

Die räumliche Verteilung der Galaxien¹

Gerhard Börner, MPI für Astrophysik, Garching

In den letzten Jahren haben Messungen der Rotverschiebung von Galaxien eine Fülle von räumlichen Strukturen in der Verteilung der leuchtenden Materie aufgedeckt. Die Schwierigkeiten, diese Verteilungen im Rahmen eines kosmologischen Modells zu verstehen, beruhen vor allem auf dem Gegensatz zwischen dieser inhomogenen Verteilung und dem äusserst gleichmässigen kosmischen Mikrowellenhintergrund. Ein spezieller Ansatz, das sog. Pfannkuchenmodell, wird kurz geschildert.

The spatial distribution of galaxies

During the last few years redshift measurements of galaxies have revealed a variety of spatial structures in the distribution of the luminous matter. The difficulties to understand these distributions in the framework of a cosmological model stem from the contrast between this inhomogeneous distribution and the remarkably uniform cosmic microwave background. A special model, the so-called pancake model is briefly described.

1 Einführung

Das heutige Bild des Universums beruht auf einigen grundlegenden Beobachtungen und der Einsicht, dass sehr einfache Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen genügen, um die Konsequenzen dieser Beobachtungen darzustellen. Es ist ganz interessant anzumerken, dass die sog. «Friedmann-Lemaître»-Lösungen, d. h. die homogenen, isotropen mathematischen Modelle der Raumzeit, die von einer Singularität ausgehend expandieren, den fundamentalen Beobachtungen historisch vorausgingen. Selbst Einstein hatte zunächst noch diese Lösungen mit Skepsis betrachtet, da sie seiner anfänglichen Überzeugung eines statischen Universums mit einer unbegrenzten, gleichmässigen Verteilung der Sterne widersprachen.

Es waren schliesslich die Arbeiten von Hubble, die in den zwanziger Jahren zunächst zeigten, dass es viele Sternsysteme ausserhalb unserer Milchstrasse gibt. Im Lichte jener fernen Galaxien fand Hubble (in Fortführung der Arbeiten von Slipher und Humason) Spektrallinien, die den ins Rote verschobenen atomaren Spektrallinien entsprachen. (Bei diesen spektroskopischen Untersuchungen wird das Licht mit Hilfe eines Prismas oder eines Beugungsgitters in seine Grundfarben zerlegt. Während ein glühender Draht, wie der einer Glühbirne, Licht im gesamten sichtbaren Spektralbereich aussendet, erscheint ein leuchtendes Gas völlig anders. Reiner Wasserstoff, reines Natrium oder reiner Sauerstoff zeigen einige helle, klare Farben, die von dunklen Bereichen unterbrochen sind. Dieses Muster der hellen Spektrallinien eines bestimmten Elementes ist der Fingerabdruck, nach dem es identifiziert werden kann. Im Licht

¹ Nach einem Vortrag vor der Naturforschenden Gesellschaft Zürich vom 5. Februar 1990.

der Sterne erscheinen Spektrallinien oft dunkel, «in Absorption», da relativ kühles Gas in der Hülle aus dem Licht, das von innen kommt, den Teil aufnimmt, «absorbiert», der den charakteristischen Spektrallinien entspricht. Man weiss z. B., dass Wasserstoff auf der Sonne vorkommt, denn im Spektrum der Sonne erscheinen die aus dem Labor bekannten Spektrallinien des Wasserstoffes. Das Element Helium wurde tatsächlich zuerst durch seine Linien im Sonnenspektrum entdeckt, bevor es auf der Erde isoliert wurde.)

Hubble interpretierte diese Verschiebung zu grösseren Wellenlängen als das Resultat einer homogenen Expansion, bei der die fernen Galaxien sich von uns wegbewegen mit einer Geschwindigkeit, die ihrer Entfernung d proportional ist:

$$cz = v = H_0 d \quad (1)$$

In diesem sog. Hubble-Gesetz ist die Dopplergeschwindigkeit v der Flucht-bewegung gleich cz , dem Produkt aus Lichtgeschwindigkeit und Rotverschiebung. Für die Hubble-Konstante H_0 werden Werte zwischen 50 und 100 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ angegeben, was einem «Expansionsalter» H_0^{-1} von 10 bis 20 Milliarden Jahren entspricht². Bewegen wir uns in Gedanken um diese Zeitspanne zurück in die Vergangenheit, so waren alle die auseinanderstrebenden Galaxien, die wir jetzt beobachten, in einem Punkt versammelt. In Bild 1 ist eine Beobachtungs-serie zum Hubbleschen Gesetz wiedergegeben.

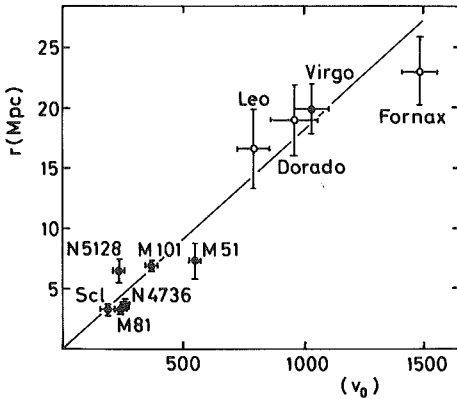


Bild 1 Das Hubble-Gesetz für verschiedene nahegelegene Galaxien. Die gerade Linie entspricht der Hubble-Beziehung von Gleichung 1. v_0 ist die Dopplergeschwindigkeit in km s^{-1} . Die Messpunkte der Galaxien folgen dieser Relation mit relativ starker Streuung, was auf lokale Abweichungen von der kosmischen Expansion schliessen lässt.

Fig. 1 The Hubble law for various near galaxies. The straight line corresponds to the Hubble relation of equation 1. v_0 is the Doppler velocity in units of km s^{-1} . The measurements of the galaxies show the general trend with a large scatter. This indicates local deviations from the cosmic expansion.

Die Hubble-Konstante besitzt eine einfache Interpretation in den sogenannten «Friedmann-Lemaître»-Modellen: In ihnen wird die Expansion als das Auseinanderfliessen einer idealisierten, gleichmässig verteilten Materie aufgefasst, die durch homogene Dichte $\rho(t)$ und Druck $p(t)$ beschrieben wird. Die Flüssigkeitsteilchen, die man sich als repräsentativ für die Galaxien denken

² Astronomische Entfernungen werden in Lichtjahren gemessen, d. h. in Einheiten der Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Die Einheit parsec (pc) ist daraus abgeleitet $1 \text{ pc} = 3,25 \text{ Lichtjahre} \approx 10^{18} \text{ cm}$. 1 Megaparsec (Mpc) = 1 Million parsec.

kann, schwimmen mit der kosmischen Expansion gleichmässig mit, nur ihr Abstand verändert sich proportional zu einem Expansionsfaktor $R(t)$. Die relative Rate dieser Veränderung zum gegenwärtigen Zeitpunkt t_0 ist die Hubble-Konstante H_0 .

Die Friedmann-Gleichungen beschreiben die Entwicklung des Expansionsfaktors $R(t)$ als Funktion von Dichte, Druck und einer konstanten Krümmung K des Raumes. Sie enthalten auch die interessante Information, dass der Anfangszustand unseres Kosmos eine Singularität ist, bei der $R(t)$, d. h. jeder endliche Abstand zweier Teilchen, gegen Null geht. Druck und Dichte werden unendlich gross in dieser Anfangssingularität, die sich in einer endlichen Zeitspanne t_0 in unserer Vergangenheit befindet. Das Alter der Sterne in den Kugelsternhaufen und das Alter der chemischen Elemente erlauben eine Abschätzung von t_0 zu 10 bis 20 Milliarden Jahren. Die bemerkenswerte Übereinstimmung mit dem für H_0^{-1} erhaltenen Wertebereich deutet an, dass das beobachtbare Universum tatsächlich vor etwa dieser Zeit entstanden ist.

Die mittlere Dichte der kosmischen Materie ρ_0 lässt sich mit Hilfe von H_0 als dimensionslose Grösse Ω_0 angeben

$$\Omega_0 \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_0$$

(G: Gravitationskonstante)

Die leuchtende Materie in den Galaxien ergibt eine untere Grenze für Ω_0 von etwa 0,01; dynamische Effekte in Gruppen und Haufen von Galaxien führen zu $\Omega_0 = 0,1$ bis 0,2 – auch $\Omega_0 = 1$ ist nicht ausgeschlossen – eine Tatsache, die auf die Existenz nichtleuchtender, «dunkler» Materie schliessen lässt (vgl. z. B. Börner 1988).

2 Die Hintergrundstrahlung

Ein weiterer grosser experimenteller Fortschritt in der Kosmologie war 1965 die Entdeckung der sog. 3K-Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson. Diese Strahlung im Wellenlängenbereich von 10 cm bis unter 1 mm trifft aus allen Richtungen in gleicher Stärke ein und folgt in ihrer spektralen Verteilung der Planckschen Strahlungsformel. Der im November 1989 gestartete NASA-Satellit COBE hat diese Strahlung vermessen und eine frappierende Übereinstimmung mit der theoretischen Kurve zur Temperatur von 2,735 K gefunden (Mather et al. 1990). In Bild 2 ist zu sehen, wie perfekt die einzelnen Messungen mit ihren Fehlerabschätzungen der Planck-Formel folgen. Das Universum scheint der ideale Schwarze Körper zu sein.

Diese Messung muss man als Bestätigung für einen heissen, dichten Anfangszustand des Universums ansehen. Es muss eine Zeit gegeben haben, in der

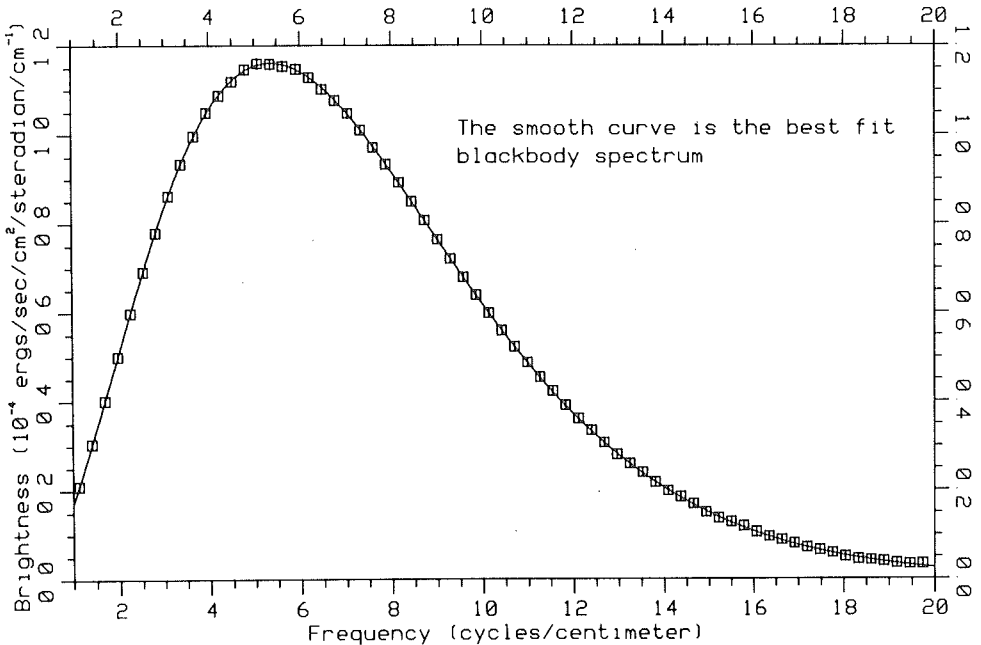


Bild 2 Die durchgezogene Kurve entspricht der Planckschen Formel eines thermischen Strahlers mit der Temperatur $T = 2,735$ K. Die kleinen Quadrate sind die einzelnen Messpunkte und ihr Fehlerbereich. Die grossartige Übereinstimmung zeigt, dass das Universum einen praktisch strukturlosen, heissen Frühzustand durchlaufen hat.

Fig. 2 The drawn out line corresponds to the Planck formula for thermal radiation with a temperature $T = 2,735$ K. The small squares are the error boxes around the individual measuring points. The agreement is phantastic, indicating a practically structureless, hot early phase for the universe.

das Universum so heiss und dicht war, dass die Atome in ihre Kerne und Elektronen aufgelöst waren, eine Zeit, in der die Streuung der Photonen an freien Elektronen ein thermisches Gleichgewicht zwischen Strahlung und Materie aufrechterhielt. Dies entsprach einer Temperatur von mehr als 3000 K. Im Laufe der Expansion kühlte das Universum unter diese Temperatur ab, Wasserstoffatome bildeten sich und banden Elektronen, die Strahlung entkoppelte von der Materie, und das Universum wurde transparent. Nach der Entkopplung verringerte sich die Temperatur der Strahlung weiter umgekehrt proportional zum Skalenfaktor $R(t)$. Zur Zeit der Entkopplung war das Universum etwa 1500mal kleiner als heute; im Standardmodell entspricht diese Zeit einigen 100000 Jahren nach dem Urknall. Nach diesem Zeitpunkt konnte die Materie ihrer Neigung zu Zusammenballung und Klumpenbildung nachgeben – die Galaxien entstanden.

Es ist in diesem Bilde allerdings nicht unmittelbar einsichtig, wie das äusserst gleichmässige Strahlungsfeld mit der stark inhomogen strukturierten Materieverteilung zusammenpasst.

3 Grossräumige Strukturen

Zur Zeit Hubbles brauchte man einige Stunden, um die Rotverschiebung einer hellen Galaxie mit einem 2,5-m-Teleskop zu messen. Heute können mit moderner elektronischer Ausrüstung, speziell Detektoren auf Siliziumbasis («CCD»-Empfänger), dieselben Messungen an einem 1,5-m-Teleskop in einigen Minuten durchgeführt werden. Diese umwälzende Entwicklung der Empfänger ermöglicht es, eine grosse Zahl von Rotverschiebungen zu messen und damit einen Eindruck von der dreidimensionalen Struktur des Universums zu gewinnen. 1956 kannte man nur von etwa 600 Galaxien die Rotverschiebung. 1976 war die Zahl auf 2700 angewachsen, und jetzt (1990) gibt es bereits mehr als 30000.

Ein sehr umfassendes Programm in diesen Vermessungskampagnen wird von Margaret Geller und John Huchra (Geller & Huchra 1989) am «Center for Astrophysics» in Cambridge, Massachusetts, durchgeführt. Sie messen die Rotverschiebungen der Galaxien, die im Zwicky-Katalog aufgeführt sind, bis zur Grenzhelligkeit von $m_b = 15,5$. Bis jetzt (September 1990) sind 8 streifenförmige Gebiete am Himmel von je 6° Breite in der Deklination unter 120° Ausdehnung in galaktischer Länge ausgemessen worden. Etwa 10^{-5} (ein Hunderttausendstel) des durch den «Hubble Radius» $2c/H_0$ gegebenen Volumens (das etwa dem uns prinzipiell zugänglichen Teil des Universums entspricht) sind damit kartographiert.

Obwohl dies insgesamt nur ein kleiner Ausschnitt ist, findet man bemerkenswerte grossräumige Strukturen und Muster in der Galaxienverteilung. Bild 3 zeigt das berühmte Beispiel des ersten Streifens (deLapparent, Geller, Huchra 1986). Der 6° breite Bereich der Deklination ist dabei in die Zeichenebene projiziert. Rektaszension und Rotverschiebung sind in diesem keilförmigen Bild aufgetragen, das also die räumliche Verteilung einer flachen Schicht von Galaxien widerspiegelt. Über das Hubble-Gesetz $cz = H_0 d$ kann ja aus der Rotverschiebung ein Wert für die Entfernung abgeleitet werden. Diese Darstellung enthält 1057 Galaxien mit Rotverschiebungen $cz \leq 15000 \text{ km s}^{-1}$. Das räumliche Bild wirkt ausserordentlich inhomogen: Fast alle Galaxien liegen in ausgedehnten dünnen Schichten, die wie eine Haut grosse, fast leere Gebiete umschliessen. Diese sogenannten «voids» enthalten nur sehr wenige helle Galaxien. Ihre Umrandung ist scharf ausgeprägt, denn die Abstände zwischen den Galaxien in der umhüllenden Schicht sind klein, verglichen mit dem Durchmesser des leeren Gebiets. Die grössten Leergebiete besitzen Durchmesser von 100 Mpc, während die Schichtdicke der Umhüllung nicht über 10 Mpc beträgt. Die angrenzenden Scheiben im Deklinationsbereich unterstützen sehr deutlich die Verstellung einer schaum- oder schwammartigen Verteilung, bei der die Galaxien in den dünnen Wänden von nahezu kugelförmigen leeren Gebieten liegen. Reiche Haufen von Galaxien finden sich an den Stellen, an denen mehrere Wände aneinanderstossen. Die auffallendste Struktur, die besonders deutlich hervortritt, wenn man den Deklinationsbereich von $26,5^\circ$ bis $44,5^\circ$ in Überlagerung darstellt, ist ein breites Band aus Galaxien, das sich über

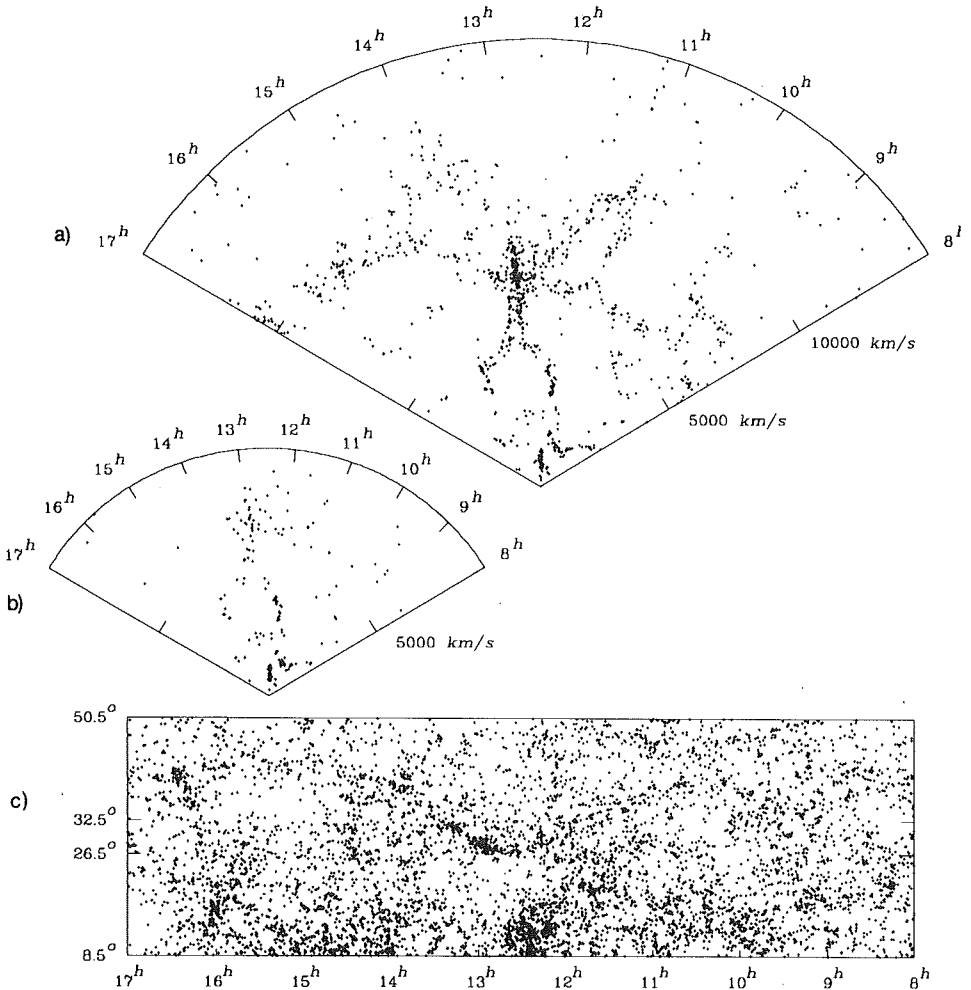


Bild 3 Die Verteilung der Galaxien des Zwickey-Katalogs

- a) Das Strichmännchen, dessen Torso der Coma-Haufen ist. Grosse leere Gebiete und dünne Randstreifen sind klar zu erkennen.
 b) Dasselbe Bild wie a), nur mit der Grenzhelligkeit $m_B = 14,5$, statt 15,5.
 c) Die Galaxien, wie sie in der Projektion auf der Himmelskugel erscheinen. Die Koordinaten sind Rektaszension und Deklination.

Fig. 3 The distribution of galaxies in the Zwickey catalog.

- a) The stickman with the Coma cluster presenting the torso. Large empty region and sharp boundary layers are prominent features.
 b) The same as a) except with limiting magnitude $m_B = 14.5$, instead of 15.5.
 c) The galaxies in projection on the celestial sphere. The coordinates are rectascension and declination.

die ganze Längenausdehnung der Durchmusterung erstreckt und das zwischen Rotverschiebungen von 7500 km s^{-1} und 10000 km s^{-1} liegt. Geller und Huchra nannten diese Struktur die «Grosse Mauer» (Bild 4). Sie enthält mehr als die Hälfte der vermessenen Galaxien. Dieses grosse Band ist in seiner Ausdehnung offenbar nur durch die Abmessungen der Durchmusterung begrenzt. Die vollen Ausmasse der «Grossen Mauer» sind noch nicht bekannt. Mindestens 340 Mpc lang und 120 Mpc breit und ca. 10 Mpc dick erstreckt sich diese Struktur bis zum Rand der CfA-Durchmusterung (falls $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1}$ angenommen wird). Die Dichte in dieser Schicht ist etwa fünfmal so hoch wie der mittlere Wert der Galaxiendichte. Mit einem Dichteparameter $\Omega_0 = 0,2$ ergibt sich eine Masse von $\sim 2 \times 10^{16} M_\odot$ (M_\odot : Sonnenmasse), etwa das 10fache der Masse des Lokalen Superhaufens.

Es ist natürlich eine wichtige Frage, ob die Grosse Mauer wirklich ein real existierendes Gebilde ist. Lässt sie sich vielleicht als zufällige Anlagerung kleinerer Gebilde deuten? Kann die Auswahl der Galaxien durch eine Hellig-

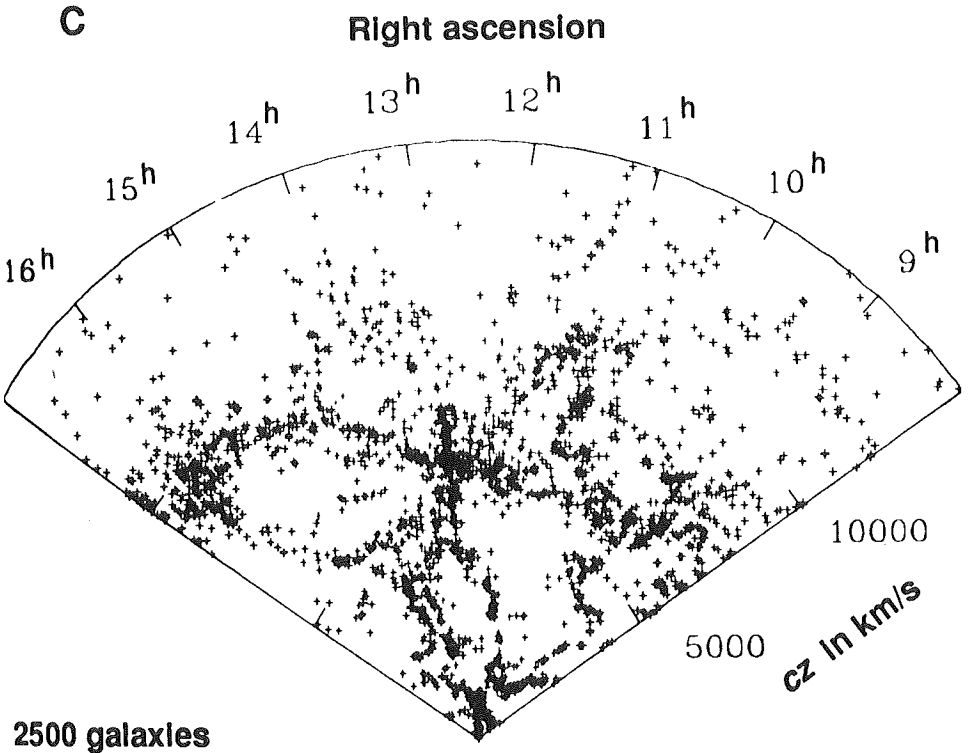


Bild 4 Analoge Darstellung zu Bild 3. Ein grosser Bereich in der Deklination ist in die Zeichenebene projiziert. Das Band aus Galaxien bei $cz \sim 7500 \text{ km s}^{-1}$ ist die Grosse Mauer.

Fig. 4 A similar plot as in fig. 3. A large range of declination values has been projected onto the celestial sphere. The band of galaxies at $cz \sim 7,500 \text{ km s}^{-1}$ is the Great Wall.

keitsgrenze einen Verstärkungseffekt vortäuschen, der in Wirklichkeit gar nicht gegeben ist? Einen Effekt dieser Art kann man wohl schon in den Bildern 3 und 4 erkennen. Bei Rotverschiebungen von mehr als $10000 \text{ km sec}^{-1}$ werden die Galaxien seltener, da wegen der Helligkeitsgrenze des Katalogs fernere Galaxien nur noch erfasst werden, wenn sie sehr hell leuchten. Die wirkliche Verteilung erscheint also verfälscht, denn viele der Galaxien mit kleiner Rotverschiebung fänden bei grösseren Rotverschiebungen nicht mehr Aufnahme in den Katalog. Durch verschiedene statistische Tests konnte aber überzeugend gezeigt werden, dass die im CfA-survey gefundenen Strukturen tatsächlich existieren und nicht etwa durch die Auswahleffekte bei der Erstellung des Zwickey-Katalogs vorgetäuscht werden.

Die Untersuchungen von Geller und Huchra haben die ersten noch mit Skepsis aufgenommenen Entdeckungen grosser Leerräume oder weit gestreckter Filamente bestätigt (Kirshner et al. 1981; Giovanelli & Haynes 1986) und diese Strukturen als normal für die Verteilung der Galaxien enthüllt. Bis jetzt ist die Ausdehnung der grössten Strukturen nur durch die Grenzen der Durchmusterung bestimmt, Anzeichen für eine tatsächliche obere Grenze gibt es noch nicht. Dies gibt uns die ernüchternde Gewissheit, dass in der Verteilung der leuchtenden Materie die gleichmässige, homogene Struktur des Universums – falls sie wirklich vorhanden ist – noch nicht zu erkennen ist.

Es könnte sein, dass der Ausschnitt des Universums, der vermessen worden ist, noch zu klein ist, um typische mittlere Züge der Gesamtverteilung zu zeigen. Es könnte aber auch sein, dass es – zumindest in der Verteilung der leuchtenden Materie – diese typischen Eigenschaften nicht gibt.

In diesem Zusammenhang ist das Resultat einer sehr tiefen Durchmusterung in einem engen Winkelbereich interessant. In einem «Bleistiftstrahl in Richtung auf den galaktischen Nord- und Südpol wurden Rotverschiebungen von Galaxien bis zu $z = 0,3$, d.h. bis zu Entfernungen von etwa 2000 Mpc, gemessen (Broadhurst et al. 1990). Die Rotverschiebungen der Galaxien häufen sich bei bestimmten Werten nach einem Muster, das wohl der Vorstellung entsprechen könnte, der Sehstrahl schneide immer wieder durch die Wände von hintereinanderliegenden Zellen. Falls dies zutrifft und die zellartige Struktur in weiteren Messungen bestätigt wird, muss wohl die Vorstellung einer grossräumigen, homogenen Materieverteilung stark modifiziert werden.

4 Grossräumige Geschwindigkeitsfelder

Wenn alle Galaxien der gleichmässigen Hubble-Expansion folgen würden, so entspräche das Rotverschiebungsbild genau der räumlichen Verteilung. Eigenbewegungen der Galaxien führen jedoch zu Abweichungen, die oft beträchtlich sein können. Die Rotverschiebung cz gibt die anscheinende Fluchtgeschwindigkeit längs der Sichtlinie an. Diese enthält die Hubble-Bewegung $H_0 d$ und die Komponente längs der Sichtlinie v_p der Pekuliargeschwindigkeit

$$cz = H_0 d + v_p \quad (2)$$

Ein gravitativ gebundenes System, wie z. B. ein dichter Haufen von Galaxien, erscheint durch diesen Effekt in die Länge gezogen, auf den Beobachter zu. Man spricht vom «Finger Gottes». Der Torso des Strichmännchens in Bild 3 illustriert diesen Effekt – hier erscheint der an sich sphärische Coma-Haufen stark verzerrt in Beobachtungsrichtung.

Es gibt auch etwas Evidenz, dass neben diesen klar erkennbaren «Fingern Gottes» noch andere grossräumige Eigenbewegungen auftreten. Der Mikrowellenhintergrund zeigt eine Anisotropie der Temperatur von einigen tausendstel Kelvin, die vom Dopplereffekt der sich gegen das Strahlungsfeld bewegenden Erde herrührt. Mit grosser Sicherheit lässt sich aus diesen Beobachtungen (Mather et al. 1990) eine Bewegung der Lokalen Gruppe von Galaxien relativ zum Strahlungshintergrund von $630 \pm 50 \text{ km s}^{-1}$ in Richtung ($\alpha = 166^\circ \pm 5^\circ$; $\delta = -26^\circ \pm 5^\circ$) ableiten. Da der Mikrowellenhintergrund wegen seiner ausserordentlich gleichförmigen Verteilung das ideale, bevorzugte Koordinatensystem für die kosmologischen Modelle definiert, entspricht diese Bewegung der Lokalen Gruppe auch einer entsprechenden Abweichung vom gleichmässigen Hubble-Gesetz.

Der Ursprung dieser grossen Pekuliarbewegung ist noch immer rätselhaft. Zwar bewirkt der Virgohaufen durch seine Schwerkraftanziehung eine Abweichung vom Hubble-Fluss von etwa 200 bis 400 km s^{-1} am Ort der Lokalen Gruppe. Dies ist aber zuwenig, und ausserdem weicht die Richtung auf das Zentrum von Virgo etwa 45° von der gemessenen Bewegungsrichtung ab.

Vielleicht zeigt sich die Lösung des Rätsels in neueren spektroskopischen Messungen an einigen hundert elliptischen Galaxien (Lynden-Bell et al. 1988). Mit statistischen Methoden konnte für dieses System eine Veränderung der Differenz ($zc - H_0 d$) über die Himmelskugel gefunden werden. Dies entspräche einer grossräumigen Bewegung von etwa 500 km s^{-1} gleichmässig über Skalen von $\sim 50 \text{ Mpc}$. Ursache dieser Bewegung sollte eine Massenkonzentration sein, die publicityträchtig der «Grosse Attraktor» genannt wurde. Bislang wurde allerdings der Grosse Attraktor noch nicht gefunden, und auch die genaue Richtung der grossräumigen Bewegung ist noch unbekannt.

5 Einige grundlegende theoretische Überlegungen

Ein sehr natürlicher Weg zur Bildung von Galaxien und Haufen in einem gleichmässigen Universum führt über anfänglich vorhandene kleine Störungen der Dichte zu deren Anwachsen und schliesslichem Zusammensturz auf Grund von Gravitationsinstabilitäten. Diese Idee gerät in folgende Schwierigkeit: Nach dem Zeitpunkt der Rekombination können kleine Dichteschwankungen $\delta = \frac{\delta\rho}{\bar{\rho}}$ zwar anwachsen, aber nur proportional zum Expansionsfaktor $R(t)$. Sie

können also ihren anfänglichen Wert nur um etwa einen Faktor 1500 steigern (das ist gerade das Verhältnis der Expansionsfaktoren jetzt und zum Zeitpunkt der Rekombination). Die Anfangsgrösse von δ ist aber begrenzt durch die hohe Gleichmässigkeit der Hintergrundstrahlung. Bei adiabatischer Ankopplung zeigen sich Dichtestörungen $\frac{\delta\rho}{\rho}$ als entsprechende Störungen in der Temperatur des Strahlungsfeldes

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = -3 \frac{\delta T}{T} \quad (3)$$

Beobachtungen der Hintergrundstrahlung in verschiedenen Richtungen ergaben Obergrenzen für Schwankungen auf verschiedenen Winkelskalen, so z. B.

$$\frac{\delta T}{T} < 2 \times 10^{-5}$$

bei einer Skala von 7 Bogenminuten (Readhead et al. 1990). Dies entspricht etwa der Winkelausdehnung eines Galaxienhaufens zur Zeit der Rekombination. Dessen Dichtekontrast ist also auf 6×10^{-5} begrenzt und durch das Anwachsen mit der Expansion auf 0,1 zum jetzigen Zeitpunkt. Jetzt sollte der Dichtekontrast aber viel grösser als 1 sein, entsprechend den Beobachtungen. Die kleinen Störungen können also nicht genügend kräftig heranwachsen. Das Universum bleibt in diesem Modell ziemlich homogen. Deshalb kann das natürliche Modell für die Entstehung der Galaxien nicht funktionieren.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma, der in den letzten Jahren häufig besprochen wurde, besteht darin, dass man nichtleuchtende «dunkle» Materie für die Strukturbildung im wesentlichen verantwortlich macht. Besonders hypothetische nichtbaryonische Materie bietet hier viele Möglichkeiten, hat allerdings den Nachteil, dass Objekte wie Neutrinos mit Masse, Axionen oder kosmische «Strings» experimentell noch nicht gefunden wurden. Ein Untergrund aus solchen Objekten hat keine direkte Wechselwirkung mit Photonen, kann grössere Anfangsamplituden δ besitzen als normale Materie, hat grössere Anwachszeiten und kann die Schwerkraftzentren vorgeben, in denen dann die normale baryonische Materie sich ansammelt. Die leuchtende Materie, also die dünnen Wände und Schichten, wie Geller und Huchra sie finden, wären sozusagen die Spitze eines Eisbergs aus dunkler Materie, die im Grossen viel gleichmässiger verteilt ist.

Man kann versuchen, diesen Aspekt darzustellen in numerischen Rechnungen, in denen man den Teilchen der dunklen Materie folgt. An Punkten, an denen die Dichte einen vorgegebenen Wert überschreitet, postuliert man dann die Entstehung einer Galaxie und trägt schliesslich nur diese Punkte graphisch auf. Bild 5 ist ein auf diese Weise entstandenes Muster von Galaxien und ihrer grossräumigen Verteilung (Buchert & Klaffl 1990). Diese Rechnung wurde im Rahmen einer analytischen Approximation, die der sowjetische Astrophysiker

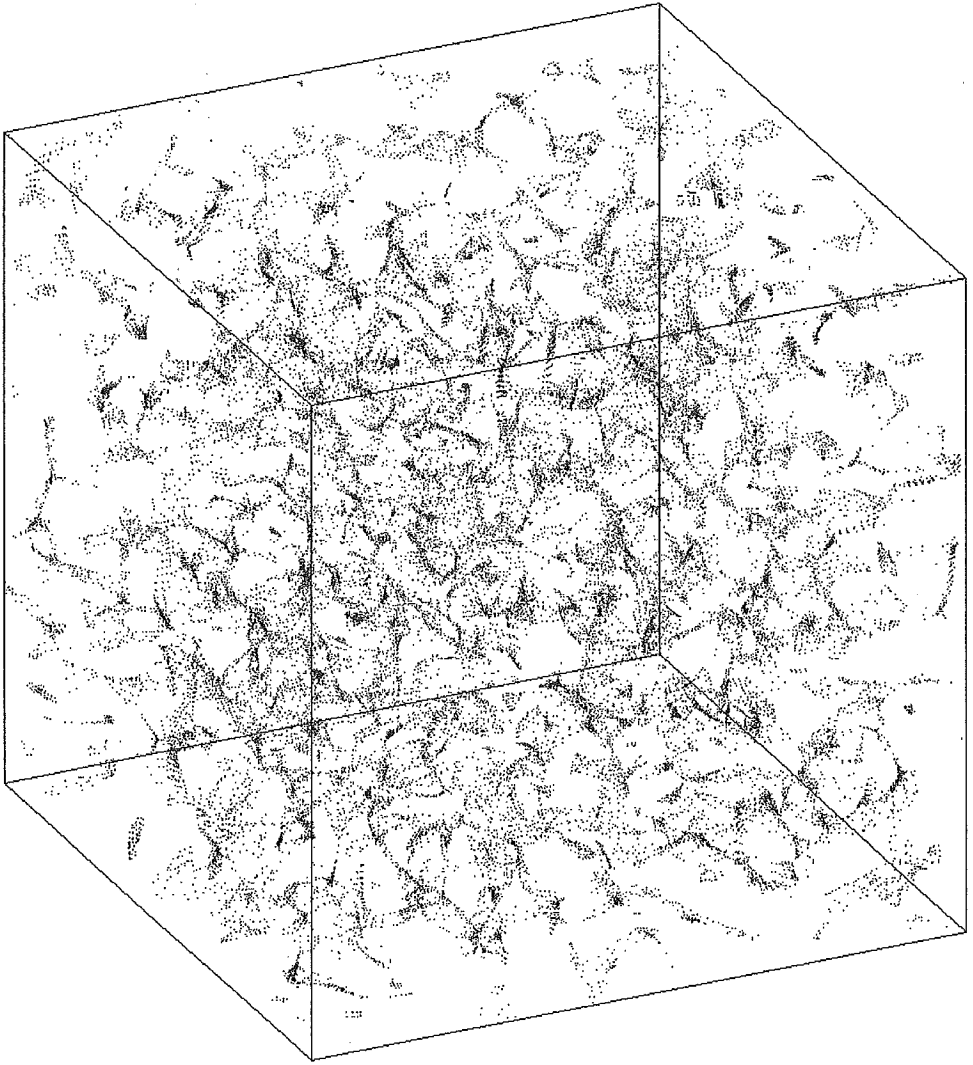


Bild 5 Eine numerische Simulation zum Pfannkuchenmodell. Die einzelnen Punkte sollten Galaxien entsprechen. Eine Vielzahl von Formen und Strukturen ist erkennbar. Die Kantenlänge des Würfels entspricht 450 Mpc; d.h. die Beobachtungen aus Bild 3 oder 4 wären in $1/16$ dieses Volumens enthalten.

Fig. 5 A numerical simulation for the pancake model. The points correspond to galaxies. A number of shapes and structures can be seen. The edge of the cube has a length of 450 Mpc; i.e. the data of fig. 3 or fig. 4 would be contained within $1/16$ of this volume.

Ya. B. Z'eldovich vorgeschlagen hatte, durchgeführt. Man verfolgt dabei die Bahnkurven von Teilchen, die sich ohne gegenseitige Stöße bewegen, aber Gebiete hoher Dichte entstehen lassen durch die Überschneidung der Bahnen. Die allgemeine Struktur dieser Gebiete hoher Dichte entspricht einer eindimensionalen Bewegung, d. h. der Bewegung auf eine Ebene zu. Anfangs ausgedehnte Gebiete kollabieren also in eine platte Form, einen «Pfannkuchen». Daher stammt der Name «Pfannkuchenmodell» für dieses Bild.

Wie aus Bild 5 zu ersehen ist, kann dieses Modell verschiedene qualitative Züge der Beobachtungen gut wiedergeben. Die Zellstruktur ist erkennbar, grosse leere Gebiete umgeben von dünnen Wänden sind vorhanden wie in Bild 3.

So eindrucksvoll diese Übereinstimmungen erscheinen mögen, so sollte doch angemerkt werden, dass zu einem wirklich quantitativen Modell noch vieles fehlt: Realistische Anfangsbedingungen müssen noch eingebaut werden, und speziell die Beschreibung der Bildung einzelner Galaxien ist noch nicht befriedigend gelöst. Trotzdem möchte ich dem Leser viel Freude wünschen bei seinen eigenen Untersuchungen von Bild 5 und der Analyse der Strukturen, die darin zu entdecken sind.

6 Literatur

- Börner G., 1988, *The Early Universe*, Springer Verlag.
 Broadhurst T.J., Ellis R.S., Koo D.C., Szalay A.S., 1990, *Nature* 343.
 Buchert T., Klaffl R., 1990, in Vorbereitung.
 deLapparent V., Geller M.J., Huchra J.P., 1986, *Astrophys. J.* 302, L1.
 Geller M.J., Huchra J.P., 1989, *Science* 246, 897.
 Haynes M.P., Giovanelli R., 1986, *Astrophys. J.* 306, L 55.
 Kirshner R.P., Oemler A., Schechter P., Sheckman S.A., 1981, *Astrophys. J.* 248, L 57.
 Lynden-Bell D. et al., 1988, *Astrophys. J.* 326, 50.
 Mather J.C. et al., 1990, *Astrophys. J. Lett* 354, L 37.
 Readhead A.C.S. et al., 1989, *Astrophys. J.* 346, 566.