

1. Einleitung und Überblick

1.1 Einleitung

Die Milchstraße, die Galaxie, in der wir leben, ist nur eine von vielen Galaxien; außerhalb der Milchstraße gibt es unzählige andere Sternsysteme, von denen viele sehr ähnliche Eigenschaften besitzen. In der Tat ist die Milchstraße, auch Galaxis genannt, eine recht durchschnittliche Vertreterin der Klasse der Spiralgalaxien, von denen zwei andere Beispiele in den Abb. 1.1 und 1.2 gezeigt sind. Dabei handelt es sich um Sternsysteme, bei denen die meisten Sterne in einer relativ dünnen Scheibe angeordnet sind. In unserer Milchstraße ist diese als langgestrecktes Band am Himmel zu erkennen. Neben solchen Scheibengalaxien gibt es eine zweite Klasse von leuchtkräftigen Sternsystemen, die Elliptischen Ga-

laxien, deren Eigenschaften sich in vieler Hinsicht von denen der Spiralen unterscheiden.

Astronomen wissen erst seit weniger als hundert Jahren, dass Objekte außerhalb der Milchstraße existieren, dass unsere Welt also deutlich größer als diese ist. In der Tat sind Galaxien nur Inseln im Universum: Der Durchmesser unserer Galaxis ist sehr viel kleiner als der mittlere Abstand zwischen zwei leuchtkräftigen Galaxien. Die Entdeckung der Existenz anderer Milchstraßensysteme und ihrer vielfältigen Erscheinungsformen führte zu Fragen nach dem Ursprung der Galaxien und ihrer Entwicklung. Befindet sich etwas zwischen den Galaxien, oder ist dies leerer Raum? Gibt es neben den Galaxien weitere kosmische Objekte? Fragen dieser Art führten zur Erforschung des Universums als Ganzes und seiner Entwicklung: Ist unser Univer-



Abb. 1.1. Die Spiralgalaxie NGC 1232 sieht vielleicht so ähnlich aus wie unsere Milchstraße, von „oben“ betrachtet. Dieses mit dem VLT aufgenommene Bild misst $6'8 \times 6'8$, was bei einer Entfernung von ca. 30 Mpc einer Kantlänge von 60 kpc entspricht. Wenn dies unsere Galaxis wäre, würden wir mitsamt des Sonnensystems in etwa 8.0 kpc Entfernung vom Zentrum der Galaxie um dieses mit einer Geschwindigkeit von ~ 220 km/s kreisen und für einen Umlauf etwa 230×10^6 Jahre benötigen. Die kleine Galaxie links am Bildrand ist eine durch gravitative Gezeitenkräfte gestörte Begleitergalaxie



Abb. 1.2. Wir sehen die Spiralgalaxie NGC 4013 von der Seite (edge-on); dieses Bild mag sich einem Beobachter darbieten, der unsere Milchstraße von der Seite betrachtet. Man sieht deutlich die Scheibe, in der eine Staubschicht den zentralen Bereich verdeckt. Weiterhin sieht man die zentrale Verdickung, den sog. Bulge der Galaxie. Wie später noch ausführlich diskutiert werden wird, sind (Spiral-)Galaxien wie diese umgeben von einem Halo aus Materie, der sich nur gravitativ bemerkbar macht, indem er z. B. die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne und des Gases um das Zentrum der Galaxie maßgeblich beeinflusst

sum endlich oder unendlich, ändert es sich mit der Zeit, hat es einen Anfang und ein Ende? Solche Fragen nach dem Ursprung und der Geschichte der Welt haben die Menschheit seit Anbeginn fasziniert. Aber erst seit wenigen Jahrzehnten sind wir in der Lage, diese Fragen empirisch zu untersuchen.

Sterne unserer Galaxis haben unterschiedliches Alter: während die ältesten ca. 12 Milliarden Jahre alt sind, findet auch heute noch Sternentstehung statt, etwa in dem bekannten Orion-Nebel. Unsere Galaxis hat sich offensichtlich zeitlich geändert. Um die Entstehung und Entwicklung unserer Galaxis zu verstehen, wäre ein Blick in ihre (und daher unsere) Vergangenheit sehr nützlich – leider ist das physikalisch nicht möglich. Aufgrund der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes sehen wir jedoch weit entfernte Objekte zu einem früheren

Zeitpunkt, also von uns aus gesehen in der Vergangenheit. Man kann daher versuchen, solche Galaxien, die „damals“ unserer Galaxis sehr ähnlich waren, zu finden und zu untersuchen und somit die wesentlichen Aspekte der Geschichte der Galaxis zu rekonstruieren. Die Anfangsbedingungen für die Entwicklung unserer Galaxis werden wir zwar nie genau kennen, aber vielleicht die charakteristischen Bedingungen. Die Entwicklung aus solchen Anfangszuständen sollte dann zu Galaxien führen, die unserer ähnlich sind und die von außen beobachtbar sind. Andererseits kann man nur in unserer Galaxis die Physik der Galaxienentwicklung aus der Nähe studieren.

Wir sind Zeitzeugen einer Epoche ungeheurer Entdeckungen in der Astronomie. Die technischen Möglichkeiten der Beobachtung und der Datenauswertung entwickeln sich zur Zeit in rasanter Weise. Zwei Beispiele sollen dies illustrieren. Im Jahre 1993 wurde das erste optische 10-Meter-Teleskop, das Keck-Teleskop, in Betrieb genommen. Dies war der erste Schritt in Richtung größerer Teleskope seit der Eröffnung des 5-Meter-Spiegels auf dem Mount Palomar im Jahre 1948. Zehn Jahre später waren bereits sieben Teleskope der 10-Meter Klasse in Betrieb, und in Kürze werden weitere hinzukommen. In den letzten Jahren haben sich dadurch unsere Möglichkeiten enorm verbessert, sehr entfernte und daher sehr lichtschwache Objekte zu finden und im Detail zu untersuchen. Als zweites Beispiel sei die Entwicklung und Größe optischer Detektoren genannt. Seit der Einführung von CCDs in der Astronomie Ende der 70er Jahre, die dann größtenteils die Photoplatten als optische Detektoren ablösten, hat sich die Empfindlichkeit, die Genauigkeit und die Datenrate optischer Beobachtungen gewaltig erhöht. Während Ende der 80er Jahre eine Kamera mit 1000^2 Bildelementen (Pixeln) als Weitwinkelinstrument galt, ging im Jahre 2003 mit Megacam eine erste Kamera in Betrieb, die $(18\,000)^2$ Pixel besitzt und ein Quadratgrad des Himmels mit $0''.2$ Winkelauflösung in einer Aufnahme ablichten kann. Eine solche Kamera liefert pro Nacht ca. 100 GB an Daten, deren Verarbeitung auf die Existenz schneller Rechner mit großen Speicherkapazitäten angewiesen ist. Doch nicht nur die optische Astronomie befindet sich in einer Zeit der großen Entwicklungen; in anderen Wellenlängenbereichen sind ebenfalls gewaltige instrumentelle Fortschritte erzielt worden, wobei die Observatorien im

Weltall eine ganz zentrale Rolle spielen. Darauf werden wir im Abschn. 1.3 näher eingehen.

Diese technischen Entwicklungen haben auch zu einem ungeheuren Erkenntniszuwachs in der Astronomie geführt, und gerade die extragalaktische Astronomie und die Kosmologie haben davon besonders profitiert. Die großen Teleskope und die empfindlichen Instrumente haben den Blick in das ferne Universum eröffnet. Da aufgrund der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit jeder Blick in die Ferne auch gleichzeitig ein Blick in die Vergangenheit ist, wurde dadurch das Studium von Objekten im frühen Universum möglich. Wir kennen heute Galaxien, die das Licht, das wir von ihnen beobachten, zu einem Zeitpunkt ausgesandt haben, als das Universum weniger als 10% des heutigen Weltalters besaß; diese befinden sich daher in einem Frühstadium ihrer Entwicklung. Dadurch kann die Entwicklung von Galaxien über kosmische Epochen verfolgt werden. Wir haben also die Möglichkeit, die Geschichte von Galaxien, und damit auch die unserer Milchstraße, zu untersuchen. So können wir studieren, zu welcher Zeit sich die meisten Sterne gebildet haben, die wir im lokalen Weltall beobachten, da die Sternentstehungsgeschichte bis hin zu sehr frühen kosmischen Epochen beobachtet werden kann. Dabei stellt sich übrigens heraus, dass ein Großteil der Sternentstehung unserem Blick verborgen bleibt und erst mit empfindlichen Fern-Infrarot-Weltraumteleskopen sichtbar wird.

Zu den faszinierendsten Entdeckungen der letzten Jahre gehört die Erkenntnis, dass die meisten Galaxien in ihrem Zentrum ein Schwarzes Loch beherbergen, dessen Masse Millionen oder gar Milliarden Sonnenmassen beträgt – sog. Supermassive Schwarze Löcher. Zwar wurde schon seit der Entdeckung der Quasare im Jahre 1963 vermutet, dass die Energiegewinnung in diesen ultra-leuchtkräftigen Objekten nur mittels eines Supermassiven Schwarzen Loches funktionieren kann, doch die Präsenz solcher Schwarzen Löcher in normalen Galaxien ist eine relativ neue Erkenntnis. Noch überraschender war das Ergebnis, dass deren Masse sehr eng korreliert ist mit anderen Eigenschaften der jeweiligen Galaxien, ein klarer Hinweis darauf, dass die Entwicklung von Schwarzen Löchern und die ihrer Heimatgalaxien sehr eng zusammenhängen muss.

Das detaillierte Studium von Galaxien und ihren Gruppierungen, den Galaxienhaufen, haben zu dem überraschenden Ergebnis geführt, dass diese Objekte er-

heblich mehr Masse enthalten, als wir in ihren Sternen und ihrem Gas sehen können. Untersuchungen der Dynamik solcher Systeme zeigen, dass nur etwa 10–20% ihrer Masse aus Sternen, Gas und Staub bestehen, die wir aufgrund ihrer Emission oder Absorption beobachten können. Der größte Teil ihrer Masse bleibt jedoch unserem Blick verborgen. Aus diesem Grunde erhielt diese den Namen Dunkle Materie. Die Dominanz Dunkler Materie in Galaxien und Galaxienhaufen, die sich allein aufgrund ihrer Schwerkraft bemerkbar macht, wurde in den letzten Jahren mit Radio-, optischen und Röntgenteleskopen etabliert und durch neue Untersuchungsmethoden weiter erhärtet und quantifiziert. Die Natur der Dunklen Materie ist eine der zentralen Fragen nicht nur der Astrophysik, sondern auch der fundamentalen Physik – jedenfalls dann, wenn diese Frage keine astronomische Lösung besitzt. Handelt es sich bei der Dunklen Materie um nichtleuchtende Himmelskörper, wie etwa ausgebrannte Sterne, oder um eine neue Form der Materie? Haben die Astronomen indirekt die Existenz eines neuen Elementarteilchens nachgewiesen, das bisher noch nicht in irdischen Labors gefunden wurde? Wenn es sich tatsächlich um neue Teilchen handelt, wovon inzwischen ausgegangen wird, sollten sie auch in unserer Milchstraße vorkommen, daher auch in unserer unmittelbaren Umgebung. In der Tat gibt es mittlerweile mehrere Experimente in unterirdischen Labors, die versuchen, die Konstituenten der Dunklen Materie mit hochempfindlichen und aufwendigen Messgeräten nachzuweisen. Physiker und Astronomen warten gespannt auf die Inbetriebnahme des neuen Teilchenbeschleunigers LHC am Europäischen Forschungszentrum CERN, mit dem ab dem Jahre 2007 deutlich höhere Energien erzielt werden können als bisher und mit dem die Hoffnung besteht, ein Elementarteilchen zu finden, welches als Kandidat für die Dunkle Materie in Frage kommt.

Zweifelsohne ist als wichtigste Erkenntnis der letzten Jahre die Etablierung eines Standardmodells der Kosmologie zu bewerten. Wir glauben heute, das Alter des Universums mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent zu kennen – es beträgt $t_0 = 13.7$ Gyr. Es hat sich aus einem sehr dichten und sehr heißen Zustand, dem Urknall, entwickelt, sich dabei ausgedehnt und abgekühlt. Noch heute lassen sich die Überbleibsel des Urknalls beobachten, zum Beispiel in Form des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Die genauen Beobachtungen

dieser Hintergrundstrahlung, die etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt wurde, haben erheblich dazu beigetragen, dass wir den Inhalt unseres Kosmos heute recht genau zu kennen glauben. Dabei wirft diese Erkenntnis mehr Fragen auf als sie beantwortet: nur etwa 4% des Energieinhalts des Kosmos besteht aus Materie, die wir aus anderen Bereichen der Physik kennen, nämlich der *baryonischen Materie*, die im Wesentlichen aus Atomkernen und Elektronen besteht. Etwa 25% des Universums besteht aus Dunkler Materie, auf die wir schon in Galaxien und Galaxienhaufen gestoßen sind. Also dominiert die Dunkle Materie über die baryonische Materie auch auf kosmischen Skalen. Aber noch überraschender ist die Erkenntnis, dass etwa 70% des Universums aus etwas besteht, was wir heute wahlweise als Vakuumsenergie oder Dunkle Energie bezeichnen und die mit der von Albert Einstein eingeführten Kosmologischen Konstanten eng verknüpft zu sein scheint. Die Tatsache, dass mehrere Namen dafür existieren, soll keineswegs implizieren, dass wir eine Vorstellung davon hätten, was diese Dunkle Energie ist. Sie macht sich ausschließlich durch ihren Einfluss auf die kosmische Expansion bemerkbar und dominiert deren Dynamik in der heutigen Epoche. Versuche, die Dichte der Dunklen Energie aus der fundamentalen Physik abzuschätzen, sind bislang hoffnungslos gescheitert: eine Abschätzung der Vakuumsenergiedichte mittels der Quantenmechanik liefert einen Wert, der um *120 Größenordnungen* über dem aus der Kosmologie abgeleiteten liegt! Auf absehbare Zeit wird die Dunkle Energie nur mit der beobachtenden Kosmologie zu untersuchen sein; ihr theoretisches physikalisches Verständnis liegt dabei vermutlich noch in ferner Zukunft. Die Existenz der Dunklen Energie stellt die momentan vielleicht größte Herausforderung an die fundamentale Physik dar.

In diesem Buch werden die Objekte der extragalaktischen Astronomie vorgestellt, beginnend mit unserer Milchstraße, die als „typische“ Spiralgalaxie als Prototyp dieser Klasse von Sternsystemen zu betrachten ist. Das andere Hauptziel dieses Buches ist eine Darstellung der modernen astrophysikalischen Kosmologie, die gerade in den vergangenen Jahren sehr große Fortschritte erlebt hat. Methoden und Erkenntnisse werden dabei parallel behandelt. Neben der Vermittlung der Faszination, die von astronomischen Beobachtungen und kosmologischen Erkenntnissen ausgeht, liegen metho-

dische und physikalische Fragestellungen im Zentrum der Darstellung. Wir beginnen im nächsten Abschnitt mit einem kurzen Überblick über das Gebiet der Extragalaktik und der Kosmologie, der einerseits Appetit auf mehr machen soll, andererseits aber einige Fakten und Begriffe einführt, die im Folgenden benötigt werden, aber erst in späteren Kapiteln detailliert behandelt werden. In Abschn. 1.3 werden wir dann einige der wichtigsten Teleskope für die extragalaktische Astronomie kurz vorstellen.

1.2 Überblick

1.2.1 Unsere Galaxis als Galaxie

Unsere Milchstraße ist die einzige Galaxie, die wir im Detail untersuchen können: Wir können in ihr Einzelsterne auflösen und spektroskopisch untersuchen, detaillierte Studien der interstellaren Materie (interstellar medium, ISM) durchführen und dabei z. B. Eigenschaften von Molekülwolken und Sternentstehungsgebieten, sowie die Extinktion und Rötung durch Staub studieren. Auch kann man innerhalb der Milchstraße die lokale Dynamik von Sternen und Gaswolken und die Eigenschaften von Satelliten-Galaxien (wie die Magellanschen Wolken) beobachten. Und schließlich bietet sich mit dem Galaktischen Zentrum in nur 8 kpc¹ Entfernung die einzigartige Möglichkeit, den zentralen Bereich einer Galaxie mit sehr hoher räumlicher Auflösung zu untersuchen. *Nur durch ein detailliertes Verständnis unserer Galaxis kann man hoffen, die Eigenschaften anderer Galaxien zu verstehen.* Dabei gehen wir natürlich implizit von der Annahme aus, dass die physikalischen Prozesse in anderen Galaxien nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen wie „bei uns“. Wäre dies nicht der Fall, so hätte man kaum die Chance, die Physik anderer Objekte im Universum oder gar das Universum als Ganzes zu verstehen. Wir werden auf diesen Punkt bald zurückkommen.

Wir werden daher zunächst die Eigenschaften unserer Galaxis untersuchen. Eines der zentralen Probleme

¹1 Parsec (1 pc) ist die gebräuchliche Entfernungseinheit in der Astronomie, wobei $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{18} \text{ cm}$ sind. Weiterhin benutzen wir $1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$, $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$, $1 \text{ Gpc} = 10^9 \text{ pc}$. In Anhang C sind weitere häufig benutzten Einheiten und Konstanten zusammengestellt.

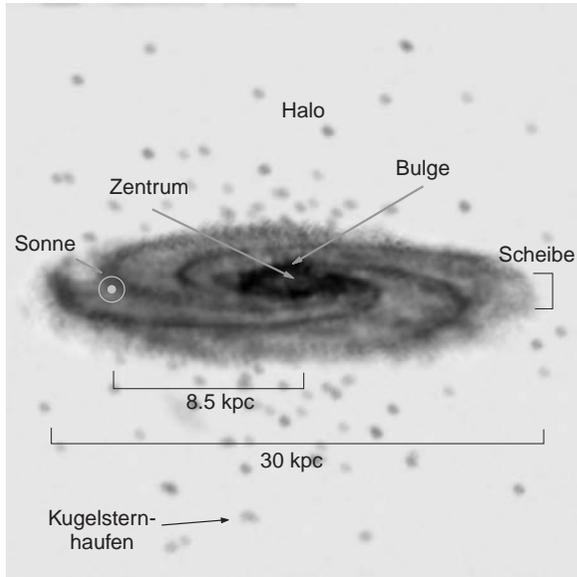


Abb. 1.3. Schematische Struktur der Galaxis, bestehend aus der Scheibe, dem zentralen Bulge, in dem sich das Galaktische Zentrum befindet, sowie dem etwa sphärischen Halo, der die meisten Kugelsternhaufen beheimatet. Die Sonne umläuft das Galaktische Zentrum in etwa 8 kpc Entfernung

dabei (und überhaupt in der Astronomie) ist die Entfernungsbestimmung von Objekten, so dass wir mit dieser Thematik beginnen werden. Aus Untersuchungen der Stern- und Gasverteilung in der Milchstraße wird dann auf deren Struktur geschlossen. Man findet, dass unsere Galaxis aus mehreren Komponenten besteht: einer dünnen Stern- und Gasscheibe mit einem Radius von etwa 20 kpc und einer Skalenhöhe von ~ 300 pc, in der sich auch die Sonne befindet, einer etwa ~ 1 kpc dicken Scheibe, einem zentralen Bulge, wie man ihn auch bei anderen Spiralen sieht, und einem ungefähr sphärischen Halo, in dem sich die meisten Kugelsternhaufen und weitere alte Sterne befinden. Abbildung 1.3 zeigt eine schematische Darstellung unserer Milchstraße mit ihren verschiedenen Komponenten. Um einen besseren visuellen Eindruck zu erhalten, zeigen Abb. 1.1 und 1.2 zwei Spiralgalaxien, die eine „von oben“ betrachtet (face-on), die andere von der Seite (edge-on). Im ersten Fall ist die Spiralstruktur sehr deutlich zu erkennen. Die hellen Knoten in den Spiralarmen zeigen Gebiete, in denen junge, leuchtkräftige Sterne vor kurzem entstanden sind. Die Aufnahme zeigt einen deutlichen Farbgradienten: Die Galaxie ist rötler im Zentrum, während sie

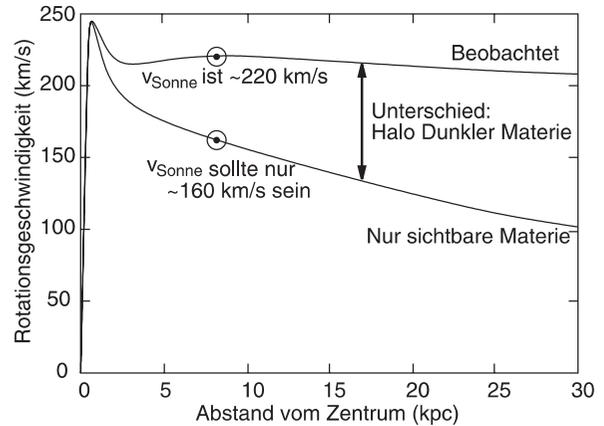


Abb. 1.4. Die obere Kurve ist die beobachtete Rotationskurve $V(R)$ unserer Galaxis, also die Rotationsgeschwindigkeit um das Galaktische Zentrum als Funktion des Abstands. Die untere Kurve ist die Rotationskurve, die man aufgrund der beobachteten Sternmasse in der Galaxis vorhersagen würde. Die Differenz zwischen den beiden Kurven wird der Anwesenheit von Dunkler Materie zugeschrieben, in die die Scheibe der Milchstraße eingebettet ist

in den Spiralarmen am blauen ist – während Spiralarme Orte aktueller Sternentstehung darstellen, sind zum Zentrum hin, speziell im Bulge, hauptsächlich alte Sterne vorhanden.

Die Galaktische Scheibe rotiert, wobei ihre Rotationsgeschwindigkeit $V(R)$ vom Abstand R vom Galaktischen Zentrum abhängt. Aufgrund der Lichtverteilung der Sterne und einem mittleren Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis der Sternpopulation kann man dann die Masse der Galaxis abschätzen (Gas und Staub repräsentieren weniger als $\sim 10\%$ der Masse der Sterne) und mit der Rotationsgeschwindigkeit der Sonne um das Galaktische Zentrum vergleichen. Dabei stellt sich heraus, dass die Sonne sich schneller bewegt, als man aus der beobachteten Massenverteilung erwarten würde: Wenn $M(R_0)$ die Masse innerhalb einer Kugel um das Galaktische Zentrum mit Radius $R_0 \approx 8$ kpc ist, so folgt aus der Newtonschen Mechanik, dass die Rotationsgeschwindigkeit²

$$V_0 = \sqrt{\frac{G M(R_0)}{R_0}} \quad (1.1)$$

²Wir benutzen Standard-Notation: G bezeichnet die Newtonsche Gravitationskonstante, c die Lichtgeschwindigkeit.

sein sollte.³ Aus der in Sternen sichtbaren Materie würde man eine Rotationsgeschwindigkeit von ~ 160 km/s erwarten. Beobachtet wird aber $V_0 \sim 220$ km/s (siehe Abb. 1.4). Daraus, und aus dem Verlauf der Rotationskurve $V(R)$ für größere Abstände R vom Galaktischen Zentrum, schließt man, dass unsere Galaxis wesentlich mehr Masse enthält als in Sternen vorhanden ist. Diese zusätzliche Masse wird als *Dunkle Materie* bezeichnet, deren physikalische Natur bislang unbekannt ist. Kandidaten dafür sind vor allem schwach-wechselwirkende Elementarteilchen, wie sie von einigen Teilchentheorien postuliert werden, aber noch nicht im Labor nachgewiesen werden konnten, aber auch makroskopische Objekte (also Himmelskörper) kommen im Prinzip in Frage, solange sie nur wenig Licht abstrahlen. Wir werden Experimente diskutieren, die solche makroskopischen Objekte identifizieren können und zu dem Schluss kommen, dass das Problem der Dunklen Materie höchstwahrscheinlich keine astronomische Lösung besitzt, sondern die Teilchenphysik den Schlüssel zur Lösung liefern wird.

Die Sterne in den unterschiedlichen Komponenten unserer Galaxis haben verschiedene Eigenschaften, etwa hinsichtlich ihres Alters und ihrer chemischen Zusammensetzung. Aus der Interpretation dieses Sachverhalts kann man auf Aspekte der Entwicklung der Galaxis schließen. Das relativ junge Alter der Sterne in der dünnen Scheibe gegenüber der älteren Sternpopulation des Bulge deutet darauf hin, dass es verschiedene Stadien der Bildung unserer Milchstraße gegeben hat. Tatsächlich ist die Galaxis ein höchst dynamisches Objekt, das sich auch heute noch verändert. Wir sehen kaltes Gas, was auf die Galaktische Scheibe einfällt, sowie ausströmendes heißes Gas, und zur Zeit wird eine kleine Nachbargalaxie, die Sagittarius-Zwerggalaxie, vom Gezeitenfeld der Milchstraße zerrissen und wird mit ihr in (kosmologisch gesprochen) naher Zukunft verschmelzen.

Wegen der Extinktion durch Staub kann man bei optischen Wellenlängen nicht weit durch die Scheibe unserer Galaxis hindurchschauen. Untersuchungen der unmittelbaren Umgebung des Galaktischen Zentrums sind daher nur bei anderen Wellenlängen möglich,

³Streng genommen gilt (1.1) nur für eine sphärisch symmetrische Massenverteilung. Die Rotationsgeschwindigkeit für eine abgeplattete Dichteverteilung weicht von dieser Relation allerdings nicht sehr stark ab, so dass wir diese Relation näherungsweise benutzen können.

insbesondere im infraroten (IR) und im Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums (siehe auch Abb. 1.5). Das Galaktische Zentrum ist ein sehr komplexes Gebiet, das allerdings in den letzten Jahren dank – hinsichtlich Empfindlichkeit und Winkelauflösung – vielfach verbesserter IR-Beobachtungen studiert werden konnte. Eigenbewegungen, d.h. zeitlich sich ändernde Positionen an der Sphäre, von hellen Sternen in der Nähe des Zentrums konnten beobachtet werden; diese erlauben eine Bestimmung der Masse innerhalb eines Raumgebiets mit der Ausdehnung von ~ 0.1 pc, $M(0.1 \text{ pc}) \sim 3 \times 10^6 M_\odot$. Obwohl die Daten bislang keine völlig eindeutige Interpretation dieser Massenkonzentration erlauben, gibt es keine plausible Alternative zu der Schlussfolgerung, dass das Zentrum unserer Milchstraße ein Supermassives Schwarzes Loch (supermassive black hole, SMBH) etwa dieser Masse beherbergt. Dabei ist dieses SMBH weit weniger massiv als diejenigen, die man in vielen anderen Galaxien entdeckt hat.

Allerdings können wir unsere Galaxis nicht „von außen“ betrachten. Dieser interne Standpunkt macht es schwierig, die globalen Eigenschaften unserer Galaxis zu verstehen: Die Struktur und Geometrie der Galaxis, z. B. ihrer Spiralarme, ist nur schwer von unserem Standort her zu erkennen. Weiterhin verbirgt die Extinktion durch Staub den Blick auf große Teile unserer Galaxis (siehe Abb. 1.6). Dadurch sind die globalen Eigenschaften der Galaxis (z. B. die Gesamtlichtkraft) nur schwer messbar. Diese lassen sich viel besser „von außen“ betrachten, also bei anderen, ähnlichen Spiralgalaxien. Um die globalen und großräumigen Eigenschaften unserer Galaxis zu verstehen, ist ein Vergleich mit ähnlichen Galaxien, die wir in ihrer Gesamtheit untersuchen können, extrem hilfreich. Nur durch gemeinsames Studium unserer Galaxis und anderer Galaxien kann man hoffen, die physikalische Natur und die Entwicklung von Galaxien in der Zeit zu verstehen.

1.2.2 Die Welt der Galaxien

Wir erörtern als nächstes die Eigenschaften anderer Galaxien. Die beiden Haupttypen von Galaxien sind Spiralgalaxien (wie unsere Galaxis; siehe auch Abb. 1.7) und Elliptische Galaxien (Abb. 1.8); dane-

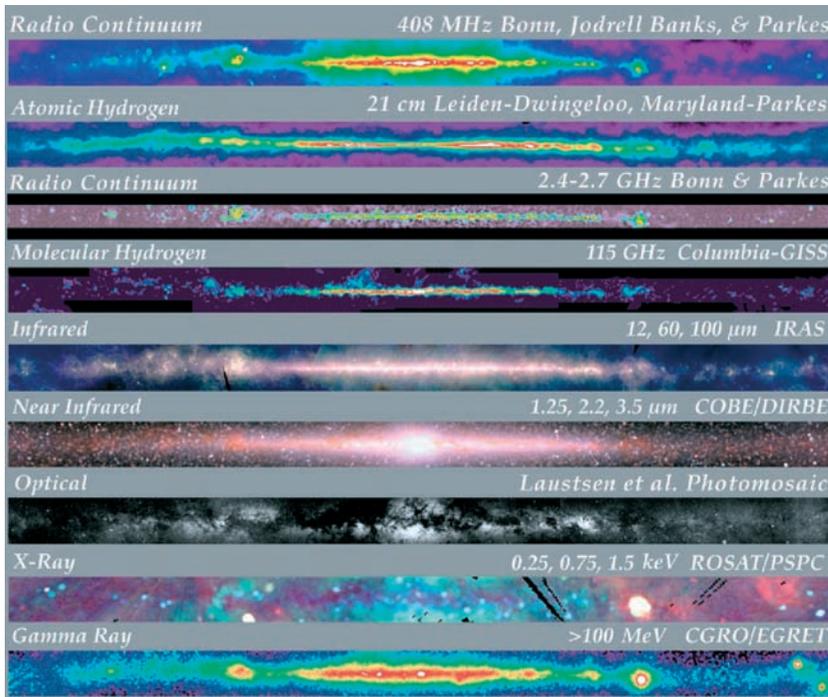


Abb. 1.5. Die Galaktische Scheibe in neun verschiedenen Wellenlängen. Das Erscheinungsbild variiert stark zwischen den verschiedenen Aufnahmen; so ist beispielsweise die Verteilung des atomaren Wasserstoffs und des molekularen Gases deutlich stärker zur Galaktischen Ebene hin konzentriert als etwa die im Nah-Infraroten sichtbare Sternverteilung, die sehr deutlich die Anwesenheit des Bulges als zentrale Verdickung zeigt. Die Staubabsorption im Optischen ist ebenfalls klar zu erkennen und kann mit der in Abb. 1.2 verglichen werden

ben gibt es weitere Klassen von Galaxien wie die Irregulären und Zwerggalaxien, Aktive Galaxien, und Starburst-Galaxien, wobei letztere eine sehr große Sternbildungsrate verglichen mit normalen Galaxien aufweisen. Diese Klassen unterscheiden sich nicht nur in ihrem Erscheinungsbild, nach der sie klas-

sifiziert werden, sondern auch durch physikalische Eigenschaften wie Farbe (\rightarrow Sterninhalt), interne Rötung (\rightarrow Staubinhalt), Gehalt an interstellarem Gas, Rate der Sternentstehung, usw. Galaxien verschiedener Morphologie haben sich unterschiedlich entwickelt.



Abb. 1.6. Die Galaxie Dwingeloo 1 ist nur etwa 5 mal weiter von uns entfernt als unsere nächste große Nachbargalaxie, Andromeda, wurde aber erst in den 90er Jahren entdeckt, da sie sich hinter dem Galaktischen Zentrum „versteckt“: Die Absorption in dieser Richtung, und die vielen leuchtkräftigen Sterne haben eine frühere Entdeckung verhindert. Die Galaxie wurde zunächst mit Radiobeobachtungen entdeckt. Die Abbildung zeigt ein mit dem Isaac Newton Telescope in den Bändern V, R und I aufgenommenes Bild



Abb. 1.7. NGC 2997 ist eine typische Spiralgalaxie, deren Scheibe etwa 45 Grad zu unserer Sichtlinie geneigt ist. Wie die meisten Spiralen hat sie zwei Spiralarme; diese sind wesentlich „blauer“ als andere Teile der Galaxie. Dies resultiert aus aktiver Sternentstehung in den Spiralarmen, so dass dort junge, heiße, also blaue Sterne vorhanden sind, während das Zentrum der Galaxie, insbesondere der Bulge, im Wesentlichen aus älteren Sternen besteht



Spiralgalaxien sind Sternsysteme, in denen auch heute noch aktive Sternentstehung stattfindet, während Ellipsen fast nur aus alten Sternen bestehen: Ihre Sternbildung muss daher schon vor langer Zeit abgeschlossen worden sein. Die S0-Galaxien, ein Zwischentyp, besitzen wie die Spiralgalaxien eine Scheibe, bestehen aber wie die Ellipsen fast nur aus alten – d. h. massearmen, kühlen – Sternen. Ellipsen und S0-Galaxien fasst man zusammen unter dem Begriff *Frühtyp-Galaxien* (early-type galaxies), während Spiralen als *Spättyp-*

Abb. 1.8. M87 ist eine sehr leuchtkräftige Elliptische Galaxie im Zentrum des Virgo-Haufens, in einem Abstand von etwa 18 Mpc. Der Durchmesser der Galaxie beträgt etwa 40 kpc; sie ist wesentlich massereicher als unsere Galaxis ($M > 3 \times 10^{12} M_{\odot}$). Diese Galaxie werden wir noch öfters betrachten: Sie ist nicht nur ein gutes Beispiel für eine zentrale Haufengalaxie, sondern ist auch ein Vertreter einer Familie von Galaxien, die als „Aktive Galaxien“ bezeichnet werden. Sie ist ein starker Radio-Strahler (Radioastronomen bezeichnen sie auch als Virgo A), und besitzt einen optischen Jet im Zentrum

Galaxien (late-type galaxies) bezeichnet werden (diese Bezeichnungen sollen im übrigen keine Interpretation implizieren und existieren allein aus historischen Gründen).

Die Scheiben von Spiralgalaxien rotieren differentiell, und aus ihrer Rotationsgeschwindigkeit lässt sich wie bei der Milchstraße mit dem Kepler-Gesetz (1.1) ihre Masse bestimmen. Man findet, dass die Rotationskurven von Spiralen nach außen hin nicht abfallen, wie man eigentlich aufgrund der Lichtverteilung erwartet. *Wie unsere Galaxis enthalten Spiralgalaxien eine große Menge an Dunkler Materie; die sichtbare Materie ist eingebettet in einen Halo Dunkler Materie.* Die Ausdehnung dieses Halos kann nur geschätzt werden, aber vieles deutet darauf hin, dass er sehr viel größer ist als die Ausdehnung der sichtbaren Materie: So ist z. B. die Rotationskurve flach bis hin zu den größten Radien, wo sie durch vorhandenes Gas noch vermessen werden kann. Das Studium der Dunklen Materie in Ellipsen ist komplizierter, aber inzwischen ist auch bei ihnen die Existenz eines Dunklen Halos nachgewiesen worden.

Das Hertzsprung–Russell-Diagramm, bzw. das Farben-Helligkeits-Diagramm von Sternen (siehe Anhang B), hat sich für die stellare Astrophysik als vielleicht wichtigstes Diagramm erwiesen. Die Tatsache, dass die meisten Sterne sich entlang einer eindimensionalen Sequenz, der Hauptreihe, gruppieren, hat zu dem Schluss geführt, dass für die Hauptreihensterne die Leuchtkraft und die Oberflächentemperatur nicht voneinander unabhängige Größen sind, sondern die Eigenschaften solcher Sterne durch im Wesentlichen einen Parameter charakterisiert werden können: der Sternmasse. Wir werden sehen, dass auch die verschiedenen Eigenschaften von Galaxien nicht unabhängig voneinander sind, sondern dynamische Eigenschaften (wie etwa die Rotationsgeschwindigkeiten von Spiralen) mit der Leuchtkraft in einem engen Zusammenhang stehen. Diese Skalierungsrelationen sind daher von ähnlicher Bedeutung für das Studium von Galaxien wie das Hertzsprung–Russell-Diagramm für die Sterne. Weiterhin erweisen sie sich für die Entfernungsbestimmung von Galaxien als äußerst nützlich.

Wie unsere Milchstraße scheinen auch andere Galaxien ein SMBH im Zentrum zu beherbergen. Das Verblüffende ist, dass die Masse des SMBH mit der Geschwindigkeitsverteilung der Sterne in den Ellip-

sen bzw. im Bulge von Spiralen sehr eng korreliert ist. Der physikalische Ursprung dieser Tatsache ist bisher noch nicht bekannt, sicherlich deutet sie aber auf eine enge gemeinsame Entwicklung der Galaxien und ihrer SMBH hin.

1.2.3 Die Hubble Expansion des Weltalls

Die Radialgeschwindigkeit von Galaxien, gemessen durch die Dopplerverschiebung von Spektrallinien (Abb. 1.9), ist für fast alle Galaxien positiv, d. h. sie scheinen sich von uns wegzubewegen. Edwin Hubble fand 1928, dass diese Fluchtgeschwindigkeit v umso größer ist, je weiter die Galaxien von uns entfernt sind. Er ermittelte eine lineare Relation (Abb. 1.10) zwischen der Radialgeschwindigkeit und der Entfernung der Galaxien,

$$v = H_0 D, \quad (1.2)$$

wobei D die Entfernung einer Galaxie ist und die Proportionalitätskonstante H_0 als *Hubble-Konstante* bezeichnet wird. Ihr Wert ist erst in den letzten Jahren mit mehreren Methoden (auf die später noch eingegangen wird) mit guter Genauigkeit ermittelt worden zu

$$60 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \lesssim H_0 \lesssim 80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}, \quad (1.3)$$

wobei der Fehlerbereich verschiedener Methoden (und Autoren) durchaus verschieden ist. Das Hauptproblem bei der Bestimmung von H_0 ist die Messung absoluter Entfernungen von Galaxien, wohingegen Dopplerverschiebungen sehr gut messbar sind. Setzt man die Gültigkeit von (1.2) voraus, kann man die Radialgeschwindigkeit als Maß für die Entfernung von Galaxien heranziehen. Man definiert die *Rotverschiebung* z aus der Verschiebung von Spektrallinien,

$$z := \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad \lambda_{\text{obs}} = (1+z)\lambda_0, \quad (1.4)$$

wobei λ_0 die Wellenlänge eines spektralen Übergangs (im Ruhesystem des Emitters) und λ_{obs} die beobachtete Wellenlänge bezeichnet. Zum Beispiel ist für den Lyman- α Übergang (dem Übergang vom ersten angeregten Niveau zum Grundzustand) im Wasserstoffatom $\lambda_0 = 1216 \text{ \AA}$. Für kleine Rotverschiebungen gilt

$$v \approx zc, \quad (1.5)$$

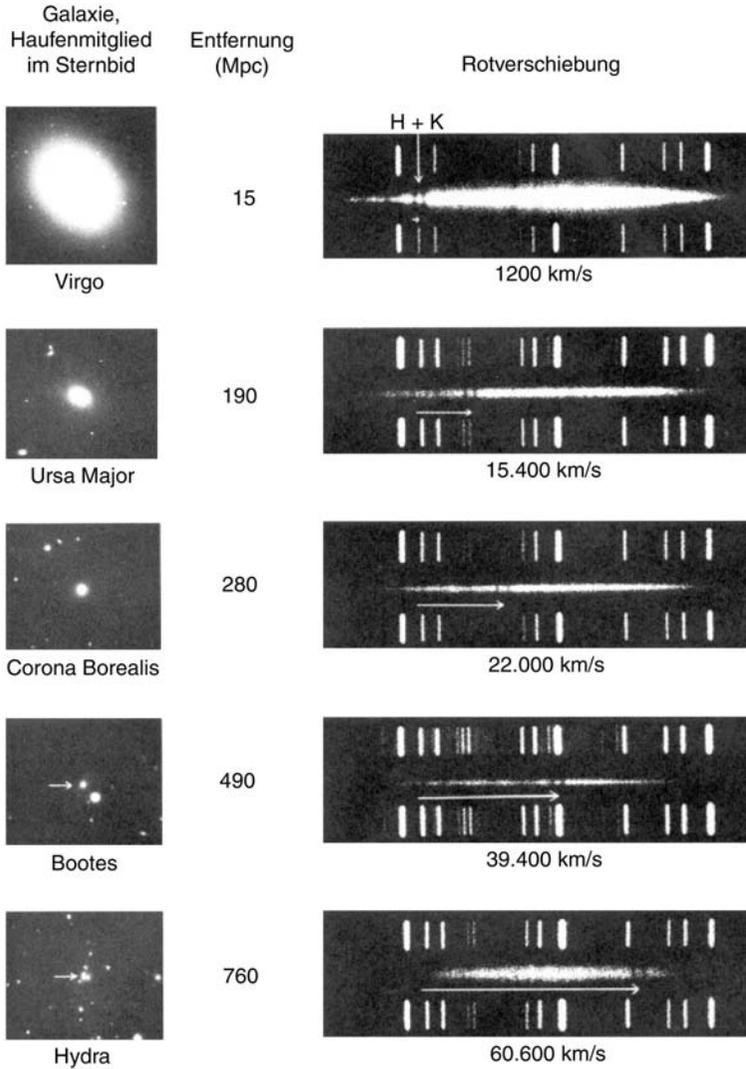


Abb. 1.9. Die Spektren von Galaxien zeigen charakteristische Spektrallinien, z. B. die H+K Linien des Kalziums. Allerdings besitzen diese Linien nicht die Wellenlängen, die man im Labor misst, sondern sind i. A. zum Roten hin verschoben. Dies ist hier anhand einiger Galaxien demonstriert, deren Entfernung von oben nach unten anwächst. Aufgrund der Verschiebung der Linien, interpretiert als Doppler-Effekt, kann man die Relativgeschwindigkeit der Galaxien zu uns bestimmen – diese ist umso größer, je weiter die Galaxie von uns entfernt ist

während für größere Rotverschiebungen diese Relation modifiziert werden muss, dann allerdings auch die Interpretation der Rotverschiebung.⁴ Die Kombination von

(1.2) und (1.5) ergibt

$$D \approx \frac{zc}{H_0} \approx 3000 z h^{-1} \text{ Mpc}, \quad (1.6)$$

⁴Die Verschiebung von Spektrallinien ist die eigentliche Observable. Je nach Zusammenhang wird diese interpretiert als eine radiale Geschwindigkeit einer Quelle weg von uns – etwa wenn wir die Radialgeschwindigkeit von Sternen in unserer Milchstraße vermessen – oder aber als kosmologische „Fluchtgeschwindigkeit“, wie das beim Hubble-Gesetz der Fall ist. Diese beiden Interpretationen sind prinzipiell nicht zu trennen, da eine Galaxie nicht nur an der kosmischen Expansion teilnimmt, sondern zusätzlich auch eine

sog. Pekuliargeschwindigkeit besitzen kann. Wir werden daher die Begriffe „Doppler-Verschiebung“ bzw. „Rotverschiebung“ und „Radialgeschwindigkeit“ je nach Zusammenhang benutzen, aber stets in dem Gedanken, dass beide durch die Verschiebung von Spektrallinien gemessen werden. Erst bei der Betrachtung des fernen Universums, bei denen die Doppler-Verschiebung durch die kosmische Expansion völlig dominiert wird, werden wir durchgängig von „Rotverschiebung“ sprechen.

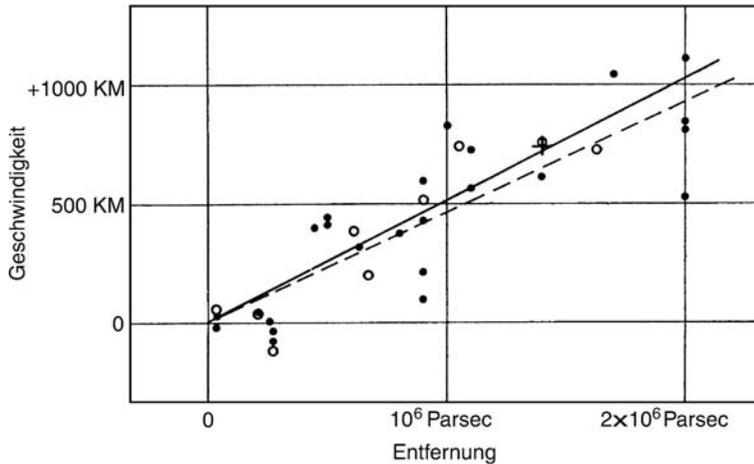


Abb. 1.10. Das Hubble-Diagramm von 1929 zeigt die Radialgeschwindigkeit von Galaxien als Funktion ihrer Entfernung. Während die Fluchtgeschwindigkeit „einfach“ gemessen werden kann durch Bestimmung der Dopplerverschiebung von Spektrallinien, ist die genaue Bestimmung von Entfernungen sehr viel schwieriger; wir werden in Abschn. 3.6 Methoden zur Entfernungsbestimmung von Galaxien diskutieren. Hubble unterschätzte die Entfernungen deutlich, weswegen sein Wert der Hubble-Konstanten wesentlich zu groß war. Nur wenige und sehr nahe Galaxien zeigen eine Blauverschiebung, d. h. bewegen sich auf uns zu; eine davon ist Andromeda (= M31)

wobei die Ungenauigkeit, mit der H_0 bekannt ist, durch h parametrisiert wird, wobei

$$H_0 = h \, 100 \, \text{km s}^{-1} \, \text{Mpc}^{-1} . \quad (1.7)$$

Entfernungsbestimmungen, die auf der Rotverschiebung basieren, enthalten daher immer den Faktor h^{-1} . Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass (1.5) und (1.6) nur für $z \ll 1$ gelten; die Verallgemeinerung für größere Rotverschiebungen wird in Abschn. 4.3 besprochen. Dennoch gilt auch für größere Rotverschiebungen, dass z ein Maß für die Entfernung ist, basierend auf der Gültigkeit von (1.2).

1.2.4 Aktive und Starburst Galaxien

Eine spezielle Form von Galaxien sind die so genannten Aktiven Galaxien, die in ihrem Zentrum eine sehr starke Energiequelle besitzen (active galactic nuclei, AGNs). Die bekanntesten Vertreter dieser AGNs sind die Quasare, Objekte mit teilweise sehr hoher Rotverschiebung und exotischen Eigenschaften. Ihre Emissionslinien können extrem breit sein: Interpretiert man diese Linienbreite als Doppler-Verbreiterung, die aus Überlagerung der Linien von emittierendem Gas mit einer sehr breiten Geschwindigkeitsverteilung resultiert, so ergeben sich Geschwindigkeiten von typischerweise $\Delta v \sim 10\,000 \, \text{km/s}$. Auf optischen Aufnahmen erscheinen Quasare punktförmig – erst mit dem Hubble Space

Telescope (HST) ist es gelungen, bei einer größeren Anzahl von ihnen Struktur im Optischen zu entdecken (Abb. 1.11).

Viele Eigenschaften von Quasaren sind ähnlich zu denen der Seyfert-Galaxien (vom Typ I), Galaxien mit einem sehr hellen Kern und ebenfalls sehr breiten Emissionslinien, und werden daher oft als extreme Mitglieder dieser Klasse interpretiert. Die Gesamtleuchtkraft von Quasaren ist extrem groß, einige von ihnen emittieren mehr als 1000 mal so viel Licht wie unsere Galaxis, und diese Strahlung kommt dabei aus einem sehr kleinen Raumgebiet, dessen Größe sich z. B. aus der Variabilität abschätzen lässt. Aufgrund dieser und anderer Eigenschaften, die in Kap. 5 besprochen werden, schließt man, dass die Kerne Aktiver Galaxien ein Supermassives Schwarzes Loch enthalten. Die Erzeugung der Strahlung findet statt, indem Materie auf dieses Loch zufällt (akkretiert) und dabei potentielle Gravitationsenergie in kinetische Energie umsetzt. Wenn diese kinetische Energie (z. B. in sog. Akkretionsscheiben) durch Reibung in innere Energie (also Wärme) umgesetzt werden kann, kann diese abgestrahlt werden – dies ist der effizienteste Prozess zur Energieerzeugung: Bezogen auf eine Einheitsmasse ist Akkretion auf Schwarze Löcher etwa 10 mal effektiver als die Kernfusion von Wasserstoff in Helium! AGNs zeigen oftmals Strahlung in einem sehr weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums, von Radiostrahlung bis hin zu Röntgen- und Gamma-Strahlung.

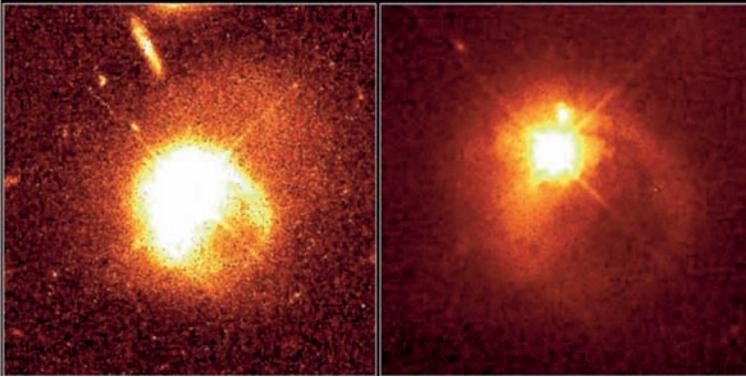


Abb. 1.11. Der Quasar PKS 2349 befindet sich im Zentrum einer Galaxie, der Heimatgalaxie (oder Host-Galaxie) des Quasars. Die Diffraction Spikes (Beugungserscheinungen an der Aufhängung des Sekundärspiegels) in der Mitte des Objekts zeigen an, dass sich im Zentrum dieser Galaxie eine Punktquelle befindet, der eigentliche Quasar, der wesentlich heller ist als seine Heimatgalaxie (host galaxy). Die Galaxie zeigt deutliche Anzeichen einer Verzerrung, als große und

dünne Gezeitenarme klar zu sehen, die durch eine benachbarte Galaxie hervorgerufen wird. Diese Nachbargalaxie ist im rechten Bild direkt oberhalb des Quasars zu erkennen, ein Objekt etwa von der Größe der Großen Magellanschen Wolke. Hosts von Quasaren sind häufig gestört oder befinden sich im Verschmelzungsprozess mit anderen Galaxien (merging). Die beiden hier gezeigten Aufnahmen des gleichen Objekts haben unterschiedlichen Helligkeitskontrast

Während in Spiralgalaxien auch noch heute Sterne entstehen, Sternentstehung somit ein weit verbreitetes Phänomen ist, gibt es Galaxien, deren Sternentstehungsrate wesentlich größer ist als die „normaler“ Spiralen. Man spricht von einem *burst of star formation*, bzw. *Starburst-Galaxien*. Solche Sternentstehungsraten betragen typischerweise zwischen 10 und $300M_{\odot}/\text{yr}$, während unsere Milchstraße nur etwa $2M_{\odot}/\text{yr}$ an Sternen neu erzeugt. Diese heftige Sternentstehung findet oft stark konzentriert in der Nähe des jeweiligen Galaxienzentrums statt. Starbursts werden wesentlich von

Störungen des Gravitationsfeldes von Galaxien beeinflusst oder gar erst angeregt, wie sie z.B. von Wechselwirkungen zwischen Galaxien hervorgerufen werden. Solche Starburst-Galaxien (siehe Abb. 1.12) sind extrem hell im fernen Infrarot (FIR); sie senden bis zu 98% ihrer gesamten Energie in diesem Spektralbereich aus. Dies geschieht durch Staubemission: Staub absorbiert bei diesen Galaxien den überwiegenden Teil der energetischen UV-Strahlung, die bei der Sternentstehung frei wird, und strahlt diese Energie als thermische Strahlung im FIR wieder ab.



Abb. 1.12. Arp 220 ist das leuchtkräftigste Objekt in unserem lokalen Universum. Sie wurde zunächst als pekuläre Galaxie katalogisiert, dann entdeckte der Infrarot-Satellit IRAS die ungeheure Leuchtkraft im IR. Arp 220 ist der Prototyp der ultraluminous infrared galaxies (ULIRG). Diese NIR-Aufnahme mit dem HST zeigt die Struktur dieser Galaxie: zwei kollidierende Spiralgalaxien im Zentrum von Arp 220. Die dadurch hervorgerufenen Störungen des ISM lösen einen starburst aus; Staub in der Galaxie absorbiert den allergrößten Teil der UV-Strahlung von den heißen Sternen und strahlt diese im IR wieder ab

1.2.5 Voids, Galaxienhaufen und Dunkle Materie

Wechselwirkungen zwischen Galaxien (Abb. 1.13) werden begünstigt durch die Tatsache, dass Galaxien nicht zufällig verteilt sind. So zeigt zum Beispiel die Projektion der Galaxien am Himmel eine deutliche Struktur. Entfernungsmessungen von Galaxien erlauben weiterhin die Bestimmung ihrer drei-dimensionalen Verteilung. Dabei zeigt sich eine starke Korrelation der Galaxienpositionen: Es gibt Raumbereiche mit einer sehr großen Dichte von Galaxien, aber auch Regionen, in denen es fast keine Galaxien gibt. Letztere nennt man Löcher, *voids*. Solche voids können Durchmesser von bis zu $30h^{-1}$ Mpc besitzen.

Galaxienhaufen (clusters of galaxies) sind gebundene Systeme von hundert und mehr Galaxien innerhalb eines Gebiets mit einem Durchmesser von $\sim 2h^{-1}$ Mpc. Haufen enthalten hauptsächlich Frühtyp-Galaxien, so dass sich in Haufengalaxien kaum noch Sterne bilden. Einige Galaxienhaufen erscheinen in der Projektion fast rund, andere zeigen eine stark elliptische oder irreguläre Verteilung von Galaxien; manchmal besitzen sie mehr als ein Zentrum. Der uns nächste Galaxienhaufen ist der Virgo-Haufen, in einer Entfernung von ~ 18 Mpc; er ist ein Haufen mit irregulärer Galaxienverteilung. Der uns nächste reguläre Haufen ist Coma, mit einer Entfernung von ~ 90 Mpc.⁵ Coma (Abb. 1.14) enthält etwa

⁵Die Entfernungen dieser beiden Galaxienhaufen sind nicht über die Rotverschiebung ermittelt worden, sondern durch direkte Methoden, die in Abschn. 3.6 diskutiert werden; diese direkten Messungen bilden eine der erfolgreichsten Methoden zur Bestimmung der Hubble-Konstanten.



Abb. 1.14. Der Coma-Galaxienhaufen befindet sich etwa 90 Mpc von uns entfernt und ist der nächste massereiche, reguläre Galaxienhaufen. Praktisch alle Objekte auf dieser Aufnahme sind Galaxien des Haufens – Coma enthält mehr als tausend leuchtkräftige Galaxien

1000 helle Galaxien, von denen 85% Frühtyp-Galaxien sind.

Fritz Zwicky bestimmte 1933 die Radialgeschwindigkeiten der Galaxien in Coma und fand, dass ihre Dispersion etwa 1000 km/s beträgt. Aus der Gesamtleuchtkraft L aller seiner Galaxien kann man eine Masse des Haufens abschätzen: Wenn im Mittel die Sterne der Haufengalaxien ein ähnliches Masse-zu-Leuchtkraft-



Abb. 1.13. Zwei Spiralgalaxien wechselwirken miteinander. NGC 2207 (links) und IC 2163 sind sich nicht nur in der Projektion sehr nahe, sondern die starken gravitativen Gezeitenkräfte, die sie aufeinander ausüben, sind durch die auffälligen Gezeitenarme klar sichtbar. Dieses Bild wurde mit dem Hubble Space Telescope aufgenommen

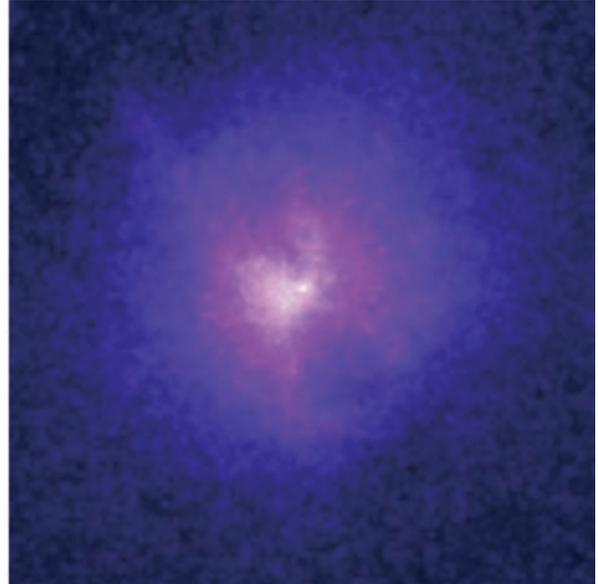
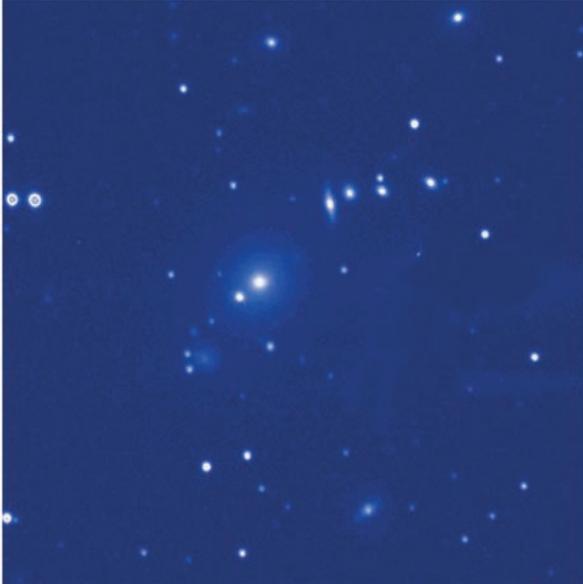


Abb. 1.15. Der Galaxienhaufen Hydra A, links eine optische Aufnahme, rechts ein Bild, das mit dem Röntgen-Satelliten Chandra aufgenommen wurde. Der Haufen hat eine Rotverschiebung von $z \approx 0.054$ und ist somit ca. 250 Mpc von uns

entfernt. Die Röntgenemission stammt von einem Gas, dessen Temperatur 40×10^6 K beträgt, im Zentrum des Haufens ist es um etwa 15% kühler

Verhältnis (M/L) wie unsere Sonne besitzen, dann würde man schließen: $M = (M_{\odot}/L_{\odot})L$. Allerdings sind die Sterne in Frühtyp-Galaxien im Mittel etwas weniger massereich als die Sonne und haben daher ein etwas größeres M/L .⁶ Die obige Massenabschätzung muss daher um einen Faktor ~ 10 erhöht werden. Zwicky verglich nun die so erhaltene Masse mit den Radialgeschwindigkeiten der Haufengalaxien relativ zu ihrem Mittelwert und stellte fest, dass die typische Galaxiengeschwindigkeit im Haufen wesentlich größer ist als die Entweichgeschwindigkeit vom Haufen, die sich aus der so bestimmten Masse ergibt. Die Galaxien des Haufens müssten daher eigentlich auf einer Zeitskala von etwa 10^9 Jahren auseinander fliegen, der Haufen sich auflösen. Da Coma aber als relaxierter, d. h. im Gleichgewicht befindlicher Haufen erscheint, dessen Alter daher deutlich größer sein sollte als die dynamische Zeitskala von 10^9 Jahren, schloss Zwicky daraus, dass der Coma-Haufen wesentlich mehr Masse enthält als die Summe der Massen der Haufengala-

xien. Unter Anwendung des Virialsatzes⁷ konnte er aus der Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien die Masse des Haufens abschätzen. Dies war der erste deutliche Hinweis auf die Existenz Dunkler Materie!

Röntgensatelliten haben später gezeigt, dass Galaxienhaufen starke Quellen von Röntgenstrahlung sind. Sie enthalten ein heißes Gas mit Temperaturen von 10^7 bis 10^8 K (Abb. 1.15). Die Temperatur des Gases ist ein weiteres Maß für die Tiefe des Potentialtopfes des Haufens: je heißer das Gas, desto tiefer muss der Potentialtopf sein, damit das Gas nicht entweicht. Die Massenabschätzungen aufgrund der Röntgentemperatur ergeben Werte, die gut vergleichbar sind mit denen aus der Geschwindigkeitsdispersion der Haufengalaxien und bestärken daher die Hypothese der Existenz

⁷Der Virialsatz besagt in seiner einfachsten Form, dass für ein isoliertes dynamisches System in einem stationären Gleichgewichtszustand die kinetische Energie gerade die Hälfte des Betrags der potentiellen Energie beträgt, also

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} |E_{\text{pot}}|; \quad (1.8)$$

insbesondere ist die Gesamtenergie $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = E_{\text{pot}}/2 = -E_{\text{kin}}$.

⁶Wir werden in Kapitel 3 noch sehen, dass für die Sterne in Spiralgalaxien im Mittel $M/L \sim 3M_{\odot}/L_{\odot}$, während für Elliptische Galaxien ein größerer Wert anzusetzen ist, $M/L \sim 10M_{\odot}/L_{\odot}$.



Abb. 1.16. Die Galaxiengruppe HCG87 gehört zu der Klasse der sog. Kompakten Gruppen. Auf dieser HST-Aufnahme sieht man drei massereiche Galaxien dieser Gruppe, eine edge-on Spirale unten im Bild, eine Ellipse unten rechts, und eine weitere Spirale oben im Bild (die kleine Spirale im Zentrum gehört nicht zu der Gruppe). Die beiden unteren Galaxien haben eine Aktiven Galaxienkern, während die Spirale oben eine Sternentstehungsphase zu durchlaufen scheint. Die Galaxien der Gruppe sind so eng beieinander, dass sie sich in der Projektion beinahe berühren. Zwischen den Galaxien konnten Gasströme festgestellt werden: Die Galaxien stören sich gegenseitig, und dies kann Auslöser für die Aktivität im Kern und die Sternentstehung sein. Die Galaxien sind in einem gemeinsamen Gravitationspotential gebunden und werden sich auf kosmologisch kurzen Zeitskalen, nämlich in wenigen Orbits – wobei ein Orbit ca. 10^8 Jahre dauert – massiv stören und vermutlich verschmelzen. Solche Verschmelzungsprozesse sind für die Entwicklung der Galaxienpopulation von äußerster Bedeutung

Dunkler Materie in Galaxienhaufen. Eine dritte Methode zur Massenbestimmung von Haufen, der sog. Gravitationslinseneffekt, macht Gebrauch von der Tatsache, dass Licht im Schwerfeld abgelenkt wird. Diese Lichtablenkung an einer Massenkonzentration ist umso stärker, je größer die Masse ist. Aus der Beobachtung und Analyse dieses Gravitationslinseneffekts in Galaxienhaufen ergeben sich Werte für die Haufenmasse, die in Übereinstimmung mit den beiden anderen Methoden sind. Somit sind Galaxienhaufen neben den Galaxien

eine zweite Klasse kosmischer Objekte, deren Masse von Dunkler Materie dominiert wird.

Galaxienhaufen sind kosmologisch junge Gebilde: ihre dynamische Zeitskala kann man abschätzen als die Zeit, die eine Haufengalaxie benötigt, um einmal den Haufen zu durchqueren. Mit $v \sim 1000$ km/s und einem Durchmesser von $2R \sim 2$ Mpc erhält man so

$$t_{\text{dyn}} \sim \frac{2R}{v} \sim 2 \times 10^9 \text{ yr}; \quad (1.9)$$

wie wir später noch sehen werden, ist das Universum etwa 14×10^9 Jahre alt. In dieser Zeit haben Galaxien daher keine Gelegenheit, den Haufen oftmals zu durchqueren. Da Galaxienhaufen in diesem Sinne kosmologisch jung sind, enthalten sie im Prinzip noch Information über ihren Anfangszustand; die meisten Haufen hatten keine Zeit, vollständig zu relaxieren und einen Gleichgewichtszustand einzunehmen, der im Wesentlichen unabhängig von den Anfangsbedingungen ist. Dies kann man vergleichen mit dem Umlauf der Sonne um das Zentrum der Milchstraße, der etwa 2×10^8 Jahre dauert – Galaxien hatten also Zeit, ihren Gleichgewichtszustand anzunehmen.

Neben massereichen Haufen von Galaxien gibt es Galaxiengruppen, die manchmal nur wenige leuchtkräftige Galaxien enthalten. Unsere Milchstraße ist selbst Teil einer solchen Gruppe, der *Lokalen Gruppe*, die weiterhin M31 (Andromeda) als dominante Galaxie und einige weit weniger leuchtkräftige Galaxien wie die Magellanschen Wolken enthält. Einige Galaxiengruppen sind sehr kompakt, d. h. ihre Galaxien sind auf engem Raum zusammen (Abb. 1.16). Wechselwirkungen zwischen diesen Galaxien bewirken, dass die Lebensdauer vieler dieser Gruppen wesentlich kleiner ist als das Weltalter; die Galaxien dieser Gruppen werden daher miteinander verschmelzen.

1.2.6 Weltmodelle und thermische Geschichte des Universums

Quasare, Galaxienhaufen und seit einiger Zeit sogar einzelne Galaxien werden auch bei sehr hohen Rotverschiebungen gefunden, bei denen das einfache Hubble-Gesetz (1.2) nicht mehr gilt. Es ist daher nötig, dieses zu verallgemeinern. Das verlangt die Betrachtung von Weltmodellen als Ganzes, die man auch als kosmologische Modelle bezeichnet. Die vorherrschende Kraft

im Universum ist die Gravitation: Schwache und starke Wechselwirkung haben extrem kleine Reichweiten, und elektromagnetische Wechselwirkung spielt auf großen Skalen keine Rolle, da die kosmische Materie im Wesentlichen neutral ist – denn wenn sie es nicht wäre, würden sofort Ströme fließen, um Ladungsdichten auszugleichen. Die gültige Theorie der Gravitation ist die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), die von Albert Einstein im Jahre 1915 formuliert wurde.

Basierend auf den beiden Postulaten, dass (1) unser Platz im Universum von anderen Orten nicht ausgezeichnet ist und dass (2) die Verteilung der Materie um uns herum zumindest auf großen Skalen isotrop ist, kann man homogene und isotrope Weltmodelle (sogenannte Friedmann-Lemaître-Modelle) konstruieren, die den Gesetzen der ART genügen. Expandierende Weltmodelle, die die Hubble-Expansion enthalten, ergeben sich im Rahmen dieser Theorie ganz natürlich. Im Wesentlichen lassen sich diese Modelle durch drei Parameter beschreiben:

- der heutigen Expansionsrate des Universums, also der Hubble-Konstanten H_0 ,
- der heutigen mittleren Materiedichte des Universums, ρ_m , oftmals parametrisiert durch den dimensionslosen *Dichteparameter*

$$\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_m, \quad (1.10)$$

- und der Dichte der sog. Vakuum-Energie, ausgedrückt durch die Kosmologische Konstante Λ oder den entsprechenden Dichteparameter des Vakuums

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}. \quad (1.11)$$

Die Kosmologische Konstante wurde von Einstein ursprünglich eingeführt, damit seine ART auch stationäre Weltmodelle beschreiben kann. Nach der Entdeckung der Hubble-Expansion hat er die Einführung von Λ in seinen Gleichungen als seinen größten Irrtum bezeichnet. Durch die Quantenmechanik erhält Λ eine andere Interpretation, nämlich als Energiedichte des Vakuums.

Die Werte der kosmologischen Parameter sind heute recht genau bekannt (siehe Kap. 8), wobei man $\Omega_m \approx 0.3$ und $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ gefunden hat. Das Ergebnis eines von Null verschiedenen Wertes für Ω_Λ kommt völlig unerwartet. Bislang sind sämtliche Versuche

gescheitert, einen Wert für Ω_Λ aus der Quantenmechanik zu berechnen, der dem sich aus kosmologischen Beobachtungen ergebenden auch nur näherungsweise ähnlich ist. Tatsächlich geben einfache, plausible Abschätzungen einen Wert für Λ , der $\sim 10^{120}$ Mal größer ist als der beobachtete – eine wahrlich schlechte Abschätzung. Diese gewaltige Diskrepanz stellt gegenwärtig wohl eine der größten Herausforderungen an die fundamentale Physik dar.

Entsprechend der Friedmann-Lemaître-Modelle war das Universum früher kleiner und heißer und hat sich im Zuge der Ausdehnung mit der Zeit abgekühlt. Man kann die Geschichte der kosmischen Expansion zurückverfolgen unter der Annahme der Gültigkeit der uns bekannten physikalischen Gesetze. Daraus ergibt sich das Urknall-Modell des Universums, nach dem unser Universum sich aus einem sehr dichten, sehr heißen Zustand, dem sog. *Urknall* (big bang) entwickelte. Dieses Weltmodell macht eine Reihe von Vorhersagen, die in überzeugender Weise verifiziert wurden:

1. Etwa 1/4 der baryonischen Materie des Universums sollte aus Helium bestehen, welches sich etwa 3 Minuten nach dem Urknall gebildet hat, während der Rest im Wesentlichen aus Wasserstoff besteht. Dies ist in der Tat der Fall: Der Massenanteil von Helium in Metall-armen Objekten, deren chemische Zusammensetzung nicht stark durch Sternentwicklungsprozesse modifiziert worden ist, beträgt etwa 24%.
2. Aus dem genauen Anteil von Helium kann man die Anzahl der Neutrino-Sorten bestimmen – je mehr Neutrino-Spezies existieren, um so größer ist der Anteil von Helium. Daraus wurde um 1981 abgeleitet, dass es drei Neutrino-Sorten geben sollte. Dieses Resultat wurde später durch Beschleuniger-Experimente bestätigt.
3. Eine thermische Strahlung aus der heißen Frühphase des Universums sollte auch heute noch messbar sein. Vorhergesagt 1946 durch George Gamow, wurde sie 1965 von Arno Penzias und Robert Wilson entdeckt. Die entsprechenden Photonen konnten sich frei ausbreiten, nachdem das Universum auf etwa 3000 K abgekühlt war und das Plasma sich zu neutralen Atomen vereinigte, eine Epoche, die man als Rekombination bezeichnet. Aufgrund der kosmischen Expansion hat sich die Strahlung auf etwa

$T_0 \approx 2.73$ K abgekühlt. Diese Mikrowellenstrahlung ist nahezu perfekt isotrop, wenn man von der Emission der Milchstraße absieht. Tatsächlich ergab die Messung des Satelliten COBE, dass es sich bei dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (cosmic microwave background, CMB) um das genaueste jemals gemessene Schwarzkörperspektrum handelt.

4. Die heutigen Strukturen im Universum haben sich aus sehr kleinen Dichtefluktuationen des frühen Kosmos entwickelt. Die Keime der Strukturbildung mussten daher bereits in der Frühzeit der kosmischen Entwicklung vorhanden gewesen sein. Diese Dichtefluktuationen sollten daher auch sichtbar sein als kleine Temperaturfluktuationen im Mikrowellenhintergrund, der etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall während der Rekombination freigesetzt worden ist. In der Tat hat COBE diese vorhergesagte Anisotropie zum ersten Mal entdeckt (siehe Abb. 1.17). Spätere Messungen, insbesondere die des Satelliten WMAP, haben die Struktur des Mikrowellenhintergrunds mit deutlich verbesserter Auflösung vermessen und dabei die Theorie der Strukturbildung im Universum im Detail verifiziert (siehe Kapitel 8.6).

Da diese Vorhersagen in solch beeindruckender Weise bestätigt worden sind, werden wir ausschließlich dieses kosmologische Modell betrachten. Es gibt zur Zeit kein konkurrierendes Modell des Universums, das in so natürlicher Weise die grundsätzlichen kosmologischen Beobachtungen erklärt. Weiterhin scheint dieses Modell mit keiner grundlegenden Beobachtung der Kosmologie im Widerspruch zu stehen. Allerdings zeigt die Existenz einer von Null verschiedenen Vakuumenergiedichte, zusammen mit einem Wert für die Materiedichte ρ_m , der etwa das Sechsfache der mittleren Baryondichte des Universum beträgt (wie man sie aus der Häufigkeit der im Urknall entstandenen chemischen Elemente ableiten kann), dass die physikalische Natur von etwa 95% des Inhalts unseres Universums bislang nicht verstanden worden ist.

Die Photonen des CMB standen zum letzten Mal mit Materie durch physikalische Wechselwirkung in Kontakt, als das Universum etwa 3.8×10^5 Jahre alt war, aber auch bei den am weitesten entfernten Galaxien und Quasaren, die wir bisher kennen ($z \sim 6.5$), ist deren Jugendlichkeit beeindruckend: wir sehen sie bei weniger als einem Zehntel des heutigen Weltalters! Die genaue

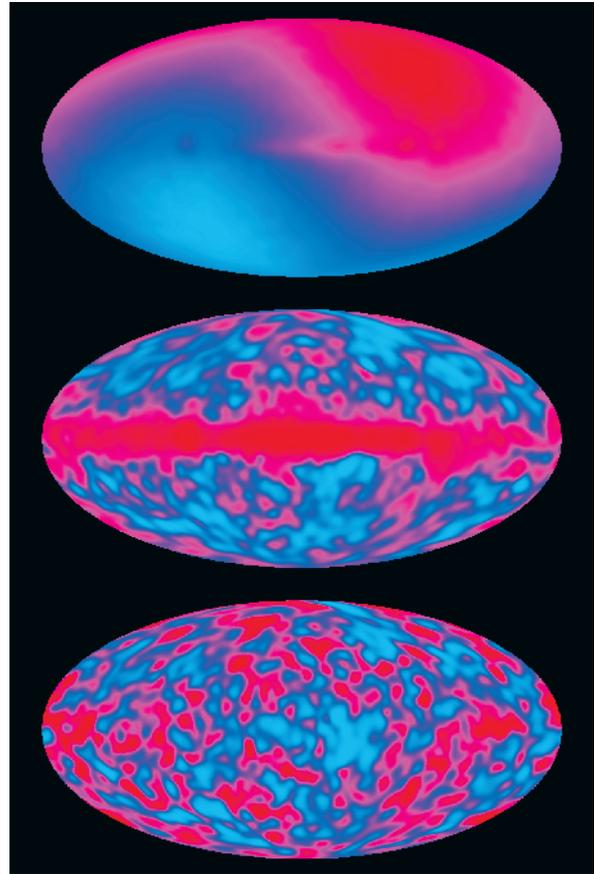


Abb. 1.17. Temperaturverteilung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds am Himmel, wie sie vom Satelliten COBE gemessen wurde. Das oberste Bild zeigt eine Dipol-Verteilung; diese stammt von der Bewegung der Erde relativ zum Ruhesystem des CMB. Wir bewegen uns mit einer Geschwindigkeit von ~ 600 km/s relativ zu diesem System, und dies führt aufgrund des Doppler-Effekts zu einer Anisotropie der Größenordnung $\Delta T/T \sim v/c \sim 2 \times 10^{-3}$. Subtrahiert man diesen Anteil, ergibt sich die mittlere Karte, die deutlich die Emission der Galaktischen Scheibe zeigt. Da diese Emission eine andere spektrale Verteilung besitzt (sie ist kein Schwarzkörper mit $T \sim 3$ K), kann man sie ebenfalls subtrahieren und erhält das untere Bild. Dies sind die primordialen Fluktuationen des CMB mit einer Amplitude von etwa $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-5}$.

Relation zwischen dem Weltalter zur Zeit der Lichtemission und der beobachteten Rotverschiebung hängt von den kosmologischen Parametern H_0 , Ω_m und Ω_Λ ab. Für den Spezialfall $\Omega_m = 1$ und $\Omega_\Lambda = 0$, genannt

Einstein–de Sitter Modell, erhält man:

$$t(z) = \frac{2}{3H_0} \frac{1}{(1+z)^{3/2}}. \quad (1.12)$$

Insbesondere ist das Weltalter heute (d. h. $z = 0$) in diesem Modell

$$t_0 = \frac{2}{3H_0} \approx 6.5 \times 10^9 h^{-1} \text{ yr}. \quad (1.13)$$

Das Einstein–de Sitter (EdS) Modell ist das „einfachste“ Weltmodell, und wir werden es manchmal als Referenz benutzen, aber neueste Beobachtungen sprechen dafür, dass $\Omega_m < 1$ und $\Omega_\Lambda > 0$ ist. Die mittlere Dichte des Universums im EdS-Modell beträgt

$$\rho_0 = \rho_{\text{cr}} \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 1.9 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}, \quad (1.14)$$

sie ist also sehr, sehr klein!

1.2.7 Strukturbildung und Galaxienentwicklung

Die geringe Amplitude der Anisotropien des CMB impliziert, dass die Inhomogenitäten zum damaligen Zeitpunkt sehr klein waren, während heute das Universum, zumindest auf Skalen von Galaxienhaufen, sehr starke Dichteschwankungen aufweist. Das Dichtefeld der kosmischen Materie muss sich also entwickelt haben. Diese Strukturentwicklung findet aufgrund der gravitativen Instabilität statt: Ein überdichtetes Gebiet expandiert aufgrund der Eigengravitation langsamer als das Universum im Mittel, weshalb sich seine relative Überdichte noch verstärkt. Das Anwachsen von Dichtefluktuationen mit der Zeit bewirkt das Ausbilden großräumiger Strukturen. Es sorgt auch dafür, dass sich Galaxien und Haufen bilden. Unser oben skizziertes Weltmodell kann die Häufigkeit von Galaxienhaufen als Funktion der Rotverschiebung vorhersagen, die man dann mit Beobachtungen vergleichen kann. Dieser Vergleich kann zur Bestimmung der kosmologischen Parameter herangezogen werden.

Eine weitere essentielle Schlussfolgerung aus der Kleinheit der CMB Anisotropien ist die Existenz Dunkler Materie auf kosmischen Skalen: *Der größte Teil der kosmischen Materie ist Dunkle Materie, der Baryonenanteil an der Materiedichte ist $\lesssim 20\%$ und $\lesssim 5\%$ an der Energiedichte. Die Energiedichte des Universums ist von der Vakuumenergie dominiert.*

Leider ist die räumliche Verteilung der Dunklen Materie auf großen Skalen nicht direkt beobachtbar, wir sehen nur Galaxien bzw. ihre Sterne. Man erwartet vielleicht, dass Galaxien dort besonders häufig auftreten, wo auch die Dichte der Dunklen Materie besonders groß ist. Es ist aber keineswegs selbstverständlich, dass lokale Dichtefluktuationen der Galaxienanzahl und der Dichte Dunkler Materie streng proportional sind. Der Zusammenhang zwischen Dunkler und leuchtender Materie ist bislang nur näherungsweise verstanden.

Dieser Zusammenhang muss letztendlich aus der Entwicklung von Galaxien begriffen werden: Eine große Dichte Dunkler Materie kann die Bildung von Galaxien begünstigen. Wir werden daher untersuchen, wie Galaxien entstehen und warum es verschiedene Sorten von Galaxien gibt. Mit anderen Worten, was entscheidet, ob eine sich bildende Galaxie zu einer Ellipse oder einer Spirale wird? Diese Frage ist nicht endgültig beantwortet, aber es wird vermutet, dass sich Ellipsen erst durch die Verschmelzung (merging) von Spiralen bilden. In der Tat sagt das Standard-Modell des Universums vorher, dass sich zunächst kleine Galaxien bilden; größere bilden sich erst später durch fortdauerndes merging kleinerer Einheiten.

Die Entwicklung von Galaxien ist direkt beobachtbar: Galaxien hoher Rotverschiebung (d. h. kosmologisch junge Galaxien) sind in der Regel kleiner und blauer – die Sternentstehungsrate war zu früheren Zeiten im Universum deutlich größer als heute. Die Entwicklung der mittleren Farbe von Galaxien als Funktion der Rotverschiebung kann durch eine Mischung von Sternentstehung einerseits und Alterung der Sternpopulation andererseits erklärt werden.

1.2.8 Kosmologie als Triumph des menschlichen Geistes

Kosmologie, extragalaktische Astronomie, ja die gesamte Astrophysik ist ein heroisches Unterfangen des menschlichen Geistes und ein Triumph der Physik. Um das Universum zu verstehen, wenden wir physikalische Gesetze an, die unter ganz anderen Umständen empirisch gefunden wurden. Alle physikalischen Gesetze wurden „heute“ aufgestellt und basieren, mit Ausnahme der Allgemeinen Relativitätstheorie, auf Experimenten im Labormaßstab oder bestenfalls auf Beobachtungen

im Sonnensystem wie z. B. die Keplerschen Gesetze, die als Grundlage der Newtonschen Gravitationstheorie dienten. Haben wir a priori einen guten Grund anzunehmen, dass diese Gesetze auch in anderen Gebieten des Universums gelten, oder zu ganz anderen Zeiten? Dennoch scheint dies der Fall zu sein: Kernprozesse im frühen Universum scheinen nach den gleichen Gesetzen der starken Wechselwirkung abzulaufen, die wir hier und heute im Labor messen – andernfalls wäre die Vorhersage des 25%-igen Massenanteils von Helium nicht möglich. Die Quantenmechanik, die u. a. das Verhältnis der Wellenlängen atomarer Übergänge beschreibt, scheint auch bei sehr großen Entfernungen bzw. zu sehr frühen Zeiten gültig zu sein – selbst die am weitesten entfernten Objekte zeigen Emissionslinien im Spektrum, deren Frequenzverhältnis mit denen im Spektrum naher Objekte übereinstimmen und die von der Quantenmechanik so beschrieben werden.

Bei weitem am größten ist der Triumph der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie wurde ursprünglich von Einstein entworfen, weil seine spezielle Relativitätstheorie es nicht ermöglichte, die Newtonsche Gravitation mit einzubeziehen. Zum damaligen Zeitpunkt (1915) gab es keine empirischen Befunde, die nicht mit der Newtonschen Gravitationstheorie beschreibbar waren. Dennoch entwickelte Einstein eine völlig neue Theorie der Gravitation aus rein theoretischen Gründen. Die korrekte Beschreibung der Lichtablenkung an der Sonne, die 1919 gemessen wurde, und der Periheldrehung des Merkur⁸ waren erste Erfolge der Theorie. Sie ermöglicht die Beschreibung des expandierenden Universums, was nach der Entdeckung von Hubble in 1928 notwendig wurde. Nur mit ihrer Hilfe kann die Geschichte des Kosmos rekonstruiert werden. Diese erscheint uns bekannt bis zurück in die Zeit, als das Universum etwa 10^{-6} Sekunden alt und etwa 10^{13} K heiß war. Auf dieser Beschreibung beruhen die oben erwähnten erfolgreichen Vorhersagen der Kosmologie. Andererseits beschreibt die Allgemeine Relativitätstheorie auch sehr viel kleinere Systeme mit sehr viel stärkeren Gravitationsfeldern, wie z. B. die von Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Die Entdeckung eines Binärsystems bestehend aus zwei Neutronensternen,

⁸Diese war bereits vor 1915 bekannt, aber es war nicht klar, ob sie vielleicht andere Ursachen haben könnte wie z. B. ein Quadrupolmoment der Massenverteilung der Sonne.

PSR 1913+16, hat in den vergangenen 20 Jahren sehr genaue Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie erlaubt, wie z. B. die Periheldrehung in diesem System und die Abnahme des Abstandes mit der Zeit wegen der Energieabstrahlung durch Gravitationswellen. Zusammengenommen wurde die Allgemeine Relativitätstheorie getestet auf Längenskalen von 10^{11} cm (die charakteristische Skala des Binärpulsars) bis hin zu 10^{28} cm, der Größe des heute sichtbaren Universums, also über 10^{17} Größenordnungen – wahrlich ein beeindruckendes Ergebnis!

1.3 Werkzeuge der extragalaktischen Astronomie

Extragalaktische Quellen – Galaxien, Quasare, Galaxienhaufen – sind weit entfernt. Das bedeutet, dass sie i. A. sehr lichtschwach erscheinen, selbst wenn sie intrinsisch leuchtkräftig sind, und unter sehr kleinem Winkeldurchmesser erscheinen können, trotz ihrer vielleicht großen linearen Ausdehnung. In der Tat gibt es genau drei extragalaktische Quellen, die mit dem bloßen Auge sichtbar sind: die Andromeda-Galaxie (M31), und die Große und Kleine Magellansche Wolke. Für die extragalaktische Astronomie benötigt man daher Teleskope mit großen Aperturen (Sammelflächen für Photonen) und hoher Winkelauflösung. Das gilt für alle Wellenlängenbereiche – von der Radioastronomie bis hin zur Gamma-Astronomie.

Die Eigenschaften astronomischer Teleskope und ihrer Instrumente sind nach verschiedenen Kriterien zu bewerten, von denen die wichtigsten kurz erwähnt werden sollen. Die *Beobachtungsempfindlichkeit* gibt an, wie lichtschwach Quellen sein dürfen, um sie in gegebener Integrationszeit untersuchen zu können. Die Empfindlichkeit hängt sowohl von der Apertur des Teleskops als auch von der Effizienz des Instruments und der Sensitivität der Detektoren ab. So wurde beispielsweise die Empfindlichkeit optischer Teleskope um einen großen Faktor dadurch erhöht, dass die CCDs die Photoplatten zu Beginn der 80er Jahre als Detektoren ablösten. Weiterhin hängt die Empfindlichkeit vom Himmelshintergrund ab: Das künstliche Licht bewohnter Regionen zwingt die optischen Teleskope in immer entlegene Gebiete, in denen die *Lichtverschmutzung* minimiert ist; ähnlich ergeht es den Radioastronomen,

4. Kosmologie I: Homogene isotrope Weltmodelle

Wir wenden uns nun der Betrachtung des Universums als Ganzem zu: Nicht mehr einzelne Objekte (wie Galaxien) sollen hier diskutiert werden, sondern der Raum und die Zeit, in dem diese Objekte sich befinden. Diese Betrachtungen werden dann zu einem Weltmodell führen, dem Modell unseres Kosmos.

In diesem Kapitel werden wir Aspekte der homogenen Kosmologie behandeln; wie wir noch sehen werden, kann das Universum in erster Näherung als homogen angenommen werden. Diese Tatsache scheint auf den ersten Blick der Beobachtung zu widersprechen, dass die Welt um uns herum hochgradig inhomogen und strukturiert ist. Die Annahme der Homogenität ist daher sicher nicht auf kleinen Skalen gültig. Jedoch sind die Beobachtungen damit verträglich, dass gemittelt über große Skalen das Universum homogen ist. Aspekte der inhomogenen Kosmologie, also der Bildung und Entwicklung von Strukturen im Universum, werden wir später in Kapitel 7 betrachten.

4.1 Einleitung und grundlegende Beobachtungen

Die Kosmologie ist eine besondere Wissenschaft. Um dies einzusehen, vergegenwärtigen wir uns den typischen Weg des Erkenntnisgewinns in den Naturwissenschaften. Dieser beginnt in der Regel mit der Beobachtung einer Gesetzmäßigkeit, beispielsweise dass die Fallstrecke h eines Steins quadratisch mit der Fallzeit t zusammenhängt, $h = (g/2)t^2$. Dieser Zusammenhang wird dann auch für andere Gegenstände gefunden, man findet ihn an verschiedenen Orten der Erde, und so formuliert man diesen Zusammenhang als „Gesetz“ des freien Falls. Dabei ist die Proportionalitätskonstante $g/2$ in diesem Gesetz stets die gleiche. Dieses Gesetz bewährt sich durch die Vorhersage, wie ein Gegenstand fällt, und wann immer man diese Vorhersage überprüft, trifft sie zu (natürlich vernachlässigen wir in diesem einfachen Beispiel den Luftwiderstand). Zusammenhänge werden zu physikalischen Gesetzen, wenn die mit ihnen gemachten Vorhersagen sich immer und immer wieder bestätigen; die Gültigkeit eines solchen Gesetzes wird als umso

stärker betrachtet, je diverser diese Überprüfungen stattgefunden haben. Das Fallgesetz wurde nur auf der Erdoberfläche überprüft (und ist auch nur dort mit dieser Proportionalitätskonstante gültig; streng genommen gilt auch dies nicht, denn der Wert der Proportionalitätskonstanten ist leicht ortsabhängig), während das Newtonsche Gravitationsgesetz das Fallgesetz beinhaltet, aber auch das Fallgesetz auf der Mondoberfläche und die Bewegung der Planeten um die Sonne beschreibt. Hätte man nur einen Stein zur Verfügung, so wüsste man nicht, ob das Fallgesetz eine Eigenschaft dieses speziellen Steins oder von allgemeinerer Gültigkeit wäre.

Die Kosmologie entspricht in gewisser Weise jenem letzten Beispiel: Wir haben nur ein Universum, das wir beobachten können. Gesetzmäßigkeiten, die wir in unserem Kosmos erkennen, können wir nicht an anderen Universen überprüfen. Es gibt daher auch nicht die Möglichkeit, eine Eigenschaft des Universums als „typisch“ zu bezeichnen – wir haben keinerlei Statistik, auf die sich eine solche Aussage empirisch stützen könnte. Trotz dieser besonderen Situation haben wir enorme Fortschritte im Verständnis unseres Universums gemacht, wie hier und in späteren Kapiteln beschrieben wird.

Kosmologische Beobachtungen sind im Allgemeinen schwierig, da der größte Teil des Universums (und damit die meisten Quellen im Kosmos) sehr weit von uns weg ist. Aufgrund der großen Entfernungen sind diese Quellen daher sehr lichtschwach. Daraus erklärt sich die Tatsache, dass ein großer Teil des Erkenntnisgewinns mit der Entwicklung großer Teleskope und empfindlicher Detektoren einhergeht. Vieles von dem, was wir heute über das ferne Universum wissen, wurde beispielsweise erst ermöglicht durch die neue Generation von optischen Teleskopen der 8-Meter-Klasse.

Der wichtigste Aspekt für die Beobachtungen in der Kosmologie ist jedoch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Eine Quelle im Abstand D sehen wir heute in einem Zustand, in dem sie $\Delta t = (D/c)$ jünger war als heute. Der heutige Zustand des Universums ist nur sehr lokal beobachtbar. Die Kehrseite dieses Effekts ist jedoch von

entscheidender Bedeutung: Die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit erlaubt es, in die Vergangenheit zu schauen! Galaxien im Abstand von 10 Milliarden Lichtjahren sehen wir in einer Entwicklungsstufe, als das Universum nur etwa ein Drittel des heutigen Weltalters besaß. Wir können zwar nicht die Vergangenheit unserer Milchstraße beobachten, aber die von anderen Spiralgalaxien studieren, und wenn es gelingt, solche darunter zu identifizieren, die sich im Laufe der kosmischen Entwicklung zu Objekten ähnlich unserer Galaxis herausbilden werden, dann kann man viel über die typische Entwicklungsgeschichte von solchen Spiralen aussagen.

Die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit in einem euklidischen Raum, in dessen Ursprung $r = 0$ wir uns heute ($t = t_0$) befinden, impliziert, dass wir nur solche Raum-Zeit-Punkte sehen können, für die gilt: $|r| = c(t_0 - t)$; ein beliebiger Raum-Zeit-Punkt (r, t) ist unbeobachtbar. Die Menge der Raum-Zeit-Punkte, die die Relation $|r| = c(t_0 - t)$ erfüllen, nennt man auch unseren *rückwärtigen Lichtkegel*.

Die Tatsache, dass wir nur den Teil des Universums sehen können, der sich auf unserem rückwärtigen Lichtkegel befindet, impliziert, dass wir nur dann eine Chance haben, durch Beobachtungen das Universum zu verstehen, wenn dessen Struktur „einfach“ ist. Zum Glück scheint unser Universum eine im Wesentlichen einfache Struktur zu besitzen.

4.1.1 Grundlegende kosmologische Beobachtungen

Wir beginnen mit einer kurzen Liste von Beobachtungen, die sich für die Kosmologie als besonders wichtig herausgestellt haben. Aus diesen Beobachtungstatsachen werden wir dann sofort einige Schlussfolgerungen ziehen können; andere Beobachtungen werden später im Rahmen eines kosmologischen Modells zu erklären sein.

1. Nachts ist der Himmel dunkel (Olbers-Paradoxon).
2. Gemittelt über große Winkelskalen sind lichtschwache Galaxien (z. B. solche mit $R > 20$) am Himmel gleichförmig verteilt (siehe Abb. 4.1).
3. Bis auf ganz wenige Ausnahmen von sehr nahen Galaxien (z. B. Andromeda=M31) zeigen die Spektren von Galaxien eine Rotverschiebung; die allermeis-

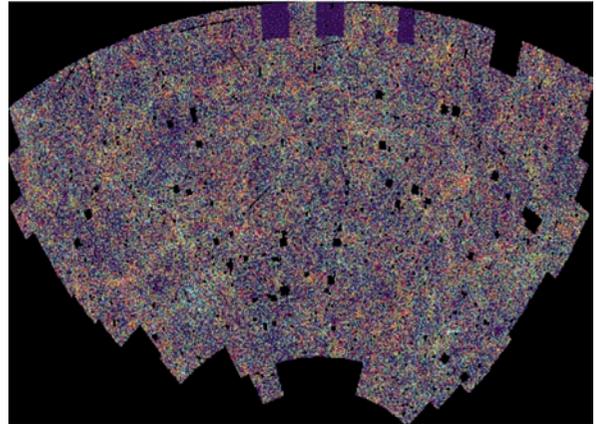


Abb. 4.1. Der APM-Survey: Galaxienverteilung in einem ca. 100 mal 50 Grad großen Feld um den Galaktischen Südpol. Die Intensitäten der Pixel sind skaliert mit der Anzahl der Galaxien pro Pixel, also der an der Sphäre projizierten Galaxiendichte. Die „schwarzen Löcher“ sind nicht untersuchte Gebiete um helle Sterne, Kugelsternhaufen, etc.

- ten Galaxien bewegen sich von uns weg mit einer Geschwindigkeit, die linear mit der Entfernung der Galaxie anwächst (Hubble-Gesetz; siehe Abb. 1.10).
4. In fast allen kosmischen Objekten (z. B. Gasnebel, Hauptreihensterne) beträgt der Massenanteil von Helium etwa 25–30%.
5. Die ältesten Sternhaufen in unserer Galaxis haben ein Alter von $\sim 12 \text{ Gyr} = 12 \times 10^9 \text{ yr}$ (siehe Abb. 4.2).
6. Es gibt eine Mikrowellenstrahlung (kosmischer Mikrowellenhintergrund, cosmic microwave background radiation, CMB), die uns aus allen Richtungen erreicht. Diese Strahlung ist bis auf sehr kleine, aber ungemein wichtige Fluktuationen der relativen Stärke $\sim 10^{-5}$ isotrop.
7. Das Spektrum des CMB entspricht, soweit bisher gemessen, einer perfekten Schwarzkörperstrahlung, d. h. einer Planck-Strahlung mit Temperatur $T_0 = 2.728 \pm 0.004 \text{ K}$ – siehe Abb. 4.3.
8. Die Anzahldichte von Radioquellen bei hoher Galaktischer Breite folgt *nicht* dem einfachen Gesetz $N(> S) \propto S^{-3/2}$ (siehe Abb. 4.4).

4.1.2 Einfache Schlussfolgerungen

Wir wollen zunächst aus den oben aufgezählten Beobachtungstatsachen einige einfache Schlüsse ziehen, die

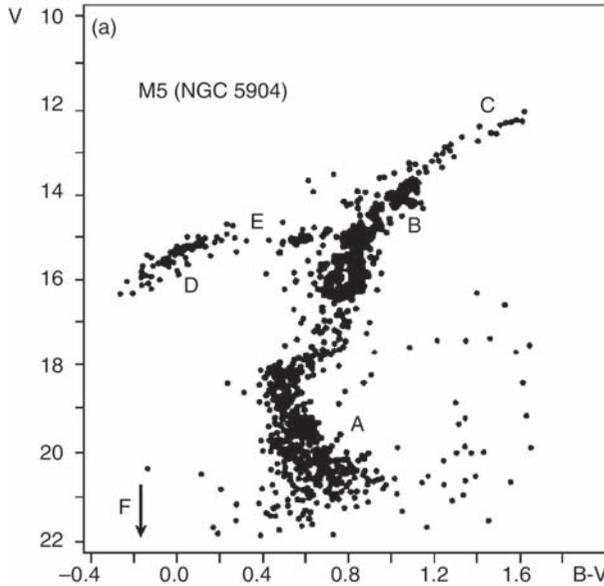


Abb. 4.2. Links: Farben-Helligkeits-Diagramm des Kugelsternhaufens M5. Die verschiedenen Bereiche in diesem Diagramm sind gekennzeichnet. A: Hauptreihe; B: Roter Riesenast; C: hier passiert der He-Flash; D: Horizontalast; E: Schwarzschild-Lücke im Horizontalast; F: Weiße Zwerge, unterhalb des Pfeils. Dort wo die Hauptreihe zum Roten Riesenast abknickt (der so genannte „Turn-Off Point“) befinden sich gerade noch Sterne der Masse, für die das Lebensalter auf der Hauptreihe gleich dem Alter des Kugelsternhaufens ist. Aus der Lage dieses Turn-Offs kann man daher das Alter des Sternhaufens bestimmen, wenn man sie mit Modellrechnungen der Sternentwicklung vergleicht. Im rechten

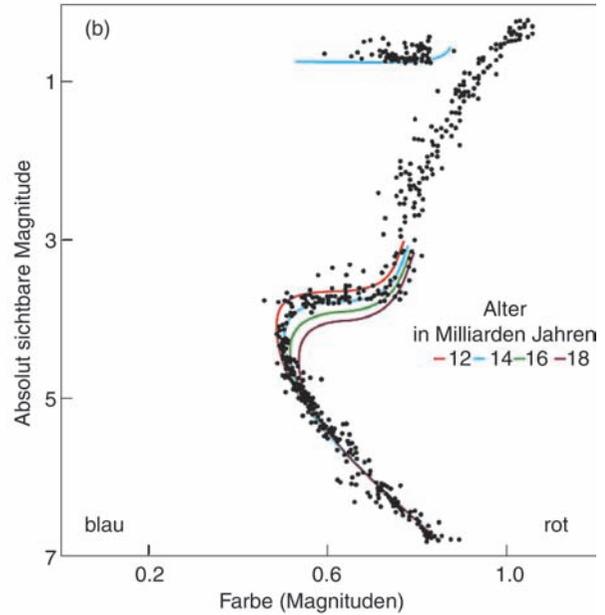


Bild sind Isochronen (Kurven von Sternen gleichen Alters) für verschiedene Alterswerte des Kugelsternhaufens 47 Tucanae eingezeichnet. Aus solchen Untersuchungen ergibt sich, dass die ältesten Sternhaufen in unserer Milchstraße etwa 13 Milliarden Jahre alt sind, wobei dieser Wert von verschiedenen Gruppen leicht unterschiedlich bestimmt wird – Details der Sternentwicklung können hier eine Rolle spielen. Weiterhin hängt das ermittelte Alter auch von der Entfernung der Haufen ab; die Revision dieser Entfernungen durch den HIPPARCOS Satelliten etwa hat die Abschätzung des Alters um ca. 2 Milliarden Jahre nach unten korrigiert

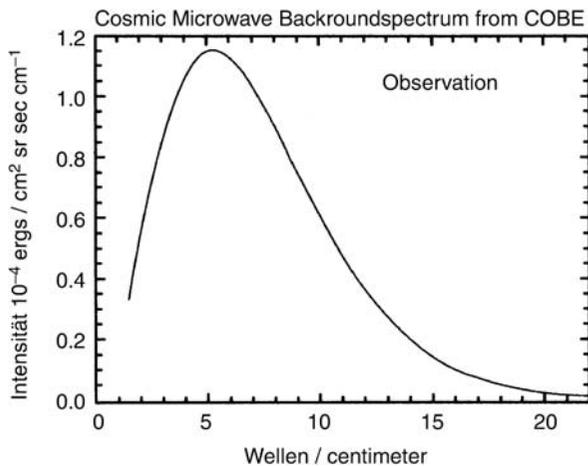


Abb. 4.3. CMB-Spektrum, aufgetragen als Intensität gegen Frequenz, gemessen in Wellen pro Zentimeter. Die durchgezogene Linie zeigt das erwartete Spektrum eines schwarzen Körpers der Temperatur $T = 2.728$ K. Die Fehlerbalken dieser Daten, die mit dem FIRAS-Instrument an Bord von COBE gemessen wurden, sind so klein, dass die Datenpunkte nicht von der theoretischen Kurve unterschieden werden können

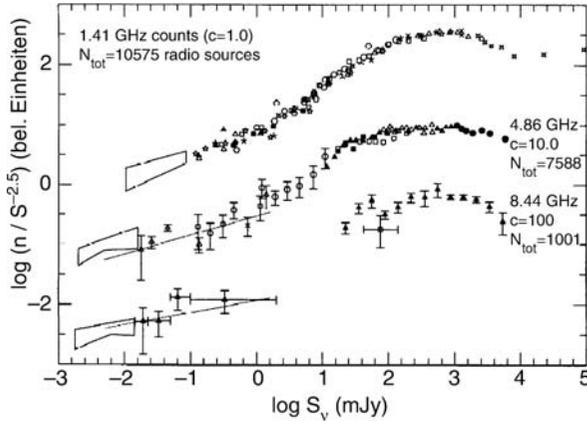


Abb. 4.4. Zählungen der Radioquellen als Funktion des Flusses, normiert durch die „Euklidische“ Erwartung $N(S) \propto S^{-5/2}$, was den integrierten Zählungen $N(> S) \propto S^{-3/2}$ entspricht. Ergebnisse sind für drei verschiedene Frequenzen angegeben. Man sieht, dass die Zählungen klar von der Euklidischen Erwartung abweichen

uns dann dazu motivieren werden, das kosmologische Modell zu entwickeln. Dabei beginnen wir zunächst mit der Annahme eines unendlichen, euklidischen, statischen Universums und werden zeigen, dass dies sofort zu einem Widerspruch mit den Beobachtungen (1) und (8) führt.

Das Olbers-Paradoxon (1): Wir können zeigen, dass in einem solchen Universum der Himmel nachts hell wäre – ungemütlich hell sogar. Dazu sei n_* die mittlere Anzahldichte von Sternen, die laut Annahme konstant in Raum und Zeit ist, und R_* ihr mittlerer Radius. Eine Kugelschale mit Radius r und Dicke dr um uns herum enthält $4\pi r^2 dr n_*$ Sterne. Jeder dieser Sterne nimmt einen Raumwinkel von $\pi R_*^2/r^2$ ein, also nehmen die Sterne in der Kugelschale insgesamt den Raumwinkel

$$d\omega = 4\pi r^2 dr n_* \frac{R_*^2 \pi}{r^2} = 4\pi^2 n_* R_*^2 dr \quad (4.1)$$

ein. Wie man sieht, ist dieser Wert unabhängig vom Radius r der Kugelschale, da der Raumwinkel eines Einzelsterns $\propto r^{-2}$ sich gerade mit dem Volumen der Kugelschale $\propto r^2$ kompensiert. Um nun den gesamten Raumwinkel aller Sterne in einem statischen euklidischen Universum zu berechnen, muss (4.1) über alle

Entfernungen r integriert werden, aber das Integral

$$\omega = \int_0^\infty dr \frac{d\omega}{dr} = 4\pi^2 n_* R_*^2 \int_0^\infty dr$$

divergiert! Formal bedeutet dies, dass die Sterne einen unendlichen Raumwinkel einnehmen, was natürlich physikalisch keinen Sinn ergibt. Der Grund für diese Divergenz ist darin zu sehen, dass wir den Effekt von sich überlappenden Sternscheiben an der Sphäre nicht berücksichtigt haben. Diese Betrachtung zeigt jedoch, dass der Himmel von Sternscheiben vollständig gefüllt wäre, d. h. aus jeder Richtung, entlang jeder Sichtlinie würde uns Sternlicht erreichen. Da die spezifische Intensität I_ν entfernungsunabhängig ist (die Flächenhelligkeit der Sonne ist von der Erde aus betrachtet die gleiche, die ein Beobachter sähe, der sich sehr viel näher an der Sonnenoberfläche aufhielte), wäre der Himmel $\sim 10^4$ K heiß; glücklicherweise ist er es nicht!

Quellenzählungen (8): Betrachten wir als Nächstes eine Population von Quellen mit räumlich und zeitlich konstanter Leuchtkraftfunktion, d. h. sei $n(> L)$ die räumliche Anzahldichte von Quellen mit Leuchtkraft größer als L . In einer Kugelschale mit Radius r und Dicke dr um uns herum befinden sich $4\pi r^2 dr n(> L)$ Quellen mit einer Leuchtkraft $> L$. Da der beobachtete Fluss S mit der Leuchtkraft über $L = 4\pi r^2 S$ zusammenhängt, ist die Anzahl von Quellen mit Fluss $> S$ in dieser Kugelschale gegeben als $dN(> S) = 4\pi r^2 dr n(> 4\pi r^2 S)$, und die gesamte Zahl von Quellen mit Fluss $> S$ ergibt sich aus der Integration über den Radius der Kugelschalen,

$$N(> S) = \int_0^\infty dr 4\pi r^2 n(> S 4\pi r^2).$$

Die Änderung der Integrationsvariablen auf $L = S 4\pi r^2$, oder $r = \sqrt{L/(4\pi S)}$, mit $dr = dL/(2\sqrt{4\pi LS})$ ergibt dann:

$$\begin{aligned} N(> S) &= \int_0^\infty \frac{dL}{2\sqrt{4\pi LS}} \frac{L}{4\pi S} n(> L) \\ &= \frac{1}{16\pi^{3/2}} S^{-3/2} \int_0^\infty dL \sqrt{L} n(> L). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Daraus sieht man, dass unabhängig von der Leuchtkraftfunktion die Quellenzählungen in einem solchen

Universum $N(> S) \propto S^{-3/2}$ wären, im Widerspruch zu den Beobachtungen.

Aus diesen beiden Widersprüchen – das Olbers-Paradoxon und die nicht-euklidischen Quellenzählungen – schließen wir also, dass mindestens eine der Annahmen falsch sein muss. Unser Universum kann nicht euklidisch, unendlich und statisch sein. Der Hubble-Fluss, d. h. die Rotverschiebung der Galaxien, deutet auf ein nicht-statisches Universum hin.

Das **Alter von Sternhaufen (5)** zeigt, dass das Universum mindestens 12 Gyr alt sein muss, denn das Weltalter kann nicht kleiner sein als das der ältesten Objekte. Interessanterweise ergeben die Altersabschätzungen von Kugelsternhaufen einen Wert, der sehr ähnlich der *Hubble-Zeit* $H_0^{-1} = 10 h^{-1}$ Gyr ist. Diese Übereinstimmung suggeriert, dass die Hubble-Expansion direkt mit der Entwicklung des Universums zusammenhängen könnte.

Die über große Skalen gemittelt isotrop erscheinende **Galaxienverteilung (2)** und die **CMB-Isotropie (6)** legen nahe, dass auf großen Winkelskalen das Universum um uns herum isotrop ist. Wir werden daher zunächst ein Weltmodell betrachten, welches das Universum um uns herum als isotrop beschreibt. Wenn wir zusätzlich davon ausgehen, dass unser Ort im Kosmos nicht vor anderen Orten ausgezeichnet ist, so folgt aus der Annahme der Isotropie um uns sofort, dass das Universum von jedem Punkt aus gesehen isotrop erscheint. Aus der Isotropie um jeden Punkt folgt dann unmittelbar die Homogenität des Universums, wie in der Abb. 4.5 erläutert ist. Zusammengefasst bezeichnet man die Annahme der Homogenität und Isotropie des Universums auch als *kosmologisches Prinzip*. Wir werden sehen, dass ein auf dem kosmologischen Prinzip basierendes Weltmodell in der Tat eine exzellente Beschreibung vieler Beobachtungstatsachen liefert.

Allerdings kann die Homogenität prinzipiell nicht beobachtet werden, da Beobachtungen weit entfernter Gebiete (oder Objekte) diese zu früheren Zeiten zeigen. Falls das Universum sich zeitlich entwickelt, wie es die obigen Betrachtungen nahe legen, können Entwicklungseffekte nicht direkt von räumlichen Variationen getrennt werden.

Die Annahme der Homogenität ist natürlich auf kleinen Skalen hinfällig: Wir sehen Strukturen im Universum wie Galaxien und Galaxienhaufen, es gibt sogar Ansammlungen von Galaxienhaufen, sog. Superhaufen.

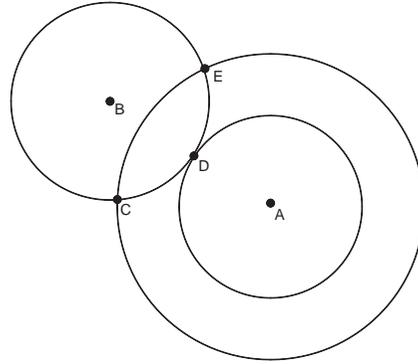


Abb. 4.5. Aus der Isotropie um zwei Punkte folgt die Homogenität: Ist das Universum um B isotrop, so ist die Dichte gleich in C, D, und E. Indem man Kugeln mit unterschiedlichen Radien um A konstruiert, wird gezeigt, dass der Bereich innerhalb der gezeichneten Kugelschale um A homogen sein muss. Mit Schalen, die groß genug sind, kann man so Homogenität für das ganze Universum folgern

Rotverschiebungs-Surveys haben Strukturen entdeckt, die sich über $\sim 100 h^{-1}$ Mpc erstrecken. Allerdings gibt es keine Hinweise auf Strukturen im Kosmos auf Skalen $\gg 100$ Mpc. Diese Länge können wir vergleichen mit einer charakteristischen Skala des Universums, die sich wiederum aus der Hubble-Konstanten ergibt. Wenn H_0^{-1} ein charakteristisches Weltalter angibt, so kann Licht in dieser Zeit die Strecke c/H_0 zurücklegen. Daraus erhält man als charakteristische Größe des Universums (genauer müsste man sagen: des beobachtbaren Universums) den *Hubble-Radius*

$$R_H := \frac{c}{H_0} = 2997 h^{-1} \text{ Mpc} : \text{Hubble-Länge} \quad (4.3)$$

Das Hubble-Volumen $\sim R_H^3$ kann also sehr viele Strukturen der Größe $\sim 100 h^{-1}$ Mpc enthalten, so dass es immer noch sinnvoll ist, von einem im Mittel homogenen Universum auszugehen. In diesem homogenen Universum gibt es dann Dichtestörungen, die mit den beobachteten großskaligen Strukturen zu identifizieren sind; diese werden im Detail in Kapitel 7 betrachtet. Aber in erster Näherung kann man für die Beschreibung des Universums als Ganzes diese Dichtestörungen vernachlässigen. Daher werden wir als Nächstes Weltmodelle betrachten, die auf dem kosmologischen Prinzip beruhen, d. h. in denen für alle