

14 Milliarden Lichtjahre – was können wir davon wissen?

Teil 1

Dierck-E.Liebscher,
Astrophysikalisches Institut Potsdam,
<http://www.aip.de/~lie/>, deliebscher@aip.de

Die physikalische Theorie, der logische Schluss, führt uns bis zum Anfang der Welt. Gibt es Grenzen ihrer Anwendbarkeit, die das verhindern? Gibt es Beobachtungen, die die Theorie stützen? Satelliten, Atome, Elektronen sind Messgeräte an den Objekten des Universums. Sie können das Bild des Universums korrigieren, fixieren oder auch verwerfen. Im ersten Teil werden die Gründe für das expandierende Universum untersucht. In einem zweiten Teil wird der Bogen bis zum Anfang der Zeit gespannt.

Fragen

Das All ist voller Superlative. Große Zahlen begleiten uns auf Schritt und Tritt, wann immer wir Entfernungen, Temperaturen oder Massen mit irdischen Maßstäben vergleichen. Aber können wir mit unseren irdischen Maßstäben das Universum überhaupt zuverlässig vermessen?

Wir lesen, wie heiß die Sonne, die Sterne sind: Wer hat das Thermometer? Wir erfahren, wie schwer die Sterne, die Galaxien sind: Wer legt sie auf die Waage? Wir hören, dass die fernen Galaxien sich mit immer größerer Geschwindigkeit von uns entfernen: Wo steht der Starkasten, an dem sie vorbeirauschen? Wir sagen, das Universum expandiert: Was macht uns da so sicher?

Verschiedene Umstände sind es, die uns all diese Aussagen ermöglichen. Zunächst versorgt uns die Natur mit Messgeräten vor Ort: auf den Sternen, in den Galaxien. Es sind die Atome und Moleküle selbst, deren Strahlung wir in den Teleskopen einfangen. Wir könnten sie aber nicht deuten, wüssten wir nicht dank der theoretischen Physik, wie Atome und Moleküle gebaut sind, wie und auf welchen Wellenlängen sie strahlen, und wovon diese Strahlung beeinflusst wird. Wir wissen aber nicht nur dies, wir können auch unsere Theorien der physikalischen Prozesse auf große Massen und Entfernungen und auf extreme Temperaturen und Dichten anwenden und Erwartungen formulieren, die dann durch Beobachtungen und Experimente geprüft werden müssen. Theorie und Messung gehen Hand in Hand, die Theorie blickt ungeduldig voraus, die Beobachtung hält die Zügel.

Was das Wissen angeht, sind wir dennoch in einer prekären Lage. Obwohl die Theorie durch ihre innere Strenge ein Instrument ist, das viel weiter reicht als jede einzelne Beobachtung und das auch die begriffliche Deutung einer Beobachtung überhaupt möglich macht, kann sie durch Beobachtungen bestenfalls gestützt, aber nicht bewiesen werden¹. Es ist aber eine historisch bewährte Strategie, einer Theorie zu vertrauen, wenn sie in ihren Anwendungen und vielleicht auch Prognosen erfolgreich ist. Eine Theorie, die bei Anwendung oder Prognose in einem prinzipiellen Punkt versagt, ist falsch. Man begegnet aber oft dem Fall, dass eine Theorie in einem gewissen Bereich erfolgreich ist, aber unter extremen Umständen eine wohlbestimmte Grenze findet und gerade dadurch in ihrem begrenzten Bereich bestätigt ist. Das Paradebeispiel ist die Newtonsche Mechanik und ihren Schranken bei hohen Geschwindigkeiten.

Im Folgenden soll nun besprochen werden, wie Beobachtungen und Theorie im Universum miteinander verwoben sind. Wir beginnen in diesem Teil mit dem Schluss auf die Expansion des Universums und setzen im zweiten Teil mit deren theoretischen und beobachtungsseitigen Folgen für die physikalischen Prozesse in der Geschichte des Universums fort.

Entfernungen

Zunächst müssen wir uns die Entfernungsbestimmung ansehen. Diese beginnt ganz wie die Landesvermessung mit einfachen Methoden. Wir vergleichen eine Basis auf der einen Seite mit dem Winkel, unter dem sie von der anderen Seite gesehen wird, und bestimmen das Dreieck, das wir so konstruieren können. Das Handwerkszeug dazu liefert uns

¹Einstein schreibt: *Das Leben des theoretischen Naturforschers ist schwer, denn die Natur, oder genauer, das Experiment, ist ein unerbittlicher und strenger Richter seiner Arbeit. Sie sagt niemals 'Ja' zu einer Theorie, sondern bestenfalls 'Vielleicht' und in den meisten Fällen einfach 'Nein'. Wenn ein Experiment mit der Theorie übereinstimmt, heißt es 'Vielleicht', wenn nicht, dann heißt es 'Nein'.*

die Theorie der euklidischen Ebene, über die wir seit 2300 Jahren verfügen. Die Idee der Dreiecksbestimmung lässt sich auf zwei Arten realisieren. Zum einen bestimmen wir von den Endpunkten einer bekannten Basis, z.B. des Durchmessers der Erdbahn, die Winkel zu dem entfernten Objekt. Die euklidische Geometrie liefert den dritten Winkel, unter dem die Basis vom entfernten Objekt gesehen wird, und die Entfernung (sie heißt *trigonometrische Parallaxe*, Abb.). Die Entfernung, von der aus die große Halbachse der Erdbahn unter dem Winkel von 1 Bogensekunde gesehen wird, heißt Parallaxensekunde (parsec, pc). Sie beträgt etwa 206000 AE.

Im Prinzip dasselbe ist der Vergleich von Entfernungen an Hand der Intensität (Energie pro Zeit und Fläche) des Lichts, das uns von Quellen vergleichbarer Leistung (Energie pro Zeit) erreicht. Unser Detektor hat eine Apertur, die vom Licht dieser Quelle einen Anteil einsammelt. Dieser Anteil wird durch den Raumwinkel bestimmt, unter dem die Detektorapertur von der Quelle aus gesehen wird. Der Vergleich des Raumwinkels mit der Aperturfläche liefert die Entfernung analog zur trigonometrischen Parallaxe.

Das Gegenstück zu dieser Art der Entfernungsbestimmung ist die Messung des Winkels, unter dem uns eine Basis am entfernten Objekt erscheint. So können wir Geschwindigkeiten der Sterne in einem Sternhaufen durch Messung der Frequenzverschiebung der Charakteristika ihrer Spektren bestimmen – das ist die Basis – und mit der scheinbaren Positionsänderung (der Eigenbewegung) vergleichen. Das Ergebnis heißt *Sternstromparallaxe* und wird meist am Sternhaufen der Hyaden eindrucksvoll demonstriert (Abb.).

Was sollte schon bei der Anwendung der euklidischen Geometrie übersehen werden? Seit der Konstruktion der Allgemeinen Relativitätstheorie wissen wir: Es ist die Krümmung des Raums, die eine Rolle spielen könnte (siehe Lindner 2004). Dann wäre die Winkelsumme im Dreieck nicht mehr π , und die Schlüsse müssten korrigiert werden. Es sieht aber nicht so aus, als wäre das für die Modellierung des Universums nötig².

Der Atombau

Bis zur Erfindung der Spektralanalyse schien es aussichtslos, etwas anderes als scheinbare Positionen, Entfernungen und einzelne Massen der Himmelskörper bestimmen zu wollen. Seit man die Spektrallinien (Abb.) deuten und vermessen kann, hat sich die Lage geändert. Wir haben nun Messgeräte auf den Sternen, in den Galaxien und im freien Weltraum. Es sind Atome, Ionen und freie Elektronen. Wir lesen sie ab durch Beobachtung ihrer elektromagnetischen Strahlung in allen zugänglichen Spektralbereichen (). An den Spektrallinien wie an der spektralen Energieverteilung generell können wir sehen, wie schnell sich die Entfernung ändert (Doppler-Effekt), wie heiß es ist (Verbreiterung der Spektrallinien), wie stark das Magnetfeld ist (Zeeman-Effekt), wie dünn das Gas ist (verbotene Linien) und anderes mehr. Es ist die Theorie des Atombaus und die Wärmelehre und generell der Physik, der wir dabei vertrauen müssen und dürfen.

Wir vertrauen ihr so weit, dass wir mit ihrer Hilfe aus den Beobachtungen des Lichts von der Oberfläche eines Sterns auf den Aufbau seiner Atmosphäre und die Energiefreisetzung in seinem Innern schließen. Dabei zeigt sich, dass wir die Theorie nicht nur für die Verhältnisse in unseren Laboratorien, sondern auch unter extremen Bedingungen erfolgreich anwenden können. Das ermutigt uns, bis jenseits aller beobachtbaren Bereiche zu extrapolieren und auf der Basis der uns bekannten Physik das Universum als Ganzes zu untersuchen.

Woher kommt diese Zuversicht? Die Theorie des Atombaus sagt leichte Aufspaltungen der Spektrallinien voraus (Feinstruktur und Hyperfeinstruktur), die man selbst in den entferntesten Quasaren wiederfindet. Man kann aus ihnen zwei Dinge lesen. Zum einen ist offensichtlich die Theorie des Atombaus bis in diese Entfernungen und diese Vergangenheit anwendbar. Zum anderen kann sich die Lichtgeschwindigkeit (in atomaren Einheiten) in den letzten 10 Milliarden Jahren höchstens um ein Hunderttausendstel geändert haben. Und wo die Feinheiten stimmen, kann man sich auch auf die Grobheiten verlassen.

Die Keplerschen Gesetze und die transparente Materie

Ein solches scheinbar grobes Messgerät ist ein Satellit oder ein Satellitensystem. Nachdem Kepler den Geistesblitz hatte, in der Bahn des Mars eine Ellipse zu sehen, konnte er seine drei Gesetze der Planetenbewegung aufstellen. Newton sah in diesen die Wirkung eines universellen Kraftgesetzes, das nicht nur die Keplerschen Gesetze erklärt, sondern auch all das Geflecht von Störungen beschreibt, die durch die Gesamtheit des Planetensystems hervorgerufen werden. Mehr noch, an Hand der ihm zugeschriebenen Störungen der Uranusbahn konnte ein unbekannter Planet erst berechnet und dann identifiziert werden: Es ist der Neptun.

Mit dem dritten Keplerschen Gesetz kann nun die Masse M des Zentralkörpers ermittelt werden. Sie wird aus Umlaufzeit T und Bahnradius a (genauer der großen Halbachse der Bahnellipse) kombiniert:

$$GM = 4\pi^2 a^3 / T^2 . \quad (1)$$

²Die Allgemeine Relativitätstheorie behauptet *nicht*, dass der Raum gekrümmt ist. Es ist die *Raum-Zeit-Union*, deren Krümmung das Schwerefeld darstellt. Der Raum kann, muss aber nicht gekrümmt sein.

Hier steckt noch die Gravitationskonstante G drin. Wenn man sie nicht kennt, kann mit der Beobachtung von Umlaufzeiten und Radien nur das Produkt GM gefunden werden. Der letzte Schritt bei der Bestimmung der Masse, etwa der Sonne, ist eine kleine Torsionswaage, mit der die Gravitationskonstante G auf der Erde bestimmt werden kann (Cavendish-Versuch).

Über die Beobachtung der Bewegung von Doppelsternen kann man die Masse der Sterne der verschiedenen Typen bestimmt werden. Ein Stern ist dabei der Satellit des anderen (und M ist dann die reduzierte Masse $M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$). Auch Galaxien haben Satelliten: Gaswolken, deren Geschwindigkeit mit dem Dopplereffekt bestimmt werden kann. Hier findet man jedoch ein Problem. Wenden wir die Newtonsche Theorie (das dritte Keplersche Gesetz (1) an, so errechnen wir Massen der Galaxien, die sehr viel größer sind als man an den Sternen in den Galaxien nachzählen kann. Halten wir an der Newtonschen Theorie (und der Allgemeinen Relativitätstheorie, die diese reproduziert) fest, sieht man in dieser Masse Materie, die nicht leuchtet, aber auch keinen Schatten wirft: Sie ist transparent. Dennoch wird sie in populärer Mystifizierung dunkel genannt³. Sie macht sich nicht durch Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung bemerkbar, sondern – bislang – nur durch ihr Schwerfeld. Auch die Galaxien eines Haufens sind eingebettet in eine große Masse transparenter Materie, deren Schwerfeld in der Temperatur des intergalaktischen Gases im Haufen oder durch den Gravitationslinseneffekt nachgewiesen werden kann.

Wir kennen andere transparente Materie, die Neutrinos nämlich. Auch diese machen sich durch elektromagnetische oder Kernwechselwirkungen nicht bemerkbar, sondern nur durch eine schwach genannte Wechselwirkung. Obwohl die Sonne im Innern zunächst mehr Neutrinos als Photonen produziert, ist es sehr schwierig, ihre Neutrinos nachzuweisen. Diese Neutrinos können aber nicht für die transparente Materie in Galaxien und Galaxienhaufen verantwortlich gemacht werden. Sie sind einfach zu schnell, um sich auf diesen Skalen genügend zu konzentrieren. Die transparente Materie muss aus anderen noch unbekanntem Teilchen bestehen.

Gibt es Auswege, gibt es andere Hypothesen, die den Schluß auf die transparente Materie vermeiden können? Man könnte vielleicht vermuten, dass das Newtonsche Gravitationsgesetz, das in der Allgemeinen Relativitätstheorie seine endgültige Form fand, auf den Skalen einer Galaxie oder eines Galaxienhaufens nicht so ganz richtig ist. Es hilft uns aber nicht weiter, hier den Schluss auf die transparente Materie zu vermeiden, denn sie taucht an ganz anderer Stelle wieder auf, wie wir bei der Besprechung der Strukturbildung im nächsten Teil sehen werden.

Die Expansion des Universums

In Entfernungen von über 5 Megaparsec wird deutlich, dass die Strukturen in den Spektren der Galaxien eine Verschiebung zu längeren Wellen zeigen, die um so größer ist, je weiter die Galaxien entfernt sind (Abb.). Die gleiche Theorie (die Allgemeine Relativitätstheorie), die als erstes einen konsistenten mittelpunktsfreien Kosmos konstruieren konnte, hält für diese Rotverschiebung ein einfaches Modell parat. Die Positionen der Galaxien werden mit festen Koordinaten beschrieben (wie die geografischen Koordinaten auf einem aufblasbaren Globus), nur der Maßstab der Entfernungen zwischen den Positionen ändert sich mit der Zeit. Genauer, der Maßstabsfaktor $a[t]$ nimmt mit der Zeit zu (Abb.). Die Rate dieser Expansion ist heute ($t = t_0$) gerade die Hubble-Konstante,

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} [t_0] = H_0 \quad (\approx 65 \text{ km/s/Mpc}) .$$

Die Allgemeine Relativitätstheorie erwartet, dass die Expansionsrate von der Energiedichte im Universum bestimmt wird. Die Energiedichte selbst hat verschiedene Komponenten, die sich durch die Expansion in unterschiedlicher Weise verdünnen. Das wird alles durch die Friedmannschen Gleichungen beschrieben, die hier aber nicht weiter behandelt werden sollen.

Die Rotverschiebung ergibt sich als Verhältnis der Maßstabsfaktoren zum Zeitpunkt der Beobachtung und zum Zeitpunkt der Emission des Lichts.

$$\frac{\lambda_{\text{beobachtet}}}{\lambda_{\text{emittiert}}} = \frac{a[t_{\text{Beobachtung}}]}{a[t_{\text{Emission}}]} . \quad (2)$$

Diese beiden Zeitpunkte sind natürlich verschieden, denn das Licht ist nicht unendlich schnell. Es braucht Zeit, um die Entfernungen zu überbrücken. Vom Anfang der Zeit bis heute hat es erst etwa 14 Milliarden Lichtjahre zurückgelegt. Was weiter entfernt ist, liegt hinter unserem Horizont (Abb.).

Das so beschriebene Modell des Universums hat keinen Mittelpunkt und setzt daher voraus, dass der allgemeine Anblick und die Strukturen des Universums hinter dem Horizont sich von denen davor nicht unterscheiden. Diese Voraussetzung heißt kosmologisches oder auch Cusanisches Prinzip, manchmal auch etwas unzutreffend Kopernikanisches Prinzip⁴. Man kann diese Voraussetzung nicht direkt prüfen, aber es gibt keine gegenteiligen Hinweise. Statt dessen gibt

³Im Grunde gibt es nur selten kurze Namen, die ohne irreführende Assoziationen sind. Auch das Komplement, die konventionelle Materie, wird als baryonische, auch als leuchtende Materie bezeichnet. Konventionell ist ein Attribut mit zeitabhangiger Bedeutung, baryonisch schließt hier Mesonen und Leptonen mit ein, und leuchtend meint auch die Dunkelwolken, die den Hintergrund verdecken.

⁴Auf deutsch: Woanders ist es vielleicht anders, aber anders ist es anderswo auch nicht. Auf sizilianisch: berall auf der Welt geht es zu wie bei uns zu Hause (Tuttu lu munnu  comu casa nostra).

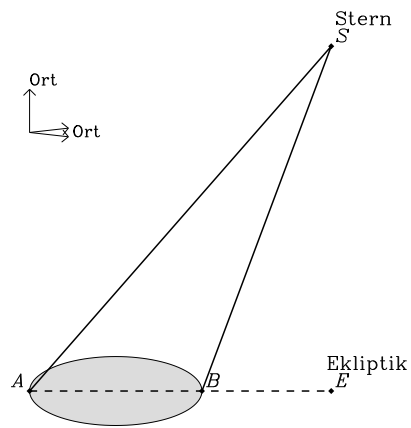


Abbildung 1: Trigonometrische Parallaxe. Basis ist der Durchmesser der Erdbahn. Mit den Winkeln SAE und SBE wird das Dreieck konstruiert und das Verhältnis SA/AB bestimmt: Distanz $\approx \sin[SAE]AB/\gamma$ mit $\gamma = SBE - SAE$

es ganz unerwartete Unterstützung durch das Auffinden von Überbleibseln aus Zeiten, zu denen das Universum noch zu heiß war, um durchsichtig zu sein. Diese Zusammenhänge sollen Gegenstand des zweiten Teils sein, der im nächsten Heft erscheint.

Literatur

Lindner, K.: Geometrie auf der Kugel, ARU 41 (2004/4), 8-11.

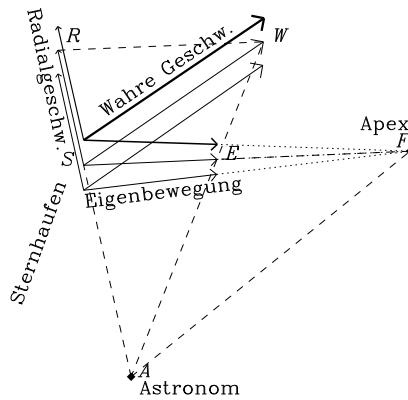


Abbildung 2: Sternstromparallaxe. Die wahre Bewegung SW eines Sternhaufens wird auf die Gesichtfeldebene SE projiziert, wobei sich der Fluchtpunkt F ergibt. Die Radialkomponente SR der Geschwindigkeit wird mit dem Dopplereffekt bestimmt, die Richtung SW ($\parallel AF$) aus dem Fluchtpunkt F der Eigenbewegungen der Sterne des Haufens. Die Dreiecke $\triangle WES$, $\triangle SRW$, $\triangle ASF$ und δASE sind nahezu ähnlich. In der Abbildung ist diese Ähnlichkeit sehr grob. Wenn man aber bedenkt, dass die Eigenbewegungen nur einige Bogensekunden pro Jahrhundert betragen, der Winkel zum Apex aber mehrere Grad, sieht man, dass das „nahezu“ ziemlich genau ist. Man berechnet aus dem Dreieck $\triangle WES \sim \triangle SRW \sim \triangle ASF$ die Geschwindigkeitskomponente SE . Das ist die Basis, und die Eigenbewegung SE/AS liefert dann AS .

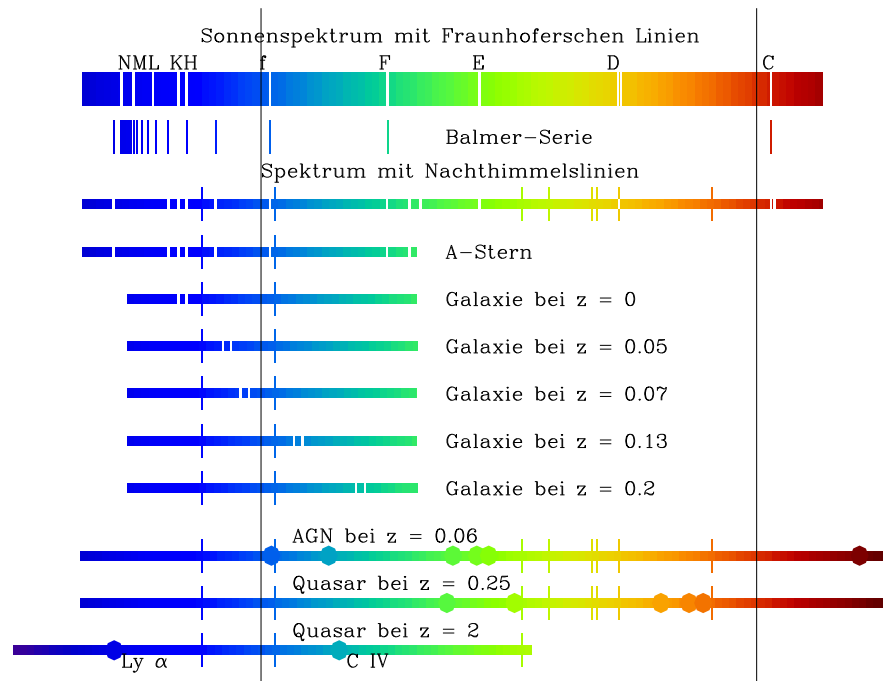


Abbildung 3: Schematische Spektren. Konventionelle Spektren sind Bilder eines Spalts, die für jede Wellenlänge an einer anderen Stelle erzeugt werden, so dass bei einem kontinuierlichen Spektrum ein breites Band in den Farben des Regenbogens entsteht. Fehlen einzelne Wellenlängen, etwa durch Absorption in der Umgebung der Quelle, ist dieses Band durch Querlinien unterbrochen. Fraunhofer hat diese Linien im Sonnenspektrum zur Kalibrierung optischer Gläser benutzt. Strahlt die Quelle nur auf einzelnen Wellenlängen, entsteht statt des Bandes nur eine Folge von Querlinien. Wenn ein Stern oder eine Galaxie den Spalt nicht voll ausfüllt, ist das Spektrum nur ein dicker Strich, begleitet von den Linien des Nachthimmels, die in voller Breite erscheinen. Die Spektren der Sterne mischen sich zu dem der Galaxien. Dabei verwischen sich die Linien bis auf H und K , die im Spektrum aller Sterne zu sehen sind. Die Verschiebung dieser Linien für entfernte Galaxien zeigt die Expansion des Universums

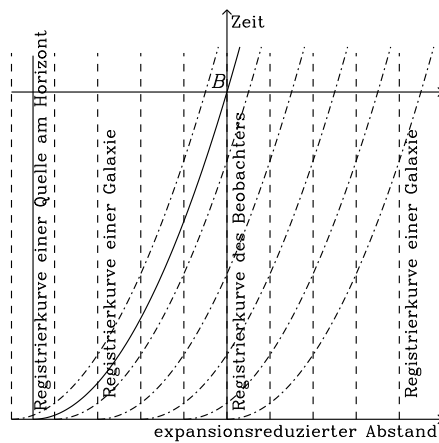


Abbildung 4: Galaxienkoordinaten und Maßstab. Auf einem Registrierstreifen, aus dem die Expansion herausgerechnet ist, hinterlassen die Galaxien vertikale Spuren (gestrichelt). Ihr tatsächlicher Abstand wächst dabei wie der Maßstabsfaktor $a[t]$. Um das zu sehen, zeichnen wir auch Spuren von Lichtsignalen ein, die hier von links nach rechts eilen (strichpunktiert). Je später es wird, desto mehr Zeit brauchen sie von einer Galaxie zur nächsten. Der Beobachter zum Zeitpunkt B hat einen Horizont. Die Galaxien hinter dem Horizont sind noch nicht zu sehen

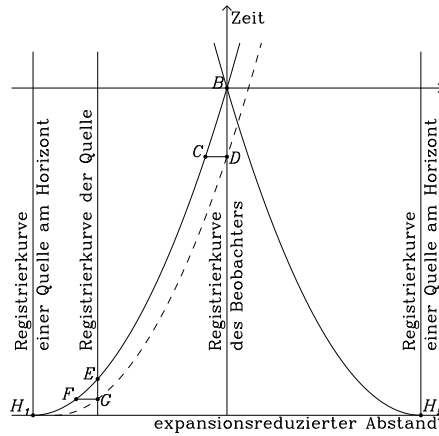


Abbildung 5: Rotverschiebung und Zeitdilatation. Wir zeichnen ein Registrierblatt in expansionsreduzierten (mitbewegten) Koordinaten wie in Abb. und wählen dazu den Fall $a^2[t]/a^2[t_0] = t/t_0$ (d.h. den Strahlungskosmos). Die Weltlinien (Registrierkurven) der Lichtsignale erscheinen als Parabeln fester Öffnung, deren Scheitel bei $t = 0$ liegt. Der Beobachter B hat zum gegebenen Zeitpunkt ein begrenztes Gesichtsfeld (dargestellt durch die Strecke H_1H_2). Zwei Signale auf gleichem Wege zeichnen in dieser Karte Parabeln festen Abstands. Dieser reduzierte Abstand bleibt fest, der wahre Abstand wächst also mit dem Maßstabfaktor $a[t]$, auch die Wellenlängen (FC und GD können die Spuren zweier Wellenberge sein). Frequenzen fallen reziprok: Die Ankunftsintervalle GE und DB verlängern sich ebenfalls mit dem Maßstabfaktor. Nicht nur die Schwingungsfrequenz des Lichts nimmt ab, auch die Rate der Photonen selbst. Die Rotverschiebung lässt sich deshalb auch nicht durch die Hypothese einer Alterung des Lichts erklären

14 Milliarden Lichtjahre – was können wir davon wissen?

Teil 2

Dierck-E.Liebscher,
Astrophysikalisches Institut Potsdam,
<http://www.aip.de/~lie/>, deliebscher@aip.de

Im ersten Teil wurde gezeigt, wie die Vorstellung von der Größe und der Expansion des Universums begründet sind. Hier soll dargestellt werden, wie das Vertrauen in diese Ergebnisse uns erlaubt, Fragen an die Vorgeschichte des sichtbaren Universums zu stellen und zu beantworten, und welche Beobachtungen diese Vorstellungen unerwartet stützen. Dabei spannen wir den Bogen bis zum Anfang der Zeit.

Gamows Fossilien

Das von den Beobachtungen nahegelegte und von der Theorie konsistent modellierte Bild des Weltalls geht von einer mittelpunktfreien Expansion aus, die den Gesetzen der Schwerkraft unterworfen ist. Rechnen wir sie in die nd Vergangenheit zurück, sehen wir, dass das Universum immer heißer und dichter gewesen ist, heißer und dichter als die Sonnenoberfläche und ebenso undurchsichtig. Dennoch gibt es aus der Frühzeit des Universums Überbleibsel, Fossilien, welche die Anwendbarkeit der Physik und der Hypothesen des Modells stützen.

Vier Typen solcher Überbleibsel spielen eine besondere Rolle. Es sind dies die Hintergrundstrahlung, die Konzentration des Deuteriums, die der Elementarteilchen überhaupt und die Entwicklung der Netzstruktur der Galaxienverteilung. George Gamow hat die Existenz der ersten beiden theoretisch vorhergesagt. Seine Argumente waren prinzipiell und einfach: Wenn das Universum wegen seiner Expansion in der Vergangenheit dichter war, muss es auch heißer gewesen sein. Irgendwann muss es so heiß gewesen sein, dass die Materie ionisiert und das Universum undurchsichtig war. Die Strahlung war dann eine Art Wärmebad, das die Temperatur generell bestimmte. Zu der Zeit, als die Materie durch Abkühlung ihre Ionisierung verlor und das Universum durchsichtig wurde, muss der Maßstab (Expansionsparameter) des Universums etwas weniger als ein Tausendstel des heutigen gewesen sein. Relikt dieses Wärmebades sollte dann heute eine homogene Wärmestrahlung (Hintergrundstrahlung) von nur einigen Grad Kelvin sein. Diese Strahlung wurde 1965 durch Zufall bei der Justierung von Radioantennen gefunden. Ihre erstaunliche Gleichförmigkeit zeigt die Homogenität des Wärmebades und stützt die Hypothese eines großräumig homogenen Universums.

Das zweite Überbleibsel ist aus der Zeit, als das Universum einige Milliarden Grad heiß war. Vor dieser Zeit, d.h. bei noch höheren Temperaturen, kann es noch keine Atomkerne gegeben haben. Sie können sich erst gebildet haben, als sich das Universum durch die Expansion auf unter eine Milliarde K abgekühlt hatte. Dann musste es aber schnell gehen, weil die mit der Expansion einhergehende Verdünnung alle Prozesse irgendwann abbricht. Atomkerne werden später zwar noch in den Sternen gebildet. Dort gibt es ja keine expansionsbedingte Verdünnung, und auch die langsameren Prozesse (2 Protonen setzen sich in Deuteron + Positron + Neutrino um) haben ihre Chance. Die stellare Produktion von Helium und Deuterium reicht aber nicht aus, die große Häufigkeit im Universum zu erklären. Speziell vom Deuterium kann in den Sternen nichts übrigbleiben, weil es dort viel schneller weiterverarbeitet als gebildet wird. Das Deuterium, das sich sehr eindrucksvoll in den Absorptionslinien kalter interstellarer Wasserstoffwolken zeigt (Abb.), muss aus der universellen Kernsynthese stammen. 1967 wurde diese Synthese mit über 100 Reaktionsmöglichkeiten und allen stabilen und instabilen Kernen bis zur Massenzahl 32 nachgerechnet und gezeigt, wie sie von der Beobachtung gestützt wird.

Teilchen und Antiteilchen

Nachdem sich beide Vorhersagen nachrechenbar bestätigt haben, weiß man nun auch, dass die Konzentration der Baryonen (10^{-9} pro Photon der Hintergrundstrahlung und keine Antiteilchen) selbst ein Fossil ist. Ein Teilchen-Antiteilchensymmetrisches Universum kann nämlich nur 10^{-19} Baryonen pro Photon vor der Annihilation retten. Die um den Faktor von 10 Milliarden größere Konzentration der Baryonen muss also ein Überbleibsel der Brechung einer Symmetrie sein, die sich heute nicht mehr offen zeigt. Das Wort Symmetrie ist heute generell Metapher für die Vorstellung, alle Wechselwirkungen seien aus einer gemeinsamen Wurzel herleitbar und haben ihre teils sehr verschiedenen Eigenschaften durch eine Brechung der Symmetrie dieser gemeinsamen Wurzel erhalten. So sind auch die starke und die elektroschwache

Wechselwirkung heute in ihren Eigenschaften sehr verschieden. Wenn sie aber eine gemeinsame Wurzel haben (und das sollte auch aus anderen Gründen so sein), dann hat es eine Symmetriebrechung gegeben. Dies heißt, dass bei tiefen Temperaturen (tief meint hier $T < 10^{28}$ Kelvin: Man erinnere sich an die Superlative) die gemeinsame Wurzel verlassen worden ist. Dabei haben sich die Zerfallskanäle geöffnet, durch die gerade die heute beobachtete Baryonenkonzentration gebildet haben kann. Die Konstruktion dieser gemeinsamen Wurzel ist bei Weitem nicht abschließend gelungen und steht heute im Zentrum des Interesses der Physik. Einiges weiß man allerdings schon über die Eigenschaften der Wurzel. Sie erklärt nicht nur die heute beobachtete Baryonenkonzentration, sie hat auch einen Haken. Sie lässt nämlich auch spezielle schwere Teilchen (sie heißen *Monopole*) erwarten, die heute einfach nicht mehr existieren dürfen und auch nicht gefunden werden. Also braucht man eine weitere Hypothese. Man muss erwarten, dass es nach der Bildung solcher Monopole eine Phase exponentieller Inflation gegeben hat, in der diese – und alle anderen – Teilchen so ausgedünnt worden sind, dass sie heute nicht mehr auffindbar sind. Diese Inflation könnte durch die Energiedichte eines instabilen Hochtemperaturvakuums auch problemlos modelliert werden. Die Inflation endet, wenn das Hochtemperaturvakuum zerfällt. Bei diesem Zerfall erzeugt seine Energie wieder die Teilchen-Antiteilchen-Paare, deren teils unsymmetrischer Zerfall in der Folge die heute beobachtete Baryonenkonzentration liefert.

Strukturen im Universum

Das liest sich wie ein Märchen, aber erstaunlicherweise gibt es auch von dieser Inflation ein beobachtbares Überbleibsel: die Keime der Bildung der Galaxien, der Galaxienhaufen und der Netzstruktur der Verteilung der Galaxien und Galaxienhaufen (Abb.). Es sind feine Schwankungen in der Dichte des Plasmas, die sich zu diesen Strukturen weiter verdichten, wenn im schließlich durchsichtigen Universum die Schwerkraft der dichteren Stellen nicht mehr vom Druck und der Viskosität des Plasmas kompensiert wird. Zum Teil drücken sich diese Schwankungen in einer leichten Abhängigkeit der Temperatur der Hintergrundstrahlung von der scheinbaren Position am Himmel aus. Wenn wir den Doppler-Effekt herausrechnen, der sich durch die Bewegung der Erde in Strahlungsbad ergibt, ist die Amplitude dieser Schwankungen nur etwa 1:100000. Dennoch müssen die sich dahinter verbergenden Dichteschwankungen zu den heute beobachteten Galaxien, Galaxienhaufen und Netzstrukturen entwickelt haben. Diese Zusammenhänge sind ein zentraler Punkt aktueller Forschung und sind durch die aktuellen Messungen der *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) mit erstaunlicher Genauigkeit zugänglich geworden. Sehen wir uns also diese Dichteschwankungen etwas genauer an.

Wenn wir die Masse bestimmen, die in einem Volumen bestimmter Größe enthalten ist, werden wir je nach Lage des Volumens einen anderen Wert erhalten, der mit einer bestimmten Streuung um einen Mittelwert schwankt. Auf den Mittelwert bezogen, ist es diese Streuung Δ , die wir messen können und betrachten müssen. Je nach der gewählten Ausdehnung L des Volumens gibt es einen Zeitpunkt, von dem ab die Kondensation mit Newtonschen Methoden berechnet werden kann. Dieser Zeitpunkt liegt um so früher, je kleiner die gewählte Volumengröße ist. Man findet, dass zu diesem Zeitpunkt ist die relative Streuung $\Delta[L]$ noch unabhängig von der Skala, der Ausdehnung L des Volumens gewesen sein muss. Auf großen Skalen hatte die weitere (Newtonsche) Verstärkung um so mehr Zeit, je kleiner die Skala ist. Dies gilt aber nur bis zu einer bestimmten kritischen Skala. Bei kleineren Skalen wird die Newtonsche Verstärkung bis zu einem bestimmten Zeitpunkt unterdrückt, so dass für große Skalen das Ergebnis von der Skala abhängig wird, die Abhängigkeit aber für kleine Skalen sehr viel schwächer ist (Abb.),

Der Ring schließt sich

Zwei Dinge sind an den Schwankungen in der Hintergrundstrahlung bemerkenswert. Zum einen sind sie viel kleiner als etwa thermische Schwankungen aus der Planck-Zeit sein müssten, zum anderen haben sie die eben beschriebene, von der Skala unabhängige Größe, wenn die Newtonsche Phase beginnt. Es ist gerade das unterstellte Stadium der Inflation, das beides leistet: Bis auf die aus der Theorie des Atombaus bekannten Nullpunktschwankungen werden alle anderen zur Unkenntlichkeit ausgedünnt, die Nullpunktschwankungen ihrerseits entwickeln sich gerade zur richtigen Größenordnung und haben das gefundene Spektrum der relativen Streuungen in der Masse.

Allerdings zeigt die relative Streuung der Masse die Unterdrückung kleiner Volumina nicht bei der charakteristischen Skala eines Baryonen-Photonen-Plasmas (200 Mpc), sondern erst bei kleineren Skalen (30 Mpc). Daraus müssen wir schließen, dass die Kondensation bereits weit vor der Zeit starten kann, wo das Baryonen-Photonen-Plasma die Ionisierung verliert. Der Start muss daher in einer Materiekomponente erfolgen, die nicht mit den Photonen und den Baryonen wechselwirkt: Wieder finden wir die transparente Materie. Wenn das Universum durchsichtig wird, gibt es bereits Dichtekonzentrationen, die in der Hintergrundstrahlung noch nicht zu sehen sind. Die neutralen Atome müssen nicht auf das Schwerfeld ihrer eigenen Störungen warten, sie fallen sofort in das Schwerfeld der Konzentrationen der transparenten Materie. Der Einschwingvorgang hängt sehr empfindlich von allen Umständen ab, deshalb ist seine Beobachtung besonders weit tragend. Im Jahre 2003 hat die WMAP das Ergebnis dieses Einschwingvorgangs so genau vermessen können, dass die Protagonisten bereits von Präzisionskosmologie sprechen. Zumindest ist nun ziemlich genau bestimmt, dass das Vakuum, das sich bei der Expansion nicht verdünnt, heute etwa 70% zur Friedmann-Bilanz beiträgt und der Rest druckfreie Materie ist, die sich umgekehrt proportional zum Volumen verdünnt. Dieser Rest (30%) teilt sich in

konventionelle (baryonische) Materie (5%) und transparente Materie (25%). Die oft diskutierte Krümmung des Raums scheint unwesentlich klein zu sein. Alle Hinweise scheinen die Hypothese der transparenten Materie zu stützen. Andere Wechselwirkungen als die Schwere hat man von dieser Materie jedoch noch nicht gefunden. Ihre Schwerewirkung ist für Galaxien, Galaxienhaufen und die Entwicklung der Netzstruktur nachgewiesen.

Mit der Begründung des Spektrums der Dichteschwankungen hat sich die Kette der Argumente und Beobachtungen zu einem Ring geschlossen (Abb.). Das Dach, die Vorstellung einer einheitlichen Theorie der Bausteine der Materie, steht nun auf zwei Säulen, die im geometrischen Modell des expandierenden Kosmos gegründet sind.

Das Weltbild

Die Geschichte des Universums wird durch die theoretische Physik modelliert (Abb.). Die Überzeugungskraft des Modells fußt auf der Sicherheit der Theorie und dem Zusammenspiel der Beobachtungen, die allerdings nur von bestimmten Ereignissen in der Geschichte berichten. Solange es keine überzeugende Alternative zur Allgemeinen Relativitätstheorie gibt (und wo sollte sie herkommen, da es doch keine relevante Beobachtung gibt, die sie nicht stützte), ist die Expansion zweifelsfrei zurückzurechnen. Die Expansion geht einher mit einer Abkühlung der Strahlung, die als Wärmebad des Universums anzusehen ist. Der primäre Strahlungskosmos mündet in eine inflationäre Phase, in der alle Teilchen und Störungen unauffindbar verdünnt werden. Diese endet mit einer Rückheizung des Universums und dem Übergang in den sekundären Strahlungskosmos, in dem die heute vorhandenen Baryonen und später die leichten Atomkerne entstehen. Der Strahlungskosmos mündet in unser heute beobachtbares durchsichtiges Universum, in dem die Dichteschwankungen zu Galaxien, Galaxienhaufen und der Netzstruktur heranwachsen. Dieser Übergang zeigt seinen Ablauf in der Hintergrundstrahlung.

Was wir wissen können vom Universum hängt also von der Sicherheit der theoretischen Strukturen ab, die wir in den irdischen Experimenten und den astrophysikalischen Beobachtungen erkennen. Die Theorie muss widerspruchsfrei sein (d.h. wir dürfen bei richtigem Rechnen keine formalen Widersprüche finden) und sie muss anwendbar sein, d.h. den Ausgang von neuen Experimenten und das Ergebnis neuer Beobachtungen richtig vorhersagen. Das ist in vielen auch unerwarteten Fällen gelungen. Dennoch erscheint speziell die Anwendbarkeit durch Bedingungen eingeschränkt, an deren Gültigkeitsgrenzen unter Umständen Verfeinerungen der Theorie erforderlich werden. Aufgabe der Astrophysik ist es gerade, solche Grenzen zu finden und zu analysieren oder auch ihr Fehlen festzustellen. Denn: Eine Theorie, die erklären kann, wie die Sterne oder das Universum funktionieren, kann auf der Erde sicher unbedenklich angewendet werden.

Was vor der Inflation geschah, können wir nicht wissen. Die Inflation ist ja gerade aus der Notwendigkeit abgeleitet, Relikte der vorangegangenen Zeit unauffindbar zu verdünnen. Sie tut das auch, aber eben mit *allen* Relikten. Wir können also keine für diese Zeit relevanten Beobachtungen erwarten. Dennoch muss die Extrapolation der Physik in diese Vorzeit hinein widerspruchsfrei möglich sein. Eine solche Extrapolation ist noch nicht gelungen. Das liegt vor allem daran, dass zu dieser Zeit die Gesetze des Atombaus (die Quantentheorie) zusammen mit der Theorie der Schwerkraft (der Allgemeinen Relativitätstheorie) ein merkwürdiges Problemlabyrinth aufbauen. Die Beschreibung dieses Labyrinths erfordert jedoch einen gesonderten Platz.

Literatur

- Gottlöber, S. und Müller, V.: Wo ist die Antimaterie im Kosmos? *Astronomie und Raumfahrt* 27 (1983/3), 66-68.
Liebscher, D.-E.: Der frühe Kosmos: Chemie mit Urknall, *Astronomie und Raumfahrt* 31 (1994) 4-6.
Liebscher, D.-E.: Der inhomogene Kosmos, *Die Sterne* 72 (1996), 14-28 und 92-107.

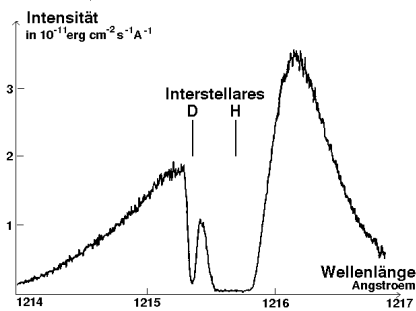


Abbildung 6: Die Signatur des Deuteriums in der Registrierkurve eine Lyman-Alpha-Linie (nach J.Linsky, Astrophys.J.). Die Lyman-Alpha-Emissionslinie eines hellen Sterns (hier Capella) ist durch die hohe Temperatur stark verarbeitet. Eingeprägt ist eine Absorptionslinie mit gleicher Wellenlänge, die aber steile Flanken hat. Sie muss von einer Wasserstoffwolke in der Sichtlinie herrühren. Die Steilheit der Flanken zeigt an, dass die Wolke sehr kalt ist. Sie ist so kalt, dass man eine Begleitlinie identifizieren kann, deren Wellenlänge leicht verstimmt ist. Es ist die Lyman-Alpha-Linie des Deuteriums, dessen Kern doppelt so schwer wie der Wasserstoffkern ist und die Verstimmung hervorruft. Der Vergleich beider Absorptionslinien zeigt, dass bereits auf 100000 Wasserstoffatome ein Deuteriumatom kommt. Das ist extrem viel. Sterne können für diese Konzentration nicht verantwortlich gemacht werden

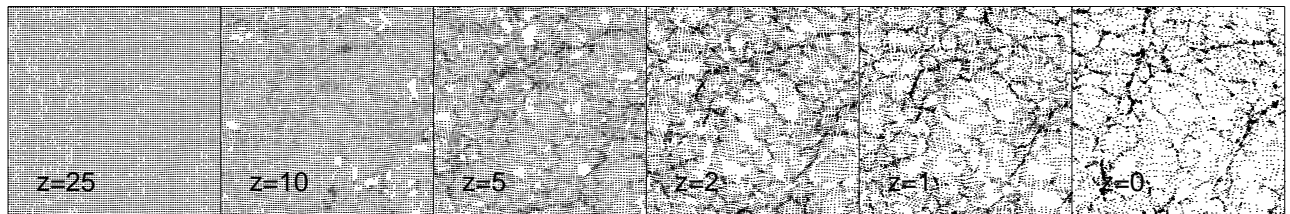


Abbildung 7: Netzstruktur der Galaxienverteilung, wie sie in ihrer Entwicklung numerisch simuliert wird (J.Retzlaff). Die Dichte wird durch eine Punkteverteilung dargestellt. Positionen und Anfangsgeschwindigkeiten der Punkte nehmen die Anfangsschwankungen auf. In angepassten Zeitschritten werden die Änderungen von Ort und Geschwindigkeit der Punkte nach dem Newtonschen Kraftgesetz bestimmt. Genauere Anpassungen der numerischen Techniken an die Besonderheiten des Problems sind immer noch Gegenstand der Forschung, aber das große Bild scheint klar: Die transparente Materie sammelt sich in einer Netzstruktur, die in der sich einbettenden Verteilung der konventionellen Materie optisch sichtbar wird.

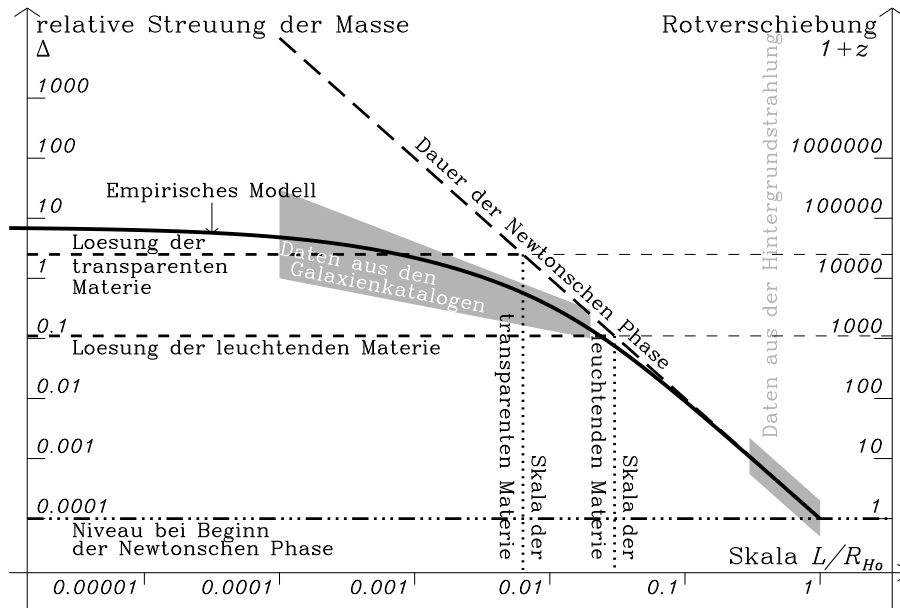


Abbildung 8: Spektrum der Massenschwankungen. Die Schwankungen sind bei Beginn der Newtonschen Kondensationsphase unabhängig von der Skala und erhalten ihre mit der Skalenlänge fallende Größe durch den immer späteren Beginn dieser Newtonschen Phase. Auf kleinen Skalen wird die Kondensation allerdings bis zu einem gewissen Zeitpunkt aufgehalten, so dass der Teil der Newtonschen Phase, in denen die weitere Verstärkung effektiv ist, ein fester Zeitraum wird. Die Grenze zwischen kleinen und großen Skalen wird durch die Hubble-Skala zum Zeitpunkt des Endes dieser Unterdrückung gegeben. Sie ist um so kleiner, je früher dieser Zeitpunkt liegt. Die Beobachtung legt nun einen Zeitpunkt lange vor dem Aufklaren des Universums nahe, d.h. es muss transparente Materie sein, die damals gelöst worden ist

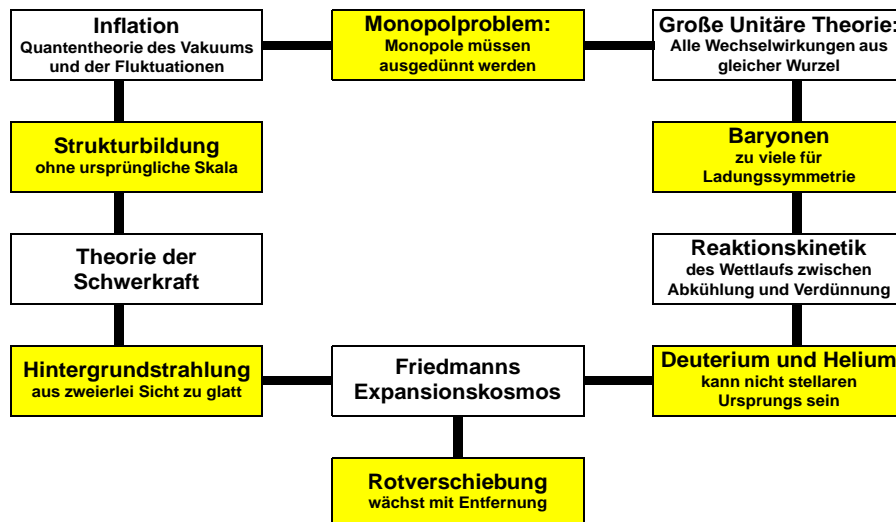


Abbildung 9: Der kosmische Ring. Sechs grundsätzliche Beobachtungen (grau unterlegt) verketteten die theoretischen Schlüsse (weiß unterlegt). Ausgehend von der Beobachtung der entfernungsabhängigen Rotverschiebung ist der Friedmannsche expandierende Kosmos die Hypothese, auf der alle Argumente aufbauen

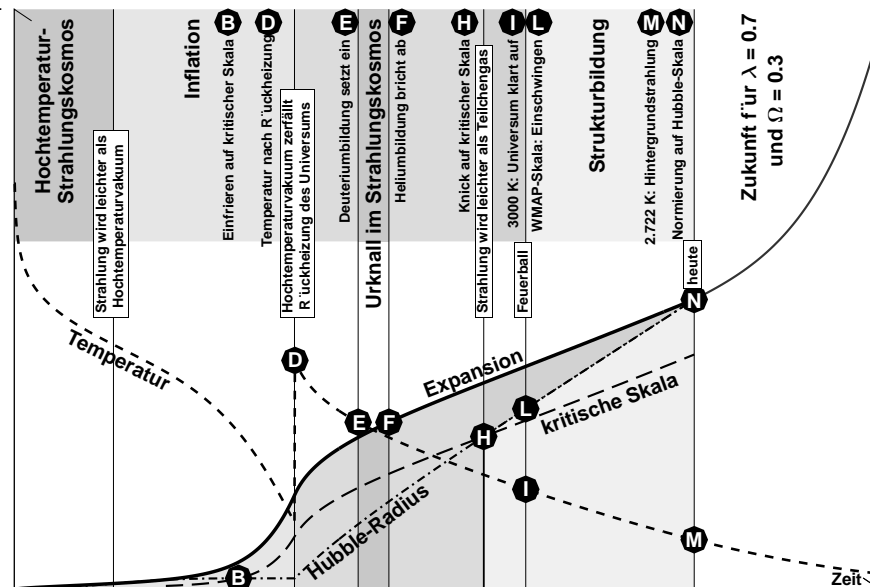


Abbildung 10: Skizze der Geschichte des Universums. Die Abszisse zeigt die Zeit, die Ordinate die anderen Größen, alles in logarithmischer Teilung. Die strichpunktierte Kurve zeigt den Verlauf des Hubble-Radius $R_H = c/H[t]$. Die durchgezogene Kurve skizziert die Expansion, genauer das Anwachsen des Maßstabsfaktors $a[t]$. Sie ist auf den Punkt N normiert, den heutigen Hubble-Radius. Die kurz gestrichelte Kurve zeigt den Verlauf der Temperatur. Mit Ausnahme der Rückheizung bei D ist die Temperatur dem Maßstabsfaktor umgekehrt proportional. M markiert die heutige Temperatur der Hintergrundstrahlung (2.7 K). I ist die Temperatur, zu der das Universum durchsichtig wird, H ist der Zeitpunkt, zu dem Materie und Strahlung gleiches Gewicht haben und die Unterdrückung der Kondensation der dunklen Materie auf kleinen Skalen aufgehoben wird. H markiert deshalb auch die Skala des Knicks im Störungsspektrum. Bei E ist die Temperatur so weit gesunken, dass die Deuteriumbildung beginnen kann, bei F wird sie durch die Verdünnung abgebrochen. Bei B ist die kritische Skala (lang gestrichelte Kurve) erstmals gleich der Hubble-Skala. In dieser Zeit entsteht das gleichförmige Anfangsspektrum der Störungen. L ist das Gebiet im Diagramm, welches das Ergebnis der WMAP-Beobachtung prägt. B, D, E, F, H, I, L und M markieren die Stellen von denen wir beobachtungsseitige Kenntnis vom frühen Universum haben