# Mitteilungsblätter der Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen e.V.

Ausgabe 6 — April 1993


## Zu diesen Mitteilungsblättern

Nun ist also auch die 6. Ausgabe der Mitteilungsblätter erschienen – und das auch noch halbwegs pünktlich. Die Erstellung der Reproduktionsvorlagen mit dem Textsatzprogramm LaTeX hat sich auch in dieser Ausgabe wieder bewährt. Am endgültigen Layout wird allerdings immer noch gefeilt, so daß sich in den nächsten Ausgaben ähnlich wie in dieser Ausgabe noch Kleinigkeiten am Erscheinungsbild ändern können. Das perfekte Layout ist eben nicht so einfach zu erreichen, wir arbeiten jedoch daran ...

Als besonderes 'Schmankerl' erscheint in dieser Ausgabe der erste Teil einer Artikelserie über die Grundlagen der modernen Kosmologie, in der uns Joachim Draeger einen Überblick über die verschiedenen Modelle und den aktuellen Stand der Forschung geben wird. Besonderes Lob verdient diese Serie auch deswegen, weil Joachim an den Mitteilungsblättern miwirkt, obwohl er *kein* Mitglied unseres Vereins ist — **nachahmenswert!**

Daneben gibt es auch wieder die Kurzmitteilungen, die größtenteils aus Beiträgen in den *Internet News* zusammengestellt sind. Gegenüber der letzten Ausgabe haben wir es diesmal sogar geschafft, die Artikel zu übersetzen.

Wie schon in der letzten Ausgabe angesprochen, gibt es mittlerweile einen Redaktionsschluß für die Ablieferung von Beiträgen in den Mitteilungsblättern. Dies ist der 15. des letzten Monats eines Quartals, so daß die Mitteilungsblätter zu Beginn des darauffolgenden Quartals – hoffentlich – pünktlich erscheinen. Für die nächste Ausgabe wäre dies also der 15. Juni. Artikel können als Manuskripte, als ASCII-Files auf Diskette (am besten in LaTeX-Format) oder auch per EMail bei Andi Härpfer oder Andi Kronawitter abgeliefert werden. Die entsprechende EMail-Adresse lautet:

*haerpfer@informatik.uni-muenchen.de*

Für LaTeX steht ein zusätzliches Makropaket zur Unterstützung dieses Zeitschriftenlayouts und einiger astronomischer Spezialitäten zur Verfügung. Interessenten können sich bei A. Härpfer melden.

Neben Beiträgen in Form von Artikeln sind natürlich auch Leserbriefe, Anregungen, Kritik etc. willkommen bzw. erwünscht.

Bleibt noch zu sagen, daß sich nicht nur Vereinsmitglieder zum Artikelschreiben aufgerufen fühlen dürfen. Wer glaubt, einen in irgendeiner Weise für die Astronomie interessanten Beitrag leisten zu können, darf und soll das gerne tun. Mit dem Beitrag über moderne Kosmologie in dieser Ausgabe ist ja bereits ein Anfang gemacht.

Wir wünschen euch viel Spaß beim Lesen!

*Eure Redaktion*

# Grundlagen der modernen Kosmologie (I) Die Urknallhypothese

J. Draeger

Ausgehend von den prinzipiellen Eigenschaften kosmologischer Modelle werden die im Rahmen der Newtonschen Kosmologie zulässigen Universen diskutiert. Die dabei sowohl in statischen als auch in nichtstatischen Universen auftretenden Widersprüche sind ausführlich dargelegt und machen die Unzulänglichkeit der Newtonschen Gravitationstheorie für kosmologische Betrachtungen deutlich. Der dadurch erzwungene Übergang zur Einsteinschen Gravitationstheorie führt auf die verschiedenen Varianten der relativistischen Kosmologie. Als deren Hauptkonkurrenten werden der evolutionäre und der Steady-State Ansatz besprochen. Phänomenologische Aspekte begründen die Bevorzugung des evolutionären Ansatzes. Weitergehende theoretische Analysen der Bedingungen im frühen Universum machen darüber hinaus eine Anfangssingularität notwendig. Eine spekulative Betrachtung der Zukunft unseres Universums schließt den Artikel ab.

## 1 Einführung

### 1.1 Allgemeines

In einem Verein wie der *Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen e.V.*, der sich die Erforschung des Himmels zur Aufgabe gemacht hat und der dafür mit eigenem Beobachtungsgerät und der Möglichkeit zur Benutzung der Laufener Schulsternwarte ausgestattet ist, steht naturgemäß die Beobachtungspraxis im Vordergrund. Trotzdem werden einige Mitglieder vielleicht auch Interesse an den theoretischen Aspekten der Astronomie haben. Hinsichtlich der Mitteilungsblätter findet sich in ihrer letzten Ausgabe als eine erste Arbeit in dieser Richtung ein Übersichtsartikel über den gegenwärtigen Kenntnisstand der Sternentwicklung. Quasi als Fortsetzung soll nun auf die Kosmologie und damit auf die Entwicklung des Universums als Ganzes eingegangen werden.

Wegen der umfangreichen Thematik erscheint diese Arbeit in Form einer Artikelserie. Um den Leser nicht mit langen und komplizierten Abhandlungen zu langweilen oder ihn in einer Flut von Querverweisen zwischen den einzelnen Folgen zu ertränken, sollen die einzelnen Artikel in sich abgeschlossene Einblicke in Teilbereiche dieses großen Wissensgebietes geben. Damit dennoch eine schlüssige Darstellung des heutigen Kenntnisstandes der Kosmologie entsteht, wurde eine solche Auswahl und Unterteilung des Stoffes angestrebt, daß jede neue Folge der Artikelserie zwar die bis zu diesem Zeitpunkt angestellten Betrachtungen auf extremere Zustände des Kosmos näher zur Urknallsingularität ausdehnt, aber im Prinzip kein bisher erworbenes Wissen wieder in Frage stellt.

Vorläufig ist daher der folgende Aufbau geplant: Nach dem hier in Teil 1 geschilderten historischen Weg zur Urknallhypothese legt Teil 2 darauf aufbauend das gegenwärtige Standardmodell der Kosmologie dar. Dieses basiert auf einem homogenen und isotropen Universum mit Anfangssingularität. Vor einer weiterführenden Diskussion kosmologischer Fragen liefert der dritte Teil grundlegende Informationen über die Elementarteilchenphysik bei hohen und sehr hohen Energien. Dies erlaubt uns in Teil 4 die Beschäftigung mit sogenannten inflationären Ansätzen.

In ihnen wird die Entwicklung des frühen Universums unter Berücksichtigung von Theorien untersucht, die die Vereinheitlichung der fundamentalen Wechselwirkungen bei hohen Temperaturen postulieren. Die Bezeichnung 'inflationär' ist einer unter diesen Umständen typischerweise auftretenden kurzzeitigen rapiden Aufblähung des Kosmos nachempfunden. Teil 5 schließt dann unsere Betrachtungen mit der Einbeziehung diverser Teilaspekte der modernen Kosmologie und einer Diskussion der Physik unmittelbar nach dem Urknall ab. Hier sollen kosmische Strings, Texturen und Magnetische Monopole sowie Quanten-, String- und selbstreproduzierende Kosmologien ihren wohlverdienten Platz finden. Da auf ziemlich lange Sicht vorausgeplant werden mußte, kann sich das intendierte Programm aber jederzeit noch durch Neuaufnahme oder Wegfall einzelner Gebiete auch in größerem Maßstab ändern.

Beim Verfassen der Artikel stellte das unterschiedliche Vorwissen der Leser dieses Mitteilungsblattes ein gewisses Problem dar; denn die Behandlung des Stoffes soll so erfolgen, daß bei der Lektüre sich weder Schüler vollständig überfordert noch Physikstudenten durch Trivialitäten gelangweilt fühlen. Als Kompromiß wurde daher ein Niveau angestrebt, das mit dem einer

Zeitschrift wie *Spektrum der Wissenschaft* vergleichbar ist. Ein Glossar nicht im Text erläuterter Fachausdrücke und einige für Spezialisten gedachte Fußnoten bzw. Abschnitte ergänzen die Ausführungen. Der Author hofft, so eine möglichst klare und verständliche Schilderung der Kosmologie zu vermitteln und über das reine Wissen hinaus einen Einblick in Vielfalt und Schönheit der Schöpfung aus naturwissenschaftlicher Sicht zu geben.

### 1.2 Literatur

Über einen Gegenstand der aktiven Forschung wie der Kosmologie existiert eine Fülle von Literatur. An dieser Stelle kann daher nur auf die wichtigsten und zur Erstellung dieser Arbeit benutzten Werke eingegangen werden.

Für den Anfänger vermittelt [HER1] einen ersten Kontakt zur Kosmologie; Interessierte können in populärwissenschaftlichen Büchern wie [HAWK1], [WEI1] ihr Wissen vertiefen. Sehr gut geeignet sind auch [BAR], [DIC] und [WIL]. Fachlich Vorgebildete, die durch ein paar mathematische Ausdrücke nicht gleich geschockt werden, profitieren wahrscheinlich am meisten von den entsprechenden Kapiteln und Abschnitten der Grundlagenliteratur, z.B. [UNS], [BER], [OHA] oder [SCI]. Für Insider sind [WEI2] und [MIS] zu empfehlen. Für Detailfragen der 'klassischen' Kosmologie wende man sich am besten an [ZEL]. Zu der wohl anspruchsvollsten, aber zugleich tiefgehendsten Literatur zählen [NAR], [ISH], [HAWK2] und [BAL]. Eine gesonderte Erwähnung verlangt [NOR]: Obwohl ansonsten veraltet finden sich dort einige interessante Anmerkungen zu Kosmologien, die auf weniger gebräuchlichen Gravitationstheorien aufbauen.

## 2 Newtonsche Kosmologie

### 2.1 Modellbildung

Definitionsgemäß beschäftigt sich die Kosmologie mit der Struktur, der zeitlichen Entwicklung und der Entstehung des Universums als Ganzem. Auf eine eingehende Diskussion der Struktur des Universums soll hier verzichtet werden; für sie gibt es schon seit längerer Zeit realistische Vorstellungen, die sich auf zahlreiche teilweise bis in die Antike zurückreichende Beobachtungen stützen und die in fast jedem Astronomiebuch im Detail nachgelesen werden können. So ist es heute allgemein bekannt, daß sich die kosmische Materie zum Großteil[1] in einzelnen Objekten konzentriert, die untereinander eine Hierarchie bilden: Sterne mit ihren Planeten und deren Monde sind mit anderen Sternen in Doppel- und Mehrfachsystemen vereint; größere Ansammlungen von Sternen bilden Sternhaufen und Galaxien, diese ihrerseits Galaxienhaufen und diese wieder Superhaufen.

Im Gegensatz zur Untersuchung der Struktur des Universums gelang es bei der Untersuchung der Dynamik erst in diesem Jahrhundert, entscheidende Durchbrüche zu erzielen. Neben religiösen und philosophischen Gründen spielte dabei auch der Mangel an Meßdaten eine Rolle; denn während der Aufbau des Universums bereits durch einfache Beobachtungen am Fernrohr anschaulich erfaßbar ist, verschließt sich die Dynamik einem direkten Zugang schon allein durch die wahrhaft astronomischen Zeiträume der Entwicklungsschritte. Um trotzdem Aussagen über die Dynamik machen zu können, muß daher mit theoretischen Modellen des Kosmos gearbeitet werden. Die Plausibilität dieser Modelle ist durch Vergleich ihrer Vorhersagen mit Beobachtungsdaten überprüfbar. Wie hat nun ein solches Modell auszusehen?

Um ein Modell für dynamische Betrachtungen anwenden zu können, ist die Kenntnis der im System herrschenden Kräfte unerläßlich. Von den vier Grundkräften, die die moderne Physik zur Beschreibung aller Wechselwirkungen von Materie aufeinander benutzt und damit als Kandidaten für eine Einbeziehung in unser Modell zur Verfügung stellt, schließen wir die starke und schwache Kernkraft zunächst vollständig aus unseren Überlegungen aus; ihre Reichweiten sind auf atomare Bereiche begrenzt und für uns daher vorläufig uninteressant. Der Elektromagnetismus ist über weite Strecken wirksam, aber aufgrund von Beobachtungsdaten weitgehend zu vernachlässigen; weder scheint die elektromagnetische Strahlung zum gegenwärtigen Zeitpunkt einen nennenswerten Einfluß auf die Bewegung kosmischer Objekte zu haben, noch treten in genügender Zahl Himmelskörper mit starker elektrischer Ladung auf. Es bleibt als wesentliche bestimmende Kraft die Gravitation. Für ihre Beschreibung verwenden wir zunächst die Newtonsche Gravitationstheorie. Unser Modell des Universums geht daher von einem dreidimensionalen euklidischen Raum mit den Galaxien als elementaren Objekten aus, die aufgrund ihrer jeweiligen Eigenmasse eine Anziehungskraft aufeinander ausüben.

Um das Modell einer einfachen mathematischen Beschreibung zugänglich zu machen, fordern wir die Erfüllung des sogenannten kosmologischen Postulats: Das Weltall besitze keine ausgezeichneten Punkte (Homogenität) und biete einem Betrachter in jeder Richtung denselben Anblick (Isotropie). In manchen Kosmologien erweitert man das kosmologische Postulat um die Bedingung, einem Betrachter möge sich in jeder Richtung und zu jeder Zeit derselbe Anblick bieten, zum sogenannten perfekten kosmologischen Postulat. Während

[1] Ob die oben erwähnten Objekte tatsächlich ein Großteil der im Universum existierenden Masse enthalten, scheint durch aktuelle Forschungen wieder in Frage gestellt. So weiß man aus Modellrechnungen, daß zur gravitativen Stabilisierung einer Galaxie die in deren Sternsystemen gebundene Masse im allgemeinen nicht ausreicht. Folglich müssen noch andere Massequellen existieren, um den Zusammenhalt zu gewährleisten. Dies ist das bis heute ungelöste sogenannte dark-matter-Problem.

die Isotropieforderung durch Beobachtungen abgesichert ist — der Sternenhimmel über uns sieht im Prinzip überall gleich aus — besitzt die Homogenitätsforderung eher einen philosophischen Hintergrund; zu schlecht waren die Erfahrungen mit den geo- und heliozentrischen Weltbildern. Die Schwierigkeiten einer experimentellen Begründung der Homogenitätsforderung resultieren aus der Notwendigkeit, Messungen nicht nur wie bei einer Kontrolle der Isotropie in allen Richtungen, sondern zusätzlich auch in allen Entfernungsbereichen durchzuführen und zu überprüfen.

## 2.2 Ein unendliches Universum

Als die Wissenschaftler im 17. Jahrhundert mit der Newtonschen Gravitationstheorie zum ersten Mal ein wirkungsvolles Hilfsmittel zur Untersuchung kosmologischer Aspekte erhielten, war die Forschung noch stark von religiösem Gedankengut beherrscht. Der biblische Gedanke eines ewigen Universums führte dazu, daß man von einem statischen Kosmos ausging. Auch wir wollen zunächst die Annahme eines statischen Kosmos machen und untersuchen, zu welchen Ergebnissen wir dabei gelangen. Unser Modell leistet uns dabei trotz seiner Einfachheit gute Dienste.

Eines der grundsätzlichsten Probleme, die wir zu klären haben, ist zu entscheiden, ob unser Universum endlich oder unendlich ist. Innerhalb der Newtonschen Kosmologie läßt sich diese Frage scheinbar rasch zugunsten eines unendlichen Weltalls beantworten. Dazu betrachten wir den folgenden Widerspruchsbeweis: Angenommen, das Universum wäre endlich. Dann gäbe es nur endlich viele Sterne. Die am Rand des Universums (d.h. am Rand der Sternpopulation) stehenden Sterne würden durch die ungleiche Verteilung der sie umgebenden Massen einer Kraft in Richtung Schwerpunkt der Sternpopulation ausgesetzt sein und daher zu wandern beginnen. Schon nach kurzer Zeit wäre das Universum in sich zusamengestürzt.

Wie soeben nachgewiesen, kann in der Newtonschen Kosmologie kein statisches endliches Universum existieren; kann es aber ein unendliches? Zwar konstruiert man sich unter Ausnützung ähnlicher Argumente wie oben relativ schnell ein entsprechendes Modell[2], doch ergibt eine genauere Analyse, daß jeder derartige Kosmos instabil sein muß: Die kleinste Störung reicht aus, um den statischen Charakter zu zerstören[3]. Damit sind auch statische unendliche Universen nicht plausibel.

Unsere Überlegungen machen deutlich, daß in der Newtonschen Kosmologie die Annahme eines statischen Universums nicht akzeptabel ist. Historisch setzte sich diese Erkenntnis aber erst sehr spät durch; denn bei der Frage nach den Existenzmöglichkeiten eines statischen unendlichen Universums fiel man lange Zeit einem Denkfehler zum Opfer[4]. Noch bevor man diesen entdeckte, tat sich jedoch an anderer Stelle ein Widerspruch auf: Olbers formulierte 1823 sein bekanntes Paradoxon[5]. Wegen dessen grundsätzlicher Bedeutung für die Kosmologie wird hier eine einfache Variante wiedergegeben.

## 2.3 Das Olberssche Paradoxon

Betrachte eine Kugelschale mit Innenradius $r$ und Dicke $d \ll r$, die die Erde $E$ als Mittelpunkt besitzt. Das Volumen der Kugelschale berechnet sich zu

$$V = \frac{4}{3}\pi((r+d)^3 - r^3) = \frac{4}{3}\pi(3r^2d + 3rd^2 + d^3)$$

Aus der nach Voraussetzung geltenden Beziehung $d \ll r$ ergibt sich die Abschätzung $3rd^2 + d^3 \ll 3r^2d$; näherungsweise darf der Term $3rd^2 + d^3$ also vernachlässigt werden. Es folgt daher $V \approx 4\pi r^2 d$.

Geht man davon aus, daß jedes Raumelement $n$ Galaxien enthält und daß jede Galaxie eine Leuchtstärke $l$ besitzt (Betrachte $n$ und $l$ als Durchschnittswerte), so er-

[2] Lege in den dreidimensionalen euklidischen Raum ein rechtwinkliges Koordinatensystem und plaziere genau an den Punkten, deren Koordninaten durch Tripel ganzer Zahlen beschrieben werden, Galaxien gleicher Masse; wie leicht auszurechnen, ist die auf jede Galaxie wirkende Kraft Null, d.h. das so erhaltene Universum ist statisch.

[3] Ein statisches Universum liegt genau dann vor, wenn die Summe aller an den einzelnen Galaxien angreifenden Kräfte Null ist. Bewegt sich einer der im Universum enthaltenen Galaxien auch nur minimal, wird dieses Gleichgewicht durch Veränderung der wirkenden Kräfte zerstört und das Szenario nichtstatisch. Eine derartige minimale Störung könnte z.B. durch Planeten verursacht werden.

[4] Man argumentierte etwa folgendermaßen: 'Ein unendliches Universum besitzt keinen Mittelpunkt; da dieser aber fehlt, gibt es auch kein Zentrum, in das das Universum kollabieren oder von dem aus es expandieren könnte. Daher ist eine Expansion oder eine Kontraktion nicht möglich.'

[5] Olbers Paradoxon wurde in der einen oder anderen Form bereits früher formuliert; seine Anfänge lassen sich bis zum Jahr 1610 (Kepler) zurückverfolgen

rechnet sich die Gesamtleuchtstärke aller in der betrachteten Kugelschale befindlichen Galaxien zu $\approx 4\pi r^2 dnl$. Weil die Strahlung jeder Galaxie bis zum Erreichen der Erde eine Strecke $\approx r$ zurücklegen muß und sich die Strahlung bis dahin auf die Oberfläche einer Kugel desselben Radius — d.h. auf eine Fläche der Größe $\approx 4\pi r^2$ — verteilt hat, erhält man für den auf der Erde ankommenden Anteil der Gesamtleuchtstärke $\approx dnl$. Dieses Resultat ist unabhängig vom Kugelschalen-Innenradius $r$.

Anders formuliert besagt dieses Ergebnis, daß von den Galaxien zweier Kugelschalen die Erde gleich viel Strahlung erhält, sofern die Kugelschalen nur gleiche Dicke besitzen; der Radius der Kugelschalen spielt keine Rolle. Dieses Ergebnis ist bei der Annahme eines unendlichen Universums hochinteressant; denn dann läßt sich das ganze Weltall durch unendlich viele zueinander disjunkte konzentrische Kugelschalen gleicher Dicke mit der Erde als Mittelpunkt lückenlos überdecken. Weil aber von den Galaxien jeder Kugelschale derselbe nichtverschwindende[6] Strahlungsbetrag abgestrahlt wird und es unendlich viele Kugelschalen gibt, wäre der auf der Erde ankommende Gesamtstrahlungsbetrag unendlich. Selbst genauere Rechnungen, die die gegenseitige Verdeckung von Galaxien berücksichtigen und das Ergebnis damit finit machen, liefern immer noch einen Gesamtstrahlungsbetrag, der die Erde auf eine Temperatur von ca. 5000 K aufheizen würde.

Noch lange nach seiner Formulierung wurden zahlreiche Versuche unternommen, das Olberssche Paradoxon zu umgehen. So schien die Annahme interstellarer Materie kurzfristig Rettung zu bringen; doch dann entdeckte man, daß diese Materie wie die Erde aufgeheizt und daher schließlich selbst strahlen würde. Selbst Versuche, die Homogenität des Raumes und damit das kosmologische Postulat abzuschwächen, ließen entweder das Olberssche Paradoxon bestehen oder stimmten nicht mit Beobachtungen der Galaxienverteilung überein. Dieser Zustand hielt bis zur Abkehr von der Forderung nach einem statischen Universum an.

Die früheren[7] Schwierigkeiten mit dem Olbersschen Paradoxon resultierten aus einem Unverständnis seiner wahren Natur. Dieses Paradoxon wendet sich nicht gegen einen unendlichen, sondern gegen einen statischen Kosmos: Da ein statisches Universum sich thermodynamisch im Gleichgewicht befinden muß, erhält man in einem derartigen Modell für jedes kosmische Objekt gleich große Werte hinsichtlich Strahlungsemission und -absorption — die Erde wäre dann also nicht so kalt, die Sonne nicht so heiß. Weil aber offensichtlich kein thermodynamisches Gleichgewicht herrscht, kann das Universum nicht statisch sein. Dabei ist es unwichtig, ob man ein endliches oder unendliches Universum voraussetzt.

### 2.4 Ein expandierendes Universum

Im Jahre 1929 stellte E. Hubble fest, daß das Licht weit entfernter Galaxien eine deutliche Rotverschiebung aufweist. Angesichts des wohlbekannten Dopplereffekts läßt sich diese Beobachtung praktisch nur als Expansionsbewegung unseres Universums deuten[8]. Damit werden alle statischen Modelle unrealistisch. Ein Übergang zu expandierenden Modellen brachte in der Newtonschen Kosmologie jedoch keine Rettung: Hubbles Erkenntnis, daß der Betrag der Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie zu ihrer Entfernung in proportionaler Beziehung steht (Ihm zu Ehren wird deren Linearfaktor heute als Hubble-Konstante bezeichnet), würde Konflikte mit der experimentell hervorragend gesicherten Speziellen Relativitätstheorie ergeben. Denn gemäß Hubble nimmt die Relativgeschwindigkeit zweier Galaxien zueinander mit unbegrenzt wachsender Relativdistanz ebenso unbegrenzt zu, überschreitet also die durch die Vakuumlichtgeschwindigkeit gegebene Grenze beliebig weit. Dabei spielt es keine Rolle, ob man von einem endlichen oder unendlichen Universum ausgeht. Die für die Entwicklung eines plausiblen kosmologischen Modells ungeeignete Newtonsche Gravitationstheorie muß daher durch einen besseren Ansatz ersetzt werden. Glücklicherweise existierte ein solcher schon 14 Jahre vor Hubbles Erkenntnis.

## 3 Relativistische Kosmologie

### 3.1 Historisches

1915 begann eine neue Ära der Wissenschaft: A. Einstein vollendete in diesem Jahr seine allgemeine Relativitätstheorie. Mit ihr gelang ihm, die Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips von Lorentztransformationen[9] auf allgemeine Koordinatentransformationen. Unter Benutzung des Äquivalenzprinzips, das die Gleichheit von träger und schwerer Masse postuliert, wird dabei die Kraft, die bei gegeneinander beschleunigten Bezugssystemen auftritt, als Gravitationskraft gedeutet. Obwohl

[6] Wäre der Strahlungsbetrag verschwindend, würde das für alle Kugelschalen gelten und das Universum somit keine Galaxien enthalten.

[7] Die moderne Kosmologie gibt zwei Erklärungsmöglichkeiten für das Olberssche Paradoxon: 1) Durch eine schnelle Expansion des Kosmos bilden sich Ereignishorizonte, die verhindern, daß aus bestimmten Regionen Strahlung zur Erde gelangt. 2) Weil das Universum einen zeitlichen Anfang hat und die Lichtgeschwindigkeit endlich ist, erreicht uns Strahlung aus bestimmten Regionen des Kosmos erst später. Unser Nachthimmel müßte bei Annahme dieses Effekts mit der Zeit immer heller werden.

[8] Die Expansion des Universums stellt keine Verletzung des kosmologischen Postulats dar, da Beobachtern in verschiedenen Galaxien genau derselbe Anblick eines expandierenden Raumes geboten wird.

[9] Die Lorentztransformationen bilden die Invarianzgruppe der speziellen Relativitätstheorie.

naturgemäß durch die Newtonsche Theorie approximierbar sind die bei höheren Energien auftretenden Unterschiede doch bedeutend. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe:

1. Durch die Nichtlinearität der allgemeinen Relativitätstheorie ist der totale Effekt mehrerer Massen nicht mehr die Summe der Effekte der einzelnen Massen.
2. Anstelle eines einzigen Gravitationspotentials geht die allgemeine Relativitätstheorie von insgesamt zehn Potentialen aus.

Derartige Differenzen lassen es naheliegend erscheinen, Modelle des Universums nun auf der Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie zu betrachten; denn wie jede andere Gravitationstheorie impliziert auch die Einsteinsche eine eigene Kosmologie. Die vorhergesagten Effekte galten aber zu der damaligen Zeit als so bizarr und so wenig glaubwürdig, daß die Physiker sich zunächst auf die Überprüfung der neuen Theorie konzentrierten; erst die Bestätigung einer ganzen Reihe von Erscheinungen wie die Lichtablenkung im Gravitationsfeld und die Erklärbarkeit der schon seit längerer Zeit bekannten Perihelbewegung des Merkur förderten die Akzeptanz der Einsteinschen Ideen. Am Ende dieser Periode wurden die Arbeiten an relativistischen Kosmologien in vollem Umfang aufgenommen. Zuvor hatte Einstein selbst bereits einige Modelle untersucht. Wie die meisten seiner Zeitgenossen machte aber auch er den Fehler, von einem statischen Universum auszugehen.

Bei seinen Überlegungen auf der Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie konnte Einstein von vornherein auf die Einbeziehung unendlicher Universen verzichten; solche sind infolge der Raumkrümmung, die von der nichtverschwindenden Materiedichte induziert wird, unzulässig[10]. Andererseits stimmen die Vorbehalte gegen endliche statische Universen mit denen der Newtonschen Kosmologie überein. Nach einer genauen Analyse des anstehenden Problems erkannte Einstein, daß zur Wahrung des statischen Charakters ein negativer Druck erforderlich ist. Durch Einführung der kosmologischen Konstante $\Lambda$ gelang es ihm, einen solchen tatsächlich zu reproduzieren. Dies führte 1917 auf die Formulierung der statischen Einstein-Kosmen. Sie schließen entgegen einer ersten Vermutung Einsteins eine Vakuumlösung nicht aus; es handelt sich dabei aber anstelle des von der speziellen Relativitätstheorie gewohnten Minkowski-Raumes um einen deSitter-Kosmos.

Der scheinbare Erfolg Einsteins, widerspruchsfreie Modelle unseres Universums angeben zu können, wurde schon fünf Jahre später durch T. Friedmann zunichte gemacht. Er zeigte 1922, daß alle statischen isotropen und homogenen Kosmen instabil und daher unrealistisch sind. Friedmanns Entschluß, deshalb nichtstatische Modelle zu untersuchen, erfuhr 1929 durch Hubbles Entdeckung der Expansion des Universums eine glänzende Bestätigung.

### 3.2 Konkurrierende Modelle

Durch den Nachweis der Expansion unseres Universums wurde eine wichtige Randbedingung gefunden, die die Vielfalt der möglichen kosmischen Modelle einzuschränken half. Die Reihe der Kandidaten, die noch im Rennen verblieben, wurde aber schon bald durch einige neue Ansatze wieder vergrößert. Mit der Zeit kristallisierten sich jedoch aus allen diesen Modellen immer mehr zwei Hauptkonkurrenten heraus: Das Modell des evolutionären Universums und das 1948 von H. Bondi und T. Gold entworfene und von F. Hoyle weiterentwickelte Steady-State-Modell.

Der evolutionäre Ansatz geht von einem konstanten Materieinhalt des Kosmos aus. Infolge der Expansionsbewegung müßte dieser in der Vergangenheit in einem sehr viel kleineren Volumen konzentriert gewesen sein. Die so mit zunehmender Nähe zum Weltanfang größer werdende Dichte des Universums würde dann in einer Singularität einen unendlichen Wert erreichen. Die wegen der extremen Dichte auch sehr heiße Frühphase des Kosmos gab dieser Theorie den Namen 'Urknall-Theorie'.

Die Steady-State Kosmologie dagegen beruht auf eine Erweiterung des kosmologischen Postulats zum perfekten kosmologischen Postulat. Die damit verbundene Bedingung an das Universum, zu allen Zeiten den gleichen Anblick zu bieten, würde eine zeitinvariante Dichte im-

[10] Zur Veranschaulichung beachte man, daß sich in unendlichen Universen mit nichtverschwindender Materiedichte sofort endliche Bereiche abschnüren und als eigenständige Kosmen weiterexistieren würden.

plizieren. Im Zusammenhang mit der ständig wachsenden Ausdehnung des Universums müßte also fortlaufend Materie neu geschaffen werden[11].

Eine Entscheidung zwischen diesen beiden Modellen konnte nur aufgrund zusätzlicher Informationen erfolgen. Diese mußten aus Messungen astronomischer Daten gewonnen werden. Die Chancen für einen Erfolg standen angesichts der großen Unterschiede beider Ansätze nicht schlecht; trotzdem war die Fachwelt von der Eindeutigkeit der mit der Zeit einlaufenden Resultate einigermaßen überrascht. Nicht weniger als drei stark verschiedene Belege wiesen auf die Korrektheit der Urknall-Theorie hin:

1) Eine 1958 vollendete Untersuchung der relativen kosmischen Elementhäufigkeit zeigte, daß der Heliumanteil von Sternen, deren Entstehungszeitpunkt weit in der Vergangenheit liegt, abnormal groß ist[12]. Die einfachste Erklärung dafür ist eine große Menge freien Heliums in der Frühzeit des Kosmos. Dieser wieder konnte am ehesten mit einer heißen und dichten Anfangsphase des Universums in Verbindung gebracht werden; in ihr hätte der heute nur im Inneren der Sterne stattfindende pp-Zyklus weiträumig Protonen zu Heliumkernen verschmolzen. Die Steady-State Kosmologie liefert keine befriedigende Erklärung.

2) Während die Eigenschaften des Steady-State Modells einen zeitunabhängigen Durchschnittswert für die Entfernung der Galaxien untereinander verlangen, geht der evolutionäre Ansatz von einer in der Vergangenheit größeren Galaxiendichte aus. Da wegen der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit die Strahlung weit entfernter Objekte einen Blick in den Frühzustand des Universums gestattet, sind beide Vorhersagen im Prinzip recht einfach zu überprüfen. Praktisch treten aber bei einem solchen Vorhaben erhebliche Schwierigkeiten auf, da die Beobachtung entsprechender Objekte infolge ihrer Lichtschwäche mit starken Ungenauigkeiten behaftet ist. Eine 1960 von M. Ryle initiierte Durchmusterung nahm mehrere Jahre in Anspruch. Ihr Ergebnis ließ eine Bevorzugung des evolutionären Ansatzes zu: In Entfernungen von mehreren Miliarden Lichtjahren (was einer ebenso weiten Reise in die Vergangenheit entspricht) scheint die Dichte von schwachen Radioquellen größer zu sein als in unserer unmittelbaren Nachbarschaft (d.h. heute).

3) Der wohl stichhaltigste Hinweis auf ein evolutionäres Universum ist der Nachweis der sogenannten kosmischen Hintergrundstrahlung[13]. Diese wurde durch Berechnungen, die bereits im Jahr 1948 ausgeführt wurden, von G. Gamov und R. Dicke vorhergesagt. Ihnen zufolge könnte der Strahlungsblitz des Urknalls, sollte er tatsächlich stattgefunden haben, noch heute beobachtet werden; zu beachten sei aber eine aus der Ausdehnungsbewegung des Universums resultierende Rotverschiebung. Eine erste Bestätigung erfolgte 1965 von A. Penzias und R. Wilson im 7.35 cm Bereich. Inzwischen fand ein Nachweis im ganzen Frequenzspektrum zwischen 1 mm und 21 cm statt. Eine genauere Auswertung der Messungen ergab, daß die kosmische Hintergrundstrahlung der Strahlung eines schwarzen Körpers mit der Temperatur 2.7 K entspricht; dies stimmt überraschend gut mit den von Gamov und Dicke gemachten Vorhersagen überein. Darüber hinaus dient die weitgehende Fluktuationsfreiheit der kosmischen Hintergrundstrahlung[14] als Rechtfertigung für die Annahme des kosmologischen Postulats.

## 3.3 Die Vergangenheit des Universums

Die Frage nach der genauen Vergangenheit unseres Universums ist nicht so schnell und einfach zu beantworten, wie es auf den ersten Blick den Anschein hat. Zwar herrschen angesichts der gegenwärtigen Expansionsbewegung unseres Universums und der Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung kaum Zweifel daran, daß der Kosmos in seiner Frühzeit eine dichte und heiße Phase durchgemacht hat; ob er aber wirklich aus einer Singularität hervorging, ist allein durch Beobachtungsdaten nicht zu beweisen oder zu widerlegen.

So stellten 1963 J. Lifschitz und I. Chalatnikov ein kosmologisches Modell vor, das von einem ewig existierenden Universum ausging; dieses sollte kontrahieren, in einen Zustand maximaler (aber nicht unendlicher) Dichte und Temperatur übergehen und dann nach der nun folgenden Expansion im Zyklus von vorne beginnen. Durch die Annahme, beim Übergang von der

[11] Ein Vergleich der beschreibenden Gleichungen der Steady-State Kosmologie mit den bei einer gewöhnlichen relativistische Kosmologie verwendeten Einsteinschen Feldgleichungen läßt einige Differenzen erkennen. Die wohl wichtigste betrifft die Ergänzung des Energie-Impuls-Tensors um ein zusätzliches skalares Feld, das die fortlaufende Generierung neuer Materie im Universum regelt. Von der Geometrie her ist eine Festlegung auf einen flachen DeSitter-Raum durchgeführt (Die Raumzeit selbst ist natürlich gekrümmt, auch wenn der Raum als flach angesehen wird). Auf die Flachheit des Raumes hat der Materieinhalt des Kosmos keinen Einfluß; auch dies ist ein deutlicher Unterschied zur allgemeinen Relativitätstheorie. Eine derartige Vereinbarung erschien notwendig, um das perfekte kosmolgische Postulat vor Verletzungen durch Effekte der Raumkrümmung zu bewahren.

[12] Neuere Untersuchungen weisen auch auf einen leichten Lithiumüberschuß hin. Dieser könnte aber eventuell durch fortlaufende Lithiumerzeugung durch kosmische Strahlung erklärbar sein.

[13] Ob die kosmische Hintergrundstrahlung tatsächlich vom Urknall stammt, ist entgegen einer weit verbreiteten Auffassung nicht ganz sicher. V. Reddish und N. Wickramasinghe weisen darauf hin, daß die Bildung interstellarer $H_2$-Gasnebel aus atomarem Wasserstoff bei ca. 3 K stattfindet. Dieser Temperaturwert bleibt durch einen Regelmechanismus weitgehend konstant: Ein Unterschreiten führt zu einer Verdichtung und damit zu einer Temperaturerhöhung, ein Überschreiten zu einer durch Verflüchtigung des atomaren Wasserstoffs bedingten Dispersion und damit zu einer Temperaturerniedrigung.

[14] Erst in den 90er Jahren entdeckte man im Rahmen des COBE-Projekts geringfügige Schwankungen an der Grenze der gegenwärtigen Meßgenauigkeit.

Kontraktions- zur Expansionsphase würden die Partikel nicht alle miteinander kollidieren, sondern teilweise aneinander vorbeifliegen, vermied man eine Singularität und machte alle Zeitbereiche dieses Universums einer Beschreibung durch die konventionelle Physik zugänglich. Gestützt wurde dieses Modell durch Präzisionsmessungen der Galaxienbewegung; sie ließen erkennen, daß sich die Galaxien nicht immer rein radial von uns fortbewegen, sondern manchmal auch kleine seitliche Geschwindigkeitsanteile besitzen.

Eine Klärung der Situation zeichnete sich erst ab, als R. Penrose 1965 der Nachweis gelang, daß bei Zugrundelegung der allgemeinen Relativitätstheorie jeder Körper, der einem Gravitationskollaps unterliegt, eine Singularität bildet. S. Hawking deckte den Bezug dieses Satzes zur Kosmologie auf: Da die im Beweis verwendete Physik rein klassischer Natur ist, darf man die Aussage des Satzes einer zeitumkehrenden Transformation der Raumzeit unterwerfen; mit der so erhaltenen neuen mathematischen Gesetzmäßigkeit kann dann die Beantwortung der Frage in Angriff genommen werden, ob eine Entstehung unseres heutigen Universums auch ohne anfängliche Singularität möglich ist.

Die praktische Durchführung seines Vorhabens ließ Hawking jedoch rasch einen entscheidenden Mangel erkennen: Alle mit dieser Methode erzielten Ergebnisse würden nur für ewig expandierende Universen gelten. In Zusammenarbeit mit Penrose konnte Hawking aber schließlich diese Lücke schließen und 1970 feststellen, daß unser Universum aus einer Singularität entstanden sein muß. Eine umfassende Darstellung hierzu liefert [HAWK2].

## 3.4 Die Zukunft des Universums

### 3.4.1 Offen oder Geschlossen?

Aus den Beobachtungsdaten ergibt sich nahezu zweifelsfrei, daß unser Universum in seiner Frühzeit nur ein sehr kleines Volumen einnahm. Das Verständnis der zu diesem Zeitpunkt herrschenden Bedingungen reicht jedoch nicht aus, um die Frage nach der Zukunft des Universums auch nur qualitativ zu beantworten. Noch heute ist das Problem ungelöst, ob die Expansion ewig andauert oder irgendwann eine Kontraktion eingeleitet wird.

Im Prinzip gestattet die Messung der durchschnittlichen Materiedichte $\rho$ des Kosmos eine sehr einfache und eindeutige Entscheidung: Ist $\rho$ kleiner oder gleich einer kritischen Dichte $\rho_c$, findet infolge der zu geringen Gravitationskraft eine ewige Expansion statt (offenes Universum); ansonsten ist von einer späteren Kontraktion auszugehen (geschlossenes Universum). Die relativistische Kosmologie gibt für die kritische Dichte einen Wert an, der gegenwärtig etwa drei Protonen pro Kubikmeter entspricht[15]. Schätzungen über die Anzahl der Sterne in einer typischen Galaxie und der durchschnittlichen Anzahl der Galaxien pro Einheitsvolumen liefern $\rho \approx 0.05\rho_c$. Daraus allerdings den sofortigen Schluß eines offenen Universums zu ziehen wäre verfrüht, denn derartige Näherungen berücksichtigen nur die leuchtende Materie.

Einen ersten Hinweis auf die Existenz nichtleuchtender Materie gibt die Beobachtung der Bahn von Sternen innerhalb einer Galaxie: Weit außen liegende Sterne rotieren weit schneller um deren Mittelpunkt, als der zuvor erhaltene Massenwert es erwarten lassen würde. Man kann daraus schließen, daß Galaxien an ihrer Peripherie in der Regel einen Halo nichtleuchtender Materie besitzen. Dessen Masse muß aufgrund quantitativer Überlegungen mindestens ebenso groß sein wie die Masse leuchtender Materie. Auf diese Weise wird eine Gesamtdichte $\rho \geq 0.1\rho_c$ erreicht. Analoge Berechnungen über die Bewegung von Galaxien in Galaxienhaufen erhöhen diesen Wert auf $\rho \geq 0.5\rho_c$. Der dunkle Anteil der Materie kann dabei in Form von Gaswolken, ausgebrannten Sternen oder Schwarzen Löchern vorliegen.

Sollten die noch fehlenden 50% zum Erreichen der kritischen Dichte tatsächlich vorhanden sein, stehen für sie als mögliche Kandidaten ionisierter Wasserstoff und Neutrinos zur Verfügung. Ein Nachweis von großen Mengen ionisierten Wasserstoffs könnte durch Röntgenteleskope im Erdorbit erfolgen. Unklarer ist die Situation bei den Neutrinos. Zwar ergeben Rechnungen, daß gegenwärtig von den in der Frühzeit des Kosmos erzeugten Neutrinos mehrere Hundert pro Kubikzentimeter vorkommen müßten; ihr Beitrag zur Dichte hängt jedoch von ihrer Ruhemasse ab, die nach wie vor unbekannt ist. Experimente zur Bestimmung der Neutrinomasse konnten lediglich eine Obergrenze von etwa 17 eV festlegen.

Auch Versuche, $\rho$ von oben einzugrenzen, verlaufen nicht erfolgreicher. Die diesbezüglich wohl bekannteste Abschätzung beruht auf Überlegungen, denen zufolge unser Universum bei der Annahme $\rho \geq 10\rho_c$ schon vor Erreichen des gegenwärtigen Status wieder anfangen würde zu kollabieren. Das so erhaltene Werteintervall $0.5\rho_c \leq \rho \leq 10\rho_c$ läßt alle Möglichkeiten offen; es bleiben reine Spekulationen.

### 3.4.2 Das offene Universum

Untersuchen wir einmal die zukünftige Entwicklung eines offenen Universums. Abgesehen von dem einen oder anderen lokalen Geschehen fällt als erstes großes globales Ereignis der Verbrauch allen nuklearen Brennmaterials auf. Leuchten $10^{12}$ Jahre nach dem Urknall noch einige rote Zwerge, so verlöschen $10^{14}$ Jahre später auch sie. Alle Vorräte an Wasserstoff und Helium sind nun im In-

[15] Eine Änderung der Materiedichte durch kernphysikalische Prozesse wie etwa Sonnenbrennen ist nicht möglich, da auch Teilchen ohne Ruhemasse wie Photonen gemäß der Einsteinschen Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ ihren Anteil zur Dichte beitragen.

neren der Sterne im wesentlichen zu Eisen[16] umgewandelt worden. In der nächsten Phase verlieren die Sterne ihre Planeten. Verursacht wird dieser Effekt durch nahe Sternbegegnungen. Genauere Berechnungen lassen ein Ende dieser Periode nach etwa $10^{17}$ Jahren erwarten.

Auch der dritte Zustandsübergang des späten Universums wird durch solche Vorübergänge eingeleitet; denn bei genügender Annäherung zweier Sterne aneinander kann der dabei stattfindende Transfer kinetischer Energie einem von ihnen eine Geschwindigkeit verleihen, die ihn zum Verlassen seiner Galaxis befähigt. Der Energieerhaltungssatz impliziert, daß der andere Stern eines solchen Paares einen entsprechenden Energiebetrag verliert. Im Endergebnis verläuft daher seine Bahn dann näher am Kern der Galaxis. Ein ähnlicher Austauschmechanismus verringert den Betrag des in den einzelnen Galaxien gebundenen interstellaren Gases. Eine Reduktion auf etwa 10% seiner ursprünglichen Masse läßt den Rest einer Galaxis schließlich kollabieren und als schwarzes Loch weiterbestehen. Das Ende aller Galaxien ist nach etwa $10^{18}$ bis $10^{19}$ Jahren zu erwarten.

Die letzten in Sternsystemen gebundenen Planeten verlieren durch Gravitationswellen, die sie bei der Bewegung auf ihrer Umlaufbahn aussenden, immer mehr an Energie. Nach spätestens $10^{30}$ Jahren hat sich ihr Bahnradius schließlich so weit reduziert, daß sie in ihr jeweiliges Muttergestirn stürzen.

Alle nun noch wirksamen Effekte sind quantenmechanischer Natur und gehören zum ausgesprochenen Langzeitverhalten der Materie. So erfolgen in jedem nichtentarteten Festkörper mit kristalliner Struktur wie etwa einfachen Gesteinsbrocken Atomverschiebungen durch Tunnelprozesse. Derartige Materiestücke verhalten sich daher als sehr zähe Flüssigkeit und nehmen letztlich nach $10^{65}$ Jahren ideale Kugelgestalt an. Gleichzeitig sind ebenfalls durch Tunnelprozesse verursachte nukleare Fusions- und Zerfallsreaktionen zu beobachten. Diese überführen schließlich alle Atome unter Energieabgabe in $^{56}$Fe, das den stabilsten Kern besitzt. Die Halbwertszeit derartiger Umwandlungsprozesse liegt zwischen $10^{500}$ und $10^{1500}$ Jahren.

Was geschieht aber mit den entarteten, extrem massiven Festkörpern wie den schwarzen Zwergen und Neutronensternen? Ein genügend großer äußerer Druck würde einen schwarzen Zwerg in einen Neutronenstern und diesen in ein Schwarzes Loch überführen. In dem zum Zeitpunkt unserer Betrachtungen extrem ausgedünnten Universum existiert zwar nichts, was einen solchen Druck ausüben könnte, doch sind mittels Tunnelprozessen spontane Kompressionen möglich. In einem typischen Zeitraum von $10^{10^{76}}$ Jahren wäre mit derartigen Umwandlungen zu rechnen. Schwarze Zwerge und Neutronensterne gehören somit nicht zu den langfristig stabilen kosmischen Objekten.

Die mit Hilfe der klassischen Physik beschreibbare Geschichte des offenen Universums endet hier. Alle weiteren und zusätzlichen Vorhersagen beruhen auf tiefliegenden und noch unbewiesenen Vermutungen der subatomaren Teilchenphysik. Einer der postulierten Effekte sagt die Instabilität des Protons voraus. Geht man von der Richtigkeit dieser Annahme aus — eine experimentelle Bestätigung gibt es noch nicht, lediglich die Halbwertszeit des Prozesses konnte mit einem Wert von $10^{32}$ Jahren nach unten begrenzt werden — ist eine signifikante Auswirkung auf die kosmischen Objekte zu erwarten, die nicht in einem schwarzen Loch endeten. Die durch Protonenzerfälle freigesetzte Wärme[17] hält die letzten noch vorhandenen ausgebrannten Sterne auf einer Temperatur zwischen 3 K und 100 K. Für ungebundene Materie gilt entsprechendes, doch tritt infolge der geringen Dichte hier keine Umsetzung der entstehenden Positronen ein: Der durchschnittliche Abstand zweier materieller Teilchen ist durch Ausdünnung mittlerweile größer als 1 Million Lichtjahre geworden. Auf diese Weise bildet sich schließlich ein extrem dünnes Teilchengemisch aus Elektronen, Positronen, Photonen und Neutrinos.

Verläuft die Expansion des Universums langsam genug, d.h. liegt die Dichte der im Universum enthaltenen Materie nur geringfügig oberhalb des kritischen Wertes und überschreitet die Halbwertszeit des Protonenzerfalls die derzeit dafür bestehende Untergrenze von $10^{32}$ Jahren nicht wesentlich, so findet im Laufe der nächsten $10^{70}$ Jahre ein weiteres Ereignis statt[18]: Die freien Elektronen und Positronen beginnen sich paarweise zu binden. Der Abstand zweier Teilchen eines solchen Paares voneinander ist dabei größer als der Durchmesser des heute beobachtbaren Universums. Die von Elektron und Positron ausgeführte Kreisbewegung um ein gemeinsames Zentrum führt zur Freisetzung von Gravitationsstrahlung. Dadurch spiralen sich die Teilchen langsam einwärts und vernichten sich am Ende unter Freisetzung zweier Photonen.

Auch die gebundene Materie unterliegt noch Quanten-Effekten. Gemäß einer von S. Hawking durchgeführten Untersuchung haben Elementarteilchen die Möglichkeit, die Barriere eines Ereignishorizontes von innen

[16] Die Bindungsenergie eines Kernes bezogen pro Nukleon wächst bis zur Massenzahl 56 an und nimmt dann wieder ab. Die bei thermonuklearen Fusionsprozessen gewinnbare Energiedifferenz zwischen der Bindungsenergien der reagierenden und resultierenden Kerne ist daher bis zur Bildung von $^{56}$Fe positiv. Die Synthese schwererer Kerne erfordert umgekehrt Energieaufwand.

[17] Die entstehende Wärme resultiert einerseits aus dem Prozeß selbst, andererseits aus der Paarvernichtung beim Zerfall freigesetzter Positronen mit Elektronen des betreffenden Himmelskörpers.

[18] Andernfalls hat sich zu einem Zeitpunkt, in dem die Positronenbildung durch Protonenzerfall größtenteils abgeschlossen ist, die Materie im Universum infolge der Expansionsbewegung derart verdünnt, daß der nachstehend beschriebene Zustandsübergang durch Elektron-/Positronpaarbindung nicht mehr stattfinden kann.

nach außen zu durchtunneln. Daher dürften Schwarze Löcher in Form von Photonen immer mehr Masse verlieren, bis sie schließlich vollständig verschwinden. Den Berechnungen zufolge dauert dieser Prozeß bei den supermassiven Relikten der Galaxien etwa $10^{100}$ Jahre.

### 3.4.3 Das geschlossene Universum

Die in einem geschlossenen Universum zu erwartenden zukünftigen Ereignisse unterscheiden sich bis unmittelbar vor dem 'Big Crunch' nur wenig von denen des offenen Universums; auf eine nochmalige Schilderung sei deshalb verzichtet. Wir konzentrieren uns besser auf die Effekte, die durch die Kontraktionsbewegung hervorgerufen werden.

In der Nähe der finalen Singularität beginnen die nun infolge Blauverschiebung sehr energiereichen Photonen alle bereits erkalteten kosmischen Objekte erneut anzuheizen. Dieser Prozeß greift wenig später auf noch aktive Sonnen über. Eine fortlaufend höher werdende Temperatur verwandelt den gesamten materiellen Inhalt des Universums in ein Partikelgas. Die vorhandenen Schwarzen Löcher sammeln dieses Material rasch ein. Am Ende enthält das Universum nur noch schwarze Löcher, die ineinander kollabieren, bis schließlich nur noch ein einziges übrig bleibt. Was weiter geschieht, ist vorläufig noch völlig ungeklärt; trotz aller Fortschritte der modernen Physik existieren darüber nicht einmal vage Vorstellungen.

Die Verletzung des Energieerhaltungssatzes zählt zu den wohl unangenehmsten Eigenschaften des geschlossenen Universums. Man betrachte dazu das Verhalten eines zum Zeitpunkt $t$ entstandenen Photons. Während der Expansionsphase reduziert sich seine Energie infolge der Rotverschiebung bis auf einen Minimalwert. Dieser wird erreicht, sobald der Kosmos maximale Ausdehnung besitzt. Wegen der dann einsetzenden Kontraktion gewinnt das Photon wieder an Energie. Sobald das Volumen des Universums den Wert unterschreitet, den es bei der Entstehung des betrachteten Photons besaß, erhält man eine Verletzung des Postulats der Energieerhaltung[19].

## 4 Schluß

Die Urknallhypothese im Rahmen eines isotropen und homogenen Universums ist ein sehr plausibles Modell. Alle Experimente und Beobachtungsdaten sind bisher mit dieser Kosmologie oder der ihr zugrunde liegenden allgemeinen Relativitätstheorie konsistent. Darüber hinaus können nur sie und ihre Varianten die Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung und den hohen Heliumgehalt des frühen Universums erklären. Dies alles führte schließlich zu einer detaillierten Ausarbeitung der Urknallhypothese. Die so entstandene Theorie gilt noch heute als das Standardmodell der Kosmologie. Ihre genaue Darlegung ist Thema der zweiten Folge dieser Artikelserie, die Ende 1993 zu erwarten ist.

## A Glossar

**Schwache Kernkraft:** Die zweitschwächste der Grundkräfte mit sehr kurzer Reichweite. Sie wirkt auf alle Materieteilchen mit Ausnahme der kräftetragenden. Beispiele für Prozesse, die durch die schwache Kernkraft verursacht werden, sind der Betazerfall und die Neutrinostreuung.

**Starke Kernkraft:** Die Grundkraft mit sowohl kürzester Reichweite als auch größter Stärke. Sie hält die Quarks in den Nukleonen und die Nukleonen in den Quarks zusammen.

**Potential:** Eine von bestimmten physikalischen Größen wie den Ortskoordinaten abhängige Funktion, aus der sich durch partielle Differentiation nach diesen andere physikalische Größen wie Kräfte bestimmen lassen.

**Vakuum:** Ein materie- und feldfreier Raum.

**Schwarzer Körper:** Ein Körper, der die gesammte auftreffende elektromagnetische Strahlung absorbiert, heißt schwarz. Schwarze Körper besitzen bei fester Temperatur ein idealisiertes Emissionsvermögen.

**Singularität:** Punkt der Raumzeit mit abnormalem mathematischen Verhalten.

**Photonen:** Lichtquanten, elementare Elemente der elektromagnetischen Strahlung. Photonen sind ladungsfrei und besitzen keine Ruhemasse.

**Protonen:** Zu den Nukleonen gehörende positiv geladene Teilchen, die den Kern des Wasserstoffatoms bilden.

**Neutronen:** Instabile ungeladene Teilchen, die wie die Protonen zu den Kernbausteinen und damit zu den Nukleonen gehören.

**Elektronen:** Zu den Leptonen gehörende negativ geladene Elementarteilchen, die als Bestandteil der Atomhülle bekannt sind.

**Positronen:** Antiteilchen des Elektrons.

**Neutrinos:** Extrem leichte elementare Materieteilchen, die nur der schwachen Kraft und der Gravitation unterliegen.

**Euklidischer Raum:** Anschaulich flacher geometrischer Raum.

**Lorentztransformation:** Umrechnungsverfahren für Orts- und Zeitkoordinaten zweier gleichförmig zueinander bewegter Bezugssysteme.

[19] Jeder Erhaltungssatz ist das Resultat einer Symmetrie der Natur. Während sich der Impulserhaltungssatz aus der Translationsinvarianz des Raumes ergibt, folgt die Energieerhaltung aus der Translationsinvarianz der Zeit (Noethersche Theoreme). Da in einem nichtstatischen Universum aber offensichtlich keine Translationsinvarianz hinsichtlich der Zeit herrscht, braucht die Energie nicht erhalten zu sein.

## Literatur

**Allgemeines:**

[BAR] J.D. Barrow, J. Silk: *The Structure of the Early Universe*, Scientific American 1980, Vol. 4

[BER] M. Berry: *Kosmologie und Gravitation*, Teubner 1990

[DIC] D.A. Dicus, J.R. Letaw, D.C. Teplitz, V.L. Teplitz: *The Future of the Universe*, Scientific American 1983 Vol. 3

[LEX] *Fachlexikon ABC Physik*, Verlag Harri Deutsch

[HAWK1] S. Hawking: *Eine kurze Geschichte der Zeit*, Rowohlt-Verlag

[HER1] J. Herrmann: *dtv-Atlas zur Astronomie*, Deutscher Taschenbuch Verlag

[HER2] J. Herrmann: *Großes Lexikon der Astronomie*, Mosaik-Verlag

[OHA] H.C. Ohanian: *Gravitation and Spacetime*, Norton 1976

[SCI] D.W. Sciama: *Modern Cosmology*, Cambridge University Press 1971

[UNS] A. Unsöld, B. Boschek: *Der neue Kosmos*, Springer 1985

[WEI1] S. Weinberg: *Die ersten drei Minuten*, Piper 1977

[WIL] C. Will: *Gravitation Theory*, Scientific American 1974 Vol. 11

**Fachliteratur:**

[BAL] R. Balian: *Cosmologie Physique – Physical Cosmology*, Les Houches Session XXXII, 2-27 Juillet 1979, North Holland 1980

[HAWK2] S. Hawking, G. Ellis: *The Large Scale Structure of Spacetime*, Cambridge University Press 1973

[ISH] J. Isham: *An introduction to mathematical cosmology*, Cambridge University Press 1992

[MIS] C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler: *Gravitation*, Freeman 1973

[NAR] J.V. Narlikar: *Introduction to Cosmology*, Jones and Bartlett 1983

[NOR] J.D. North: *The Measure of the Universe*, Oxford University Press 1965

[WEI2] S. Weinberg: *Gravitation and Cosmology*, Wiley 1972

[ZEL] Y.B. Zeldovich, I.D. Novikov: *Relativistic Astrophysics, Vol. 2: The Structure and Evolution of the Universe*, The University of Chicago Press 1983

### Letzte Meldung: Supernova in NGC 3031 (M81)

Wie in IAUC 5731 berichtet, entdeckte F. Garcia, Lugo, Spanien am 28. März eine Supernova in der Spiralgalaxie NGC 3031. Die offizielle Bezeiochnung dieser Supernova lautet SN1993j, sie befindet sich etwa 45” W und 160” S des Kerns der Galaxie. Die Koordinaten für die Epoche 1950 lauten

$$9^{\mathrm{h}}51^{\mathrm{m}}19\overset{\mathrm{s}}{.}27$$
$$+69^\circ 15' 25\overset{\prime\prime}{.}7$$

Die bereits aufgenommenen Spektren sind blau und erstaunlich linienarm, was auf eine Typ II SN hindeutet. Die einzigen klaren Absorptionslinien sind Na ID und CaII H+K, die von der interstellaren Absorption herrühren. Daneben sind sehr schwache $H_\alpha$ und He I Strukturen erkennbar.
Bisherige Helligkeitsschätzungen zeigen folgenden Verlauf:

| Datum | | Mag |
|---|---|---|
| Mar | 26.9 | 14.0 |
| Mar | 28.86 | 12.0 |
| Mar | 29.1 | 11.8 |
| Mar | 29.88 | 11.0 |
| Mar | 30.25 | 10.2 |

Eine genauere Diskussion der Supernova, sowie einige Lichtkurven folgen in der nächsten Ausgabe der Mitteilungsblätter.

# RR-Lyrae-Sterne als Entfernungsindikatoren

Andi Kronawitter

Die Pulsationsveränderlichen Sterne vom Typ RR-Lyrae liegen in einem sehr kleinen Bereich im Hertzsprung-Russell-Diagramm, haben also alle etwa die gleiche Leuchtkraft. Gelingt es nun, die absolute Helligkeit dieser Sterne zu bestimmen, so kann man mit der gemessenen scheinbaren Helligkeit und einer Abschätzung für die interstellare Absorption deren Entfernung relativ präzise bestimmen. Diese Methode findet in der jüngsten Vergangenheit Anwendung bei der Entfernungsbestimmung der Galaxien in der lokalen Gruppe. Vor allem mit den neuen Großteleskopen und dem Hubble Space Teleskop (HST) und längeren Beobachtungsperioden wird eine weitere Präzisierung erwartet. Die Bedeutung der Entfernungsbestimmung in unserer „näheren Nachbarschaft“ liegt vor allem in der Kalibrierung der Entfernungsindikatoren für größere Entfernungen und ist deshalb auch von entscheidender Bedeutung für kosmologische Fragestellungen.

## 1 Einführung

Die RR-Lyrae Sterne sind veränderliche Sterne, wie man bereits am Namen erkennen kann. Veränderliche werden gewöhnlich mit einem Großbuchstaben von R bis Z und dem Genetiv des Sternbildes, zu dem sie gehören, bezeichnet. Meistens gibt es allerdings mehr Veränderliche in einem Sternbild, weswegen man zunächst die Bezeichnungen RR, RS, ..., ZZ, und dann AA, AB, ... bis QZ verwendet. Das sind insgesamt 334 verschiedene Kombinationen. Alle weiteren Veränderlichen eines Sternbildes benennt man einfacher mit V335 (Name des Sternbildes), z.B. V394 Canis Venaticorum.

Die veränderlichen Sterne werden in zwei Hauptgruppen unterteilt. Zum einen gibt es die bedeckungsveränderlichen Sterne, also Doppelsternsysteme, die sich gegenseitig bedecken und so eine Veränderlichkeit vortäuschen. Die zweite Gruppe sind die physischen Veränderlichen. Diese Gruppe ist wiederum in drei Unterklassen unterteilt:

1. Pulsationsveränderliche,
2. eruptive Veränderliche und
3. Flecken- und Flaresterne.

Zu den eruptiven Veränderlichen gehören die Zwergnovae und Novae, beides enge, sogenannte kataklysmische Doppelsterne, bei welchen Material von einer Komponente auf die andere überströmt und dort mehr oder weniger explosiv reagiert. Auch die Supernovae gehören zu dieser Klasse. Fleckensterne zeigen den Sonnenflecken ähnliche Erscheinungen, allerdings in weitaus dramatischeren Ausmaßen. Beide Unterklassen interessieren uns im Folgenden überhaupt nicht.

RR-Lyr Sterne sind Pulsationsveränderliche. Es sind schon sehr weit entwickelte Sterne, die den Wasserstoffvorrat im Kernbereich bereits verbraucht haben. Im Kern des Sterns läuft in dieser Phase die Fusion von Helium zu Kohlenstoff (und Sauerstoff), während es in einer weiter außen liegenden Schicht noch Wasserstoff-zu-Helium Fusion gibt. Der Pulsationsmechanismus ist der auch bei den Cepheiden wirkende $\kappa$-Mechanismus. Mit $\kappa$ bezeichnet man in der Astrophysik den Absorptionskoeffizienten. Das ist eine Größe, die angibt, wieviel Strahlung in einem bestimmten Material steckenbleibt. Jeder Stoff hat seinen spezifischen Absorptionskoeffizienten.

*Abb. 1: Schnitt durch einen Pulsationsveränderlichen; die zweite Schicht von außen gesehen ist für die Pulsation verantwortlich.*

Bei den RR-Lyr funktioniert das folgendermaßen: Kleine Temperaturschwankungen verursachen kleine Änderungen der Auftriebsbewegung. Normalerweise dehnt sich heißes Gas aus, kühlt dabei ab, zieht sich wieder zusammen und gibt Ruhe. Nicht so bei den RR-Lyr. Diese haben außen die sogenannte Heliumionisationsschicht. Innerhalb dieser Schicht ist das Helium ionisiert (es hat ein Elektron aus seiner Hülle abgegeben), außerhalb ist es neutral (es hat alles beisammen). Um Helium zu ionisieren, muß man Energie aufwenden, die wieder frei wird, wenn das Helium rekombiniert, also das Elektron wieder zurückbekommt.

Eine kleine Störung unterhalb der Heliumionisationsschicht bewirkt nun eine Ausdehnung (Abb. 1). Dadurch wird ein Teil des ionisierten Heliums in eine kühlere, weiter außen liegende Schicht angehoben und kühlt dabei etwas ab (vor allem, weil es Arbeit gegen die Anziehungskraft verrichtet). Damit kommt das Material aber in die Rekombinationszone, also in die Schicht, in der die Temperatur nicht mehr so hoch ist und das Helium rekombiniert, das heißt ein Elektron einfängt. Dabei gewinnt es Energie, die es nicht anders loswerden kann als dadurch, daß es weiter aufsteigt. Gleichzeitig wird das Material opak (das bedeutet undurchsichtig), denn der Absorptionskoeffizient von neutralem Helium ist größer als der des ionisierten.

Anschaulich kann man sich die Strahlung aus dem Sterninneren in Form von kleinen Geschossen (Photonen) vorstellen, die durch einen mit Kugeln gefüllten Raum fliegen. Die Durchmesser der Kugeln sind jedoch auf der Innenseite des Raumes kleiner als auf der Außenseite. Die Geschosse werden daher vor allem auf die großen Kugeln treffen und diese weiter nach außen schieben. Für unser Helium bedeutet das, daß es über das Ziel hinausschießt, es wird weiter nach außen transportiert, als es eigentlich sollte (Abb. 2).

Rückwärts funktioniert es auf die gleich Weise: Das Helium strahlt seinen Überschuß an Energie ab, fällt zurück (in Richtung Stern), kommt in die Heliumionisationszone, streift ein Elektron ab, verkleinert damit seinen Wechselwirkungsquerschnitt (die Kugel verringert ihren Durchmesser) und plumst weiter hinein als es gestartet ist.

Wegen des Wechsels der Ionisationsstufe schaukelt sich also eine anfänglich kleine Störung auf. Aufgrund verschiedener Dämpfungsmechanismen steigert sich die Oszillation nicht bis ins „Unendliche“ (unendlich würde bedeuten, daß die äußere Schicht abgeblasen wird), sondern schwingt sich ein. Die Perioden der RR-Lyr sind über lange Zeiten äußerst genau; man könnte sie etwa mit der Genauigkeit einer Quarzuhr vergleichen.

### 1.1 Allgemeine Eigenschaften

Man findet die RR-Lyr Sterne im HRD (Hertzsprung-Russell-Diagramm) etwas oberhalb der Hauptreihe (Abb. 3). Sie sind zumeist vom Spektraltyp A, in seltenen Fällen auch vom Typ F. Das heißt, ihre Außentemperatur beträgt ungefähr 10000 K. Während der Pulsation verändern sich sowohl der Spektraltyp als auch die Temperatur und – natürlich – der Radius.

Der Spektraltyp ist davon abhängig, welche Fraunhoferlinien man zur Klassifikation heranzieht: Verwendet man die Linien des Wasserstoffs, so erhält man in der Regel einen späteren Spektraltyp als bei der Verwendung von Calcium-Linien (späterer Spektraltyp bedeutet grob niedrigere Atmosphärentemperatur). Das hat seinen Grund offensichtlich darin, daß die Ca-Linien aus tieferen und damit heißeren Schichten stammen, was auch durch Messungen der Radialgeschwindigkeitskurve bestätigt wird.

Nimmt man zum Beispiel gerade dann ein Spektrum des Sterns auf, wenn dieser sich ausdehnt, so sind die Absorptionslinien blauverschoben; wenn sich der Stern zusammenzieht, beobachtet man dagegen eine Rotverschiebung. Dabei fällt wiederum auf, daß die Wasserstofflinien eine stärkere Verschiebung erleiden als die Ca-Linien. Da wahrscheinlich die äußersten Atmosphärenschichten die größte Schwingungsamplitude haben, müssen die Ca-Linien eben weiter im Inneren entstehen.

Die Perioden der RR-Lyr Sterne liegen im Bereich von $0.05 \cdots 1.2$ Tagen, und sie werden, wie bereits erwähnt, über lange Zeite sehr exakt eingehalten. Im allgemeinen mißt man die Intensität der Strahlung photoelektrisch und trägt die so gewonnenen Meßwerte über der Zeit an. Diese *Lichtkurven* sind in Form und Phase konstant. Es ist kein Fall bekannt, in dem plötzliche Änderungen der Lichtkurve aufgetreten wären. Wenn man allerdings

*Abb. 3: Wieder einmal ein HRD; eingetragen sind die wichtigsten Typen von Veränderlichen. Die Pulsationsveränderlichen RR-Lyr befinden sich im unteren Bereich des Instabiliätsstreifens. Oberhalb liegen die massereicheren und helleren Cepheiden.*

*Abb. 2: Photonen stoßen wegen des größeren Wirkungsquerschnitts häufiger mit neutralen Heliumatomen als mit ionisierten zusammen.*

sehr genau mißt, findet man bei manchen Exemplaren noch eine weitere Modulation, die häufig ein Vielfaches der Grundschwingung ist und nur eine sehr kleine Amplitude hat. Dieses Phänomen nennt man den *Blazko-Effekt*.

Die RR-Lyr Sterne sind sehr alte Sterne und gehören der Population II an. Die Pop II Sterne findet man vor allem im galaktischen Zentrum und im Halo um die Milchstraße herum. Im Gegensatz dazu bezeichnet man die Sterne in der Scheibe, vor allem die in den Spiralarmen als Pop I. Dies ist allerdings nur eine sehr grobe Einteilung, die im Laufe der Zeit noch stark unterteilt wurde, dabei jedoch leider sehr unübersichtlich geworden ist.

Früher unterteilte man die RR-Lyr Sterne in drei Untergruppen mit den Bezeichnungen RRa, RRb und RRc. Heute faßt man die Gruppen a und b zu ab zusammen, da sich die Unterscheidung als rein willkürlich erwiesen hat. Abbildung 4 zeigt die verschiedenen *Bailey-Typen* in einem Amplituden-Perioden-Diagramm. In Abbildung 5 werden die unterschiedlichen Lichtkurven gezeigt. In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Unterschiede der verschiedenen Typen zusammengestellt.

## 2 Bestimmung der absoluten Helligkeit

Es wurde bereits erwähnt, daß die absolute Helligkeit aller RR-Lyr Sterne fast gleich ist. Diesen Umstand wollen wir uns für die Entfernungsbestimmung zunutze machen. Dazu verwenden wir den *Entfernungsmodul*

$$m_V - M_V = -5 + 5 \cdot \log r + A_V \,.$$

Dabei bezeichnen $m_V$ die scheinbare visuelle Helligkeit (so hell erscheint ein Stern durch ein Filter, dessen Durchlässigkeit der des Auges gleicht), $M_V$ die entsprechende absolute Helligkeit (so hell wäre der Stern, wenn er in einer Entfernung von 10pc = 32.6 Lichtjahren (ly) stünde), $r$ die Entfernung in Parsec und $A_V$ die interstellare Extinktion. Durch Gas- und Staubwolken wird ein Teil des Sternlichtes auf dem Weg zum Beobachter vernichtet; dieser Effekt wird als Extinktion bezeichnet. Einen guten Wert für die Extinktion zu finden ist eines der größten Probleme bei allen Methoden der Entfernungsbestimmung, die sich auf die Messung von Helligkeiten stützen.

Unser Problem ist es nun zuallererst, die absolute Helligkeit zu bestimmen. Dummerweise gibt es in unserer näheren Umgebung keinen Vertreter dieser Gruppe. Nähere Umgebung bedeutet hier eine Entfernung bis zu maximal 100pc = 326ly, denn so weit kann man Entfernungen mit großen Teleskopen mit Hilfe der trigonometrischen (jährlichen) Parallaxen bestimmen. Kurz und gut, wir müssen uns eben einen anderen Weg suchen. Bei den klassischen Cepheiden sucht man sich Vertreter in offenen Sternhaufen, deren Entfernung man mit Hilfe der sogenannten Haufenparallxen sehr gut bestimmen kann, und bestimmt so deren absolute Helligkeit. RR-Lyr Sterne aber sind alte Sterne, und alte Sterne findet man nicht in offenen Haufen. So geht es also auch nicht.

Eine andere Möglichkeit findet sich in der Methode der statistischen Parallaxen. Diese ist aber nicht ganz einfach, weshalb sie hier nur ganz kurz umrissen werden soll (dieser Absatz kann ohne Schaden übersprungen werden). Man mißt von einer möglichst großen Menge von RR-Lyrae Sternen unserer Galaxis i) die scheinbaren Helligkeiten $m$, ii) die Radialgeschwindigkeiten $v_r$ über den Dopplereffekt und iii) die Eigenbewegung $\mu$ ( dazu benötigt man sehr viel Zeit, mehrere Jahr(zehnt)e).

| **Typ** | **a** | **b** | **c** |
|---|---|---|---|
| **Form der Lichtkurve** | stark asymmetrisch<br><br>steiler Anstieg<br>flacher Abfall<br>lange im Minimum | asymmetrisch | symmetrisch;<br>oft fast<br>sinusförmig |
| **Amplitude** | bis zu $1,^m 6$ | etwa $0,^m 5$ | $< 0,^m 5$ |
| **Perioden** | $\simeq 0,5d$ | $\simeq 0,7d$ | $\simeq 0,3d$ |

*Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen Typen von RR-Lyr Sternen und ihre Charakteristika.*

*Abb. 5: Photografischen Amplituden von RR-Lyr als Funktion der Periode.*

*Abb. 4: Lichtkurven der Bailey-Typen a, b, c*

Nun nimmt man an, daß die Pekuliargeschwindigkeiten der Sterne des Samples gaußverteilt sind um den Erwartungswert $\bar{v}$ mit einer Streuung $\sigma_v$, nachdem man die Pekuliarbewegung des Sonnensystems abgezogen hat. Jetzt fehlen nur noch die vollständigen Raumgeschwindigkeiten der Sterne: Bislang kennen wir zwar die Radialgeschwindigkeiten, nicht aber die Tangentialgeschwindigkeiten, denn direkt meßbar sind nur die Eigenbewegungen, die über $v_t = \mu \cdot r$ mit der Entfernung $r$ verknüpft sind, die uns aber gerade unbekannt ist. Man sucht sich einen Schätzwert für die (mittlere) Helligkeit $\bar{M}_{RR-Lyr}$, errechnet mit diesem Wert die Entfernung jedes Sterns des Samples (mit einer Abschätzung für die Extinktion) und erhält damit die Geschwindigkeit jedes Sterns. Diesen Vorgang wiederholt man solange, bis die Geschwindigkeitsdispersion $\sigma_v$ minimal wird.

Ergebnis: die mittlere absolute Helligkeit der Sterne unserer ausgewählten Menge und die Entfernungen dieser Sterne. Damit können wir jetzt „weitersehen“ und uns an die Bestimmung der Entfernungen von Objekten außerhalb der Milchstraße machen. Die Werte jüngerer Studien:

- Hawley et al. (1986): $\langle M_V \rangle = (0,76 \pm 0,14)^m$
- Strugnell et al. (1986): $\langle M_V \rangle = (0,75 \pm 0,2)^m$
- Barnes und Hawley (1986): $\langle M_V \rangle = (0,68 \pm 0,14)^m$

Diese Untersuchungen verwendeten im Wesentlichen die gleichen Sternmengen; die hauptsächlichen Unterschiede liegen in den statistischen Verfahren zur Bestimmung der Helligkeiten (Abb. 6) und in der Abschätzung für die interstellare Extinktion.

Nebenher sei noch erwähnt, daß zur Bestimmung der absoluten Helligkeiten auch noch die im folgenden benannten Methoden angewendet werden: Baade-Wesselink, Hauptreihenfit von Kugelhaufen und Sternstromparallaxen.

*Abb. 6: Mit verschiedenen Mittelungsmethoden gelangt man leider zu signifikant verschiedenen Werten für $\langle m \rangle$.*

## 3 Anwendungen in der Lokalen Gruppe

Im Prinzip verwenden alle Gruppen die gleiche Vorgehensweise. Man beginnt damit, immer dasselbe Sternfeld möglichst oft ohne Unterbrechung aufzunehmen, natürlich so weit als möglich unter gleichbleibenden Bedingungen (dummerweise geht jeden Tag die Sonne auf; die stört meistens schon ein bißchen). Die Aufnahmen werden mit einem breitbandigen Filter gemacht, wobei als Empfänger heute nur noch CCD-Kameras verwendet werden. Daraufhin werden die Daten mit Hilfe von Computern reduziert, das heißt schlechte Aufnahmen (CCD-Bilder nennt man zumeist „frames“) werden aussortiert, Bildfehler gekennzeichnet, frames aufintegriert (um längere Belichtungszeiten zu erhalten und Fehler zu minimieren) usw.

Jetzt kann man sich auf die Suche nach Veränderlichen machen, was heute meistens softwaremäßig geht (auch ein Grund, warum Astronomen nie geügend Rechenzeit haben). In der Regel gibt der Rechner eine Liste mit Veränderlichen heraus. Aus dieser Liste müssen nun noch die RR-Lyr-Kandidaten herausgesucht werden. Leider gibt es einige Veränderliche, die den RR-Lyr ähneln, zum Beispiel die Zwergcepheiden und die $\delta$-Scuti-Sterne.

Als nächstes muß für jeden RR-Lyr-Stern eine Lichtkurve erstellt werden. Das ist aufgrund der wenigen Meßpunkte für gewöhnlich schwieriger als man sich das vorstellt (Abb. 7), aber Beobachtungszeit ist teuer (eine Nacht $\simeq$ 100 000 Mark) und andere Leute wollen die Großteleskope ja auch einmal benutzen. Mit den Lichtkurven in der Tasche kann man darangehen, die mittleren scheinbaren Helligkeiten zu bestimmen und gegebenenfalls die Sterne nach den Baileys-Gruppen zu klassifizieren. Untersucht man sehr weit entfernte Galaxien (weiter als M31 = Andromeda), ist die Wahrscheinlichkeit, andere Typen außer a zu finden sehr klein, da hier die Modulationen des Sterns kaum noch über dem elektrischen Rauschen der CCD's liegen.

Zu guter Letzt braucht man noch eine vernünftige Abschätzung für die interstellare Extinktion, um die Entfernung mittels des Entfernungsmoduls ausrechnen zu können. Die Ergebnisse der letzten Untersuchungen an Galaxien der Lokale Gruppe finden sich in Tabelle 2.

Bemerkungen: Pritchet und van den Bergh verwandten ein B-Filter (also $x = B$) für ihre Aufnahmen, Saha und Hoessel ein sogenanntes g-Filter ($x = g$). Letzteres hat den Vorteil, daß in diesem Wellenlängenbereich gerade das Intensitätsmaximum der RR-Lyr liegt. „n“gibt die Zahl der RR-Lyr Sterne in dem untersuchten Feld an. Die Angaben der Helligkeiten, der Extinktion $A_x$ und des Entfernungsmoduls verstehen sich in Größenklassen (magnitudines), die Entfernungen $r$ in *kpc*. Die Fehlerangaben bei den Helligkeiten wurden weggelassen, da sie nicht in allen Quellen angegeben sind und zudem nicht vergleichbar sind.

## 4 Probleme und Vorteile

Schon bei der Bestimmung der absoluten Helligkeit tauchen die ersten Probleme auf: die Bildung eines Mittelwertes für die scheinbaren Helligkeit ist nicht unumstritten. Desweiteren tritt auch hier die Extinktion (Verfärbung) auf und kann nicht vollständig eliminiert werden. Eine weitere Schwierigkeit ist das Fehlen einer Beziehung zwischen Metallizität und Periode, die nach der Theorie eigentlich zu erwarten wäre.

Bei der Anwendung hat man wiederum das Problem der mittleren scheinbaren Helligkeit, hier aufgrund der

*Abb. 7: Es ist eine Kunst für sich, aus wenigen Meßpunkten ein vernünftige Lichtkurve zu gewinnen. Oft muß man schon wissen, wie sie auszusehen haben. In manchen Fällen kann man allerdings keine eindeutige Zuordnung zu einem Typ vornehmen.*

| Autoren | Objekt | n | $\langle \mathbf{m}_x \rangle$ | $A_x$ | $m_x - M_x$ | r |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pritchet, van den Bergh (1987) | Halo von M31 | 29 | $25,68$ | $0,31$ | $24,34 \pm 0,15$ | $738 \pm 51$ |
| Saha, Hoessel (1990-92) | NGC 185 | 151 | 25.20 | 0.68 | $23.79 \pm 0.25$ | $573 \pm 70$ |
| | NGC 147 | 32 | 25.25 | 0.60 | $23.92 \pm 0.25$ | $608 \pm 74$ |
| | NGC205 | 30 | 25.60 | 0.12 | $24.65 \pm 0.25$ | $850 \pm 104$ |
| | IC 1613 | 15 | 24.90 | 0.07 | $24.10 \pm 0.27$ | $660 \pm 87$ |

*Tab. 2: Ergebnisse jüngster Untersuchungen an Galaxien der Lokalen Gruppe.*

unvollständigen Lichtkurven. Ein zusätzliches Problem ist die „Verseuchung“ mit anderen Veränderlichen. Zuletzt ist noch zu erwähnen, daß diese Untersuchungen hart an der Meßgrenze angesiedelt sind. Aus diesem Grund sind Fehlerangaben von weniger als 10% schon mit etwas Vorsicht zu geniessen. In der Regel liegen die Fehler bei 10% und darüber, je nachdem, wie schwach die untersuchten Objekte sind.

Was kann man besser machen? Mit größeren Teleskopen und dem (in diesem oder im nächsten Jahr reparierten) Hubble Space Telescope längere Beobachtungsreihen durchführen, um bessere Lichtkurven zu gewinnen. CCD's mit höherer Auflösung und besserer Quantenausbeute verwenden und sich bei der Bestimmung der Verfärbung mehr Mühe geben. Denn an sich hat diese Methode ihre Vorzüge: man kann ohne Zwischenstufen (wie die nicht sehr genauen Haufenparallaxen bei den Cepheiden) Entfernungen innerhalb der Lokalen Gruppe mit verhältnismäßig kleinem Fehler bestimmen. Und – nicht zu vergessen – die Perioden von RR-Lyr Sternen sind sehr kurz (Cepheiden haben Perioden von etwa 5 bis 50 Tagen; hier stört häufig der Mond genaue Studien), weswegen man nur verhältnismäßig kurze Beobachtungszeiten beantragen muß.

## Literatur


**Lehrbücher:**

[1] J.S. Glasby; *Variable Stars*

[2] Strohmeier; *Variable Stars*

**Statistische Parallaxen:**

[3] P. Strugnell, N. Reid, C.A. Murray; *The luminosity and kinematics of RR-Lyr in the solar neighbourhood*

[4] S. Hawley, W. Jeffreys, T. Barnes III; *Absolute magnitudes and kinematic properties of RR-Lyr stars*, ApJ **302** 626-631 (3/86)

[5] T. Barnes, S. Hawley; *On the absolute magnitudes of RR-Lyr stars*, ApJ **307** L9-L13 (8/86)

**Entfernungsbestimmungen:**

[6] C. Pritchet, S. van den Bergh; *Observations of RR-Lyr stars in the Halo of M31*, ApJ **316** 517-529 (3/86)

[7] A. Saha, J. Hoessel; *RR-Lyr stars in local group galaxies* (Serie), AJ **99** 1 (1/90), **100** 1 (7/90), **103** 1 (1/92), **104** 3 (9/92)

# Kurzmitteilungen

## Beteigeuze wird schwächer

Aufmerksame Betrachter des winterlichen Abendhimmels konnten in den letzten Wochen etwas seltsames beobachten. Beteigeuze, der rötliche Stern, der die nordöstliche Schulter des Sternbilds Orion markiert, war in letzter Zeit deutlich lichtschwächer als gewöhnlich.

Der Stern ist als Veränderlicher bekannt und hat sich seit Januar auf etwa zwei Drittel seiner regulären Helligkeit von $0^{\mathrm{m}}\!.5$ abgeschwächt. Ungefähr 425 Lichtjahre entfernt kann Beteigeuzes Helligkeit zeitweise um bis zu einer ganzen Magnitude schwanken. Die letzte derartige Veränderung dieses Sterns liegt mehr als vier Jahre zurück.

## Jupiter bald ein Zwergstern

Eine Gruppe von Theoretikern von der Universität L'Austin/Texas hat in einem Preprint (Apr 93) nachgewiesen, daß es sich bei Jupiter doch um einen (noch) verhinderten Stern und damit um das Sonnensystem als Fast-Doppelsternsystem handelt. Schon seit langem ist die im Vergleich zu den anderen Planeten zu hohe Abstrahlung des Riesenplaneten bekannt (auch die Erde strahlt mehr Energie ab als sie von der Sonne empfängt; diese Energie stammt aus dem natürlichen radioaktiven Zerfall schwerer Elemente im Erdinneren). Die jovianischen Planeten bestehen vor allem aus den leichten Elementen H, He und den leichten Metallen (in der Astrophysik werden alle Elemente schwerer als Helium Metalle genannt) C, N und O. Im Inneren liegt vor allem ein Wasserstoff-Helium-Gemisch vor, ähnlich wie auch in der Sonne. Bekanntlich hat der größte Planet gerade nicht genug Masse abbekommen, um (nach den traditionellen Sternentwicklungsrechnungen) das Wasserstoffbrennen im Kern zünden zu können. Die ersten Auswertungen der Daten der Geigerzähler der Voyager-Sonden lassen allerdings darauf schließen, daß die bisherigen Annahmen offensichtlich nicht ganz zutreffen. So wurden $\gamma$-Photonen nachgewiesen, die offensichtlich aus Fusionsprozessen stammen.

Zudem bekommt Jupiter „Nachschub" an Masse. Simulationsrechnung zeigen, daß sich der Jupitermond Io auf Kollisionskurs mit dem - ebenfalls bei den Voyagermissionen entdeckten - kleinen Satelliten 23 (man konnte sich noch auf keinen Namen einigen) befindet. Die bei dem Zusammenstoß freiwerdende Energie reicht aus, um beide Satelliten zu zerstören. Die Bruchstücke regnen in der Folge im Schwerefeld des Riesen auf die Oberfläche herab. Diese Massenzunahme reicht nach den Berechnungen der Texaner aus, um Temperatur und Dichte auf die für die Fusionszündung notwendige Größe zu treiben. Damit wird der Jupiter zu einem schwachen Sternchen vom Spektraltyp M9. Die Bewohner der Erde wird die zusätzliche Einstrahlung nicht sonderlich stören, dazu ist die „Leistung" des neuen Sternchens im Verhältnis zu seiner Entfernung zu gering. Wer die Bewohner der Erde am Tag des Aufleuchtens sein werden, ist wohl der interessanteste Aspekt: Das Ereignis soll in 204 Jahren über die Bühne gehen: Am 1. April 2197.

## Seltener Ausbruch von CY UMa

Zum ersten Mal seit dem 19. Dezember 1991 wurde wieder ein Ausbruch des Zwergnova-Sterns CY UMa (SU UMa-Typ) registriert. Allerdings könnten im letzten Jahr mehrere Ausbrüche dieses Sterns verpaßt worden sein. Die nachfolgende Tabelle gibt die Helligkeitsschätzungen der Zwergnova wieder, die von Patrick Schmeer übermittelt wurden.

| Datum | | Mag |
|---|---|---|
| Feb | 23.001 | 13.2 |
| Feb | 24.072 | 12.2 |
| Feb | 24.845 | 12.3 |
| Feb | 25.881 | 12.5 |
| Feb | 28.197 | 12.7 |
| Mar | 1.110 | 12.7 |
| Mar | 3.150 | 12.9 |

Der Veränderliche SU UMa vom gleichen Zwergnova Typ hatte fast zur gleichen Zeit ein helles Maximum. In der nachfolgenden Tabelle finden sich ebenfalls wieder die von Patrick Schmeer geschätzten Helligkeitsdaten.

| Datum | | Mag |
|---|---|---|
| Feb | 25.117 | 12.7 |
| Feb | 26.034 | 12.4 |
| Mar | 1.108 | 11.3 |
| Mar | 3.051 | 11.4 |
| Mar | 4.090 | 11.5 |
| Mar | 7.901 | 11.8 |
| Mar | 8.868 | 11.8 |
| Mar | 13.002 | 12.4 |
| Mar | 14.041 | 12.5 |
| Mar | 15.116 | 12.7 |
| Mar | 20.085 | 12.7 |

Bei U Gem zeigte sich zum ersten Mal seit September 1992 ebenfalls wieder ein Maximum. Die wenigen erhältlichen Helligkeitsdaten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt.

| Datum | | Mag |
|---|---|---|
| Mar | 17.922 | 13.5 |
| Mar | 19.001 | 12.6 |
| Mar | 19.882 | 9.7 |
| Mar | 20.863 | 9.3 |

## PPM: Der Nachfolger des SAO-Katalogs

In der Zeitschrift Sterne und Weltraum 10/91 wurde der neue *Positions and Proper Motions* Katalog schon einmal angekündigt. Bei diesem handelt es sich um einen maschinenlesbaren Sternkatalog, der neben sehr genauen Sternpositionen bezogen auf J2000.0/FK5 auch noch Angaben zu Eigenbewegung, Helligkeit, Spektraltyp und Querverweise auf die Katalognummern von SAO-Katalog, Bonner Durchmusterung, Henry-Draper-Katalog und AGK3 enthält.

Mit knapp 400 000 Objekten enthält der PPM deutlich mehr Sterne als der SAO-Katalog (258 997 Sterne), die zudem gleichmäßiger als in diesem verteilt sind. Die Grenzgröse liegt in beiden Katalogen etwa bei $11^{\mathrm{m}}.5$ , mehr als 99% der Sterne des SAO-Katalogs sind auch im PPM enthalten.

Da der SAO-Katalog besonders den Südhimmel stark vernachlässigte, wurde bei der Zusammenstellung des PPM auf eine Verbesserung dieses Zustandes besonderer Wert gelegt. Dies nicht zuletzt deshalb, weil sich gerade auf der Südhalbkugel unserer Erde der größte Teil aller weltweiten Großteleskope befindet. Nachdem der Nordteil des Katalogs bereits 1990 fertiggestellt werden konnte ist seit kurzem nun auch der Südteil des Katalogs verfügbar (siehe SuW, 2/93, 123).

Durch den besonderen Aufwand, der bei der Erstellung des Südteils getrieben wurde, ist damit erstmals ein Positionskatalog entstanden, dessen Sterndichte und Genauigkeit auf der Südhalbkugel größer als auf der Nordhalbkugel ist.

## Ephemeriden des periodischen Kometen P/Schaumasse

Der periodische Komet Schaumasse kehrt zur Zeit zum elften Mal seit seiner Entdeckung im Jahre 1911 in das innere Sonnensystem zurück. Normalerweise hält er sich in einer durchschnittlichen Entfernung von 4.1 AE tief im Asteroidengürtel auf. Alle 8.2 Jahre, wie gerade jetzt, jedoch kommt er der Sonne auf 1.2 AE nahe. Beobachter schätzten die Helligkeit des Kometen auf etwa $8^{\mathrm{m}}.5$, ein leichtes Objekt für Amateurteleskope oder sogar größere Feldstecher unter dunklem Himmel. Eine große Aufsuchkarte erscheint in der Märzausgabe der Zeitschrift *Sky& Telescope*. Am 4. und 5. März hat der Komet in nur einem Grad Entfernung den hellen Stern Capella passiert, der nach Einbruch der Dunkelheit fast genau im Zenit steht. Genauere Informationen und die weitere Bahn des Kometen können der nachfolgenden Ephemeridentabelle entnommen werden. Alle Angaben beziehen sich auf 0h UT, die Spalten “SUN” und “EARTH” enthalten die Entfernung zur Erde bzw. Sonne, jeweils in AE, Koordinatenangaben sind im System J2000.0.

| YR | MN | DY | R.A. | J2000.0 | DEC. | | EARTH | SUN | ELONG | MAG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ° | ' | ° | ' | | | | |
| 1993 | 4 | 1 | 7 | 56.140 | +45 | 55.37 | 0.6148 | 1.2565 | 99.5 | 9.4 |
| 1993 | 4 | 2 | 8 | 1.980 | +45 | 39.63 | 0.6184 | 1.2603 | 99.6 | 9.5 |
| 1993 | 4 | 3 | 8 | 7.767 | +45 | 22.73 | 0.6222 | 1.2643 | 99.8 | 9.5 |
| 1993 | 4 | 4 | 8 | 13.497 | +45 | 4.72 | 0.6261 | 1.2683 | 99.9 | 9.5 |
| 1993 | 4 | 5 | 8 | 19.165 | +44 | 45.63 | 0.6302 | 1.2725 | 100.1 | 9.5 |
| 1993 | 4 | 6 | 8 | 24.767 | +44 | 25.50 | 0.6344 | 1.2768 | 100.3 | 9.6 |
| 1993 | 4 | 7 | 8 | 30.299 | +44 | 4.37 | 0.6388 | 1.2812 | 100.4 | 9.6 |
| 1993 | 4 | 8 | 8 | 35.757 | +43 | 42.27 | 0.6433 | 1.2857 | 100.6 | 9.6 |
| 1993 | 4 | 9 | 8 | 41.140 | +43 | 19.24 | 0.6480 | 1.2903 | 100.7 | 9.7 |
| 1993 | 4 | 10 | 8 | 46.445 | +42 | 55.33 | 0.6528 | 1.2950 | 100.9 | 9.7 |
| 1993 | 4 | 11 | 8 | 51.670 | +42 | 30.58 | 0.6578 | 1.2998 | 101.0 | 9.7 |
| 1993 | 4 | 12 | 8 | 56.813 | +42 | 5.04 | 0.6630 | 1.3047 | 101.2 | 9.8 |
| 1993 | 4 | 13 | 9 | 1.873 | +41 | 38.74 | 0.6683 | 1.3098 | 101.3 | 9.8 |
| 1993 | 4 | 14 | 9 | 6.850 | +41 | 11.72 | 0.6738 | 1.3149 | 101.5 | 9.8 |
| 1993 | 4 | 15 | 9 | 11.743 | +40 | 44.04 | 0.6794 | 1.3201 | 101.6 | 9.9 |
| 1993 | 4 | 16 | 9 | 16.552 | +40 | 15.74 | 0.6853 | 1.3254 | 101.7 | 9.9 |
| 1993 | 4 | 17 | 9 | 21.276 | +39 | 46.86 | 0.6912 | 1.3308 | 101.9 | 9.9 |
| 1993 | 4 | 18 | 9 | 25.917 | +39 | 17.44 | 0.6974 | 1.3363 | 102.0 | 10.0 |
| 1993 | 4 | 19 | 9 | 30.474 | +38 | 47.53 | 0.7037 | 1.3418 | 102.1 | 10.0 |
| 1993 | 4 | 20 | 9 | 34.949 | +38 | 17.16 | 0.7102 | 1.3475 | 102.2 | 10.1 |
| 1993 | 4 | 21 | 9 | 39.341 | +37 | 46.38 | 0.7169 | 1.3533 | 102.3 | 10.1 |
| 1993 | 4 | 22 | 9 | 43.654 | +37 | 15.23 | 0.7237 | 1.3591 | 102.4 | 10.1 |
| 1993 | 4 | 23 | 9 | 47.886 | +36 | 43.75 | 0.7307 | 1.3650 | 102.5 | 10.2 |
| 1993 | 4 | 24 | 9 | 52.041 | +36 | 11.96 | 0.7379 | 1.3710 | 102.6 | 10.2 |
| 1993 | 4 | 25 | 9 | 56.118 | +35 | 39.92 | 0.7453 | 1.3771 | 102.7 | 10.3 |
| 1993 | 4 | 26 | 10 | 0.120 | +35 | 7.65 | 0.7528 | 1.3832 | 102.7 | 10.3 |
| 1993 | 4 | 27 | 10 | 4.048 | +34 | 35.19 | 0.7605 | 1.3894 | 102.8 | 10.3 |
| 1993 | 4 | 28 | 10 | 7.904 | +34 | 2.57 | 0.7684 | 1.3957 | 102.8 | 10.4 |
| 1993 | 4 | 29 | 10 | 11.689 | +33 | 29.82 | 0.7764 | 1.4021 | 102.9 | 10.4 |
| 1993 | 4 | 30 | 10 | 15.404 | +32 | 56.98 | 0.7846 | 1.4085 | 102.9 | 10.5 |
| 1993 | 5 | 1 | 10 | 19.052 | +32 | 24.06 | 0.7930 | 1.4150 | 103.0 | 10.5 |
| 1993 | 5 | 2 | 10 | 22.634 | +31 | 51.10 | 0.8016 | 1.4216 | 103.0 | 10.5 |
| 1993 | 5 | 3 | 10 | 26.152 | +31 | 18.12 | 0.8103 | 1.4282 | 103.0 | 10.6 |
| 1993 | 5 | 4 | 10 | 29.606 | +30 | 45.15 | 0.8192 | 1.4349 | 103.0 | 10.6 |
| 1993 | 5 | 5 | 10 | 33.000 | +30 | 12.21 | 0.8282 | 1.4417 | 103.0 | 10.7 |
| 1993 | 5 | 6 | 10 | 36.334 | +29 | 39.32 | 0.8375 | 1.4485 | 103.0 | 10.7 |
| 1993 | 5 | 7 | 10 | 39.611 | +29 | 6.49 | 0.8469 | 1.4554 | 102.9 | 10.8 |
| 1993 | 5 | 8 | 10 | 42.832 | +28 | 33.75 | 0.8564 | 1.4623 | 102.9 | 10.8 |
| 1993 | 5 | 9 | 10 | 45.998 | +28 | 1.12 | 0.8662 | 1.4693 | 102.9 | 10.9 |
| 1993 | 5 | 10 | 10 | 49.111 | +27 | 28.60 | 0.8761 | 1.4763 | 102.8 | 10.9 |
| 1993 | 5 | 11 | 10 | 52.174 | +26 | 56.21 | 0.8862 | 1.4834 | 102.8 | 11.0 |
| 1993 | 5 | 12 | 10 | 55.187 | +26 | 23.97 | 0.8964 | 1.4906 | 102.7 | 11.0 |
| 1993 | 5 | 13 | 10 | 58.152 | +25 | 51.89 | 0.9068 | 1.4978 | 102.6 | 11.0 |
| 1993 | 5 | 14 | 11 | 1.071 | +25 | 19.98 | 0.9174 | 1.5050 | 102.5 | 11.1 |
| 1993 | 5 | 15 | 11 | 3.946 | +24 | 48.24 | 0.9281 | 1.5123 | 102.4 | 11.1 |
| 1993 | 5 | 16 | 11 | 6.777 | +24 | 16.70 | 0.9390 | 1.5196 | 102.3 | 11.2 |
| 1993 | 5 | 17 | 11 | 9.567 | +23 | 45.36 | 0.9501 | 1.5270 | 102.2 | 11.2 |
| 1993 | 5 | 18 | 11 | 12.317 | +23 | 14.23 | 0.9613 | 1.5344 | 102.1 | 11.3 |
| 1993 | 5 | 19 | 11 | 15.028 | +22 | 43.31 | 0.9727 | 1.5419 | 102.0 | 11.3 |
| 1993 | 5 | 20 | 11 | 17.701 | +22 | 12.61 | 0.9842 | 1.5494 | 101.8 | 11.4 |
| 1993 | 5 | 21 | 11 | 20.338 | +21 | 42.14 | 0.9959 | 1.5570 | 101.7 | 11.4 |
| 1993 | 5 | 22 | 11 | 22.941 | +21 | 11.91 | 1.0078 | 1.5645 | 101.5 | 11.5 |
| 1993 | 5 | 23 | 11 | 25.509 | +20 | 41.91 | 1.0198 | 1.5722 | 101.4 | 11.5 |
| 1993 | 5 | 24 | 11 | 28.045 | +20 | 12.16 | 1.0319 | 1.5798 | 101.2 | 11.6 |
| 1993 | 5 | 25 | 11 | 30.550 | +19 | 42.66 | 1.0443 | 1.5875 | 101.0 | 11.6 |
| 1993 | 5 | 26 | 11 | 33.024 | +19 | 13.40 | 1.0567 | 1.5953 | 100.8 | 11.6 |
| 1993 | 5 | 27 | 11 | 35.468 | +18 | 44.41 | 1.0693 | 1.6030 | 100.6 | 11.7 |
| 1993 | 5 | 28 | 11 | 37.884 | +18 | 15.67 | 1.0820 | 1.6108 | 100.4 | 11.7 |
| 1993 | 5 | 29 | 11 | 40.273 | +17 | 47.19 | 1.0949 | 1.6186 | 100.2 | 11.8 |
| 1993 | 5 | 30 | 11 | 42.635 | +17 | 18.98 | 1.1080 | 1.6265 | 100.0 | 11.8 |
| 1993 | 5 | 31 | 11 | 44.970 | +16 | 51.02 | 1.1211 | 1.6344 | 99.8 | 11.9 |