staubes durch Novaausbrüche in unser Milchstraßensystem gelangt ist, während sich der größere möglicherweise infolge der Aktivität des Milchstraßenkerns in der Symmetrieebene des Systems ausgebreitet hat oder – was wahrscheinlicher ist – noch einen Überrest der ursprünglichen Gaskugel darstellt, aus der die Galaxis entstanden ist.

Ein kleiner Anteil der interstellaren Materie ist wahrscheinlich bei Supernovaausbrüchen aus dem »Gravitationskerker« seines Sterns ausgebrochen. Da Ausbrüche mit einer solch gewaltigen Strahlungsemission selten sind, dürfte die abgegebene Masse an der Gesamtmasse der interstellaren Materie nicht nennenswert sein.

Innerhalb des Milchstraßensystems sind bis heute drei sichere Supernovaerscheinungen bekannt, die in den letzten tausend Jahren aufgezeichnet wurden. Ohne Zweifel ist das interessanteste und zugleich am meisten diskutierte Objekt dieser Art jener »Gaststern«, der im Jahre 1054 aufleuchtete. Nach chinesischen, koreanischen und japa-

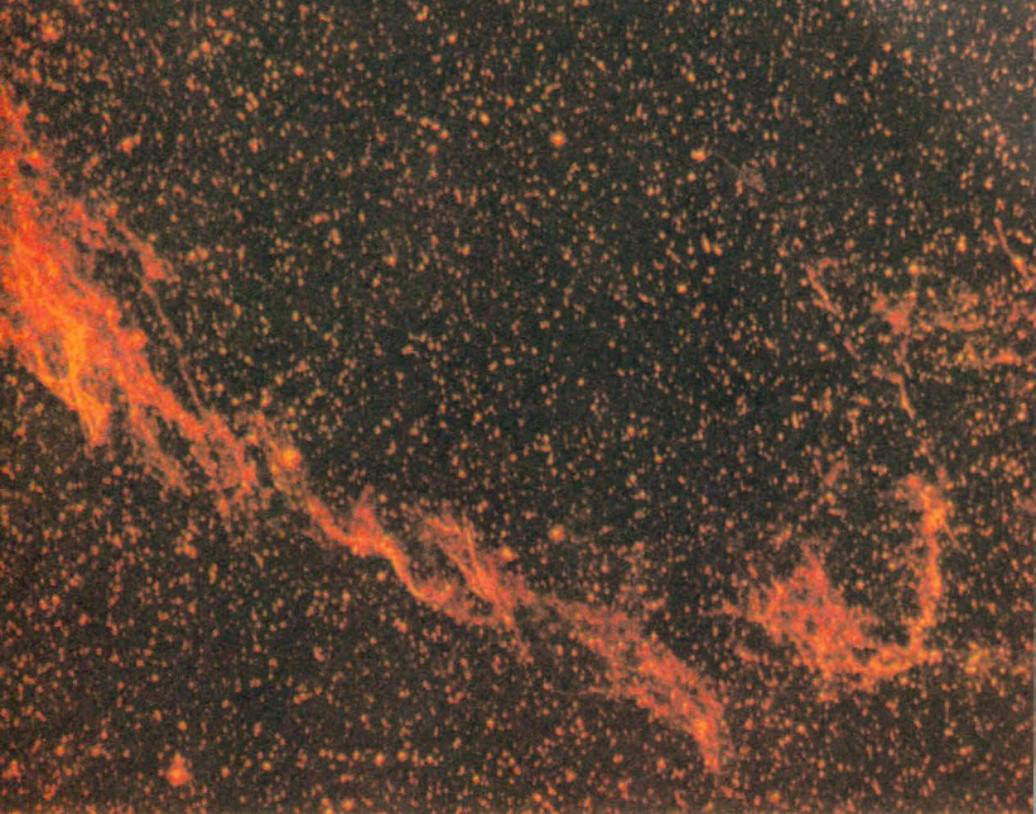
Ausschnitt aus einer chinesischen Sternkarte um 1200. Über dem linken Ende der kettenförmig aneinandergereihten sechs Sterne im unteren Bildteil ist der Stern Tien-Kuan zu sehen, den wir heute als Zeta Tauri bezeichnen. In seiner Nähe war im Jahre 1054 mehr als 20 Tage lang ein Stern selbst bei Tageslicht noch sichtbar.



nischen Astronomen war damals ein heller neuer Stern im Sternbild Stier zu sehen, der in unserer heutigen Helligkeitsskala eine scheinbare Helligkeit von etwa -6^m hätte. Nach der Ortsangabe kann man die bizarre interstellare Wolke, die Krebsnebel genannt wird, als Überrest dieses Objekts betrachten. Obwohl ihre charakteristischen Daten in keiner Weise denen der Überreste der beiden anderen galaktischen Supernova-Überreste ähnlich sind, ist man allgemein davon überzeugt, daß das 1054 beobachtete deutliche Hellerwerden eines Sterns einen gewaltigen Supernovaausbruch darstellte. Ein Argument für diese Auffassung besteht darin, daß nach der sich aus der Dopplerverschiebung ergebenden Strömungsgeschwindigkeit die Expansion des Krebsnebels gerade vor 900 Jahren begonnen haben muß, sofern er aus einem kleinen, aber dichten Objekt entstanden ist.

Neue Aufregung verursachte die Entdeckung eines Pulsars im Inneren des Nebels. Die Pulsare sind verhältnismäßig lichtschwache sternartige Objekte und zeigen außerordentlich interessante Veränderungen. Mit Radioteleskopen, die eine große Zeitauflösung haben, kann man aus ihrer Radiostrahlung ihre mit sehr kurzen Perioden ablaufenden Intensitätsänderungen einfacher bestimmen als mit Hilfe optischer Fernrohre die mit den Radiopulsen synchron verlaufenden Helligkeitsänderungen. Die Periode der Radiosignale liegt zwischen 0,03 und 3 s, und ihre Form ist charakteristisch. Innerhalb einer Periode treten ein oder zwei kurze Maxima auf, deren Länge ein Zehntel der gesamten Periodendauer beträgt. Es ist interessant, daß gerade der Pulsar, der 1968 im Krebsnebel entdeckt wurde, derjenige mit der kürzesten Periode ist. Mit Hilfe eines besonderen lichtelektrischen Geräts ist – durch Summierung von insgesamt 2000 Lichtänderungsperioden in ihren Einzelheiten – der Nachweis gelungen, daß der im Zentralteil des Nebels befindliche lichtschwache Stern durch eine Helligkeitskurve charakterisiert werden kann, die einen ähnlichen Verlauf hat wie die im Radiowellenbereich gemessene Intensitätskurve, und daß die Periode der Helligkeitsänderung 0,033 s beträgt.

War nun ein Teil einer Supernova als Stern zurückgeblieben? Viele Astrophysiker bejahen diese Frage.



Den Überrest eines Supernovaausbruchs, der vor etwa 160 000 Jahren stattgefunden hat, stellt der Schleiernebel dar (Zirrusnebel, NGC 6960/6992). Die Aufnahme zeigt einen Teil dieses Nebels, der eine Ausdehnung von mehr als 60 Lichtjahren hat.

Danach explodieren Sterne, die wegen ihrer zu großen Masse nicht in den Zustand der Weißen Zwerge überzugehen vermögen, infolge der schnellen Kontraktion. Dadurch werden gewaltige Mengen von Gravitationsenergie freigesetzt. Dabei erhöht sich ihre absolute Helligkeit so stark, daß sie vorübergehend eine so große Lichtleistung abstrahlen wie eine ganze Galaxie; gleichzeitig werfen sie einen wesentlichen Teil ihrer Masse ab. Der andere Teil der Masse verdichtet sich durch eine unvorstellbare Kontraktion während des Ausbruchs in eine superdichte Kugel, deren Durchmesser kaum ein Dutzend Kilometer beträgt, während sich seine Masse nicht wesentlich von der der Sonne unterscheidet. Wie ist das möglich? Nur dadurch, daß in diesem Zustand der Himmelskörper

nicht mehr aus Atomen, ja nicht einmal aus Atomkernen, sondern vorwiegend aus Neutronen aufgebaut ist. Daher nennt man solche Objekte *Neutronensterne*.

Übrigens fand *Woltjer* 1957 – 10 Jahre vor der Entdeckung der Pulsare – durch Polarisationsmessungen, daß sich das Zentrum des Krebsnebels bzw. der Mittelpunkt des Magnetfelds in unmittelbarer Nähe eines schwach leuchtenden Sterns befindet.

Wir würden uns aber etwas von der Wahrheit entfernen, verlören wir nicht einige Worte über die anderen beiden Supernovae, die in unserem Sternsystem entdeckt worden sind. Beide wurden von sehr berühmten und fähigen Astronomen beobachtet, die auch deren Positionen viel genauer bestimmten als ihre Kollegen einige Jahrhunderte zuvor den Ort der Supernova im Sternbild Stier. Im Jahre 1572 entdeckte *T. Brahe* einen Stern der scheinbaren Helligkeit – 4^m im Sternbild Cassiopeia; 1604 fand *J. Kepler* einen Novastern der Helligkeit – 2^m im Sternbild Schlangenträger (Ophiuchus). Beide verfolgten über einen langen Zeitraum die Helligkeitsabnahme der von ihnen gefundenen Objekte; leider stand ihnen noch kein Fernrohr zur Verfügung. Bekanntlich gelangte ein Gerät dieser Art erst vier Jahre später in die Hände *G. Galileis*, der es zum wichtigsten Hilfsmittel des Astronomen machte. Zu Recht kann nun aber jeder die Frage stellen, ob von den Astronomen wirklich Pulsare an den Orten mit den genau bekannten Koordinaten gefunden wurden. Nein! Und das ist ja gerade die Ursache dafür, daß viele die Vorstellung über die Entstehung des Krebsnebels, wie sie oben beschrieben wurde, nicht als typisch für alle Supernovaausbrüche ansehen. Es fehlen nicht nur die Pulsare an den Orten der Ausbrüche von 1572 und 1604, auch die Strukturen der im Radiowellenbereich beobachteten Gaswolken und die Polarisationsverhältnisse sind von denen des Krebsnebels verschieden. Aus diesen Gründen können wir uns noch nicht mit voller Sicherheit über die physikalischen Besonderheiten der Supernovae und ihrer Überreste äußern. Wir müssen weitere Anstrengungen unternehmen, um detailliertes Beobachtungsmaterial zu sammeln.

Aus welchen chemischen Elementen besteht unser Sternsystem?

Bevor wir auch das letzte Glied der Bauelemente des Milchstraßensystems untersuchen, wollen wir uns mit den in ihm vorkommenden chemischen Elementen und deren Häufigkeit befassen. Sind die fernen Himmelskörper aus den gleichen Bausteinen aufgebaut wie unsere Erde, unser Sonnensystem? Zur Ermittlung der chemischen Elemente, aus denen ferne Himmelskörper zusammengesetzt sind, steht uns heute eine einzige Möglichkeit zur Verfügung: die Untersuchung der von ihnen zur Erde gelangenden elektromagnetischen Wellen (Radio-, Infrarot-, sichtbare, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung).

Als dieses Buch geschrieben wurde, gab es »unmittelbare« Informationen nur von insgesamt fünf größeren Himmelskörpern: von der Erde, vom Mond, von der Sonne, von Mars und Venus. Alle Daten über andere kosmische Objekte waren durch spektroskopische Untersuchungen erlangt worden. Ganz gleich, ob man die Spektren von Kometen, von interstellaren Wolken, von fernen Sternen oder Galaxien untersucht, immer können die in ihnen enthaltenen Linien und Banden nur in der gleichen Weise identifiziert werden wie die in den Spektren der in unseren irdischen Laboratorien untersuchten Körper.

Welche Elemente hat man nun in der Galaxis gefunden? Es ist allgemein bekannt, daß es 92 chemische Elemente gibt, die in unserer natürlichen Umgebung in irgendeiner Form vorkommen und über einen verhältnismäßig langen Zeitraum stabil sind. Bisher hat man noch keinerlei Anhaltspunkte gefunden, aus denen man darauf schließen müßte, daß es in den entfernten Bereichen der Galaxis auch andere Elemente gäbe.

Die 92 natürlichen Elemente findet man mit unterschiedlicher Häufigkeit auf den Himmelskörpern. Ohne jeglichen Zweifel ist Wasserstoff das am häufigsten vorkommende Element; wahrscheinlich bestehen 65% der Masse der Galaxis aus ihm. Ein Drittel der Gesamtmasse ist Helium, während der Anteil der schwereren Elemente zusammen etwa 2 bis 3% beträgt. Die zehn häufigsten Elemente im

Milchstraßensystem sind – betrachtet man allein ihre Teilchenzahl je Volumeneinheit – Wasserstoff, Helium, Sauerstoff, Kohlenstoff, Neon, Stickstoff, Silizium, Mangan, Eisen und Schwefel. Die augenfälligste Gesetzmäßigkeit bei der Verteilung der Elemente besteht darin, daß die Elemente mit kleinerer Massenzahl wesentlich häufiger sind als die mit höherer. Ferner ist bei den Elementen, die schwerer als Kohlenstoff sind, die Häufigkeit der Elemente mit geradzahligem Ordnungszahl immer größer als der Anteil der Stoffe mit ungerader Kernladungszahl.

Die Untersuchung der Elemente, aus denen das Milchstraßensystem aufgebaut ist, kann man nicht abschließen, ohne auf die im ganzen System vorhandene elektromagnetische und Korpuskularstrahlung einzugehen. Nur ein Teil der Strahlung ist auf die Emission durch Sterne, Nebel und den Kern der Galaxis zurückzuführen. Mit Hilfe hochempfindlicher Radioteleskope konnte nachgewiesen werden, daß aus allen Richtungen des Universums gleichstarke Radiowellen auf unsere Erde gelangen, deren Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Wärmestrahlung von Körpern einer Temperatur von 2,7 K entspricht. Selbst mit den empfindlichsten Meßgeräten konnte bis jetzt keine eindeutige Anisotropie (d. i. die Abhängigkeit physikalischer Eigenschaften von der Richtung) dieser sogenannten *Hintergrundstrahlung* nachgewiesen werden.

Es scheint, als ob die in unserer Galaxis beobachtbare Korpuskularstrahlung (Teilchenstrahlung) – abgesehen von den durch die Sonne verursachten lokalen Strahlungsfeldern – im wesentlichen aus zwei Komponenten besteht. Die eine Komponente ist mit hoher Wahrscheinlichkeit isotrop, d. h., sie kommt aus allen Richtungen mit gleicher Intensität; die andere ist in Richtung zu den zentralen Bereichen des Sternsystems besonders stark. Ferner ist offensichtlich, daß bei den Nova- und Supernovaausbrüchen ebenfalls energiereiche Teilchen freigesetzt werden, die dann als kosmische Strahlung zu uns gelangen können. Unter Berücksichtigung neuester Forschungsergebnisse kann man zu der Auffassung gelangen, daß auch die veränderlichen Sterne vom Typ T Tauri, die bisher als »fried-

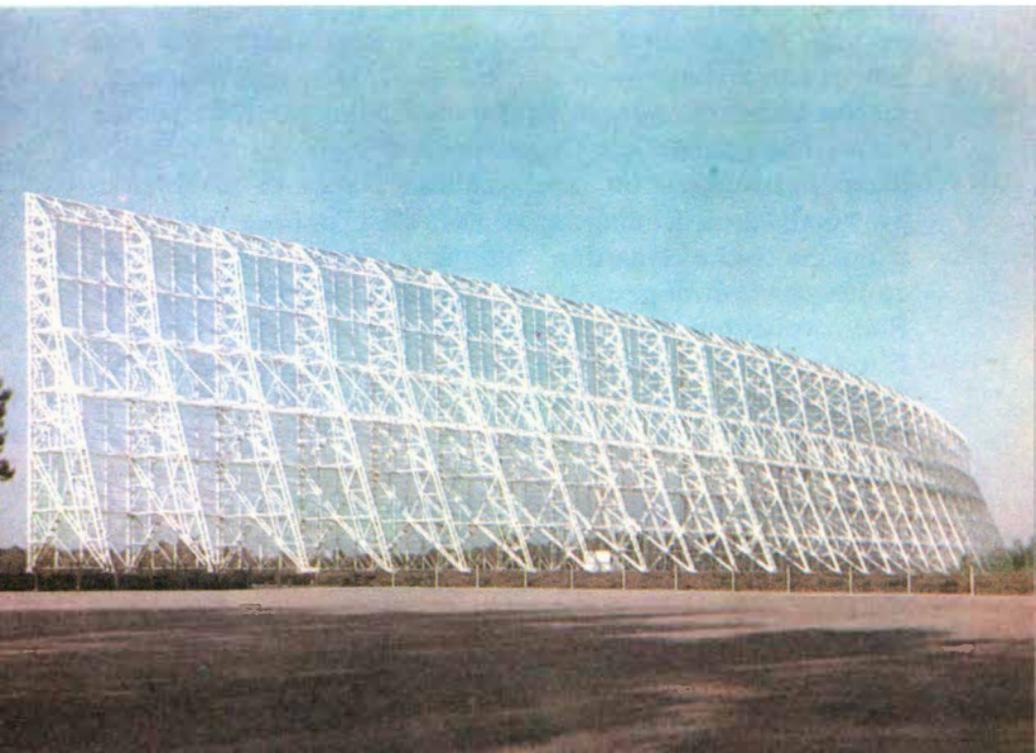
liche«, kleine veränderliche Sterne betrachtet wurden, einen ernst zu nehmenden Anteil an der Produktion des Nachschubs für diese Teilchenströme haben.

Populationen in der Galaxis

Die in der Galaxis beobachteten Objekte werden nach ihrer räumlichen Anordnung, dem Bewegungsverhalten, dem Anteil der schweren chemischen Elemente und ihrem Alter in Populationen eingeteilt. Am frühesten sind die *Objekte der Population II* (oder *Halo*-Population) entstanden: die Kugelsternhaufen, die besonders wenig Metall enthaltenen Unterzwerge und die veränderlichen Sterne des Typs RR Lyrae, deren Periode länger als 0,4 Tage ist.

Der *Zwischenpopulation II* sind die Sterne zuzuordnen, deren Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Symmetrieebene des Systems größer ist als 30 km/s (Schnellläufer), und die periodisch veränderlichen Sterne, deren Lichtwechselperioden zwischen 80 und 250 Tagen liegen.

300 m lange und 35 m hohe sphärische Antenne in Nançay, Frankreich



Zu den *Objekten der Scheibenpopulation* gehören die Sterne des Kerns des Milchstraßensystems, die Sonne, aber auch die Novae, die Planetarischen Nebel, und die veränderlichen Sterne des Typs RR Lyrae mit kürzeren Lichtwechselperioden als 0,4 Tage.

Der *älteren Population I* gehören folgende charakteristische Sternarten an: die Sterne mit verhältnismäßig starken Spektrallinien, die Sterne des Spektraltyps A und von den Zwergen mit Emissionsspektrum die der Klasse M.

Zur *extrem jungen Population I* gehören: das interstellare Gas und der interstellare Staub, die veränderlichen Sterne vom Typ T Tauri, die Überriesen, die Spiralarme der Galaxis und die klassischen Cepheiden (veränderlichen Sterne des Typs Delta Cephei).

Organische Moleküle im interstellaren Raum

Abschließend einige Worte zu den mit modernen Radioteleskopen entdeckten interstellaren Gaswolken. Wir sprachen bereits über die aus Wasserstoff und geringen Anteilen an anderen elementaren Gasen aufgebauten Nebel; in den letzten Jahren hat es sich jedoch herausgestellt, daß im interstellaren Raum auch chemische Verbindungen vorkommen. Besonderes Interesse haben organische Moleküle ausgelöst, die die Grundbausteine für die einfachsten lebenden Organismen sein können. Da sich diese Substanzen im interstellaren Raum unter solchen physikalischen Bedingungen befinden, daß sie nur elektromagnetische Quanten von sehr geringer Energie zu emittieren vermögen, kann man ihre Strahlung nur im Radiowellenbereich wahrnehmen. Sie sind relativ selten. Einige dieser Verbindungen machen sich auch im sichtbaren Spektrum von Sternen, die sich hinter einer Wolke befinden, durch ihre charakteristischen Absorptionslinien bemerkbar.

Am häufigsten läßt sich das Hydroxylradikal (OH) nachweisen. Es folgen die zweiatomigen Moleküle von Kohlenmonoxid (CO), Zyan (CN), Kohlenstoffsulfid (OS) und

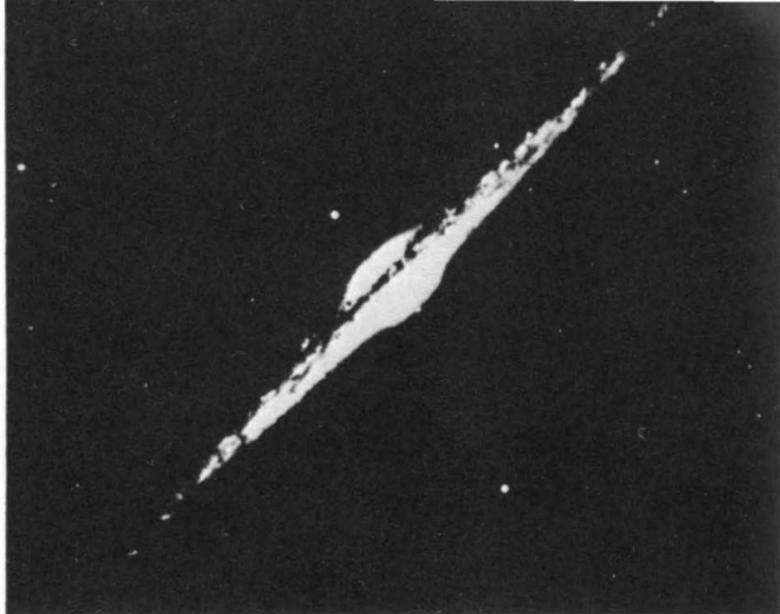
Siliziumoxid (SiO). Die meisten Verbindungen findet man in den Sternbildern Schütze (Sagittarius) und Orion. In diesen beiden Sternbildern hat man die komplexeren Moleküle, die aus sechs bis sieben Atomen aufgebaut sind, gefunden. Unter ihnen sind: Formaldehyd (HCHO), Methylcyanid (CH₃CN), Formaldimin (CH₂NH), Methylazetylen (CH₃C₂H), Azetaldehyd (CH₃HCO), Formamid (NH₂HCO) und der 1974 im Orionnebel gefundene Dimethyläther [(CH₃)₂O]. Die Anzahl der in den interstellaren Wolken entdeckten Moleküle beträgt etwa 45. Die Radioastronomen geben sich jedoch nicht mit dem Auffinden und Identifizieren der verschiedenen Stoffe zufrieden: Sie versuchen auch, ihre Mengen zu bestimmen, ebenso die Bewegung, die Temperatur und die Dichte der Wolken, in denen sich die Moleküle befinden, und nicht zuletzt die Bedingungen, unter denen sich diese Verbindungen gebildet haben. Auffallend ist, daß die chemischen Verbindungen immer dort gefunden wurden, wo auch größere Staubmengen anwesend sind. Ja, je dichter die Wolken sind, die man untersucht, um so kompliziertere Moleküle hat man dort entdeckt. Die Atome der Gase reagieren offensichtlich auf den Oberflächen der als Katalysator wirkenden Staubteilchen viel leichter miteinander.

Die extragalaktischen Objekte

Geheimnisvolle Nebelflecke

Obwohl bereits vor mehr als zwei Jahrhunderten die Möglichkeit in Erwägung gezogen wurde, daß die am Firmament erkennbaren blaß leuchtenden Nebelflecken unserem Sternsystem ähnlich und weit von uns entfernte Himmelskörper sein könnten, wurde dennoch in unserem Jahrhundert erst damit begonnen, diese Objekte eingehender zu untersuchen. Als es gelungen war, die Entfernung einiger spiralförmiger Sternsysteme zu ermitteln, stand zweifelsfrei fest, daß diese tatsächlich nicht zu unserem Milchstraßensystem gehören können. In recht großer Anzahl waren jedoch auch solche Flecken zu erkennen, die man beim besten Willen nicht mit den Spiralsystemen vergleichen konnte. Häufig sind diese Gebilde, die sich von den Kugelsternhaufen nur in ihrem scheinbaren Durchmesser unterscheiden, ansonsten aber eine ähnliche Struktur und eine zu ihrem Zentrum hin heller werdende kugelförmige Gestalt haben. Manchmal erkennen wir auch mehrere Dutzend von ihnen im Gesichtsfeld unseres Fernrohrs. Die kleinen Fleckchen, die früher »Nebelsterne« genannt wurden, haben oft die Form eines gestreckten Ellipsoids, oft verjüngen sie sich sehr stark, dabei befindet sich in ihrer Mitte eine kleine Aufwölbung. Die zuletzt erwähnten Nebel werden auch manchmal von einem schmalen, dunklen Streifen durchzogen.

Es gibt aber auch Gebilde, die mit keiner geometrischen Form vergleichbar sind, eventuell aus mehreren, dicht beieinanderliegenden schwer abgrenzbaren Flecken bestehen. Nicht selten bilden diese kleinen Nebelflecke



Die Galaxie NGC 4565 vom Typ Sb im Sternbild Haar der Berenice

Die elliptische Galaxie NGC 205 (Typ E6)

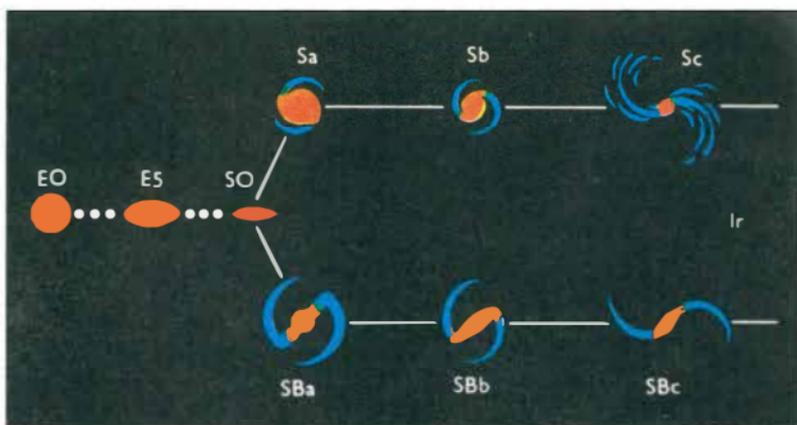


größere Gruppen, Haufen oder Paare, Dreier-, Vierfach- oder Fünffachsysteme. Diese große Vielfalt der Objekte ließ es als wünschenswert erscheinen, eine für die Forschung unerläßliche Klassifizierung vorzunehmen. Naturgemäß ermöglicht die immer bessere Kenntnis der physikalischen Besonderheiten der Himmelskörper auch eine genauere Information über ihre Unterschiede. Mit bloßem Auge erkennt man nur einige Nebelflecke. Durch die Vervollkommnung der Fernrohre können wir sie jedoch nach Gestalt, Struktur und Helligkeit leichter und genauer voneinander trennen.

Da die sich außerhalb unseres Sternsystems befindenden Himmelskörper vor allem nach fotografischen Verfahren erforscht werden, ist es verständlich, daß man versuchte, diese Objekte nach den auf den Aufnahmen gut erkennbaren Besonderheiten in Klassen einzuteilen. Berücksichtigt man weiterhin, daß die fotografischen Materialien anfangs vor allem im blauen und violetten Licht empfindlich waren, kann man leicht verstehen, warum für die Galaxien das Klassifizierungssystem nach *E. P. Hubble* entstand. Ebenso wie bei der Galaxis – erinnern wir uns nur an die Unterschiede zwischen offenen Haufen und Kugelsternhaufen – gibt es auch bei den fernen Sternsystemen blauere und röttere Bereiche. Die Spiralarme stellen z. B. ausgesprochen blaue Gebiete dar, so daß sie auch auf den vor 50 bis 70 Jahren gemachten Aufnahmen gut zu erkennen sind. Auf Grund des Studiums solcher Aufnahmen entstand das erste, verhältnismäßig grobe Klassifizierungsschema.

Die Klassifizierung der Galaxien

Hubble unterschied drei grundlegende Typen: die *Spiralsysteme*, die *elliptischen Galaxien* und die *unregelmäßigen (irregulären) Sternsysteme*. Er schätzte auch ab, welcher Typ am häufigsten vorkommt, und kam dabei zu folgendem Ergebnis: 17% der Sternsysteme, die wir beobachten können, haben eine elliptische Gestalt, 80% eine spiralförmige, 3% eine irreguläre. Es ist aber durchaus nicht sicher, daß diese Häufigkeiten, wie wir sie



Von Hubble 1926 eingeführtes Klassifizierungsschema von Galaxien

erhalten haben, die wirklichen Häufigkeitsverhältnisse widerspiegeln. Vielleicht können wir den in diesen Zahlenwerten enthaltenen Auswahleffekt am besten durch einen Vergleich veranschaulichen. Stellen wir uns vor, daß ein Zoologe von einem hohen Turm aus das Leben in einem Reservat beobachtet, weil er die Tiere möglichst wenig stören möchte. Was sieht er? Die Giraffen und die Elefanten erkennt er bereits aus weiter Entfernung, die Zebras und die Antilopen im günstigsten Fall aus einem Abstand von einem Kilometer, die kleineren Vierbeiner und die Vögel sieht er erst aus 200 bis 300 m Nähe, Nagetiere und Echsen sogar erst, wenn sie auf 20 bis 40 m herankommen. Und die in der größten Zahl vorhandenen Insekten, Ameisen, Fliegen und Spinnen, nimmt er vielleicht überhaupt nicht wahr. Genau so ergeht es dem Astronomen, wenn er die verschieden hellen und unterschiedlich weit entfernten Objekte beobachtet. Die hellsten Spiralgalaxien sind noch aus einer weit größeren Entfernung zu erkennen als die elliptischen Zwergsysteme oder die diffusen unregelmäßigen Sternsysteme. In der 1936 vorgenommenen Erweiterung der ursprünglichen, 1926 veröffentlichten Klassifizierung ist auch noch ein Übergangstyp enthalten, ein als *lenticular* oder linsenförmig bezeichnetes Gebilde, das den Übergang zwischen den elliptischen und den Spiralsystemen darstellt.

Bei der Untersuchung der Spiralgalaxien ergab sich, daß



Die Spiralgalaxie M 100 (Typ Sc)

sie in zwei sich wesentlich unterscheidende Unterklassen einzuteilen sind, in die *normalen Spiralsysteme*, bei denen die Arme tangential von der zentralen Verdichtung ausgehen, und die *Balkenspiralen*, bei denen die Spiralarme in radialer Richtung vom Zentrum ausgehen und dann im rechten Winkel abgelenkt werden.

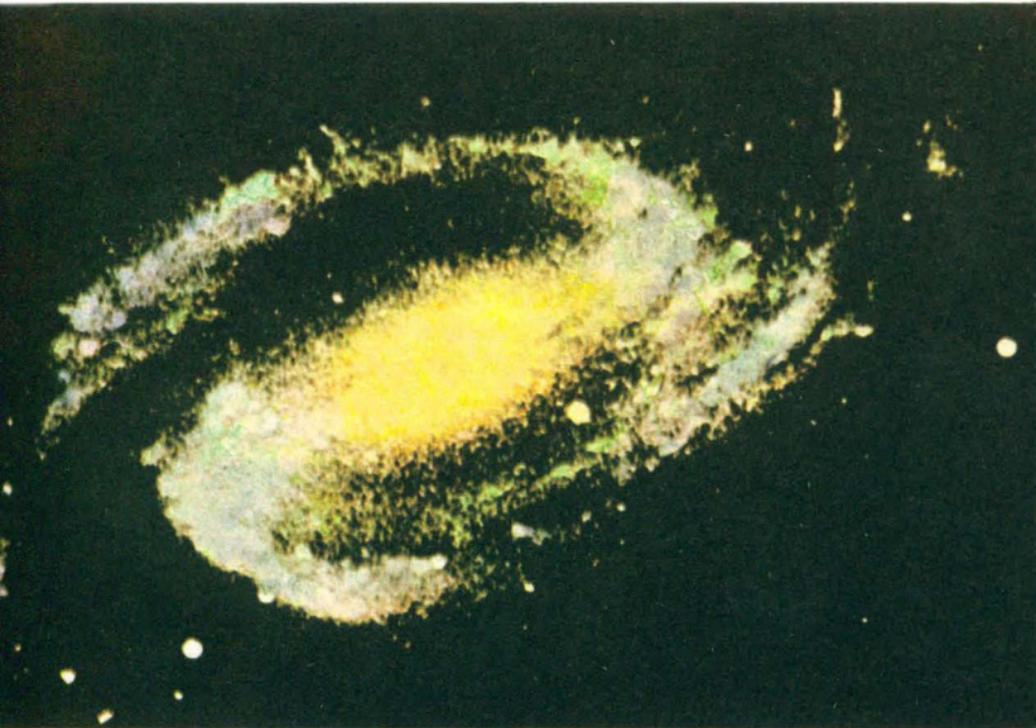
Die ellipsoidförmigen Galaxien werden je nach ihrer Abplattung in acht Untergruppen gegliedert. Die mit E0 gekennzeichneten Objekte sind kugelsymmetrisch, während die mit dem Symbol E7 am stärksten gestreckt sind. Eine ähnliche Unterteilung gibt es bei den Spiralsystemen. In Abhängigkeit davon, wie groß das Verhältnis zwischen der Spiralgalaxie und ihrem Kern bzw. wie groß die Öffnung der Spiralarme ist, werden die Untergruppen mit den Buchstaben a, b und c gekennzeichnet. Bei den Spiralnebeln vom Typ Sa sind die Arme eng um den relativ großen Zentralkörper gewunden, während bei den Objekten der Klasse Sc die Spiralarme stark aufgelöst sind und das Zentralgebiet klein ist im Verhältnis zum gesamten System.

Durch die neuen Teleskope mit ihrem höheren Auf-

lösungsvermögen und ihrer größeren Lichtstärke wurde es möglich, auch die Feinstruktur der fernen Sternsysteme zu untersuchen. So hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten herausgestellt, daß das Hubbleschema in vieler Hinsicht ergänzungsbedürftig ist. Von den beiden in den Vereinigten Staaten von Amerika arbeitenden Astronomen *A. R. Sandage* und *G. de Vaucouleurs* wurden im Verlauf der sechziger Jahre neue Klassifizierungssysteme geschaffen, die auch heute noch die Forderungen hinsichtlich Genauigkeit und Systematik erfüllen. Das Klassifikationsschema von Sandage schließt sich sehr eng an das Hubblesystem an.

Bei dem System von de Vaucouleurs werden außer den auch schon bisher berücksichtigten Eigenschaften bei den Spiralsystemen noch zwei Besonderheiten eingeführt: Es wird zwischen ringförmigen und s-förmigen Galaxien unterschieden; gleichzeitig werden alle Übergangstypen in die Klassifizierung einbezogen. Die zwischen den elliptischen und den Spiralsystemen liegenden spindelförmigen

Die Balkenspiralgalaxie NGC 1300





Die Spiralgalaxie NGC 253. Die durch interstellare Absorption verursachten dunklen Streifen sind deutlich zu erkennen.

Galaxien, die man als Typ S0 bezeichnet, werden in gesonderte Klassen – vor allem in die Gruppen $S0^-$ und $S0^+$ – eingeordnet, wobei sie von den ihnen ähnlichen elliptischen langgestreckten Systemen ($E7^+$) getrennt werden. Auch der Übergang zwischen den normalen Spiralgalaxien (SA) und den Balkenspiralen (SB) wird als gesonderte Gruppe behandelt (SAB bzw. SBA). Gleichfalls werden für die Objekte, die zwischen den Untergruppen der Spiralnebel liegen, spezielle Klassifizierungen geschaffen (a^- , a , a^+ , b^- , b , b^+ , c^- , c , c^+). Das so erhaltene Schema wird durch die mit d und m gekennzeichneten Objekte erweitert, wodurch sich die Verbindung zwischen den Spiralgalaxien und den irregulären Systemen ergibt. Bei den unregelmäßigen Galaxien werden zwei Untergruppen eingeführt. Dabei werden der einen die Systeme zugeordnet, die nach-

weislich aus Sternen aufgebaut sind (Im), während zur zweiten alle die außerhalb unseres Sternsystems erkennbaren ausgedehnten Objekte gehören, die man keiner der übrigen Klassen oder Gruppen zuordnen kann. Obwohl durch die hier erläuterte Klassifizierung die Struktur der Galaxien genau und systematisch beschrieben wird, wendet man dennoch häufig die gröbere ältere Klassifizierung an, da sie einfacher zu handhaben ist.

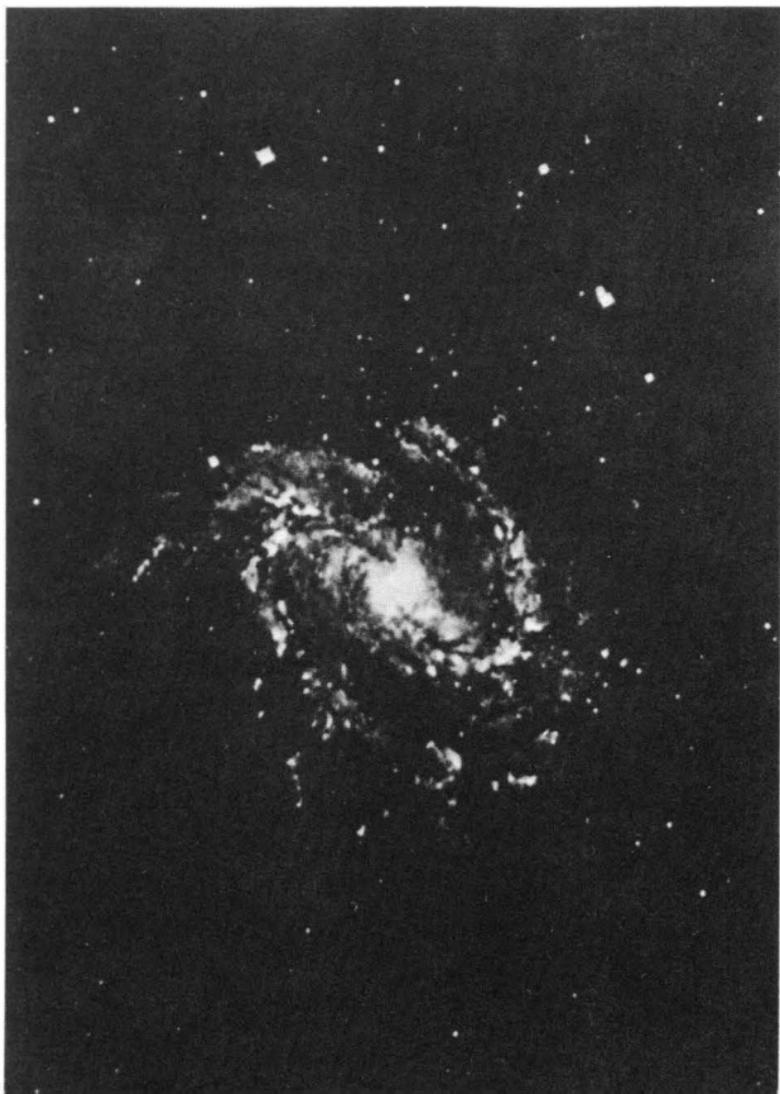
Die integrierte Helligkeit der Galaxien

Die Bestimmung der scheinbaren Helligkeit nicht punktförmiger Objekte ist nicht immer einfach. Die für die Sterne festgelegte Helligkeitsskala können wir leicht auf die Planeten, den Mond oder die Sonne erweitern. Alle diese Himmelskörper sind scharf vom Hintergrund abgegrenzt. Das kann man aber nicht von den Objekten behaupten, die in der extragalaktischen Astronomie untersucht werden. Die meisten dieser Objekte sind diffus und nur schwer abzugrenzen, außerdem sind sie außerordentlich lichtschwach. Was soll man also als Helligkeit solcher Himmelskörper betrachten? Das heute übliche genaueste Verfahren ist recht umständlich; wir möchten hier deshalb auch auf seine Beschreibung verzichten. Durch Messungen mit den großen Teleskopen wissen wir heute, daß die scheinbare fotografische Helligkeit des Andromedanebels $4^m.5$ beträgt. Es gibt noch viele Galaxien, die heller als 15^m sind. Leider verrät diese scheinbare Helligkeit nur wenig über die tatsächliche elektromagnetische Strahlungsmenge, die diese Sternsysteme in der Zeiteinheit aussenden. Wir dürfen nämlich nicht übersehen, wie schwierig es ist, die Beziehung zwischen scheinbarer und absoluter Helligkeit zu ermitteln. Bei den zu unserem Milchstraßensystem gehörenden Sternen war die Differenz zwischen diesen beiden Helligkeiten nur von ihrer Entfernung und von der Absorption durch interstellare Wolken innerhalb der Galaxis abhängig. Bei den extragalaktischen Systemen werden die Berechnungen jedoch noch durch zwei Erscheinungen erschwert: durch die außerhalb unseres Milchstraßensystems mögliche intergalaktische Ab-

sorption – die tatsächlich außerordentlich gering und damit zu vernachlässigen ist – und durch die Absorption durch die interstellare Materie in den betreffenden Galaxien. Der zuletzt genannte Effekt ist stark davon abhängig, unter welchem Winkel man die untersuchte Galaxie sieht. Die Auswirkungen der Rotverschiebung kann man berechnen, wozu man aber gewisse Annahmen über das tatsächliche Spektrum der beobachteten Objekte machen muß, durch die die Genauigkeit des Verfahrens beeinträchtigt wird.

Schließlich wollen wir die absoluten Helligkeiten betrachten, die sich aus Messungen mit großen Fernrohren ergeben. Die lichtschwächsten und die hellsten bekannten

Die Spiralgalaxie M 83

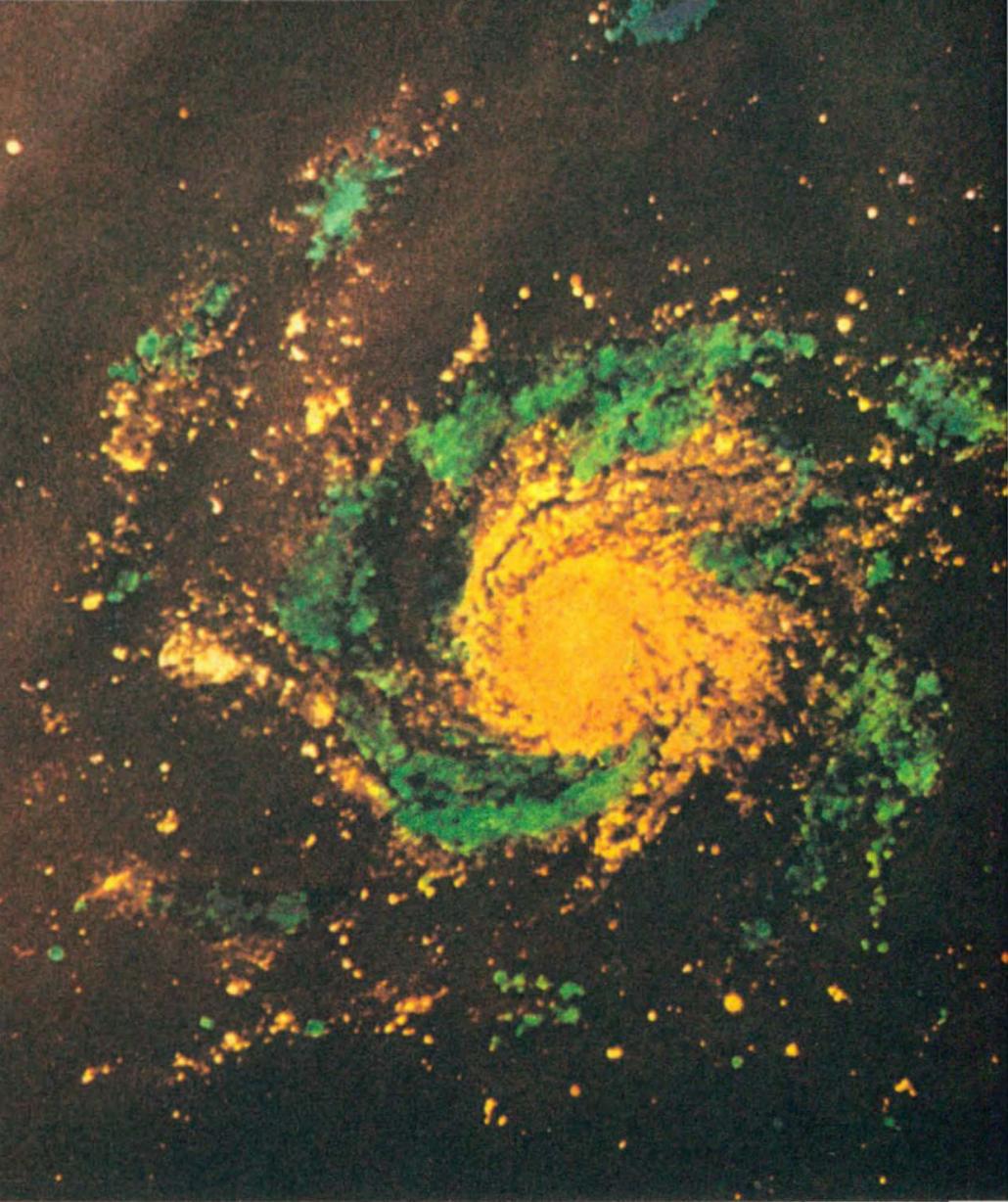


Galaxien findet man unter den elliptischen Systemen. Gegenwärtig scheint es, als ob die kleinsten Objekte eine absolute fotografische Helligkeit von -9^m aufweisen, während der entsprechende Wert der Riesensysteme im fotografischen Bereich etwa -23^m ausmacht. Diese Lichtleistung entspricht dem mehr als Hundertmilliardenfachen der Lichtleistung unserer Sonne. Die Spiralnebel bilden eine viel homogenere Gruppe als die elliptischen Systeme. Die hellsten unter ihnen haben eine Helligkeit von -21^m , die lichtschwächsten dagegen von -15^m . Auffallend ist, daß der Helligkeitsbereich der Spiralgalaxien nur sechs Größenklassen überstreicht, der der elliptischen Sternsysteme demgegenüber 14 Größenklassen. Die absoluten Helligkeiten der irregulären Sternsysteme bewegen sich in engeren Grenzen, und zwar sind sie zwischen -13^m und -18^m eingeeengt. Da diese Galaxien nicht nur eine geringe Flächenhelligkeit besitzen, sondern auch eine ungeordnete Struktur aufweisen, kann man sie verhältnismäßig schwer erkennen.

Die charakteristischen Sterntypen in den Galaxien

Bereits bei der Behandlung des Milchstraßensystems haben wir dargelegt, daß die Sterne in Populationen eingeteilt werden und diese Einteilung sicherlich auch in einer Beziehung zum Alter der Himmelskörper steht. Welches Bild ergibt sich in dieser Hinsicht bei den fernen Sternsystemen?

Aus den bisherigen Kapiteln geht hervor, daß die elliptischen Systeme wesentlich weniger interstellare Materie aufweisen als die Spiralgalaxien. Wir wissen aber, daß innerhalb unserer Galaxis das Fehlen von interstellarem Gas und Staub nur für die Kugelsternhaufen charakteristisch ist. Das sind Sternzusammenballungen, die aus typischen Objekten der alten Halo-Population oder extremen Population II bestehen. Wir sind deshalb nicht überrascht von der durch detaillierte Untersuchungen gestützten Behauptung: Der überwiegende Teil der Sterne der elliptischen Galaxien sind mehrere Milliarden Jahre alte Objekte der Population II. Bei der Untersuchung der Spi-



Falschfarbenbild einer Spiralgalaxie (M 101)

ralnebel hat es sich herausgestellt, daß sie im wesentlichen ähnlich aufgebaut sind wie das Milchstraßensystem. Die Spiralarme, die Ursache ihrer Bezeichnung sind, sind ausgesprochen junge Gebilde, die ausschließlich aus Objekten der Population I bestehen. In den übrigen Bereichen

der Spiralgalaxien herrschen die älteren Objekte der Population I, der Scheibenpopulation sowie der Zwischenpopulation II vor. Damit haben wir auch schon verraten, daß die in ihnen beobachtbaren unermeßlichen Mengen an interstellarem Gas und Staub entlang der Symmetrieebene ebenso in den Spiralarmlen konzentriert sind wie in unserer Galaxis. In den irregulären Sternsystemen findet man keine Himmelskörper der Population II, sehr häufig sind dagegen die veränderlichen Sterne vom Typ Delta Cephei, die Mitglieder der Population I sind. Alles deutet darauf hin, daß diese Systeme zu den jüngsten gehören.

Die Masse der Galaxien

Obwohl sich diese Systeme in einer kaum vorstellbaren Entfernung von uns befinden, haben wir dennoch erstaunlich viele Angaben darüber, welche Masse sie besitzen. Die entsprechenden Berechnungen basieren auf der Untersuchung des Spektrums der jeweiligen Galaxie. Aus der Linienverschiebung an verschiedenen Orten innerhalb einer Galaxie kann man die Winkelgeschwindigkeiten des Systems als Funktion der vom Galaxienkern aus gemessenen Entfernung ermitteln, woraus man unter bestimmten Annahmen die Masse der gesamten Galaxie errechnen kann. Ist eine Galaxie zu lichtschwach, um sie so, ins einzelne gehend, untersuchen zu können, dann kann man die Masse nur abschätzen, wenn das betreffende Objekt einer Galaxiengruppe angehört. In einem solchen Fall muß man die Radialgeschwindigkeiten aller Galaxien dieser Gruppe bestimmen, und als Ergebnis dynamischer Berechnungen erhält man dann die Gesamtmasse dieser Gruppe. Diese wird dann – gegebenenfalls unter Berücksichtigung der scheinbaren Helligkeiten – durch die Anzahl der Galaxien dieser Gruppe »geteilt«. Zahlenmäßig ergeben sich für die Massen der verschiedenen Galaxientypen folgende Werte:

Elliptische Galaxien	Spiralgalaxien	Irreguläre Galaxien
$(10^7 \dots 10^{13}) M_{\odot}$	$(10^9 \dots 4 \cdot 10^{11}) M_{\odot}$	$(10^8 \dots 3 \cdot 10^{10}) M_{\odot}$

Man erkennt, daß ähnlich wie bei der absoluten Helligkeit auch die Massen der elliptischen Systeme den weitesten Bereich überstreichen. Eine andere beachtenswerte Tatsache besteht darin, daß die irregulären Galaxien die Systeme mit der kleinsten durchschnittlichen Masse darstellen. Und drittens dürfen wir nicht unbeachtet lassen, daß die obere Grenze der Masse der Spiralnebel die Gesamtmasse des Milchstraßensystems kaum überschreitet. Das bedeutet, daß unsere Galaxis eine der gewaltigsten ihrer Gattung, wenn auch nicht die größtmögliche ist.

Schließlich sei noch der Gehalt der Galaxien an neutralem interstellarem Wasserstoff in Prozent ihrer Gesamtmasse angegeben:

Galaxientyp	M_{H}/M (in %)	Mittlere Streuung
E	0,0	—
Sa	2,0	± 2
Sb	5,0	± 2
Sc, Sd	10,0	± 2
Im	22,0	± 2

Wie wir wissen, besteht die interstellare Materie vorwiegend aus Wasserstoff, so daß die in der Tabelle angeführten Werte charakteristische Mengen der nichtstellaren Materie in den verschiedenen Systemen darstellen.

Die Radiostrahlung der Galaxien

Ähnlich wie bei unserem Milchstraßensystem konnte man die Radiostrahlung vieler Galaxien in der Linie des neutralen Wasserstoffs bei der Wellenlänge von 21 cm beobachten. Nur die elliptischen Galaxien, die fast keine interstellare Materie enthalten und die nur wenig interstellare Materie aufweisenden linsenförmigen Systeme machen in der Hinsicht eine Ausnahme.

Bei einem Teil der Galaxien konnte mit Hilfe großer Radioteleskope auch eine kontinuierliche Radiostrahlung wahrgenommen werden. Da die Intensitätsverteilung dieser Strahlung in Abhängigkeit von den Wellenlängen sich im allgemeinen nicht als Temperaturstrahlung erklären

ließ, wurde sie als nichtthermische Radiostrahlung interpretiert. Demgegenüber ist die thermische Komponente der Radiostrahlung, die sich aus der Summe der von den ionisierten interstellaren Wasserstoffgebieten ausgehenden Radioemission zusammensetzt, meist zu vernachlässigen. Bei den meisten Galaxien ist die Intensität der Radiostrahlung um mehrere Größenordnungen geringer als die der Strahlung im optischen Bereich. Meistens geht die nichtthermische Radiostrahlung einer Galaxie von ihrem Kern aus, häufig – wie beim Andromedanebel – ist das gesamte System in einen Radiohalo eingehüllt. Die intensivste Radiostrahlung emittieren jedoch jene Galaxien, bei denen vermutlich explosionsartige Prozesse ablaufen. Ein ähnlich starker Radiostrahler ist übrigens auch der Kern des Milchstraßensystems. Diese kontinuierliche Radiostrahlung der extragalaktischen Objekte wird durch die Bewegung elektrisch geladener Teilchen in starken Magnetfeldern verursacht. Da eine ähnliche Strahlung auch in den großen Teilchenbeschleunigern auftritt, bezeichnet man diese Radiostrahlung als Synchrotronemission.

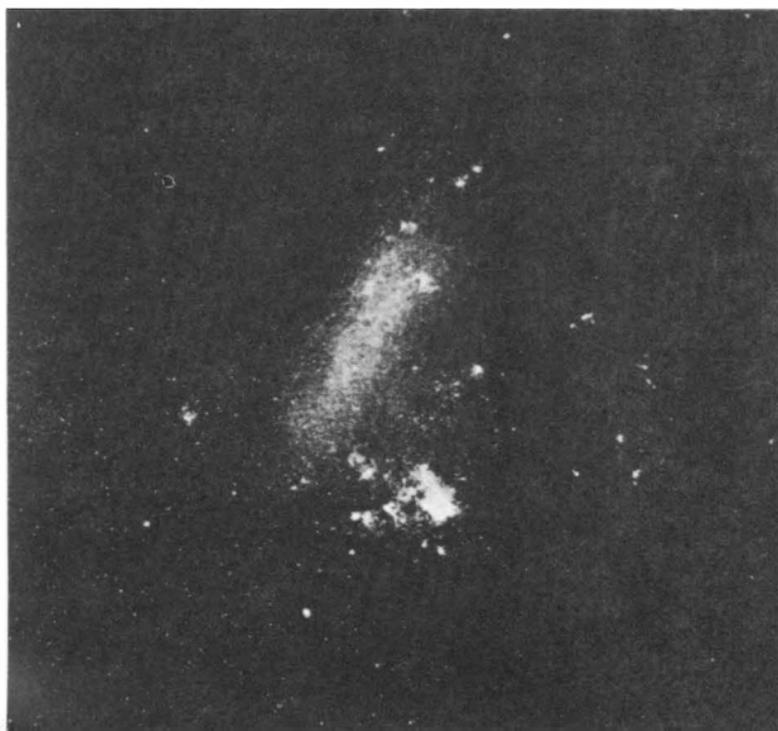
Die bekanntesten Galaxien

Die Große Magellansche Wolke ist das hellste aller sich außerhalb der Milchstraße befindenden Objekte; ihre scheinbare Helligkeit im visuellen Bereich beträgt $+0^m.5$. Man kann sie deshalb auch mit dem bloßen Auge gut erkennen. Da auch ihre nördlichsten Teile unter einer Deklination von -60° stehen, ist sie von Europa aus nicht zu sehen. Wir brauchen uns daher nicht zu wundern, wenn sie trotz ihrer großen Helligkeit erst im 11. Jahrhundert erstmals beschrieben wurde, und zwar von arabischen Astronomen, die viel weiter nach dem Süden kamen als ihre griechischen Vorgänger. Über die Entfernung der Großen Magellanschen Wolke wurde viel diskutiert; zuletzt wurde sie von *S. Gaposchkin* mit großer Genauigkeit bestimmt. Er fand auf den mehr als tausend Aufnahmen, die zwischen 1893 und 1961 gemacht worden waren, 1 830 veränderliche Sterne. Da sich unter diesen 1 28 Cepheiden befinden, gelang es, unter Verwendung der Beziehung

zwischen Periode und absoluter Helligkeit, die Entfernung des Objekts mit ungewöhnlicher Genauigkeit zu berechnen. Sie ergab sich zu 50 kpc, während die absolute Helligkeit der Großen Magellanschen Wolke $-18^m.5$ beträgt. Besonders interessant ist der Stern HD 33579 (Spektraltyp A 2), der mit der absoluten Helligkeit -10^m der leuchtkräftigste aller bekannten Sterne ist. Der lineare Durchmesser dieses extragalaktischen Systems beträgt 11 kpc, also kaum ein Zehntel des Durchmessers unserer Galaxis. Beachtenswert ist die Tatsache, daß der Raum zwischen diesen beiden Systemen keineswegs leer ist, sondern sogar recht viele Sterne in dieser Zone zu finden sind. Glücklicherweise befinden sich darunter 105 veränderliche Sterne, deren absolute Helligkeiten bekannt sind, so daß man ihre Entfernungen ermitteln kann. Danach ist die Große Magellansche Wolke über eine »Brücke« mit einer hohen Materiedichte mit dem Milchstraßensystem verbunden.

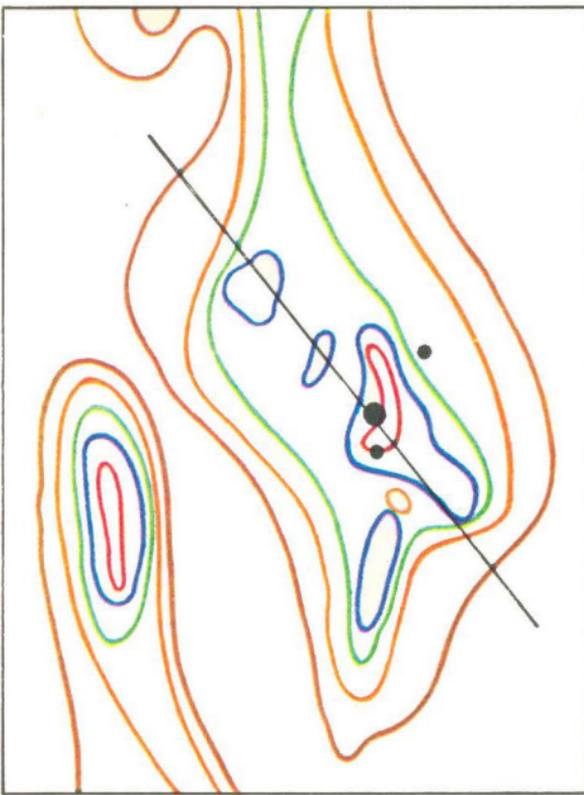
Die Kleine Magellansche Wolke ist eine gleichfalls mit bloßem Auge erkennbare Galaxie im nahen Süden und wurde ebenfalls von arabischen Astronomen erstmals

Die Große Magellansche Wolke, die scheinbar hellste aller Galaxien



beschrieben. Ihre scheinbare Helligkeit im sichtbaren Bereich beträgt $+1^m.5$. Besondere Bedeutung erlangte die Kleine Magellansche Wolke, nachdem im Jahre 1908 *H. Leavitt* 2 400 veränderliche Sterne in ihr entdeckt hatte, unter denen sich auch eine bedeutende Anzahl von Cepheiden mit Perioden zwischen 1 und 30 Tagen befindet, deren Untersuchung Miss Leavitt zur Formulierung der Perioden-Helligkeits-Beziehung veranlaßte. Damals hatte noch niemand daran gedacht, daß diese kleine, helle Wolke am südlichen Himmel nicht zu unserer Galaxis gehören könnte. Man glaubte, sie stelle eine hellere Sternwolke dar, die sich in einem fernerem Bereich des Milchstraßensystems befinde. *E. Hertzsprung*, der in Potsdam arbeitete, kam bei der näheren Untersuchung von Cepheiden bekannter Entfernung zu dem Schluß, daß die Kleine Magellansche Wolke mindestens 30 000 Lichtjahre von uns entfernt ist. Ein Jahr später gelangte der Amerikaner *H. N. Russell* unabhängig von Hertzsprung zum gleichen Ergebnis. Seitdem wurde der für die Kleine Magellansche Wolke erhaltene Entfernungswert mehrmals geändert. In neuerer Zeit hat ebenfalls *S. Gaposchkin* mit 66 kpc das genaueste Ergebnis erhalten. Daraus ergibt sich der Durchmesser der Kleinen Magellanschen Wolke zu 4,6 kpc. Mit unserer Galaxis ist sie über eine Sternenbrücke verbunden, in der 119 veränderliche Sterne identifiziert werden konnten. Bemerkenswerterweise überwiegen bis zu zwei Drittel der Strecke zwischen den beiden Sternsystemen die Cepheiden, darüber hinaus jedoch die veränderlichen Sterne vom Typ RR Lyrae. Die beiden Magellanschen Wolken befinden sich auf dem Teil der Milchstraße, der durch die Sternbilder Carina-Vela verläuft. Da in diesem Bereich nach bisherigen Erkenntnissen die Spiralstruktur offensichtlich kompliziert ist, nehmen einige Astronomen an, daß diese beiden unregelmäßigen Sternsysteme irgendwann aus dem Kern unserer Galaxis abgespalten wurden. Daß sie noch junge Gebilde darstellen, geht unter anderem aus der im Vergleich zum Milchstraßensystem viel größeren Anzahl an Cepheiden je Volumeneinheit hervor.

Der Andromedanebel (M31) ist das unserer Galaxis am nächsten stehende größere extragalaktische System. Diese

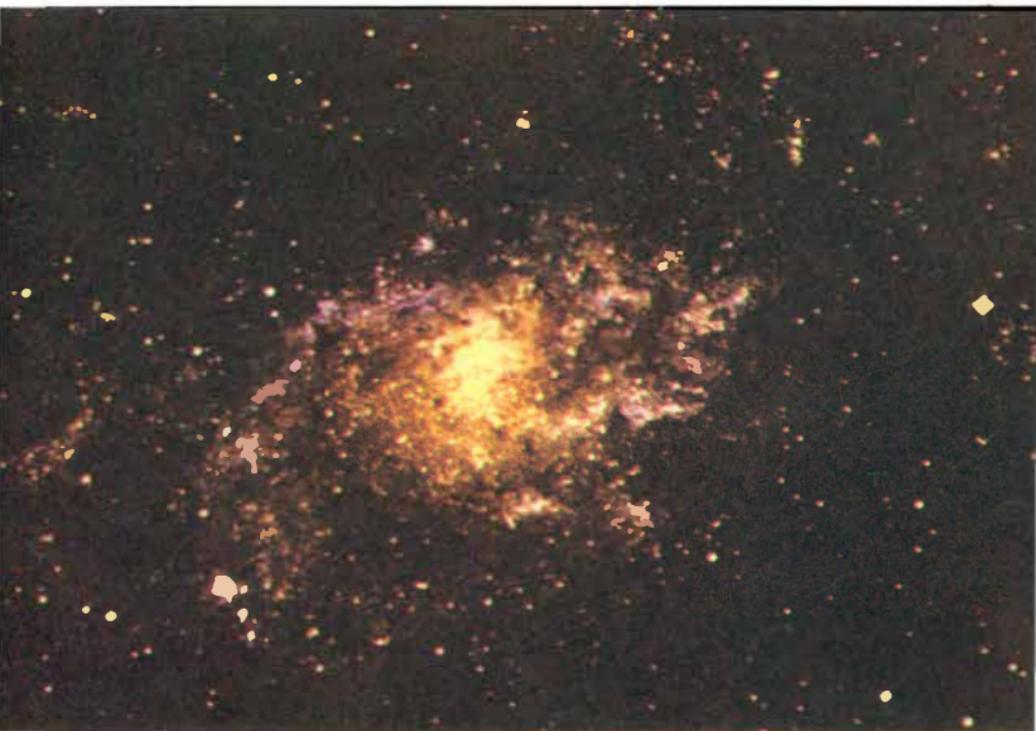


Die Radiokarte des Andromedanebels und seiner Umgebung

Spiralgalaxie ist das einzige extragalaktische Objekt, das man in Europa mit bloßem Auge beobachten kann. Auch der Andromedanebel wurde erstmals von arabischen Astronomen in die Sternkarte eingetragen. Von *Al-Suif* wurde er als kleiner Nebel angegeben, der im Jahre 905 u. Z. entdeckt worden war. Seine scheinbare visuelle Helligkeit beträgt $4^m.5$, sein mit unbewaffnetem Auge erkennbarer zentraler Bereich ist eine Ellipse mit einer Länge von ungefähr $0^\circ.7$. Der Andromedanebel wurde erstmals mit dem Fernrohr von *S. Marius* 1612 beobachtet, der folgendes von diesem Objekt notierte: »Er ist wie die Flamme einer Kerze hinter einer Hornplatte in der Nacht.« Recht spät erkannte man, daß es sich um eine Spiralgalaxie handelt; ihre dunklen Absorptionsbanden werden sogar erst 1874 erwähnt. Heute weiß man jedoch, daß der Andromedanebel dem Milchstraßensystem sehr ähnlich ist, obwohl er eine größere Masse hat. Er stellt ein Sternsystem vom Typ Sb dar, und zwar mit verhältnismäßig viel inter-

stellarer Materie. Sein Radius beträgt 20 kpc, seine Entfernung 690 kpc, d. h. zwei Millionen Lichtjahre. Die Rotationsachse des Andromedanebels schließt mit unserer Blickrichtung einen Winkel von 45° ein. Zu erwähnen wäre noch, daß die erste extragalaktische Supernova im Jahre 1885 im Andromedanebel entdeckt wurde. Radioastronomische Untersuchungen zeigten, daß die Scheibe des Systems von einem Halo umgeben ist, in dem man im optischen Bereich einzelne Sterne und Kugelsternhaufen erkennen kann. Der Radiokarte kann man auch entnehmen, daß die Radiostrahlung nicht von den gleichen Orten ausgesandt wird wie das sichtbare Licht. In den äußeren Partien des Halos befindet sich die kleine elliptische Galaxie M 32 in einer Entfernung von 680 kpc von uns; sie bildet mit dem Andromedanebel ein enges physikalisches System. M 32, ein Sternsystem der scheinbaren Helligkeit $8^m.2$, wurde am 29. Oktober 1749 entdeckt.

Der Triangulumnebel (M 33)

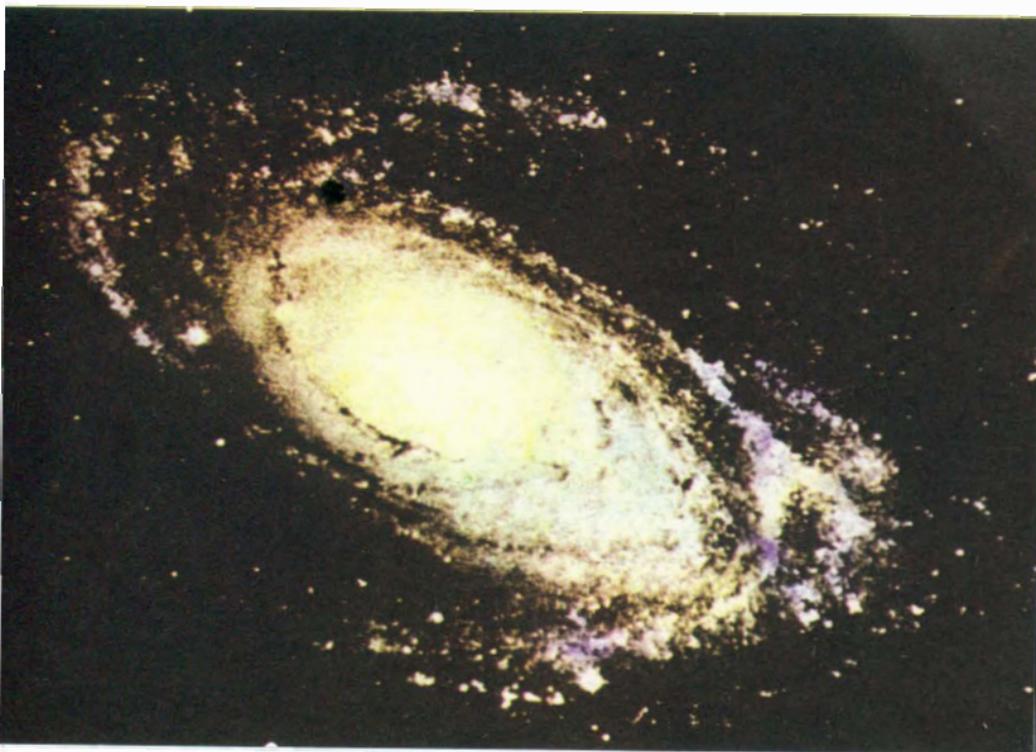


Der Triangulumnebel (M 33) erhielt seine Bezeichnung vom Sternbild Triangulum (Dreieck), in dem er zu sehen ist. Diese Spiralgalaxie des Typs Sc befindet sich in einer Entfernung von 720 kpc. Ihre visuelle Helligkeit beträgt 6^m8 . Entdeckt wurde der Triangulumnebel von Messier im Jahre 1765. Seine Rotationsachse schließt mit unserer Blickrichtung einen kleineren Winkel ein als bei M 31; seine Spiralarme fallen deshalb viel stärker auf. Der Triangulumnebel ist dem Spektraltyp A 7 zuzuordnen, sein Farbenindex $+0,20$ zeigt bereits an, daß er zu den bläuesten Spiralsystemen gehört. Seine Masse beläuft sich auf etwa das Achtmilliardenfache der Sonnenmasse.

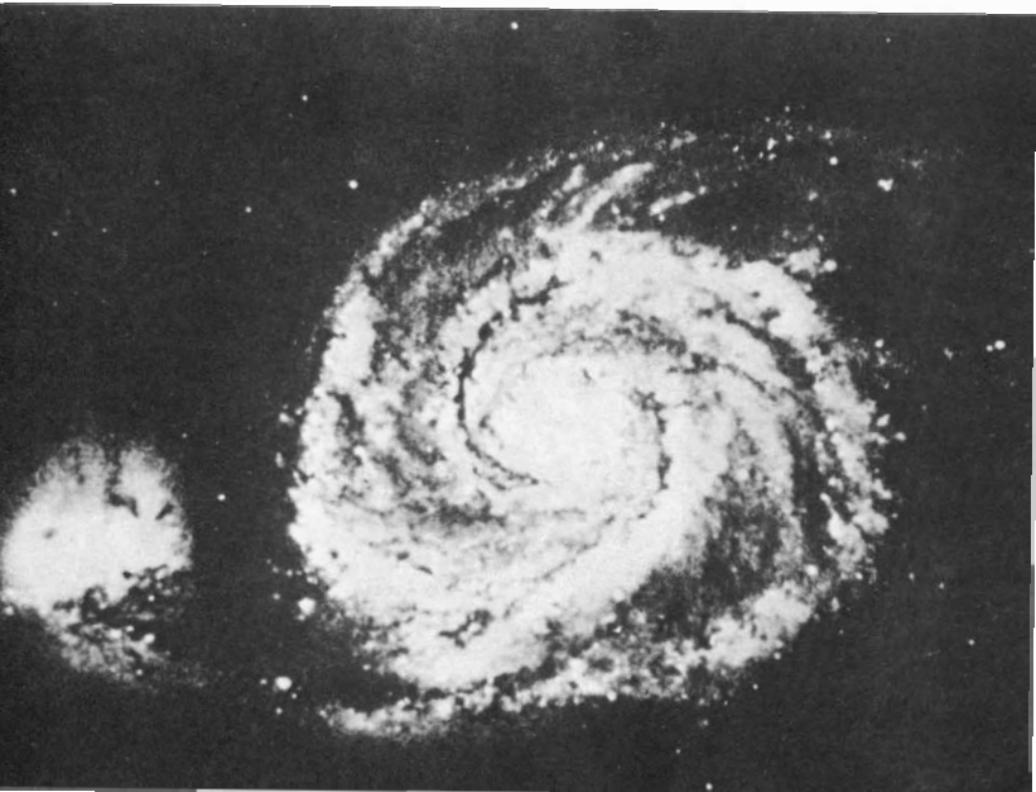
Der Wirbelnebel M 51 liegt im Sternbild Jagdhunde und ist dadurch bekannt, daß er das erste System darstellt, an dem eine Spiralstruktur festgestellt wurde. *F. E. Rosse* vermerkte im Frühjahr 1845 in seinem Protokoll: »Ich sehe Spiralkurven, die ein recht kompliziertes System darstellen.« Sechzehn Jahre später bezeichnet er bereits das beobachtete Objekt als charakteristischen Vertreter der Klasse der Spiralnebel. Auch hat Lord Rosse erkannt, daß der Wirbelnebel einen kleineren Begleiter besitzt. Die scheinbare Helligkeit von M 51 beträgt 8^m1 , seine Entfernung etwa 17 Millionen Lichtjahre.

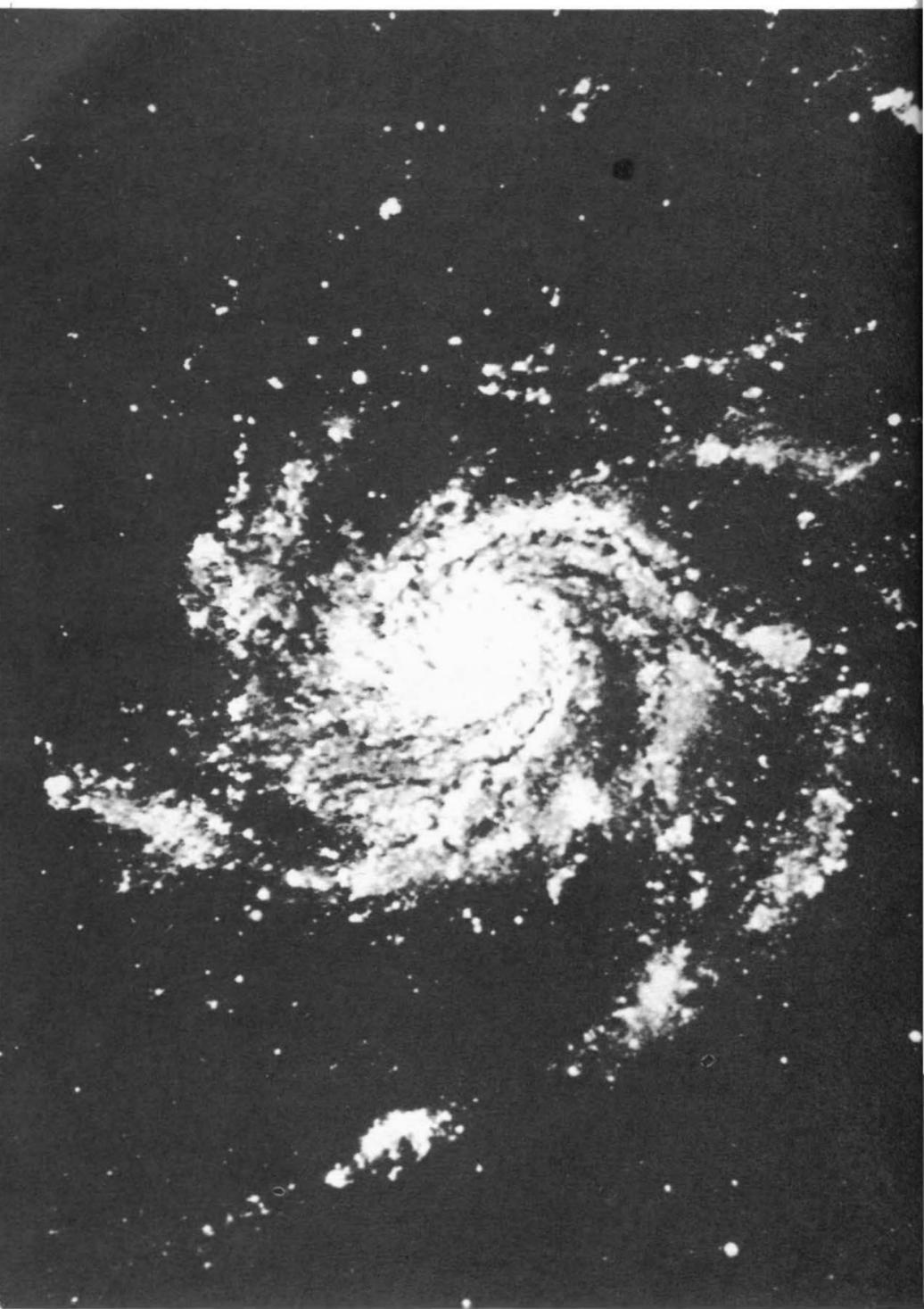
Die Spiralgalaxie M 81, ein Sternsystem vom Typ Sb mit der scheinbaren Helligkeit 7^m9 , befindet sich im Sternbild Großer Bär, etwa 8,5 Millionen Lichtjahre entfernt. Die Spiralgalaxie M 81 wurde im Jahre 1774 in der Silvesternacht von *Bode* entdeckt. Sie hat die absolute Helligkeit -21^m , gehört zum Spektraltyp G 3 und hat einen Farbenindex $+0,53$. Sie ist von einem ähnlich großen Halo umgeben wie M 51, der durch seine Radiostrahlung erfaßt werden konnte. Die Masse der Spiralgalaxie M 81 beträgt etwa 250 Milliarden Sonnenmasse, ihre Dichte $0,1 M_{\odot}/\text{pc}^3$. Damit stellt sie eines der dichtesten Spiralsysteme dar.

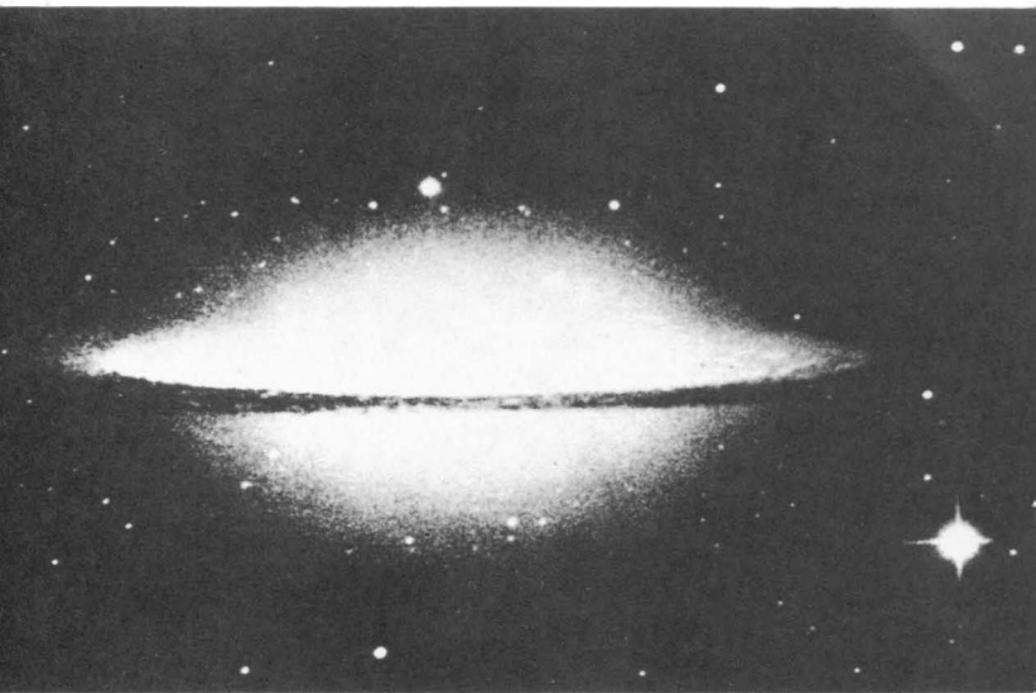
Die Spiralgalaxie M 101 ist im Sternbild Großer Bär zu suchen. Bei ihr handelt es sich um ein Sternsystem vom Typ Sc mit einer scheinbaren Helligkeit von 7^m9 . Sie wurde 1781 von *Méchain* entdeckt. *Lord Rosse* erkannte,



Die Spiralgalaxie M 81
Die Spiralgalaxie M 51







Der Sombreronebel (M 104)

daß es sich um eine Spiralgalaxie handelt. Sie hat einen Winkeldurchmesser von fast einem halben Grad. Ihre Entfernung von uns beträgt ungefähr 4 Millionen pc. Sie gehört zur Spektralgruppe F 8 und hat mit +0,16 den kleinsten Farbenindex von allen Sternsystemen des Messierkatalogs. Die absolute Helligkeit der Spiralgalaxie M 101 wurde zu -20^m 1 ermittelt.

Der Sombreronebel (M 104), eine Spiralgalaxie des Typs Sb, befindet sich im Sternbild Jungfrau. Ihre Rotationsachse schließt mit unserer Blickrichtung einen recht großen Winkel ein. Demzufolge verdeckt die entlang ihrer Symmetrieebene angeordnete interstellare Staubmaterie die weiter innen liegenden Sterne. Dadurch nimmt das ganze System eine Form an, die an einen Sombrero mit einem riesigen Rand erinnert. Die scheinbare Helligkeit dieses Nebels beträgt 8^m 3, seine Entfernung 41 Millionen

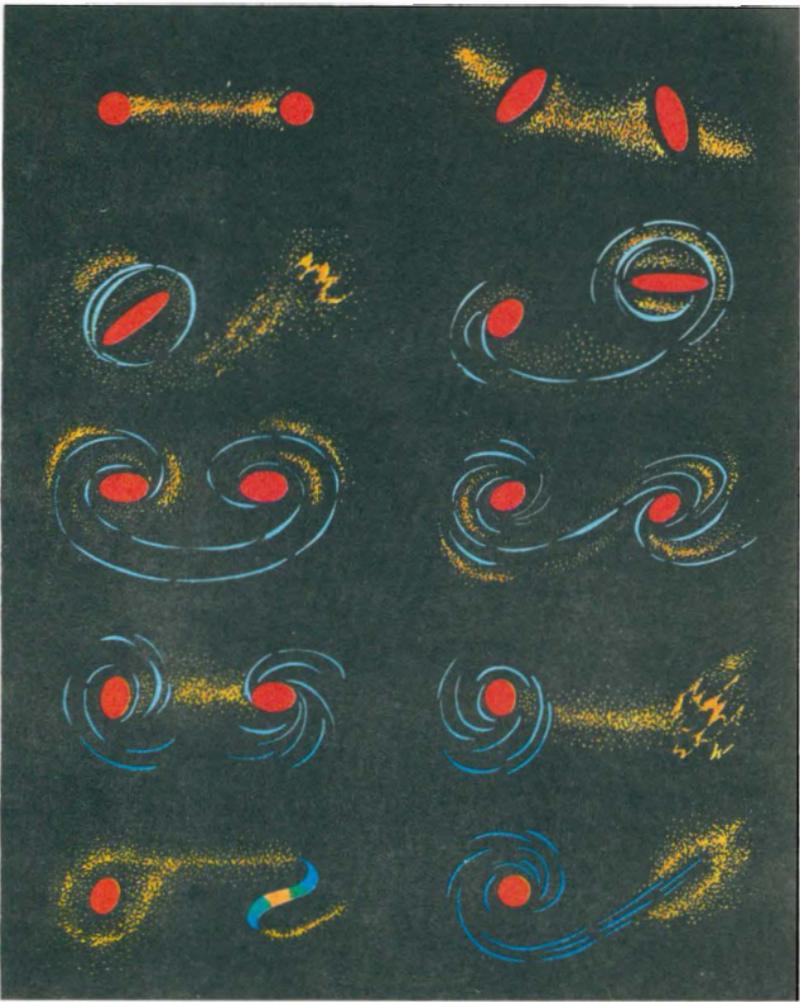
Die Spiralgalaxie M 101 im Sternbild Großer Bär

Lichtjahre. Der Sombrero-Nebel war das erste Objekt, in dessen Spektrum eine starke Rotverschiebung beobachtet werden konnte. Im Jahre 1913 war es *V. M. Slipher* gelungen, nachzuweisen, daß sich das Objekt 104 mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/s von unserem Milchstraßensystem entfernt. Später erkannte man den ähnlich wie bei der Galaxis und dem Andromedanebel aus vielen, vielen Kugelhaufen bestehenden Halo. Die im roten Bereich gemachten Aufnahmen haben auch verraten, daß der kugelsymmetrische Halo auch sehr viele Sterne der Population II enthält.

Die Verteilung der Galaxien

Mit zunehmender Einführung der Astrophotographie gelang es, immer mehr lichtschwache Galaxien festzuhalten, darunter auch eine große Anzahl von Doppel-, Dreifach- oder Mehrfachsystemen.

Am häufigsten sind die *Doppelgalaxien*, in denen zwischen den beiden Sternsystemen mehr oder weniger starke physikalische Beziehungen bestehen. Das erkennt man am besten daran, daß die einzelnen Komponenten offenbar einen gemeinsamen Masseschwerpunkt umlaufen. Es wurden auch viele Doppelgalaxien beobachtet, deren Mitglieder über schwache »Brücken« miteinander verbunden sind. Die Formen der infolge der starken Wechselwirkungen auftretenden Materieströme können sehr vielfältig sein. Obwohl es bereits mehr oder weniger gelungen ist, die Gas-, Staub- und Sternformationen zu klassifizieren, weiß man bis heute noch nicht genau, welche Strukturbeziehungen sich unter bestimmten physikalischen Bedingungen herausbilden müssen. Die Art dieser Beziehungen ist mit Sicherheit davon abhängig, wieweit die beiden Komponenten einer Doppelgalaxie voneinander entfernt sind, von welchem Typ sie sind, welche Masse sie haben und wie groß ihr Durchmesser ist, möglicherweise auch davon, ob sie ein Magnetfeld haben und welche Stärke dieses Magnetfeld besitzt. Treten z. B. Spiralgalaxien miteinander in Wechselwirkung, gehen oft die Arme der beiden Spiralsysteme ineinander über.



Schematische Darstellung einiger häufig auftretender Doppelgalaxien

Gelegentlich hat man den Eindruck, als ob zwischen zwei Systemen eher eine Abstoßung als eine Anziehung wirksam ist, vor allem dann, wenn die beiden Systeme der Doppelgalaxie sehr nahe beieinander stehen, wenn sie zusammenzustößen scheinen. Aus der miteinander verschlungenen Zentralmasse solcher Paare werden gewaltige antennenartige Materieströme herausgeschleudert, oft bis in sehr große Entfernungen. Die Länge derartiger Gebilde erreicht häufig 40 bis 50 kpc und übertrifft manchmal sogar die Größe einzelner Galaxien. Eines der be-

kanntesten Doppelsysteme sind die Galaxien NGC 4038 und NGC 4039.

Bei den Systemen, die aus mehreren Galaxien bestehen, gibt es einen besonderen Typ: die von *H. C. Arp* entdeckten *Kettengalaxien*. Der amerikanische Astronom beobachtete auf einzelnen Aufnahmen, die mit dem großen Spiegelteleskop des Observatoriums auf dem Mount Wilson gemacht wurden, Aufreihungen von vier bis sechs meist elliptischen Galaxien. Viele Astronomen sind der Ansicht, daß diese Gruppierungen vielleicht bei der Beantwortung der Frage nach der Entstehung der Galaxien helfen können. Eine – allerdings spekulative – Erklärung geht davon aus, daß eine Muttergalaxie mit einer gewaltigen Masse – nach einem bis jetzt unbekanntem Mechanismus – explosionsartig Sekundärgalaxien auswirft.

Es gibt auch Ansammlungen oder Assoziationen von Galaxien, in denen man nicht nur ein oder zwei, sondern mehrere hundert oder sogar mehrere tausend Sternsysteme beobachten kann. Diese Materiewolken mit Ausdehnungen von mehreren Megaparsec werden als *Galaxienhaufen* bezeichnet.

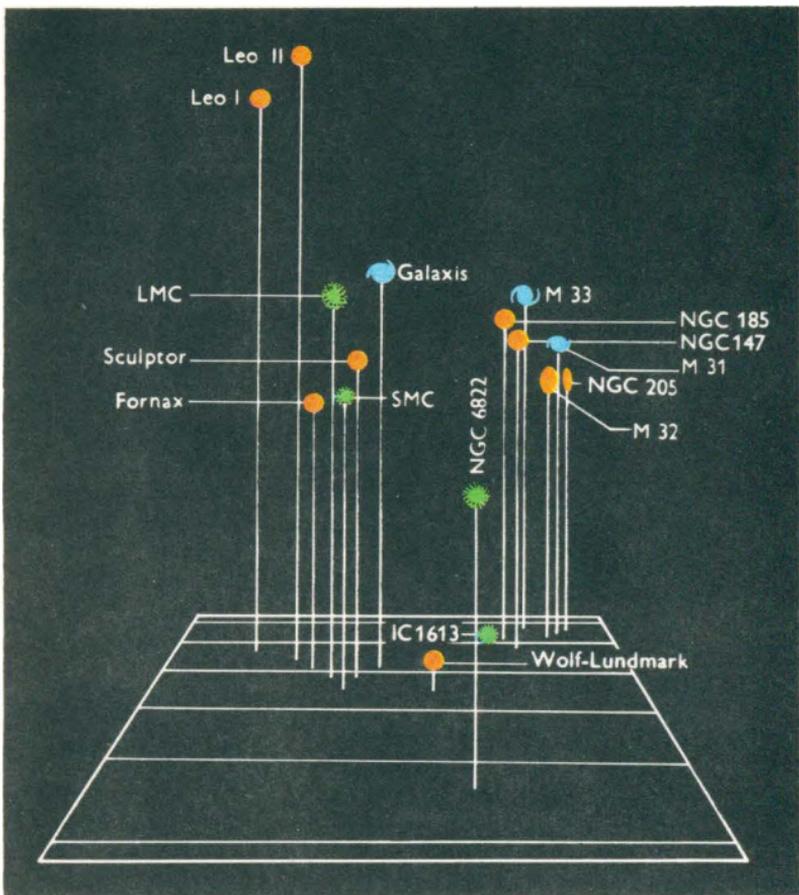
Bei der Auswertung von Himmelsaufnahmen fiel auf, daß in manchen Bereichen am Himmel die Anzahl der Galaxien je Flächeninhalt die der Sterne übertrifft. Diese überraschende und auf den ersten Blick unwahrscheinlich erscheinende Tatsache kann der Astronomie unüberschaubare Perspektiven eröffnen. Man muß überlegen: Wir erfassen mit unseren Teleskopen mehr Galaxien im Universum, als es Sterne in unserem Milchstraßensystem gibt.

Untersuchen wir nun – ausgehend vom Milchstraßensystem – die Verteilung der Sternsysteme! Die unserem Milchstraßensystem am nächsten liegende Doppelgalaxie besteht aus der Kleinen und der Großen Magellanschen Wolke. Diese beiden bilden zusammen mit unserer Galaxis ein recht lockeres Dreiersystem (Triplett). Auch der Andromedanebel bildet mit seinen beiden Satelliten – M 32 und NGC 205 – ein aus drei Komponenten bestehendes System. An dieses Triplett schließt sich eine weiter entfernt von ihm befindliche schöne Spiralgalaxie an, der Triangulumnebel im Sternbild Dreieck (Triangulum). Diese



Die Galaxiengruppe im Sternbild Andromeda (M 31, M 32, NGC 205)

zunehmend auf vier Systeme angewachsene Gruppe hat noch zwei weiter entfernt liegende Begleiter, die beiden kleinen elliptischen Galaxien NGC 147 und NGC 185. Sowohl das Triplet Milchstraßensystem, Kleine und Große Magellansche Wolke als auch die aus sechs Komponenten bestehende Andromedagruppe – hinzu kommen noch mehrere kürzlich entdeckte kleine Objekte – gehören einem größeren extragalaktischen System an. Bei Berücksichtigung mehrerer Einzelgalaxien hat diese *Lokale Gala-*



Lage der Galaxien innerhalb der Lokalen Gruppe

xiengruppe (LGG) nur insgesamt rund zwei Dutzend Mitglieder. Da diese genügend weit voneinander entfernt liegen, sind auch die Wechselwirkungen zwischen ihnen nicht sehr stark. Bisher gelang es, in der Lokalen Gruppe lediglich im intergalaktischen Raum zwischen Milchstraßensystem und den beiden Magellanschen Wolken Sterne zu finden. Da der Durchmesser der LGG ungefähr 7 Millionen Lichtjahre beträgt und, vor allem, weil es innerhalb dieses Bereichs nur so wenige Galaxien gibt, kann man behaupten, daß sie zu den Zwergen unter den Galaxienhaufen gehört. Es wurde nämlich festgestellt, daß es ähnlich ausgedehnte, jedoch mehr Mitglieder zählende Gruppen – Haufen – in den Sternbildern Bildhauer (Werk-

statt) (Sculptor), Großer Bär (Ursa Major), Löwe (Leo), Ofen (Fornax) und in vielen anderen Himmelsgegenden gibt. Die Galaxien in diesen Sternbildern zeigen bemerkenswerte Analogien. In den dichten und viele Einzelsysteme umfassenden Haufen, so z. B. im Haufen Fornax I (im Sternbild Ofen), existieren vorwiegend elliptische und linsenförmige Galaxien, die nur mit einigen Spiralgalaxien »durchsetzt« sind. Demgegenüber herrschen in den lockeren, unregelmäßigeren Anhäufungen, wie sie auch die Lokale Galaxiengruppe darstellt, Spiralsysteme und den Magellanschen Wolken ähnliche unregelmäßige Systeme vor, zu denen sich nur einige riesige elliptische Systeme oder spindelförmige Galaxien gesellen.

Die Unterschiede in den relativen Häufigkeiten der Typen weisen zweifellos darauf hin, daß anfangs die Bedingungen für die Entstehung der Galaxien in den unterschiedlichen Gebieten verschieden waren. Aus der beobachteten Geschwindigkeitsverteilung der einzelnen

Galaxienhaufen im Sternbild Herkules





Die Galaxiengruppe M 81

Mitglieder in den Gruppen zog der Präsident der Armenischen Akademie der Wissenschaften, *V. A. Ambarzumjan*, die Schlußfolgerung, daß die einzelnen Galaxien vor kosmisch nicht allzulanger Zeit entstanden sein müssen, weil die Gruppen offenbar keine dynamisch stabilen Systeme darstellen und infolgedessen nicht über eine lange Zeit bestehen bleiben können. Nach seinen Berechnungen haben solche Gruppen eine Lebensdauer von höchstens einigen Milliarden Jahren. Das bedeutet gleichzeitig, daß

die einzelnen Mitglieder – die Galaxien – auch höchstens so alt sein können, jedoch darf man nicht übersehen, daß die Beobachtungsgrundlagen teilweise nicht sicher genug sind und auch andere Schlußfolgerungen zulassen.

Außerdem wurden von den Astronomen auch Galaxienhaufen anderer Typen beobachtet. Sie umfassen im allgemeinen mehrere hundert oder mehrere tausend Galaxien, die bis zu einem gewissen Grade kugelsymmetrisch angeordnet sind. In den Zentren solcher Haufen ist die Dichte am höchsten. Durch die Analyse der Spektren der Mitglieder dieser Haufen konnten die Geschwindigkeiten der einzelnen Sternsysteme bestimmt werden. Nach den Berechnungen der auf den Masseschwerpunkt des betreffenden Haufens bezogenen Geschwindigkeiten sind diese gewaltigen Galaxienanhäufungen so stabil, daß sie noch über viele Milliarden Jahre beobachtet werden können, wenn keine gravierenden Veränderungen eintreten. Die Stabilität der Haufen wird – wenigstens für viele dieser Objekte – durch ihre Kugelsymmetrie nahegelegt. Es gelang außerdem, noch eine andere interessante und wichtige Gesetzmäßigkeit festzustellen. Die hellsten Mitglieder der viele Sternsysteme umfassenden Galaxienhaufen haben nahezu die gleiche absolute Helligkeit. In der folgenden Tabelle sind die absoluten visuellen Helligkeiten der hellsten, der fünftellsten und der zehntellsten Glieder von sieben Galaxienhaufen zusammengestellt.

Die Radialgeschwindigkeiten weisen darauf hin, daß die Homogenität der absoluten Helligkeiten auch für große

Haufen	M_{v1}	M_{v5}	M_{v10}	Radialgeschwindigkeit (in km/s)
Virgo	-22 ^m 2	-21 ^m 4	-21 ^m 1	1 140
Coma Berenices	-22 ^m 7	-21 ^m 8	-20 ^m 8	6 660
23 22 - 14 25	-21 ^m 6	-20 ^m 8	-20 ^m 3	13 200
01 06 - 15 36	-22 ^m 1	-20 ^m 5	-20 ^m 3	15 800
12 39 + 18 52	-22 ^m 9	-21 ^m 6	-21 ^m 3	21 500
00 25 + 22 33	-22 ^m 1	-21 ^m 5	-21 ^m 2	47 800
01 38 - 18 40	-22 ^m 0	-21 ^m 3	-21 ^m 2	51 900
Durchschnitt	-22 ^m 2	-21 ^m 3	-20 ^m 9	—

Entfernungen gilt; dadurch können die Ergebnisse zur Bestimmung der Entfernung von Galaxienhaufen verwendet werden. Man braucht also nur festzustellen, welches die hellsten Galaxien des untersuchten Haufens sind und wie groß ihre scheinbare Helligkeit ist. Durch einen Vergleich der dabei erhaltenen Werte mit der in der Tabelle angegebenen mittleren absoluten Helligkeit erhält man die Entfernung des Systems. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß es auch bis zu sehr großen Entfernungen zuverlässige Ergebnisse liefert. Es kann bis zu 1 000 Megaparsec, d. h. bis zu mehr als 3 Milliarden Lichtjahren, angewendet werden. Jedoch muß bei diesen Abständen die Verfälschung der Helligkeiten durch die Rotverschiebung berücksichtigt werden.

Wenn bereits Haufengalaxien, die sich in so großen Entfernungen befinden, räumlich eingeordnet werden können, kann man berechtigt fragen, ob diese Galaxiengruppen und -haufen nicht irgendeine Anordnung aufweisen. Betrachten wir als erstes die Umgebung der Lokalen Gruppe, zu der das Milchstraßensystem gehört. Wir wissen, daß diese Gruppe einen Durchmesser von einigen Millionen Lichtjahren hat. Sie kann von ähnlichen Gruppierungen in ihrer Nähe gut abgegrenzt werden, so z. B. von der Sculptorgruppe am südlichen Sternhimmel (die nach dem Sternbild Bildhauer benannt wurde, in dem man sie beobachten kann) und von der Gruppe um M 81 im Sternbild Großer Bär am nördlichen Sternhimmel. Diese Gruppen sind von der Lokalen Gruppe etwa 7 bzw. 8 Millionen Lichtjahre entfernt.

In einem Raum um die Lokale Galaxiengruppe mit einem Radius von 50 Millionen Lichtjahren konnten bis jetzt etwa 50 Gruppen und Haufen identifiziert werden. Die beiden umfangreichsten Galaxienanhäufungen in dieser Zone sind der Fornaxhaufen am südlichen Himmel und der Virgohaufen, der am nördlichen Sternhimmel zu sehen ist. Trägt man diese in der Nachbarschaft der Lokalen Gruppe liegenden Gruppierungen in die Himmelskarte ein, dann fällt auf, daß sie sich anscheinend entlang eines Großkreises anordnen. *E. B. Holmberg* (1937) und später *G. de Vaucouleurs* (1953) äußerten die Ansicht, diese Verteilung könnte darauf zurückzuführen sein, daß diese Gruppen zu

einem gewaltigen *Superhaufen* gehören, der ähnlich wie das Milchstraßensystem abgeflacht ist, wodurch für uns die Verdichtung längs der Symmetrieebene sichtbar wird. Durch diese Symmetrieebene wird auch der *supergalaktische Äquator* festgelegt, den man zweckmäßigerweise als Basis für ein Koordinatensystem wählt, wenn man Untersuchungen über die Verteilung von Galaxien anstellt. Die supergalaktische Länge wird von einem Punkt im Sternbild Cassiopeia aus gezählt. In dieser Richtung liegt einer der beiden Schnittpunkte zwischen galaktischem und supergalaktischem Äquator. Dort und in der entgegengesetzten Richtung findet man allerdings keine Galaxiengruppen und -haufen, weil die absorbierenden Gas- und Staubwolken der Milchstraße eine Beobachtung der lichtschwachen Objekte unmöglich machen. Aus der Abplattung des Superhaufens muß man schließen, daß das System um seine Achse rotiert. Unsere Galaxis liegt gemeinsam mit der Lokalen Gruppe weit entfernt vom Zentrum des Superhaufens am Rande des Systems, um das sie sich vermutlich mit einer Geschwindigkeit von annähernd 500 km/s bewegt. Der Mittelpunkt des Superhaufens befindet sich in der Nähe des Virgohaufens, mindestens 60 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.

Es gelang auch, die Gesamtmasse des Superhaufens abzuschätzen. Sie ergab sich zu $2 \cdot 10^{48}$ g; dieser Wert entspricht 10^{15} Sonnenmassen. Die Anzahl der Galaxien, aus denen dieses große System besteht, liegt wahrscheinlich bei einigen zehntausend. Der Durchmesser unseres Superhaufens dürfte 100 Millionen Lichtjahre betragen, seine Dicke demgegenüber »lediglich« 20 Millionen Lichtjahre. Mit Hilfe dieser Daten kann man die mittlere Dichte im Superhaufen zu 10^{-29} g/cm³ berechnen. Obwohl dieser Wert sehr niedrig ist, liegt er interessanterweise dennoch viel höher als die durchschnittliche Materiedichte im heute überschaubaren Bereich des Universums.

Zum Superhaufen gehören die meisten Galaxien, die scheinbar heller sind als 16^m oder 17^m. Wenn man also weiter entfernte Bereiche in Himmelskarten erfassen möchte, dann muß man neue Galaxienzählungen vornehmen, bei denen auch die lichtschwächsten Objekte berücksichtigt werden. Die wohl sorgfältigsten Untersuchungen

in dieser Hinsicht wurden am Lick-Observatorium durchgeführt; dabei wurden alle Galaxien erfaßt, die scheinbar heller als 19^m sind. Die Ergebnisse wurden in Sternkarten durch Niveaulinien gekennzeichnet, wobei die Orte mit gleichen Galaxienanzahlen je Quadratgrad miteinander verbunden wurden. Diese Karten wurden für drei Viertel des von Kalifornien aus sichtbaren Himmels angefertigt. Man kann ihnen nicht nur die Verteilung der interstellaren Wolken – wegen der Staubabsorption – entnehmen, sondern auch die Tatsache, daß sich auch in anderen Gebieten des Weltalls Galaxienhaufen zu gewaltigen Gruppen konzentrierten. Auf den Karten des Lick-Observatoriums erkennt man mehrere Galaxienkonzentrationen ähnlicher Größe von der des lokalen Superhaufens. Eine davon ist die sehenswerte große Galaxienansammlung im Sternbild Herkules, deren scheinbarer Durchmesser 20° beträgt. Berücksichtigt man, daß sie 110 Megaparsec von uns entfernt ist, erhält man einen wirklichen Durchmesser von 130 Millionen Lichtjahren. G. Abell ist bei der Auswertung der Aufnahmen, die mit dem Schmidt-Spiegelteleskop des Mt.-Palomar-Observatoriums gemacht wurden, zu ähnlichen Schlußfolgerungen gelangt. Er fand, daß die Verteilung der Zentren von Galaxienhaufen am Himmel sehr ungleichmäßig ist. Durch eine statistische Analyse konnte er nachweisen, daß die Abmessungen der Konglomerate von Haufen ebenfalls 130 bis 160 Millionen Lichtjahre ausmachen. Es scheint, als ob dieser Durchmesserbetrag eine charakteristische, allgemeine Längeneinheit der großräumigen Struktur im Universum darstellt.

Diese Ergebnisse ziehen die Frage nach sich, ob es noch größere Gruppierungen mit charakteristischen Abmessungen gibt. Obwohl man mit den heute zur Verfügung stehenden Geräten noch nicht in jeder Richtung genügend weit sehen kann, neigt man dennoch dazu, diese Frage mit einem Ja zu beantworten. Möglicherweise existieren noch ausgedehntere Superhaufengruppierungen, deren Durchmesser vielleicht eine Milliarde Lichtjahre beträgt.

In unseren Tagen ist es gelungen, die durchschnittliche Massendichte des durch Galaxienzählungen erfaßten Himmelsgebietes zu ermitteln; dabei ergab sich ein Wert

von der Größenordnung 10^{-31} g/cm^3 . Vergleicht man diesen Wert mit der Dichte des lokalen Superhaufens, erkennt man, daß dieser Wert nur etwa 1 % der Dichte des Superhaufens entspricht. Offensichtlich befinden sich unser Milchstraßensystem und seine Umgebung in einem Bereich des Universums, der eine viel höhere Massendichte (und gleichzeitig damit auch eine höhere Energiedichte) aufweist als der Mittelwert für das Weltall.

Strahlende Welten

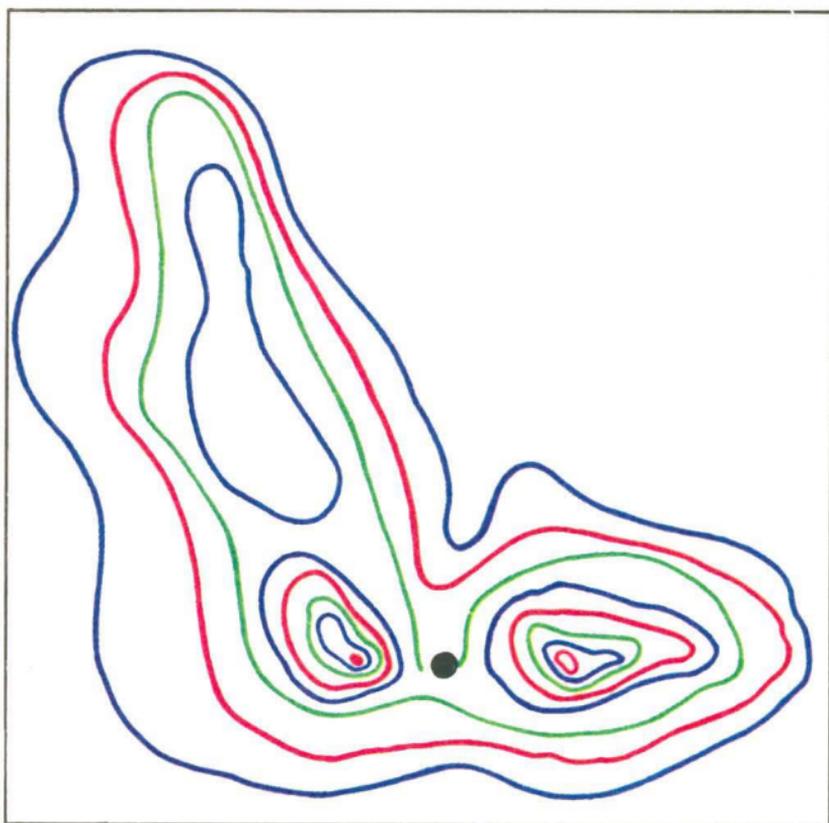
Radiogalaxien

Die Radioastronomie ist ein verhältnismäßig junger Wissenschaftszweig – sie kann nur auf eine Vergangenheit von kaum 40 Jahren zurückblicken. Es ist verständlich, daß wir ihr zahlreiche astronomische Entdeckungen unserer Tage verdanken. Als erste erwies sich die Milchstraße – insbesondere ihr Zentralgebiet – als starke Radioquelle. Dann erkannte man, daß auch die Sonne Strahlung im Radiofrequenzbereich aussendet. Nachdem die gewaltigen Parabolantennen errichtet waren, folgte eine Nachricht über Neuentdeckungen der anderen. Bald hatte es sich herausgestellt, daß es nicht nur innerhalb der Galaxis Radioquellen gibt, sondern in großer Zahl auch unter den extragalaktischen Objekten. Mit Hilfe der im optischen Spektralbereich gewonnenen Aufnahmen von Himmelskörpern, die starke Radioquellen darstellen, konnte man feststellen, daß es sich hauptsächlich um ferne Sternsysteme oder um unregelmäßige und eigenartige Galaxien handelt. Andere Objekte waren bereits seit langem als Sternsysteme mit besonderen Eigenschaften bekannt, und die Suche im Radiowellengebiet ergab, daß sie meistens starke Radioquellen sind. Als intensive extragalaktische Radioquellen haben sich das Objekt Centaurus A, das mit der Galaxie NGC 5128 identisch ist, und die unregelmäßige Galaxie M 82 im Sternbild Großer Bär herausgestellt. Auch die normalen Galaxien senden Radiowellen aus; im allgemeinen sind die Kerne der Systeme die intensivsten Gebiete, so auch beim Milchstraßensystem und beim Andromedanebel.

Die Radiogalaxien haben gegenüber den normalen Sternsystemen eine völlig andersartige Struktur im Radiowellengebiet. Sowohl bei der Untersuchung der Quelle NGC 5128 als auch des Objekts Fornax A und anderer Radiogalaxien fallen sofort die Unterschiede zwischen dem optischen und dem Radiobild auf. Die mit dem Radioteleskop aufgenommenen Intensitätskarten zeigen ausnahmslos einen Himmelskörper mit einer gewaltigen Ausdehnung und einer Doppelstruktur, den man auch als Radioquellenpaar bezeichnen könnte. Demgegenüber sind auf den mit optischen Geräten gemachten Aufnahmen oft nur kleine und unregelmäßige Objekte mit einer undeutlichen Struktur in dem betreffenden Gebiet zu erkennen.

Obwohl man die Strahlung der Radiogalaxien nur mit Hilfe riesiger Antennen wahrnehmen kann, hat dies seine Ursache nicht in der zu geringen Intensität der Strahlungsquellen. Die Radiogalaxie Cygnus A, die ebenfalls die oben beschriebene Doppelstruktur aufweist, ist rund eine Milliarde Lichtjahre von uns entfernt. Aus der Intensität des Empfangs der Radiowellen kann man errechnen, daß sie allein im Bereich der Radiofrequenzen eine Energiemenge von etwa $1,5 \cdot 10^{38}$ J/s ausstrahlt. Das ist das Siebenfache der Leistung, die vom Milchstraßensystem im gesamten Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung emittiert wird, und das Siebenmillionenfache der von unserer Galaxis im Radiofrequenzgebiet abgegebenen Leistung! Auch ist die Tatsache nicht uninteressant, daß die erwähnte Radiogalaxie im optischen Bereich je Zeiteinheit die gleiche Energiemenge abgibt wie im Radiowellengebiet. Eine derartige hohe Radioleuchtkraft ist jedoch keine allgemeine Erscheinung bei den Radiogalaxien; meist ist ihre optische Leuchtkraft tausend- bis zehntausendmal intensiver als ihre Radiostrahlung. Aber auch so übertreffen sie sowohl das Milchstraßensystem als auch die »normalen« Galaxien wesentlich, die im allgemeinen im Radiofrequenzbereich millionenfach leistungsschwächer sind als im optischen Gebiet.

Mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ist die Ursache der Strahlung der Radiogalaxien der Synchrotronprozeß. Die bei verschiedenen Wellenlängen gemessenen Intensitäten stimmen mit den aus dieser Theorie folgenden Intensitäten



Radiokarte von NGC 5128 = Centaurus A, eine der intensivsten Radioquellen von großer Ausdehnung (Länge 1,5 Millionen Lichtjahre). Das Gebiet der Radiostrahlung ist wesentlich größer als die dazugehörige optisch erfaßbare Galaxie (60000×70000 Lichtjahre).

gut überein. Bei diesem Prozeß bewegen sich außerordentlich schnelle Elektronen in einem Magnetfeld. Durch die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Magnetfeld kommt es zu einer Energieabstrahlung, deren Wellenlängenabhängigkeit charakteristisch ist und durch die Energie der Elektronen bestimmt ist.

Seyfertgalaxien

Eine andere Gruppe von Galaxien mit besonderen Eigenschaften wurde von *C. K. Seyfert* entdeckt und von ihm 1944 zuerst beschrieben. Die elektromagnetische Strahlung

der *Seyfertgalaxien* kann man in Analogie zu der Radio-
wellenstrahlung der Radiogalaxien nicht durch die Emis-
sion einiger Milliarden normaler Sterne erklären. Das
Eigenartige an diesen Objekten besteht darin, daß sie die
rund hundertfache Strahlungsleistung des Milchstraßensy-
stems abgeben, jedoch aus einem wesentlich kleineren
Raumgebiet. Eine solche Galaxie hat einen verblüffend
hellen Kern, um den man selbst auf mehrstündigen Auf-
nahmen die für Galaxien so charakteristischen aus-
gedehnten äußeren Bereiche kaum erkennen kann. Be-
lichtet man nur kurz auf eine Platte, dann sieht man an der
Stelle der Seyfertgalaxien solche scharfen Bildchen, wie
sie Sterne auf einer Aufnahme bei vollkommen klarem
Himmel zeigen. Anhand von Aufnahmen, die mit den
größten Fernrohren auf den empfindlichsten Platten ge-
wonnen wurden, kann man jedoch zweifelsfrei feststellen,
daß diese Objekte ausnahmslos Spiralgalaxien darstellen,
die eine außerordentlich helle zentrale Verdichtung und
einen großen Kern aufweisen. Außer an der bereits be-
schriebenen gewaltigen Energieproduktion kann man sie
auch leicht daran erkennen, daß sie einen wesentlichen Teil
ihrer Strahlung im infraroten Bereich des Spektrums ab-
geben. Was ist die Erklärung für diese Erscheinung?
Vorerst kann man noch nichts Genaueres sagen. Zuerst hatte
man sich vorgestellt, daß die Seyfertgalaxien wegen ihrer
großen Masse in der Lage wären, derartig große
Energienmengen abzustrahlen. Diese Überlegungen hatten
sich jedoch recht bald als falsch erwiesen. Es hatte sich
nämlich herausgestellt, daß der Durchmesser des den
größten Teil der Strahlung emittierenden Kerns nicht mehr
als 10 Lichtjahre beträgt, was wenig ist im Vergleich zum
Durchmesser der Galaxien. Außerdem gelangte man zu der
Feststellung, daß diese Objekte keine besonders großen
Massen haben; im Gegenteil sind die meisten Seyfert-
galaxien masseärmer als das Milchstraßensystem. Gegen-
wärtig wird allgemein die Auffassung akzeptiert, daß die
großen Energiemengen, die in diesen Objekten zur Dek-
kung ihrer großen Strahlungsintensität freigesetzt werden,
nicht durch die in den Sternen ablaufenden Kernreaktionen
entstehen, sondern durch irgendwelche uns noch un-
bekannte physikalische Vorgänge.



Die eigenartige Galaxie NGC 5128 ist gleichzeitig die hellste Radioquelle (Centaurus A) im Sternbild Centaurus.

Quasare

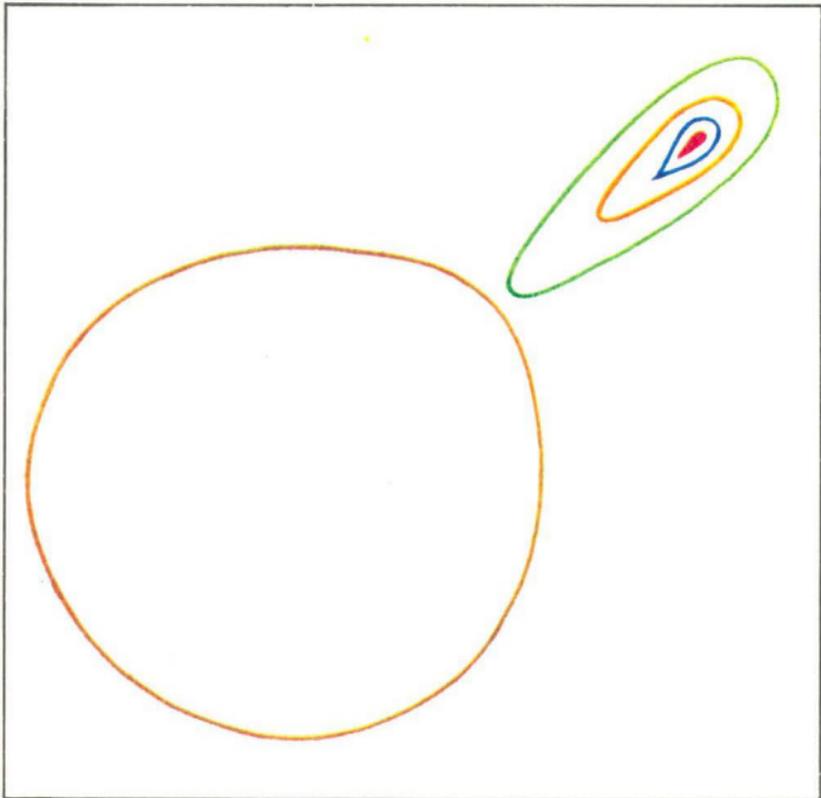
Diese am schwersten zu erklärenden Himmelsobjekte wurden über Jahrzehnte für lichtschwache blaue Sterne gehalten. In den sechziger Jahren hat es sich dann herausgestellt, daß sie nicht nur sichtbares Licht, sondern auch intensive Radiostrahlung von sich geben. Da sie auf den astronomischen Photographien als kleine sternartige Flecke erschienen, akzeptierte man die Bezeichnung *Radiostern*, obwohl niemand erklären konnte, wie eine

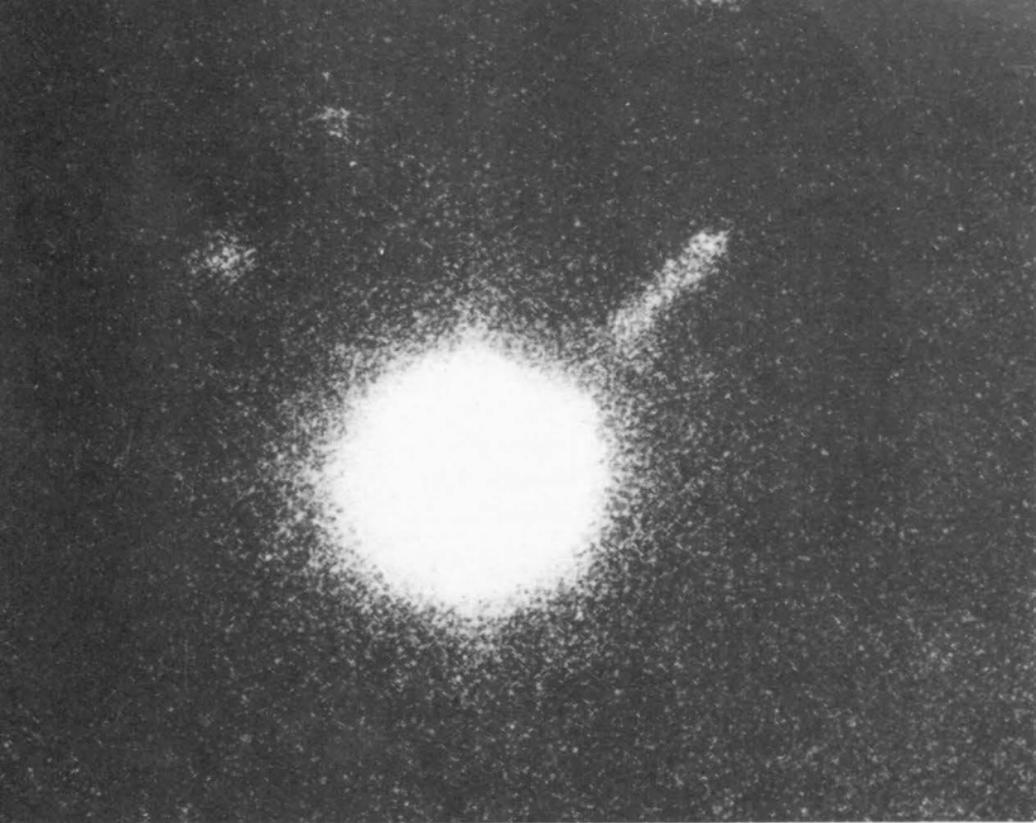
derartig starke Radiostrahlung in einem Stern mittlerer Größe entstehen kann. Bisher war ein einziger Stern bekannt, der tatsächlich auch Radiowellen emittierte: Das war die Sonne. Man wußte jedoch sehr genau, daß diese Radiostrahlung im Vergleich zum sichtbaren Licht verschwindend gering ist.

Wie konnte dann aber die intensive Strahlung der Radiosterne im Radiofrequenzbereich entstehen? Die Astronomen gingen mit großem Elan daran, diese Frage zu klären; und dabei wurde eine Vielzahl neuer Tatsachen zutage gefördert. Zuerst gelang es im Jahre 1963, am Mt.-Palomar-Observatorium mit dem 5-m-Spiegelteleskop die Spektren zweier »Radiosterne« aufzunehmen. Obwohl jeder Astronom damit gerechnet hatte, daß irgendwelche Anomalien in den Spektren der Objekte zu finden sein würden, lösten die Ergebnisse dennoch ein allgemeines Staunen aus. Die Spektren der »Radiosterne« zeigten keinerlei Ähnlichkeit mit irgendeinem – selbst dem extremsten – Sternspektrum. Es gelang zunächst nicht, die Emissions- und Absorptionslinien auch nur mit einem einzigen bis dahin bekannten Element zu identifizieren! Das Rätselraten beendete *M. Schmidt*, Mitarbeiter des Palomar-Observatoriums. Bei der Analyse des Spektrums des hellsten »Radiosterns«, des Objekts 3 C 273, fand er Linienserien, die den Balmerlinien des Wasserstoffs sehr ähnlich sind, die allerdings zum roten Ende des Spektrums verschoben sind. Durch weitere Untersuchungen konnte diese Deutung bestätigt werden. Es gelang, nicht nur die Linien der Balmerlinie, sondern auch weitere Linien zu identifizieren und darüber hinaus festzustellen, daß die Wellenlänge einer jeden einzelnen Linie auf das 1,15fache vergrößert ist. Also erneut Rotverschiebung! Aber welche Ursache kann sie haben? Auf der Grundlage des Dopplereffekts ergibt sich für den »Radiostern« eine Fluchtgeschwindigkeit von fast 50 000 km/s. Für das andere untersuchte Objekt erhielt Schmidt eine noch größere Radialgeschwindigkeit. Es erhob sich die Frage: Sind diese Himmelskörper tatsächlich Sterne, wie wir sie im Milchstraßensystem haben? Immer mehr Fachleute kamen zu der Antwort »Nein«. Die Radialgeschwindigkeiten, die sich aus den größten Werten der Linierverschiebung, die bei

normalen Sternen beobachtet wurden, ergeben, sind nämlich um zwei Größenordnungen kleiner als die oben angegebenen. Gehören diese interessanten Radioobjekte andererseits wirklich zum Milchstraßensystem, und bewegen sie sich so schnell, wie nach den beobachteten Linienverschiebungen zu erwarten ist, dann müßte man auch ihre Bewegung relativ zu den Sternen – die Eigenbewegung – feststellen können, da es keinen Grund gibt, anzunehmen, daß sie sich ausgerechnet vom Sonnensystem, das sich in der Galaxis nicht an einer besonderen Stelle befindet, in radialer Richtung entfernen. Vom Objekt 3C 273 liegen Aufnahmen aus einem Zeitraum von mehr als achtzig Jahren vor. Diesen Aufnahmen kann man entnehmen, daß sich diese Radioquelle während dieser Zeitspanne relativ zu den in ihrer Umgebung sichtbaren Ster-

Aus Messungen im Radiowellenbereich hergestellte Skizze des Quasars 3C 273





Fotografische Aufnahme des Quasars 3C 273

nen nicht bewegt hat. Berücksichtigt man noch, daß in-
zwischen auch »Radiosterne« entdeckt wurden, die sich
nach den Linienverschiebungen in ihren Spektren, die als
Dopplereffekt gedeutet werden, mit einer Geschwindigkeit
von uns fort bewegen, die 90% der Lichtgeschwindigkeit
im Vakuum entspricht, dann liegt die Schlußfolgerung
nahe, daß diese Himmelskörper überhaupt keine Sterne
darstellen und nicht zum Milchstraßensystem gehören, ja
sogar sehr weit von uns entfernt sein müssen. Aus diesem
Grunde nennt man sie auch nicht mehr »Radiosterne«,
sondern entsprechend der Abkürzung der englischen Be-
zeichnung für sternartige – quasistellare – Radioquellen
»Quasare«.

Wenn die Quasare nicht zur Galaxis gehören, dann findet
man sie vielleicht in einem näheren oder fernerem Stern-
system. Leider erwies sich auch diese Annahme als falsch.

Es konnte kein Sternsystem gefunden werden, mit dem die mehreren hundert Quasare in einer physikalischen Beziehung stehen. Bewegen sich die Quasare selbständig durch das Universum ähnlich wie die einzelnen Galaxien? Auch das ist möglich. Führt man diesen Gedanken weiter, dann bietet sich auch für die großen Doppler-Verschiebungen eine plausible Erklärung: Warum sollte dann nicht auch für diese das Hubblegesetz gelten, durch das die aus der Rotverschiebung folgende Fluchtbewegung der Galaxien so eindeutig beschrieben wird? Nur leider ergeben sich nach diesem Gesetz für die Quasare so riesige Werte für die Entfernung, die nur schwer mit den scheinbaren Helligkeiten der Quasare, wie sie beobachtet wurden, in Übereinstimmung zu bringen sind. Das bereits mehrfach genannte Objekt 3C 273 hat z. B. eine scheinbare Helligkeit von $+13^m$; seine Entfernung ergibt sich zu rund einer Milliarde Parsec. Hieraus folgt, daß der von diesem Objekt ausgestrahlte Lichtstrom von der Größenordnung 10^{38} J/s ist. Diese Zahl läßt sofort erkennen, daß die Bezeichnung sternartige Radioquellen nicht richtig ist; denn so große Sterne kann es nicht geben! Dieser Lichtstrom übertrifft den der hellsten Supernova, obwohl sie ihn nur über einige Wochen zu emittieren vermag. Die Helligkeit des bekanntesten Quasars hat sich jedoch in den nunmehr 80 Jahren, seit er beobachtet wird, kaum verändert. Auch nur wenige Galaxien besitzen eine derartig große Leuchtkraft. Da sich für die Entfernungen aller Quasare so außerordentlich große Werte ergaben und die daraus abgeleiteten absoluten Helligkeiten sehr groß sind, begannen einige Wissenschaftler daran zu zweifeln, daß die Hubble-Beziehung auch für diese Objekte Gültigkeit hat. Ihr Argument bestand vor allem darin, daß wir keine physikalischen Prozesse kennen, bei denen so große Energiemengen freigesetzt werden, noch dazu für derartig lange Zeitspannen und mit großer Konstanz. Viele der Zweifler waren der Ansicht, die Verschiebung des Spektrums habe ihre Ursache nicht im Dopplereffekt, sondern die Rotverschiebung sei gravitationsbedingt. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist nämlich jede Form der Energie an eine bestimmte – gut definierte – Masse gebunden. Wenn man davon ausgeht, daß auch die Photonen eine

Masse haben, dann darf man auch nicht unberücksichtigt lassen, daß sie mit der Masse des Körpers, von dem sie ausgestrahlt werden – im vorliegenden Falle mit der des Quasars –, in Wechselwirkung treten. Während sich das Photon vom Himmelskörper entfernt, muß es gegen dessen Anziehungskraft Arbeit leisten und kann so bedeutende Energiemengen verlieren. Dadurch nimmt seine Frequenz ab, seine Wellenlänge also zu, und es ist röter. Aus dem Spektrum kann man nicht feststellen, was die Ursache für die Linienverschiebung ist, eine große Relativgeschwindigkeit oder aber die gewaltige Gravitationswirkung. Sicher ist jedoch, daß im zweiten Fall die Strahlungsquelle – die mit Sicherheit größer ist als ein mittlerer Stern – eine derartig große Masse haben müßte, daß ihre dynamische Wirkung auch die Bewegung der Sterne im Milchstraßensystem beeinflussen würde. Da aber ein solcher Einfluß überhaupt nicht zu beobachten ist, muß diese Erklärung für die Rotverschiebung als wenig wahrscheinlich abgelehnt werden.

Ausgehend davon, daß die Quasare nach der Hubble-Beziehung sich schnell von uns entfernende, sehr ferne Objekte mit einem sehr großen Lichtstrom darstellen, wollen wir versuchen, herauszufinden, was sie eigentlich sind. Sicher ist bereits, daß sie keine Sterne, sondern viel größere Himmelskörper sind. Handelt es sich bei ihnen vielleicht um Galaxien? Das ist nicht unmöglich. Man hat in ihren Spektren eine Anzahl von Emissionslinien gefunden, die nur in einem Gas mit einer niedrigen Dichte entstehen können. Es ist also sehr wahrscheinlich, daß der helle Kern, den man gut beobachten kann, von einer umfangreichen Gashülle mit einer sehr geringen Dichte umgeben ist. (Das ist wieder ein Argument gegen die gravitationsbedingte Rotverschiebung, weil sich um eine Masse, die die beobachtete Deformation verursacht, keine derartige Hülle ausbilden könnte!) Für diese Deutung spricht eine neuere Beobachtung. Es gelang nämlich, in der Umgebung einiger Quasare schwache Untergrundaufhellungen nachzuweisen, wie sie bei Sternsystemen zu erwarten sind. Danach könnten die Quasare also helle Galaxienkerne sein!

Die Quasare ähneln also etwas den gut bekannten Ga-

laxien, vor allem jedoch den Seyfertgalaxien. Die radioastronomischen Messungen lassen es als wahrscheinlich erscheinen, daß auch zwischen den Radiogalaxien und den Quasaren eine nähere Verwandtschaft besteht. Die Leuchtkraft der Quasare im sichtbaren Spektralbereich ist von der Größenordnung 10^{38} J/s. Das ist das Zehnfache der Leuchtkraft der größten Spiralgalaxien und der gleiche Betrag wie bei den größten bekannten Sternsystemen, den elliptischen Riesengalaxien. Die zuletzt erwähnten Objekte sind die gewaltigsten »normalen« Himmelskörper. Es gelang auch der Nachweis, daß die große optische Helligkeit der Quasare nur einen Bruchteil ihrer gesamten Energieabstrahlung ausmacht. Viel heller sind die Quasare in dem nicht mehr sichtbaren Infrarotbereich des Spektrums. Im fernen Infrarot im Wellenlängengebiet zwischen 1 000 bis 10 000 nm ist die Abstrahlung am stärksten. So beträgt bei 3 C 273 die gesamte abgestrahlte Leistung etwa 10^{41} J/s; das ist das rund Tausendfache der optischen Strahlung der hellsten Galaxien. Diese gewaltige Infrarotemission weist auch darauf hin, daß die Quasare den Seyfertgalaxien und den anderen aktiven Galaxien – z. B. M 82 – nahestehen.

Im Spektrum der normalen Galaxien findet man im wesentlichen solche Linien, die auch in den Sternspektren auftreten. Dabei ist die Zahl der Absorptionslinien viel größer als die der Emissionslinien. Bei den Quasaren sind zu Lasten der Absorptionslinien die meisten Linien jedoch Emissionslinien. Eine der auffallendsten Besonderheiten der Spektren von Quasaren ist außerdem die viel größere Helligkeit im ultravioletten Bereich im Vergleich zu den normalen Galaxien. Berücksichtigen muß man noch, daß sich auf kurz belichteten Aufnahmen die Seyfertgalaxien von den Quasaren kaum unterscheiden. Sie erscheinen gleichfalls als nebelartige Sternchen, da nur das Bild ihres Kerns auf der Platte erscheint. Je länger man belichtet, um so deutlicher kann man der entwickelten Aufnahme entnehmen, daß eigentlich eine Spiralgalaxie aufgenommen wurde, die sehr lichtschwache Arme hat.

Die astronomischen Fotografen haben auch enthüllt, daß die Kerne der Seyfertgalaxien und der normalen Spiralsysteme etwa gleich groß sind und Durchmesser von wenigen

Lichtjahren besitzen. Die Quasarkerne sind offenbar noch kleiner.

Zur Leuchtkraft der Objekte läßt sich folgendes feststellen: Die absolut hellsten Seyfertgalaxien übertreffen die lichtschwächsten Quasare. Ebenso kommt die Leuchtkraft der lichtschwächsten Quasare der von absolut hellen normalen Galaxien gleich.

Aus diesen Tatsachen muß man zu der Schlußfolgerung kommen, daß die Quasare Galaxien mit großen Besonderheiten sind, die sich nach ihren Merkmalen in eine Reihe »normale Spiralsysteme – Seyfertgalaxien – Quasare« einordnen. Man kann auch annehmen, daß der beobachtbare kleine, helle Kern, der früher als »Radiosterne« bezeichneten Objekte von zahlreichen Gas- und Staubwolken umgeben ist – ähnlich wie die Mehrzahl der Galaxien. Der Intensitätsverlauf in den kontinuierlichen Spektren weicht erheblich von der in den Sternspektren beobachteten Helligkeitsverteilung ab. Möglicherweise ist daher in den Quasaren ein wesentlicher Teil der Masse nicht in Sternen konzentriert.

Schließlich nochmals einige Worte zu ihren Entfernungen. Erinnern wir uns an die außerordentlich großen Werte der Rotverschiebung; einige Astronomen waren nicht geneigt, diese auf der Grundlage des Hubbleeffekts zu interpretieren. Kaum ein Astronom zweifelt jedoch daran, daß die Galaxien dem Hubbleschen Gesetz folgen, also eine eindeutige Beziehung zwischen den in ihren Spektren beobachtbaren Doppler-Verschiebungen und den Entfernungen dieser Objekte von der Erde besteht. Die Diskussion um die Quasare wurde 1973 von den beiden amerikanischen Astronomen *R. L. Brown* und *M. S. Roberts*, die im Green-Bank-Observatorium tätig sind, entschieden. Es gelang ihnen festzustellen, daß sich der Quasar 3C 286 hinter einer fernen Galaxie befindet, die sich ebenfalls mit einer sehr hohen Geschwindigkeit von der Erde entfernt. Die Geschwindigkeit des Quasars beträgt 70% der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum; die vor ihm »schwimmende« Galaxie bewegt sich ebenfalls mit einer hohen Geschwindigkeit, und zwar mit mindestens 170 000 km/s. Da das Sternsystem sicher so weit von uns entfernt ist, wie es aus dem Hubbleschen Gesetz folgt, hat es überhaupt

keinen Sinn, darüber zu diskutieren, ob der Quasar wirklich 25 % oder nur um einige Prozent weiter entfernt ist. Gerade deshalb muß man die Feststellung akzeptieren, daß die Hubble-Beziehung eine für das gesamte Universum geltende allgemeine Regel darstellt.

»akzent« – die Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Lewantowski/Hoffmann, Raumtransporter
Petrik, Merkwürdiges
aus dem Patentschrank
Brentjes, Vom Stamm zum Staat
Odening, Parasiten –
Geißel der Menschheit?
Wasilewski, Vulkane – die Feuer des Pluto
Brosin, Vorstoß ins Ungewisse
Peters, Mensch und Tierwelt