

Das Alter der Welt. Ein Beitrag zum Stand der Debatte

Norbert Pailer, Landstr. 24, 88719 Meersburg-Stetten

Zusammenfassung: Aufgrund neuerer Messungen der spektralen Rotverschiebung von Objekten der Galaxie M100 im Virgo-Cluster (Galaxienhaufen im Sternbild Jungfrau, einem Mitglied der lokalen Gruppe) wurde neuerdings von Kosmologen das Alter des Universums mit 8 - 11 Milliarden Jahren ermittelt. Aus der Sternentwicklung und Strukturbildung des Kosmos werden jedoch viel größere Alter abgeleitet, nämlich bis zu 20 Milliarden Jahren. Da die Sterne nicht älter sein können als der Kosmos, aus dem sie entstanden sein sollen, haben die Astronomen ein ernsthaftes Problem. Beispielsweise handelt es sich bei M92 um einen Kugelsternhaufen, dessen Sterne 16 - 19 Milliarden Jahre alt sein sollen. Entweder müssen die kosmischen Dimensionen, mit deren Hilfe das Alter bestimmt wird, falsch sein oder die Sternentwicklungsmodelle sind fragwürdig. Das Auflösen dieses Altersparadoxons ist eines der drängendsten Probleme in der gegenwärtigen Astronomie. Hier können sicher sorgfältige Messungen, die vielfältigen Möglichkeiten der Raumfahrt und die Bereitschaft zum Umdenken weiterhelfen.

1. Das Prinzip der Altersbestimmung

Die heute maßgeblichen Altersbestimmungen des Kosmos erhielten Anfang der 20er Jahre wichtige Anstöße mit der Entdeckung der zunehmenden Rotverschiebung der Spektrallinien bei zunehmender Entfernung. Sie wurde im Sinne des Doppler-Effekts als Expansionsbewegung interpretiert (vgl. Abb. 1)

Es ist offensichtlich, daß die Milliarden Galaxien an unserem Himmel nicht seit unendlicher Zeit von uns fortgeflogen sein können. Sie wären sonst bei den langen Zeiträumen unendlich weit entfernt. Unter der Annahme, daß der oben angesprochene Zusammenhang zwischen spektraler Rotverschiebung und der Entfernung allgemein besteht, ergäbe sich als Schlußfolgerung, daß es nach dieser Vorstellung Epochen gegeben haben muß, in denen die Galaxien ganz dicht zusammengedrängt waren. Zu einer noch früheren Zeit konnten bei diesem Modell die Galaxien, die Sterne, ja selbst die Atome, als einzelne Objekte gar nicht existieren. Die gesamte Materie muß im Kontext dieser Modellvorstellung einmal ein ganz kleiner, extrem heißer Feuerball aus „Materie“ in einem exotischen

Zustand gewesen sein, bevor eine gewaltige Explosion den Anstoß zu einer bis heute weiterlaufenden Expansion des Weltalls gegeben hat. Diese Idee liegt dem Urknallmodell zugrunde. Alle Fragen nach dem Grund für einen Urknall, nach seinem „Woher“ oder „Vorher“, sind jedoch naturwissenschaftliches Sperrgebiet.

Will man sich ein anschauliches Bild von diesen modellhaften Vorgängen machen, muß man ein wenig abstrahieren, denn nicht die Galaxien bewegen sich durch den Raum; man spricht vielmehr davon, daß der Raum expandiert und die Galaxien mitbewegt werden.

Es ist also nicht wie bei der Explosion einer Bombe, bei der Splitter auseinanderfliegen. Die Galaxien verhalten sich eher wie Rosinen in einem aufquellenden Hefeteig. Dort bewegen sich die Rosinen nur deshalb fort, weil sich der Teig aufbläht – und nicht aus eigenem Antrieb. Alle Rosinen entfernen sich voneinander, und zwar so, daß für einen Beobachter auf irgendeiner Rosine die Fluchtbewegung durch das Hubble-Gesetz beschrieben wird: Je weiter entfernt die andere Rosine ist, um so schneller scheint sie sich wegzubewegen. Diese Beobachtung gilt für jede Rosine, so daß keine das Recht hat, sich aufgrund dieser Beobachtung als Zentrum des Kuchens zu fühlen.

Die Aufgabe des Astronomen, die Größe der heutigen Ausdehnung des Universums zu messen, ist im Prinzip die gleiche wie die, das Aufgehen des Hefeteiges in Zahlen zu fassen. Unserer Anschauung nach liegt der Rosinenkuchen jedoch näher als das unermessliche Universum, wenngleich beide Vorgänge mathematisch nicht äquivalent sind.

In diesem Sinne sind die Galaxien lediglich „Markierungsbojen“, die dem Astronomen die Ausdehnung des Raumes andeuten. Kosmologen bestimmen nun das Alter des Universums durch Messung der galaktischen Bewegung. Sie finden die Reisezeit einer Galaxie seit dem Urknall – was im Urknallmodell identisch ist mit dem Weltalter – durch Division der Entfernung durch die Geschwindigkeit.

Fehler in der Geschwindigkeits- oder Entfernungsmessung führen zu falschen Altern, weshalb Durchschnittswerte von ausgewählten Galaxien zugrundegelegt werden. Die so gewonnene Expansionsrate nennt man Hubble-Konstante H_0 in Einheiten von km/sec/Millionen Lichtjahre. Allerdings war sie historisch alles andere als konstant (jeweils

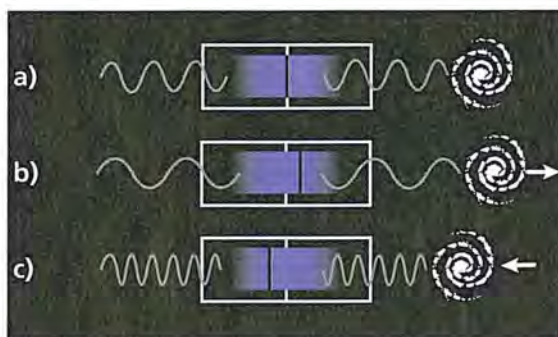
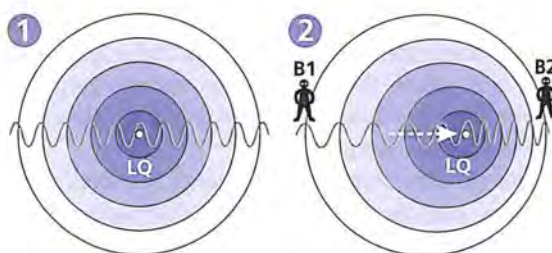
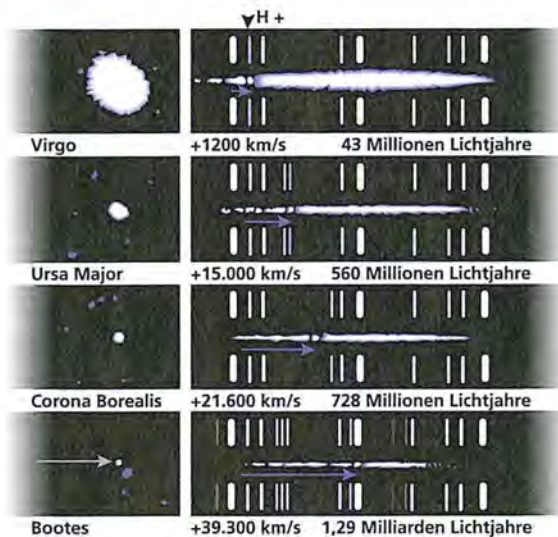


Abb. 1 oben: Beispiel rotverschobener Spektren. Verschiebung der Spektrallinien (H- und K-Linien des ionisierten Kalziums) in Abhängigkeit der zugeordneten Entfernungsgeschwindigkeit von vier verschiedenen Galaxien. Man beachte die im mittleren Feld angedeutete Linienstruktur, deren Verlagerung der Pfeil ausweist. (Hale Observatories)

Mitte: Dopplerprinzip.

1. Ruhende Lichtquelle LQ; die Wellen breiten sich mit derselben Frequenz nach allen Seiten aus.
2. Die Lichtquelle LQ bewegt sich relativ zu den beiden Beobachtern B1 und B2; B1 erhält die Wellen kleinerer Frequenz, B2 solche mit höherer Frequenz.

Unten: Hier ist dieses Prinzip auf drei Beobachtungsfälle angewandt:

- a) aus einem unverschobenen Spektrum wird auf eine (relativ zum Beobachter) ruhende Galaxie geschlossen;
- b) ein rotverschobenes Spektrum wird als Fluchtgeschwindigkeit interpretiert;
- c) ein blauverschobenes Spektrum wird als ein uns entgegenkommendes Objekt verstanden.

Fall b) ist die allgemeine Situation von Objekten in größerer Entfernung.

neuere Messungen ergaben tendenziell immer niedrigere Werte). Dennoch verbirgt sich hinter ihr – im wahrsten Sinn des Wortes – Weltbewegendes. Abb. 2 zeigt den geschichtlichen Verlauf der Bestimmung des Hubble-Wertes. Der beste Wert für H_0 ergibt sich als Mittelwert aus Messungen an möglichst vielen Galaxien, um die Beobachtungsfehler durch individuelle Expansion (der allgemeinen Expansion überlagerte Zufallsbewegungen) gering zu halten. Das Alter des Universums ist dann $1/H_0$, das sog. Hubble-Alter; es ist genauer gesagt das Alter, welches ein expandierendes Universum hätte, wenn dieses keine Materie beinhalten würde.

Aber Sterne und Galaxien füllen unser Universum. Deren Gravitationswirkung reduziert die Expansionsgeschwindigkeit mit der Zeit. Dieser Effekt bedeutet in der Umkehrung, daß Galaxien in der Vergangenheit schneller gewesen sein müssen als heute (größeres H_0). Deshalb ist das aktuelle Alter ($1/H_0$) kleiner als das Hubble-Alter. Es wird mit „wahrscheinlich kleiner als 2/3 des Hubble-Alters“ angenommen (JAYAWARDHANA 1993). Dieser Wert ist abhängig von der gesamten Materiedichte des Kosmos.

II. Die Ausgangsgrößen Geschwindigkeit und Entfernung von Objekten

Auch wenn man die Urknallvorstellung voraussetzt, ist das Hubble-Alter nur so genau, wie die Zahlen, von denen es abgeleitet ist, nämlich die Geschwindigkeit und die Entfernung der Objekte. Deshalb müssen wir über diese zwei Größen nachdenken.

1. Die Geschwindigkeitsbestimmung. Wenn die Rotverschiebung in den Spektren des Sternenlichts als Doppler-Verschiebung interpretiert wird, ist deren Geschwindigkeitsbestimmung relativ einfach. (Es ist allerdings nicht auszuschließen, daß für weit entfernte, massereiche Objekte andere Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie eine Rolle spielen.) Bewegungen von uns weg verschieben Linien eines Spektrums zu längeren, sprich röteren Wellenlängen, wogegen Bewegungen auf uns zu mit einer Blauverschiebung, d. h. einer Verkürzung der Wellenlängen, verbunden sind (Abb. 1). Fast alle Galaxien zeigen offensichtlich eine Rotverschiebung.

Allerdings gibt es auch andere Deutungen der Rotverschiebung, auf die hier nicht näher eingegangen wird (z. B. durch Materiebrücken verbundene Objekte mit deutlich unterschiedlicher Rotverschiebung, PAILER 1996, ARP 1987). So eindeutig und einfach, wie die Methode auch klingen mag, die Diskrepanz ihrer Ergebnisse gibt immer wieder

Anlaß zu Diskussionen. So schreibt Steven WEINBERG in seinem bekannten Buch „Die ersten drei Minuten – Der Ursprung des Universums“ (WEINBERG 1979): „Ich möchte nicht den Eindruck erwecken, als seien sich alle in der Interpretation der Rotverschiebung einig. Tatsächlich beobachten wir nicht, daß sich die Galaxien von uns entfernen; alles, dessen wir uns sicher sind, ist die Tatsache, daß die Linien in ihren Spektren zum Roten, also zu längeren Wellenlängen hin, verschoben sind. Daß die Rotverschiebungen irgend etwas mit Dopplerverschiebungen oder mit einer Expansion des Universums zu tun haben, wird von führenden Astronomen bezweifelt. Halton ARP vom Hale-Observatorium hat nachdrücklich darauf hingewiesen, daß es Gruppen von Galaxien am Himmel gibt, in denen einige Galaxien eine sehr abweichende Rotverschiebung aufweisen; falls diese Gruppen echte physikalische Assoziationen von benachbarten Galaxien sein sollten, dürften sie kaum grob abweichende Geschwindigkeiten haben. Darüber hinaus hat Maarten SCHMIDT 1963 festgestellt, daß eine bestimmte Klasse von Objekten, die wie Sterne aussehen, gleichwohl enorme Rotverschiebung aufweist, in einigen Fällen über 300%! Falls diese 'quasi-stellaren Objekte' soweit entfernt sein sollten, wie man aus ihrer Rotverschiebung annehmen muß, müßten sie unglaubliche Energien emittieren, um so hell zu erscheinen. Schließlich kann man darauf hinweisen, daß es bei wirklich großen Entfernungen nicht leicht ist, das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Entfernung zu bestimmen.“ So weit Steven WEINBERG. Dieses Zitat verdeutlicht, mit welcher Unsicherheit die Bestimmung der Ausgangsgröße „Geschwindigkeit“ behaftet ist. Auch wenn obiges Zitat nicht aus jüngster Zeit stammt, ist keines der Argumente bisher widerrufen worden.

2. Wie man das Weltall ausmißt. Im Vergleich zur Rotverschiebungs- bzw. der daraus abgeleiteten Geschwindigkeitsbestimmung ist die Entfernungsbestimmung eine noch delikate Aufgabe. Sie beruht im wesentlichen auf Schätzungen und Annahmen. Wir können jedoch über Sterne fast nichts aussagen, wenn wir nicht wissen, wie weit sie von uns entfernt sind. Woher soll der Astronom wissen, wie lange die kosmische Reise von Photonen aus den winzigen Lichtfleckchen am Himmel gedauert hat, ehe sie einen Tupfer auf seine Fotoemulsion geätzt haben? Für ein unbewaffnetes Auge kann ein unscheinbares Lichtpünktlein am Himmel der benachbarte Mars sein, der nur Sonnenlicht reflektiert, oder es kann ein Gebilde sein, das soviel Licht aussendet wie eine ganze Galaxie, das aber so weit in der Tiefe des Raumes steht, daß die Entfernung nicht mehr die volle Pracht seiner Erscheinung erkennen läßt. Hier sollen die wichtigsten Stufen der Entfernungsskala in Form einer kosmischen Sprossenleiter diskutiert werden.

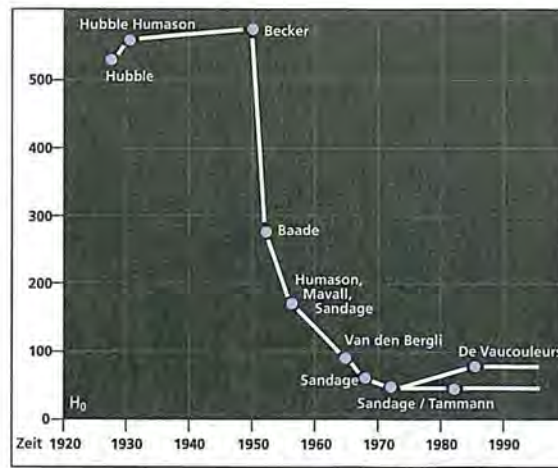


Abb. 2: Historische Varianz der Hubble-Konstanten. Je tiefer man in den Raum hinausschauen konnte und je ausgefeilter die Meßmethoden wurden, um so tiefer sank die „Konstante“ H_0 , das heißt, das Universum wurde größer und älter.

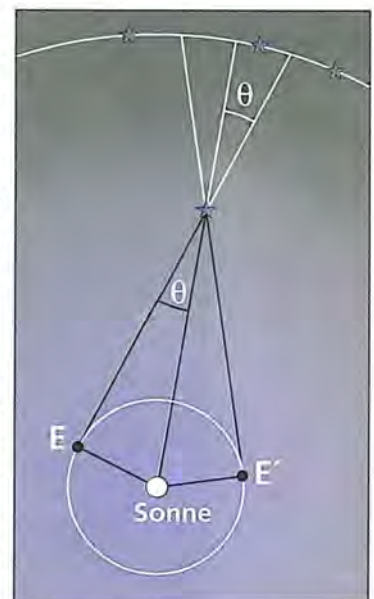
Erste Sprosse der kosmischen Leiter: Radarmessungen. Die Vermessung unseres Sonnensystems ist heute im Zeitalter der Elektronik relativ unproblematisch. Man peilt z. B. die Venus mit Radar an und benutzt das Gesetz, das schon Kepler zu Anfang des Dreißigjährigen Krieges gefunden hat. Die Entfernung Erde – Sonne von rund 150 Millionen Kilometern ist bis auf wenige Kilometer genau bekannt.

Zweite Sprosse der kosmischen Leiter: Triangulation. Der nächste Schritt geht von unserem Sonnensystem zu den Sternen unserer Milchstraße. Der Astronom wendet zunächst die Methode der Parallaxe an. Diese rein geometrische Methode benutzt die genau bekannte Entfernung zwischen Sonne und Erde als Basislänge. Da sich die Erde im Laufe eines Jahres um die Sonne bewegt, sehen wir die nahen Sterne im Laufe der Zeit aus immer etwas verschiedenen Richtungen. Über Triangulation (s. Abb. 3) läßt sich die Methode der „kosmischen Landvermessung“ bis auf Entfernungen von etwa 300 Lichtjahren vorantreiben. Sie wurde insbesondere durch den Astrometrie-Satelliten Hipparcos in den Jahren 1989 bis 1993 verfeinert.

Abb. 3: Messung der Parallaxe von Sternen. Der die Erde umkreisende Astrometrie-Satellit Hipparcos vermaß jenseits der störenden Atmosphäre in den gegenüberliegenden Positionen E und E' die Stellung von Objekten vor der Himmelssphäre über den Winkel θ .

Prinzip des Vermessens großer Entfernungen: Mit sog. „Standard“- oder „Einheits-Kerzen“ wird ein Weitergehen erreicht. Wenn man einen Helligkeits-Standard hat, braucht man nur noch zu schauen, wie hell er in einer weiteren Galaxie ist. Daraus kann man deren Entfernung ableiten. Im Prinzip wieder sehr einfach; praktisch jedoch teilweise problematisch, wie nachfolgend gezeigt wird.

Dritte Sprosse der kosmischen Leiter: Delta-Cephei-Sterne. Daß man überhaupt weiter in den Tiefen des Raumes Entfernungen bestimmen kann, grenzt fast an ein Wunder. Aus Gründen, die man bislang nicht so ganz verstanden hat, zeigen pulsierende (helligkeitsveränderliche) Sterne vom Typ Delta-Cephei eine merkwürdige Eigenschaft: Zwischen der Periode ihrer Schwingung und der Leuchtkraft besteht eine direkte Beziehung. Da man durch geduldiges Beobachten eines Delta-Cephei-Sterns



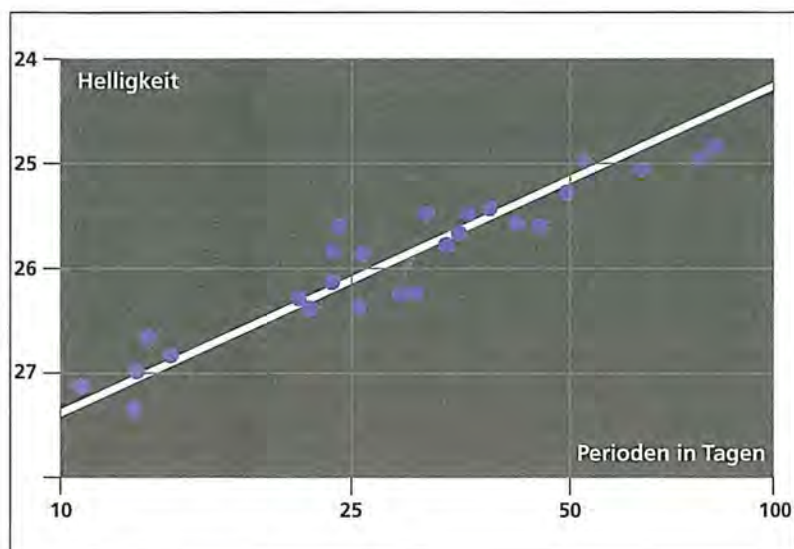
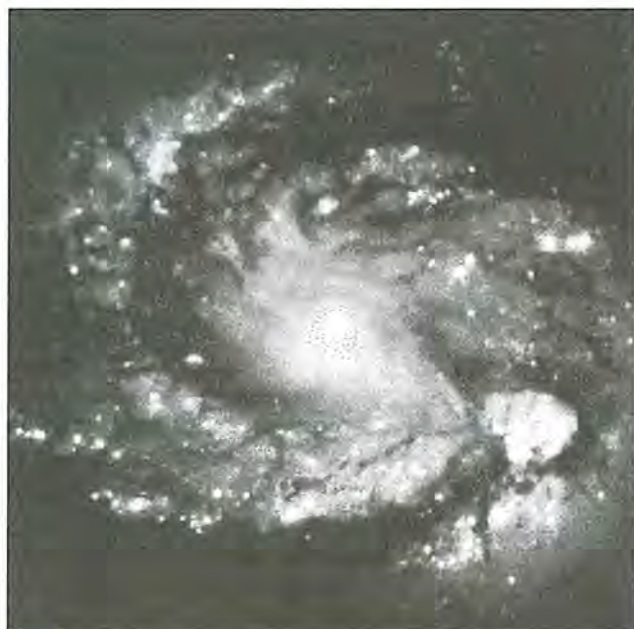


Abb. 4: Cepheiden sind veränderliche Sterne: Ihre Helligkeit zeigt rhythmische Schwankungen. Diese „Perioden-Leuchtkraft-Beziehung“ erlaubt Rückschlüsse auf die Entfernung des Sterns. Die Grafik zeigt die neuen Meßpunkte der in der Galaxie M100 beobachteten Cepheiden und aus der großen Magellanschen Wolke.

seine Pulsationsperiode (eine Bewegung, die aus dem Zusammenspiel von Schwerkraft und Gasdruck abgeleitet wird) bestimmen kann, folgt aus der in Abb. 4 gegebenen Beziehung direkt seine über eine Periode gemittelte Leuchtkraft. Vergleicht man sie mit der mittleren Helligkeit des Sterns am Himmel, kann daraus seine Entfernung abgeleitet werden. Da Delta-Cephei-Sterne relativ leuchtkräftig sind – sie sind 10.000mal leuchtkräftiger als die Sonne – können sie nicht nur in den fernsten Winkeln unserer Milchstraße gesehen werden; das Auf und Ab ihrer Helligkeit läßt sie selbst unter den Sternen anderer Galaxien auffallen. Diese Methode ist mit einigem Erfolg bis zu Entfernungen von 25 Millionen Lichtjahren anwendbar. Wie bedeutsam eine Bestimmungsbestimmung mit

Abb. 5: Galaxie M 100 im Virgo-Galaxienhaufen, in der das HST-Weltraumteleskop 20 Cepheiden-Sterne vermessen hat.



Hilfe von Cepheiden sein kann, hat im Oktober 1994 das Hubble Space Telescope HST demonstriert. Es hat damit gleichzeitig einen Beitrag zu seiner eigentlichen Bestimmung, nämlich der Entfernungsmessung, geleistet. Damals konzentrierten sich die Messungen auf die Galaxie M100 im Virgo-Galaxienhaufen. Ein Bild dieses Objekts, aufgenommen mit dem HST, ist in Abb. 5 gezeigt. Eine ungewöhnlich große Zahl von 20 Cepheiden wurde beobachtet. Sie sind so weit entfernt, daß sie erst mit dem weltraumgestützten, optisch besten Teleskop ausgemacht werden konnten.

Das Hubble-Teleskop und das Hubble-Alter.

Der aktuelle Stand der Ermittlungen. Die Astronomen sprechen von den bisher genauesten Entfernungsmessungen. Etwa 40.000 Sterne mußten bei der Suche nach diesen 20 hellen Veränderlichen inspiziert werden. Aus den Messungen der Lichtkurven in Abb. 6 hat man die Leuchtperioden und über die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung letztlich die Entfernungen dieser Sterne zu 17,1 Mpc oder 56 Millionen Lichtjahren ermittelt. Damit ist M100 zur Zeit die entfernteste Galaxie, in der Cepheiden-Veränderliche genau vermessen worden sind.

Bislang haben die besten bodengebundenen Beobachtungen Cepheiden in nahen Galaxien innerhalb eines Radius von 12 Millionen Lichtjahren entdeckt. Jedoch führen alle Galaxien in diesem Gebiet aufgrund gegenseitiger Massenanziehung nahestehender Galaxien zusätzliche Bewegungen aus. Um solche Störungen möglichst auszuschließen, muß man Cepheiden beobachten, die mindestens 30 Millionen Lichtjahren von unserem System entfernt sind. Genau dies hat das HST erstmals an Objekten von M100 ermöglicht.

Unsicherheiten dieser bislang genauesten Messungen liegen insbesondere in unserer Unkenntnis begründet, ob die Rotverschiebung von M100 identisch ist mit der mittleren Rotverschiebung des relativ großen Virgo-Clusters. Auch diese Rotverschiebung ist möglicherweise aufgrund lokaler Gravitationswirkungen verfälscht, die sich der radialen kosmischen Fluchtgeschwindigkeit untrennbar überlagern. Deshalb hat man zur Absicherung der Rotverschiebungsmessung Werte des etwas weiter entfernten Coma-Galaxienhaufens herangezogen, dessen relativer Abstand zum Virgohaufen aufgrund von Beobachtungen im Radiowellenbereich mit weniger Unsicherheiten behaftet ist.

Im Rahmen des kosmologischen Standardmodells bedeutet der ermittelte hohe Wert der Hubble-Konstanten ein Alter von 11-12 Milliarden Jahren für ein Universum mit kleiner Materiedichte und etwa 8 Milliarden Jahre für eines mit hoher Dichte. Dieses eine Beobachtungsergebnis hat das Weltalter durch eine der bewährtesten Methoden aufgrund dieser Messungen bereits um etwa Faktor 2 verjüngt; denn eine verbesserte Bestimmungsbestimmung des Virgo-Clusters ist ein kritischer

Meilenstein für die außergalaktische Entfernungsskala. Bis heute muß allerdings die Frage offen bleiben, wie eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Cepheiden in verschiedenen Galaxien deren Helligkeit und damit die Entfernungsbestimmung beeinflusst. „Beide Werte [8 bzw. 11-12 Milliarden Jahre] führen zu dem Dilemma, daß unser Universum jünger wäre als die ältesten Sterne unserer Milchstraße bzw. die ältesten Kugelsternhaufen – ein Ding der Unmöglichkeit. Außerdem bereiten kleine Alterswerte den derzeitigen Theorien Schwierigkeiten, die versuchen, Entstehung und Entwicklung großräumiger Strukturen im Universum zu beschreiben“ (ADORF 1995).

Über einen Ausweg aus diesem Widerspruch denken die Astronomen intensiv nach. Es gibt konkrete Pläne, Vergleichsmessungen an dem zur südlichen Hemisphäre gehörenden Fornax-Cluster aufzunehmen. „Whatever Fornax gives for the Hubble constant should carry a lot more weight than any single determination from Virgo ever could“, sagt Barry MADORE vom Caltech (CROSWELL 1995).

Aufgrund der unterschiedlichen Größe beider Haufen ergeben sich Vorteile für Fornax. Wie in Abb. 7 angedeutet, sind beide etwa gleich weit von unserer Milchstraße entfernt. Der Fornax-Cluster ist allerdings wesentlich kompakter, so daß man für die Entfernungsbestimmung jede seiner Spiralgalaxien nehmen kann. Deshalb wird die Unsicherheit bezüglich der Lage eines Objekts innerhalb des Clusters um einen Faktor von etwa zwei kleiner sein. Zur Ermittlung der lokalen Gravitationseinflüsse ist es auch entscheidend, daß man eine Kontrollmessung auf der gegenüberliegenden Seite unserer Galaxie durchführt.

Allerdings hat Fornax deutlich weniger Galaxien als Virgo. Eine Untersuchung aus dem Jahre 1988 zeigte nur 235 in Fornax im Vergleich zu 1 170 in Virgo. Die Durchmusterung zeigte nur 17 für Cepheiden verdächtige Spiralgalaxien und nur ein paar wenige werden sich für die Zwecke der Messung als tauglich erweisen. So können Sterne in Galaxien in der Position der Kantenstellung wegen der umgebenden Gas- und Staubbichte nicht vermessen werden, weil sie die Untersuchungen verfälschen. Trotzdem ist man zuversichtlich, brauchbare Sterne zu finden. Dies wäre eine echte Gegenprobe zu Messungen im Virgo-Cluster. „Virgo is going to answer it and Fornax is going to nail it... If they don't, that will signal trouble“ (CROSWELL 1995).

Vierte Sprosse der kosmischen Leiter: Supernovae. Um in noch größere Tiefen des Raumes vorzustoßen, weckt eine weitere Methode Hoffnungen: Supernovae sind Sterne, die gegen Ende ihrer Existenz in einer gewaltigen Explosion zerissen werden und dabei – je nach Typ – eine bestimmte maximale Helligkeit erreichen, so daß ihr Lichtmaximum

offenbar eine geeignete Einheitskerze darstellt. Eine Typ-Ia-Supernova ist mehrere Magnituden heller als Cepheiden. Wenn diese Sterne von einem Begleitstern genug Material aufgesammelt haben, explodieren sie in einem katastrophalen Vorgang, der nahezu den gesamten Stern zerreißt.

Stabile Sterne sind dann in einem Gleichgewichtszustand, wenn zwischen ihrem inneren Druck und ihrer eigenen Gravitation Gleichgewicht herrscht. Eine Störung dieser Balance ist die grundlegende Ursache für die erwähnte Sternexplosion. Wenn der Druck, der von der durch Kernreaktion erzeugten Hitze des inneren Sternmaterials stammt, – so das heutige Verständnis – plötzlich stark zunimmt, expandiert der Stern rasch. Das damit verbundene Ansteigen der Sternoberfläche und die Zunahme der Energieproduktion haben ein plötzliches Ansteigen der Sternhelligkeit zur Folge. Bei Expansionsgeschwindigkeiten um 10.000 km/sec wächst der Stern dann schnell von etwa Sonnengröße in nur einem Tag auf den Durchmesser des ganzen Sonnensystems an, wobei seine Oberfläche in dieser kurzen Zeit um ein Vielfachmillionenfaches zunimmt. Für die Dauer einer Woche kann eine Supernova die ganze Galaxie, in der sie steht, überstrahlen.

Supernovae sind relativ seltene Erscheinungen. Man entdeckt etwa nur eine pro hundert Jahren in einer durchschnittlichen Galaxie. So wurde auch die aufsehenerregende Supernova im Februar 1987 in der Großen Magellanschen Wolke genau vermessen. Sie half, die Vorgänge beim Kollaps eines Sterns besser zu verstehen und damit die Entfernungsbestimmung mit dieser physikalischen Methode weiter zu verbessern. Leider sind Supernovae wesentlich schwächer als die hellsten Haufen galaxien, so daß sie bis heute noch nicht bis in große Entfernungen beobachtet werden konnten.

Weiterhin ist der Sprung von Cepheiden zu Supernovae nicht eben eine Sprosse auf der kosmischen Leiter. Dazwischen liegt im Grunde eine ganze Leiter. Denn Cepheiden werden normalerweise in relativ nahestehenden Galaxien beobachtet, und da sich Supernovae so selten ereignen, müssen Astronomen sie in der größeren Zahl von weiter entfernten Galaxien suchen. Weiterhin ist die maximale Helligkeit der Supernovae mit Unsicherheiten behaftet.

Diese Lücke in der kosmischen Leiter hat die Astronomen zu andern Methoden greifen lassen, die ihnen helfen, die Lücke zu schließen. Die sog. Tully-Fisher-Methode benutzt die Tatsache, daß massivere Galaxien generell heller sind und

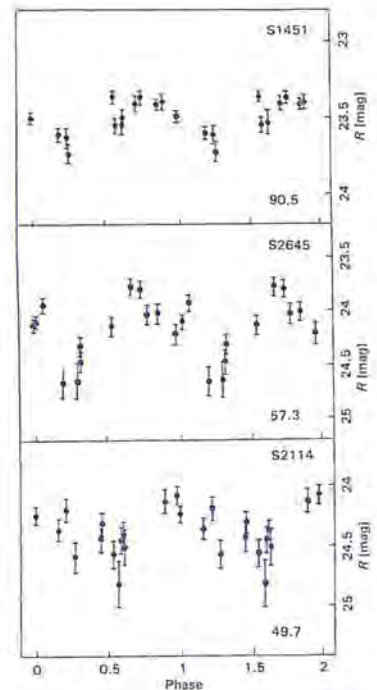
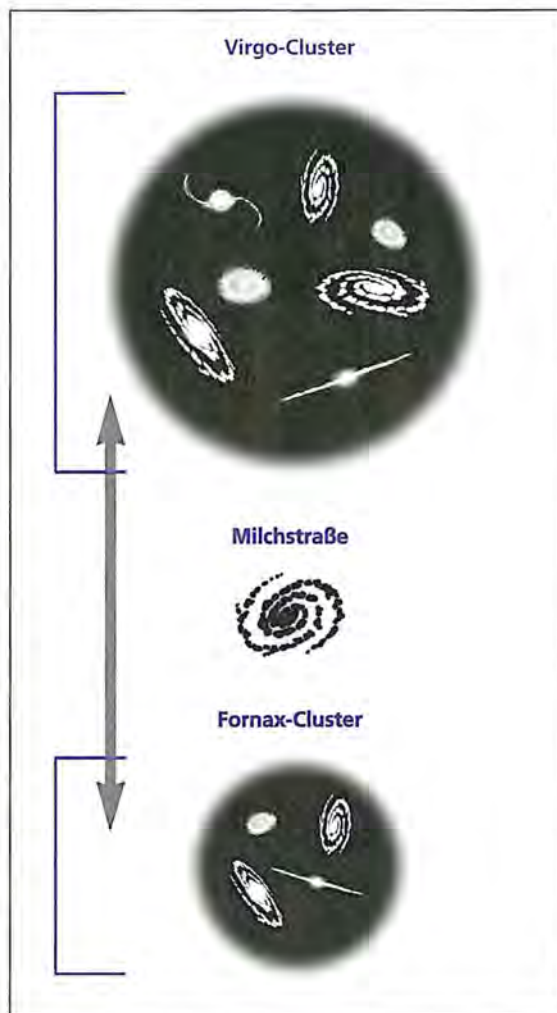


Abb. 6: Lichtkurven eines veränderlichen Cepheiden in der Spiralgalaxie M 100. Der Cepheide ändert seine Helligkeit zwischen 24,5 und 23,5 Magnituden. Die Periodendauer ist ein direktes Maß für seine absolute Helligkeit. (Nach ADORF 1995)

Abb. 7: Das Tiefenproblem. Fornax ist so kompakt, daß jede andere Galaxie sich in durchschnittlicher Distanz vom Cluster bewegt. Dies trifft jedoch nicht auf den viel größeren und komplexer strukturierten Virgo-Cluster zu. Dieses Problem macht es schwieriger für die Astronomen, die Hubble-Konstante aufgrund von Messungen am Virgo-Cluster allein zu berechnen.



schneller rotieren als weniger massive Objekte. Radioastronomen ermitteln die Rotationsrate mit Hilfe der 21-cm-Spektrallinie, die vom Wasserstoff der Galaxien emittiert wird. Je breiter diese Linie ist, umso schneller rotiert die Galaxie und um so massiver ist sie. Der Vergleich der so ermittelten Helligkeit mit der beobachteten ergibt dann die Ermittlung der Distanz. Die Tully-Fisher-Formel gibt Werte für die Hubble-Konstante, die zwischen 15 und 30 Kilometern pro Sekunde und Millionen Lichtjahre liegen und die zu Weltaltern von 14-7 Milliarden Jahren führen. „Aber“ – so führt Ray JAYAWARDHANA (1993) an – „sie sind zu ungenau.“

Fünfte Sprosse der kosmischen Leiter: Planetarische Nebel. Seit einigen Jahren versuchen die Astronomen mit Planetarischen Nebeln als Standardkerzen weiterzukommen. Diese haben mit Planeten nichts zu tun, sondern sind große Hüllen glühender Gase, die gelegentlich um alte Sterne beobachtet werden. Abb. 8 zeigt eine aktuelle Aufnahme des „Katzenauges“ vom HST aufgenommen. Diese sterbenden Sterne stoßen Schalen von Gas ab, da sie nicht massiv genug sind, um in einer Supernova zu explodieren. Die Beobachtung läßt darauf schließen, daß die Leuchtkraft der Hüllen untereinander vergleichbar und so hell ist, daß sie auch in großen

Tiefen des Raumes vermessen werden können. Zudem kommt den Astronomen zu Hilfe, daß ein dominantes Charakteristikum in ihrem Spektrum sie eindeutig identifizieren läßt. So hat das Team um George JACOBY bereits 1992 den Virgo-Cluster mit Planetarischen Nebeln vermessen und einen Wert gefunden, der mit den neuesten Messungen des HST übereinstimmt (JAYAWARDHANA 1993).

Neben der Unsicherheit der Altersbestimmung aus unterschiedlichen Entfernungsbestimmungsmethoden bringt das bisherige Verständnis der Sternentwicklung weitere Unsicherheiten ein. So kommen die Kosmologen trotz intensiver Suche nach besseren Methoden auf ein Alter des Universums, das mit ca. 10 Milliarden Jahren deutlich jünger ist als die ältesten Sterne mit 16-20 Milliarden Jahren.

III. Datierungsmethoden über den Sternaufbau

Die Halosterne. Die ältesten beobachtbaren Sterne sind die Halosterne. Sie umgeben unsere Milchstraße bis zu einer Entfernung von etwa 100.000 Lichtjahren. Sie bewegen sich, wie in Abb. 9 schematisch gezeigt ist, um das Zentrum der Milchstraße und füllen im Gegensatz zum Hauptanteil der Materie, die in einer Scheibe konzentriert ist, den ganzen Raumwinkel aus. Sie bilden bevorzugt Kugelsternhaufen. Die Astronomen gehen davon aus, daß sie gleichzeitig entstanden sind und damit gleiches Alter haben. Aber massenreiche Sterne in dem Halo verbrauchen ihren nuklearen Brennstoff schneller als massenärmere Sterne und werden dann zu Riesensternen. Deshalb beobachten die Astronomen, welche Sterne sich jetzt durch Aufblähen in Riesensterne umwandeln, und vergleichen das Ergebnis mit theoretischen Vorhersagen bzgl. ihrer Entwicklung. Da eine Einzelsternbeobachtung unter anderem wegen der unterschiedlichen Größe zu größeren Fehlern führen würde, vermessen sie eine möglichst große Anzahl von Temperatur- und Helligkeitsdaten in gleichen Kugelsternhaufen und vergleichen diese mit Ergebnissen theoretischer Ableitungen. Unterschiedliche Forschergruppen arbeiten sich nach dieser Methode vor. Eine italienische Gruppe hat so z. B. für M92 ein Alter von 19 Milliarden Jahren ermittelt.

Ein solches Ergebnis steht in drastischem Konflikt zu den diskutierten „Entfernungsaltern“ (Abschnitt II). Sicher, es gibt Aspekte, die Halosterne älter aussehen lassen können, als sie es wirklich sind. Z. B. kann die Diffusion schwererer Elemente als Wasserstoff und Helium, wie Lithium dazu dienen, daß diese eher zum Zentrum konzentriert sind als die leichteren. Durch die Metallizität der Elemente kann der Energietransport vom

Zentrum zur Oberfläche verändert werden und damit die Helligkeit und die Temperatur des Sterns. Deshalb könnte die Diffusion zu einer falschen Eichung von Sternhelligkeit und Temperatur führen. Die Einführung einer Korrektur hat tatsächlich das Alter auf minimal 16 Milliarden Jahre reduziert, aber den Alterskonflikt nicht aufgehoben.

Neueste Messungen an Kugelsternhaufen mit dem Hubble-Weltraumteleskop haben für eine weitere Überraschung gesorgt: Obwohl die Kugelsternhaufen zweifellos Heimstätte einer überalterten Sternengeneration sind, enthüllten jüngste Beobachtungen helle, blau leuchtende und daher jung erscheinende Sterne. Diese sogenannten Blue Stragglers (Blaue Ausreißer) wurden in über 20 Kugelsternhaufen der Milchstraße gefunden. Bei den neu entdeckten Objekten handelt es sich deshalb wohl kaum um eine Laune der Natur.

Die Lebenserwartung leuchtkräftiger blauer Sterne beträgt nur wenige Zehnmillionen Jahre und ist damit weit kürzer als das Alter von Kugelsternhaufen; sie können damit nicht gleichzeitig entstanden sein. Daß es sich bei den neu entdeckten Objekten um junge Sterne handelt, ist aber wenig wahrscheinlich, weil die interstellare Materie – also der Rohstoff für neue Sterne – nicht einmal mehr in Spuren vorhanden ist (BÜHRKE 1996).

Das ist eine echte Zwickmühle für die Kosmologen: Irgendwie müssen die alten Mitglieder eines Kugelsternhaufens eine Art Jungbrunnen gefunden haben. Wie soll diese Entdeckung in den Rahmen einer Entwicklungsvorstellung Eingang finden? Befriedigende Lösungen werden auf sich warten lassen.

Kohlenstoffreiche Sterne mit großer Rotverschiebung. Der Nachweis von Kohlenstoff und anderen schweren Elementen in den entferntesten Quasaren zwingt die Kosmologen zu der Vorstellung, daß es etwa eine Milliarde Jahre nach dem Zeitpunkt des postulierten Urknalls, als die ersten Quasare auftauchten, bereits mehrere Generationen massereicher, kohlenstoffproduzierender Sterne existiert haben müssen. Bisher fehlt von ihnen jede Spur.

Je tiefer die Astronomen bei ihren Beobachtungen in den Weltraum vordringen – oder um im Modell zu bleiben – sich dem Urknall nähern, desto weniger Kohlenstoff sollten sie messen. Jeder weitere Quasar mit schweren Elementen in immer größerer Entfernung stellt das Urknallmodell auf eine harte Probe.

Auf geradezu dramatische Weise hat sich durch Beobachtungen des ESO-Observatoriums im chilenischen La Silla der Konflikt vertieft. Wie im Sommer 1995 berichtet, hat man die bisher entfernteste Galaxie entdeckt. Das Sternsystem soll 11-15 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sein. Das Sternsystem muß also nach der Urknallvorstellung früh entstanden sein, dennoch enthält es neben



Silizium und Schwefel. Diese deuten darauf hin, daß schon sehr früh Sterne entstanden und gestorben sein müssen.¹

Der sterbende Stern „Katzenauge“ als sog. Planetarischer Nebel zur Entfernungsbestimmung.

Wohlgeformte Galaxien am Rand der Welt. „Hubble Unveils New Cosmic Puzzle“ war die Überschrift eines Berichtes in Aviation Week & Space Technology (ASKER 1994), das über die Beobachtung von elliptischen Galaxien am Rande des beobachtbaren Universums berichtete. In einer Entfernung von rund 14 Milliarden Lichtjahren hat man wohlgeformte elliptische Galaxien entdeckt, jedoch keine Spiralgalaxie. Sie scheinen alte, rote Sterne zu beherbergen, die nahezu zeitgleich mit dem Urknall (oder kurz danach, je nach angenommenem Alter) entstanden sein müssen. Oder es ist etwas falsch mit der Entfernungsskala? Der leitende Wissenschaftler Duccio MACCHETTO: „It's just not possible to make sense of it yet.“

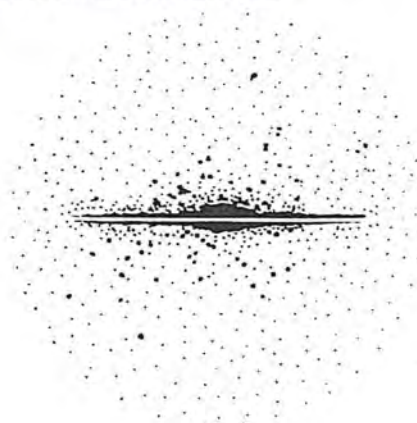


Abb. 9: Die Gasstaubscheibe unserer Milchstraße ist von einer kugelförmigen Ansammlung von alten, sogenannten Halosternen umgeben.

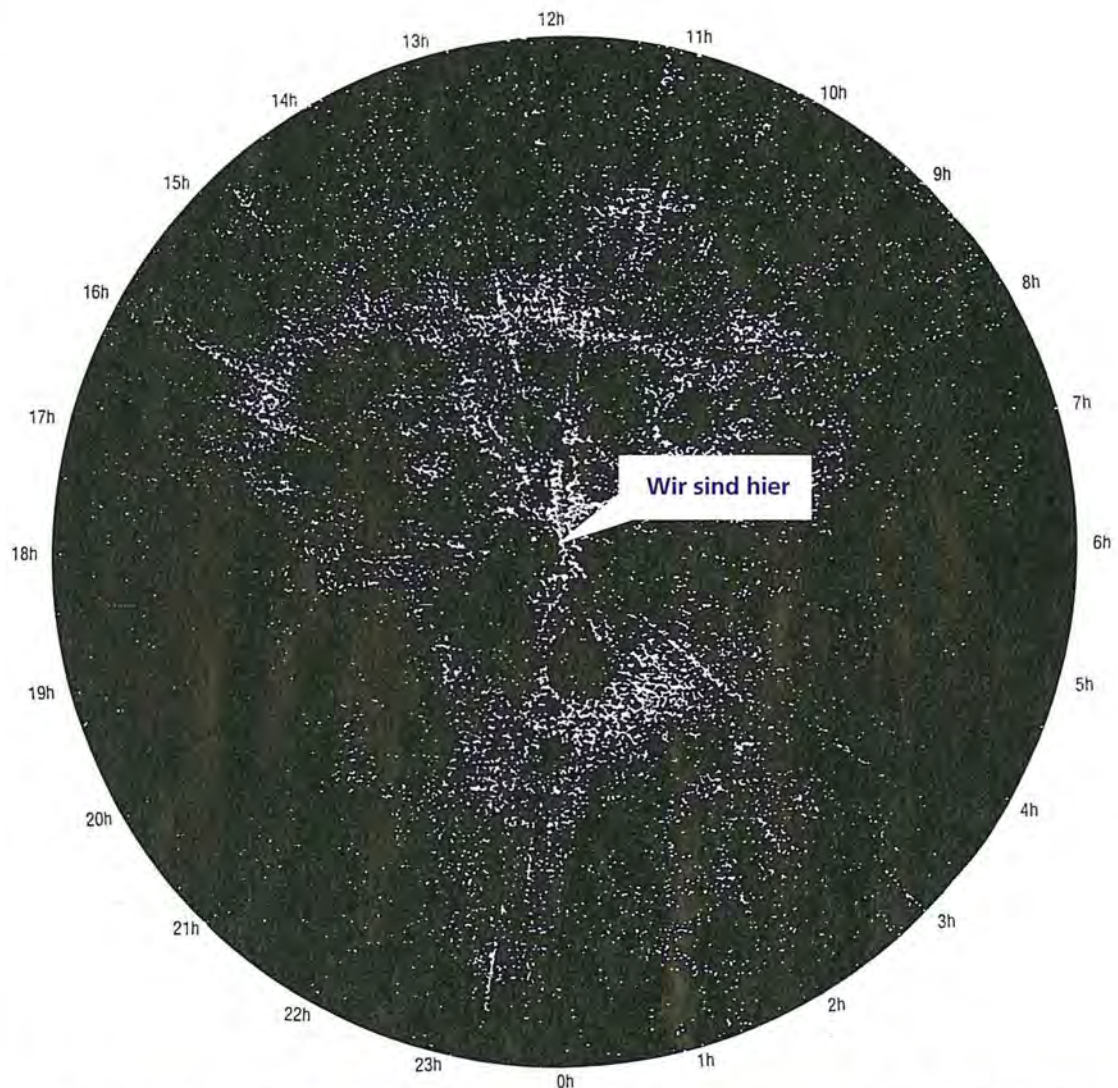


Abb. 10: Die „neueste Karte des Kosmos“. Diese runde Karte versucht, unsere kosmische Umgebung aus der Sicht eines virtuellen Beobachters darzustellen, der in einer Entfernung von Milliarden Lichtjahren senkrecht zur Ebene unserer Milchstraße ein lichtstarkes Teleskop auf uns richtet. Unsere eigene Galaxie ist zu einem kleinen Punkt geschrumpft, umgeben von Ansammlungen tausender von Galaxien in unterschiedlichsten Mustern.

Die Erstellung der Karte erfolgte derart, daß ein 36° hoher Keil über den vollen Raumwinkel von 360° nach Objekten abgesucht wurde. Wir sehen von unserem Standort im Zentrum aus in einen Raum, der sich über 500 Millionen Lichtjahre von der Erde aus erstreckt. (Zum Vergleich: die nächste Galaxie, die Magellansche Wolke, ist 100.000 Lichtjahre entfernt, während die entferntesten Quasare in einer Entfernung von 5 bis 10 Milliarden Lichtjahren gesehen werden).

Altersabschätzung aus Großraumstrukturen. Im Welt- raum gibt es Gebiete, die vor Galaxienreichtum strotzen. Andere Himmelsgebiete erscheinen nahezu galaxienfrei. Aber erst die aufwendige, aber immer noch sehr grobe Bestimmungsbestimmung brachte das räumliche Verteilungsmuster der Galaxien ans Tageslicht. Brücken aus Plasma und verstreute Galaxienhäufungen wurden entdeckt, die wiederum durch fließende Übergänge mit ähnlichen Gebilden verbunden sind, bis schließlich Formen von tausendfacher Galaxiengröße erkennbar wurden. Der Perseus-Pisces-Superhaufen z. B.

Die auffallendste Struktur sind die sog. „Finger Gottes“: Galaxien scheinen derart angeordnet zu sein, daß sie in speichenartiger Formation auf uns weisen. Diese Struktur ist insofern nicht ganz echt, als nicht die Entfernungen, sondern die Rotverschiebung in den Spektren aufgetragen ist. Dies verursacht eine gewisse Unsicherheit durch die Eigenbewegungen der Objekte in Galaxienhaufen.

In der oberen Hälfte der Karte kann man zwischen den Koordinaten 9 und 16 Uhr am nördlichen Himmel die sog. „Große Wand“ sehen. Das helle Feld über uns ist der sog. „Virgo-Haufen“. Daneben gibt es auffallend große Leerräume, an deren Begrenzung sich Anlagerungen von Galaxien häufen. Warum sich gerade entlang der Leerräume Galaxien häufen, ist eines von vielen Geheimnissen der Kosmologie. Von diesem Bild ist das Modell des „Seifenblasen-Universums“ abgeleitet. (Aus Astronomy, April 1993)

besteht aus einer dünnen Kette aus rund 20 lose miteinander verbundenen Galaxienhaufen, die sich über eine Entfernung von nahezu einer Milliarde Lichtjahre erstreckt.

Im Jahre 1989 hat man die dreidimensionale Verteilung von insgesamt 15.000 Galaxien dargestellt. Dabei fand sich eine gewaltige Wand aus Galaxien: etwa 500 Millionen Lichtjahre lang, rund 200 Millionen Lichtjahre breit und lediglich 15 Millionen Lichtjahre dick. Sie erhielt den plakativen Namen „Große Mauer“. Diese Formationen sind zu groß, um in der „kurzen“ Zeit seit dem postulierten

Urknall entstanden zu sein. Dafür müßte das Universum um Größenordnungen älter sein. Abb. 10 gibt einen Eindruck von der Ansicht eines außergalaktischen Beobachters, der aus einer Entfernung von Milliarden Lichtjahren in Richtung unseres Systems schaut.

Andere Strukturphänomene, wie die Existenz von Spiralgalaxien und riesige, heiße Wolken lassen sich bei den relativ langen Zeiträumen nur dann mit der uns bekannten Physik verstehen, wenn man ein Mehrfaches an sog. „Dunkler Materie“ einführt, die durch ihre zusätzliche Gravitationskraft dafür sorgt, daß solche Gebilde sich nicht in den angenommenen langen Zeiträumen auflösen.

Zusammenfassung. Die Konsequenzen aus dem Dargestellten zeigen Inkonsistenzen im Weltbild der Kosmologen:

- (i) Sie könnten die Theorie der Sternentwicklung opfern, einen Pfeiler der Astronomie und Triumph der Kernphysik, um schon bald nach dem Urknallereignis die Existenz schwerer Elemente denkbar erscheinen zu lassen.
 - ✱ Eine Möglichkeit, die Sternentwicklung um Milliarden Jahre zu beschleunigen, sehen die Theoretiker nicht.
- (ii) Sie müßten gigantische Kräfte unbekannter Herkunft annehmen, die an den Objekten zerren und die Messungen verfälschen. Das gilt auch für Großraumstrukturen.
 - ✱ Diesen Weg, nämlich den Ruf nach einer neuen Physik, scheut jeder.
- (iii) Sie können das Fundament ihres Denkgebäudes, den Urknall, mit all seinen Folgen preisgeben
 - ✱ Es gibt heute kein wissenschaftliches Modell, das globale Beobachtungen kosmischer Strukturen befriedigend einordnen läßt.

Damit ist die Suche nach dem Kosmosalter weit davon entfernt, beendet zu sein. Bei den aus Entfernungen abgeleiteten Altern mögen Staubwolken Objekte schwächer erscheinen lassen als sie sind und dadurch eine zu große Entfernung vortäuschen. Eigenbewegungen der Galaxien unabhängig von der Expansionsgeschwindigkeit können Alter verfälschen. Deshalb wird sowohl die Suche nach verlässlicheren Entfernungsindikatoren als auch die nach verbesserten Sternentwicklungsmodellen weitergehen müssen. Die bisherigen Ergebnisse sind jedoch das Beste, was Astrophysik mit den heutigen Mitteln – finanziell und technisch – leisten kann.

G. TAMMANN kommentiert: „Der Astronom muß viele Korrekturen bei seinen Auswertungen anbringen. Wenn er aber da angelangt ist, wo er hin will, sieht er möglicherweise keine Notwendigkeit mehr, nach weiteren Korrekturmöglichkeiten zu suchen. Es ist schwierig zu entscheiden, was in diesem Prozeß vom Wunschziel bestimmt und was

ehrliches Suchen ist. Wissenschaftliches Arbeiten ist zuweilen nicht ganz so objektiv, wie man hofft“ (zit. nach KNAPP 1995). Es ist ein steiniger Weg von Zahlen zur Welterkenntnis. In einem Spiegel-Interview sagte TAMMANN in Anbetracht der Komplexität der Bewertung von Messungen: „Die Hubble-Konstante ist ein Maß für die Naivität, mit der sie gemessen wird.“ Andere nennen sie „Die Kunst des Ratens“.²

Vera RUBIN stellt in „Galaxien – Reise durch das Universum“ fest, daß die Wissenschaft am besten vorankommt, wenn uns die Beobachtungen zu einer Änderung unserer Vorstellungen zwingen. „The search for a cosmological age is far from over“ (JAYAWARDHANA 1993).

Die Suche nach dem Kosmosalter ist weit davon entfernt, beendet zu sein.

Kosmologen haben mit erheblichem Aufwand eine ganze Palette ausgefeilter Methoden entwickelt, um einer Antwort nach dem Alter der Welt näherzukommen. Allerdings bewegen sie sich an einer Grenze, wo manches zu verschwimmen beginnt. Noch zu keiner Zeit waren die Astronomen mit so weitreichenden Hilfsmitteln der Raumfahrt zur Lösung ihrer Probleme ausgestattet. Deshalb sollte man bald in der Lage sein, eine schlüssige Antwort zu geben, falls es sie denn gibt. Die Frage scheint allerdings berechtigt, ob ein so komplexes Thema ein eindeutiges, objektives Ergebnis erwarten läßt. Selbst – oder gerade – die Experten haben ihre Zweifel. Deshalb bleiben Arbeiten an dieser Front weiterhin spannend.

Anmerkungen

- ¹ nach: Focus 39/1995
- ² aus: Der Spiegel 44/1994.

Literatur

- ADOLF H-M (1995) Kosmische Entfernungen. Eine neue Bestimmung der Hubble-Konstanten. *Sterne und Weltraum* 2/95, S. 96-100.
- ARP HC (1987) *Quasars, Redshifts, and Controversies*. Berkeley, CA.
- ASKER JR (1994) Hubble unveils new cosmic puzzles. *Aviation Week & Space Technology* 19/12, S. 63.
- BÜHRKE T (1996) Sterne älter als das All? *Bild der Wissenschaft* 2/96, S. 24-27.
- CROSWELL K (1995) A Milestone in Fornax. *Astronomy* 10/95, S. 42-47.
- JAYAWARDHANA R (1993) The Age Paradox. *Astronomy* 6/93, S. 39-41.
- KNAPP W (1995) Der Streit um das Alter der Welt. *Bild der Wissenschaft* 4/95, S. 54-61.
- PAILER N (1996) *Geheimnisvolles Weltall*. Neuhausen.
- WEINBERG S (1979) *Die ersten drei Minuten*. München.