

Kosmologie – quo vadis

Dierck-E.Liebscher

Astrophysikalisches Institut Potsdam

Im vergangenen Jahrhundert hat sich die Kosmologie von einer Spekulation zu einer beobachtungsgestützten Wissenschaft entwickelt. Die Fragen, die nun endlich gestellt werden können, harren ihrer Antwort im nächsten Jahrzehnt, im nächsten Jahrhundert. Wer kann es wagen, weiter vorauszublicken? Wenn wir über die weitere Entwicklung nachdenken wollen, müssen wir uns zuerst fragen, worin die vergangene, insbesondere die jüngste Entwicklung bestanden hat, was vorher an der Kosmologie Spekulation war, welche Fragen unbeantwortet geblieben sind.

Kosmologie ist zuerst die Wissenschaft vom *Kosmos*, der *Weltordnung*, das heißt, sie muss die Frage untersuchen, ob die Naturgesetze, wie wir sie verstehen, konsistent sind, also jeder denkbaren Extrapolation standhalten, ohne in innere Widersprüche zu geraten. Das ist ein theoretisches Problem, das ohne spezifische Beobachtung auskommen muss, denn Beobachtung kann bestenfalls Inkonsistenz, aber nicht generelle Konsistenz beweisen, es ist aber *keine* Spekulation. So ist – ohne alle weitere Beobachtung – die Newtonsche Theorie der Schwerkraft und das Cusanische Prinzip eines homogen erfüllten Raums mit einer euklidischen Geometrie nicht vereinbar, zumindest nicht bei einer positiven mittleren Massendichte¹. Das ist eine in dieser Hinsicht typisch kosmologische Aussage.

Die Spekulation besteht nun erst in der Unterstellung eines *Universums*, d.h. eines allumfassenden Objekts, das den Kosmos der Naturgesetze auch gegenständlich verwirklicht. Ohne diese Unterstellung ist es sinnlos zu fragen, ob die Modelle, die wir bauen, um die globale Konsistenz der Naturgesetze zu untersuchen, selbst eine nachvollziehbare Bedeutung *neben* der Konsistenzprüfung haben. Zugegebenermaßen ist die Konsistenz eines kosmologischen Modells, dessen Anwendbarkeit an einem realen Objekt gezeigt werden kann, überzeugender als die eines Modells ohne diese Möglichkeit.

Wir überschauen ein Universum jedoch *nicht*. Das Universum besteht ja nicht allein aus einer Konfiguration zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern in der Gesamtheit der in ihm ablaufenden Prozesse. Es ist ein Objekt in Raum und Zeit. Abgesehen von der Überhebung, die es bedeutet, ein Universum bis zu seinen Grenzen in Raum *und* Zeit durchforsten zu wollen, wissen wir heute genauer, dass es Horizonte gibt, die unsere Teleskope prinzipiell nicht überwinden können². Von vornherein können wir nur einen

¹Seit Kant zieht man auch hierarchische Modelle (heute würden wir sie *fraktal* nennen) in Betracht, die man als homogen ansehen kann, deren mittlere Massendichte aber immer kleiner wird, je größer die Räume sind, über die man mittelt.

²Die Entfernung zum Horizont nimmt zwar mit der Zeit zu, aber eben sehr langsam (etwa ein Promille pro Jahrillion).

Teil des unterstellten Universums beobachten. Diesen Teil kann man *Metagalaxis* nennen. Die in der Metagalaxis ablaufenden Prozesse, die Verteilung und Charakterisierung der Himmelskörper in der Metagalaxis sind Gegenstand der Astrophysik, die heute mit der Beobachtung in allen Spektralbereichen die Grenzen der Metagalaxis erreicht. Ist das schon das Universum? Wie sieht es hinter dem Horizont aus?

Wir brauchen wieder ein spekulatives Prinzip, das man vielleicht gut begründen, aber nicht beweisen kann. Es ist das Prinzip, das die kopernikanische Wende in der Naturwissenschaft einleitete, und das man vielleicht am gerechtesten mit dem Namen Nikolaus Cusanus' verbindet. Cusanus schreibt: Die Welt erscheint wie Rad in Rad und Sphäre in Sphäre, nirgends Mittelpunkt oder Umfang, die man auszeichnen könnte³. Und weiter: Daher hat der Mechanismus der Welt sozusagen überall sein Zentrum und nirgends seine Umgrenzung, weil Umgrenzung und Mittelpunkt Gott selbst ist, der überall und nirgends ist⁴. Es gibt keinen Punkt im Universum, der vor anderen bevorzugt wäre, etwa dadurch, das die Naturgesetze dort anders abliefen. Der Volksmund sagt hierzulande, überall wird mit demselben Wasser gekocht, und in Sizilien, überall auf der Welt geht es zu wie zu Hause⁵. Jenseits des Horizonts sieht das Universum wie die Metagalaxis aus, Dichte, Zusammensetzung und Verteilung der Materie sind gleich, die ablaufenden Prozesse werden von den gleichen Naturgesetzen beherrscht. Das bleibt eine nie prüfbare Spekulation, aber ohne sie ist es nicht möglich, von den beobachteten Eigenschaften der Metagalaxis auf die des Universums zu schließen und einen Vergleich mit den Modellen der Kosmologie zu unternehmen. Ohne dieses *kosmoslogische Prinzip* bleibt die Kosmologie eine interne Konsistenzprüfung, deren Modelle ohne reales Gegenstück auskommen müssen. Diese Spekulation bleibt.

Einstein war der erste, der ein kosmologisches Modell mit positiver mittlerer Massendichte konstruierte, welches das oben angeführte Newtonsche Paradoxon auflöste und die Gravitationstheorie mit dem Cusanischen Prinzip versöhnte. Die Allgemeine Relativitätstheorie hatte gezeigt, dass das Gravitationsfeld Ausdruck der Krümmung der *Welt*⁶ ist, und dass man eine Krümmung des Raums nicht ausschließen darf, wenn man eine Krümmung der Welt akzeptieren muss. Einstein versuchte also ein kosmologisches Modell, in dem der Raum positiv gekrümmt ist wie eine Kugelfläche, keine Grenzen hat, aber ein endliches Volumen behält. Es war Friedmann, der zeigte, dass das Newtonsche Paradoxon auch in unendlichen Räumen (auch solchen mit *negativer* Raumkrümmung) lösbar ist, dann aber der Raum expandieren muss. Der Nachweis dieser Expansion war die erste Beobachtung,

³*Mundus apparet quasi rota in rota et sphaera in sphaera, nullibi habens centrum vel circumferentiam, ut praefertur* (De docta ignorantia, Absatz 161).

⁴*Unde erit machina mundi quasi habens undique centrum et nullibi circumferentiam, quoniam eius circumferentia et centrum esse deus, quid est undique et nullibi* (De docta ignorantia, Absatz 162).

⁵*Tuttu lu munnu è comu casa nostra.*

⁶Der Begriff *Welt* wurde von Minkowski geprägt und bezeichnet das vierdimensionale Produkt aus Raum und Zeit.

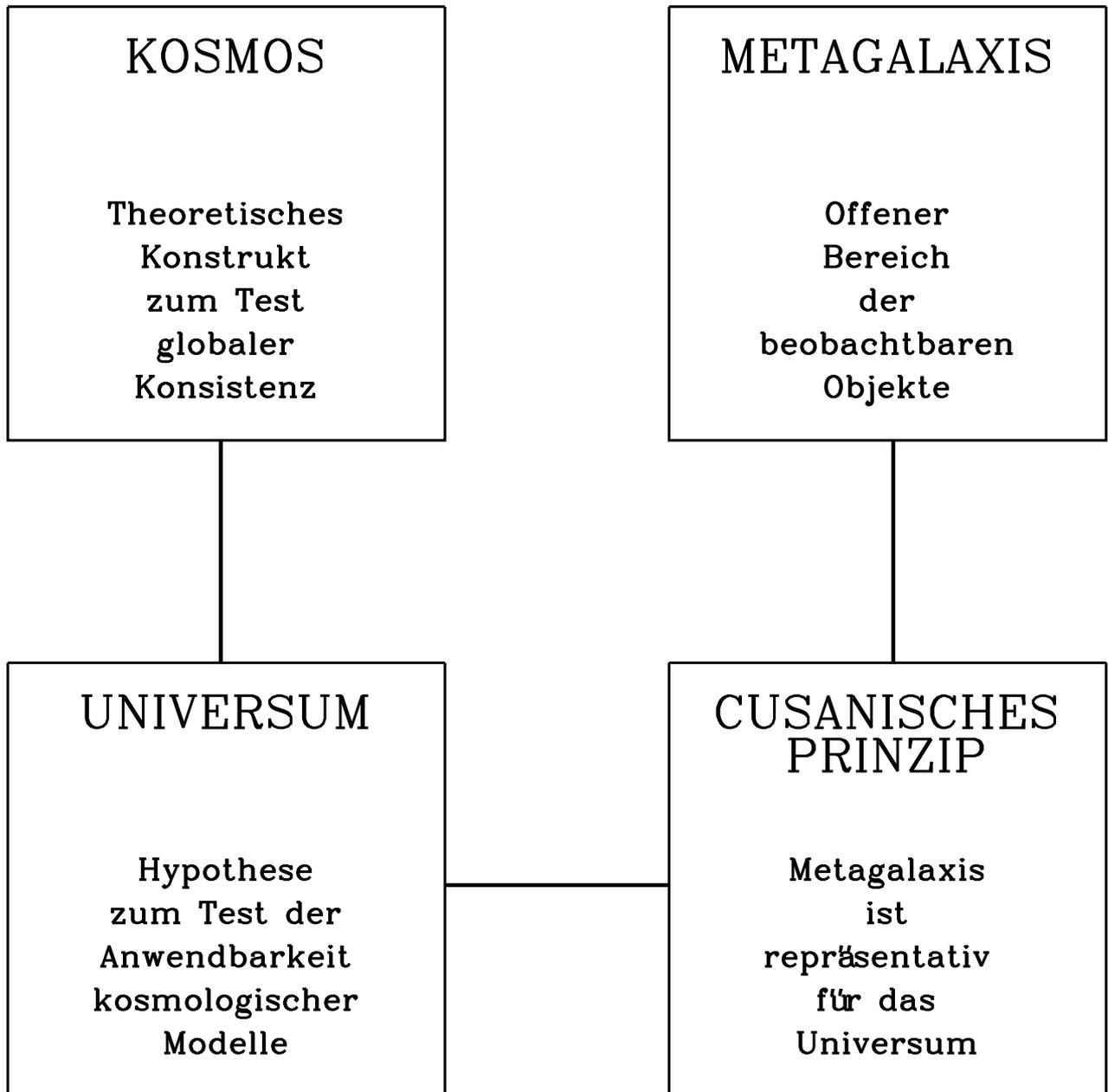


Abbildung 1: Kosmos, Universum, Metagalaxis

Das Schema wiederholt das Argument im Text, um die Stellung des Cusanischen Prinzips zu verdeutlichen.

die direkt auf kosmologische Modelle Bezug nahm. Hubble fand die Fluchtbewegung der Galaxien, je weiter entfernt, desto schneller, und diese Fluchtbewegung ist zwanglos als Friedmannsche Expansion des Raums zu verstehen.

Die Expansion des Universums bedeutet, dass das Universum eine Geschichte hat, die es sowohl von Seiten des Modells als auch von Seiten der Beobachtung zu untersuchen gilt. Geschichte heißt nun nicht, dass etwa heute andere Gesetze gelten als vor einigen Milliarden Jahren, aber die Struktur und Zusammensetzung der Materie ändert sich, d.h., die Gesetze finden sich ändernde Objekte vor und müssen sich unter Bedingungen bewähren, die sich selbst verändern und damit immer wieder andere Aspekte der universellen Gesetze widerspiegeln. Mit der Berechnung und Bestätigung dieser Geschichte wurde die Kosmologie zu einem Wissenschaftszweig von erheblicher Bedeutung.

Gamow vermutete als erster, dass die Expansion des Universums bis auf sehr dichte und heiße Zustände zurückverfolgt werden *muss*. Dann ist aber der Schluss unausweichlich, dass die Geschichte des Universums eine Geschichte der Kondensationen in einer sich ständig abkühlenden und sich ständig verdünnenden Umgebung darstellt. Dabei muss es eine Art Wettlauf geben: Erst die Abkühlung ermöglicht Kondensation, aber die Verdünnung unterbindet sie wieder, unter Umständen *bevor* sie durch Abkühlung ermöglicht wird. Deshalb gibt es immer Reste, die nicht mehr umgesetzt werden können. Solch ein Rest sind die Kerne des schweren Wasserstoffs, von denen einer auf etwa 10^5 Wasserstoffkerne kommt. Sie können sich erst bilden, wenn die Temperatur unter 10^9 K gefallen ist und werden in Heliumkerne weiterverarbeitet, bis die Verdünnung dies unterbricht. Heliumkerne könnten auch weiter kondensieren, aber dazu ist das Universum schon zum Zeitpunkt der Bildung des Heliums zu dünn. Die Sterne haben etwas von diesen Prozessen nachgeholt, bis jetzt ist aber ein kosmologisch bedeutsames Ergebnis noch nicht erreicht. Die Benutzbarkeit der Rechnungen zur primordialen Kernsynthese zeigt, dass wir die Expansion bis auf den Faktor 10^{-9} zurückverfolgen dürfen.

Bis zu einer relativen Größe von 10^{-3} ist das Universum undurchsichtig, danach klart es auf und die Strahlung dieser Zeit kommt unter Rotverschiebung⁷ ziemlich ungestört zu uns. Wir beobachten ihren elektromagnetischen Teil als Mikrowellenhintergrundstrahlung. Diese Strahlung ist Wärmestrahlung. Sie hat heute eine Temperatur von 2.73 K. Ihre Richtungsunabhängigkeit kündigt von einer erstaunlichen Gleichförmigkeit des Universums in der Zeit des Aufklarens: Nur 10^{-5} sind die Abweichungen von völliger Einförmigkeit. Das ist zum einen eine Bestätigung der Benutzbarkeit des kosmologischen Prinzips, Zeichen der Einfachheit, stellt aber zugleich ein neues Problem.

Das Problem besteht darin, dass die Hintergrundstrahlung *zu gleichförmig* ist. Man muss erwarten, dass Kondensationskeime der relativen Größe von 10^{-5} bis heute nur auf 10^{-2} wachsen, die Materieverteilung also *immer noch* ziemlich gleichförmig sein müsste.

⁷Die Rotverschiebung entsteht mit der Expansion des Universums und ist äquivalent zur adiabatischen Abkühlung der Strahlung.

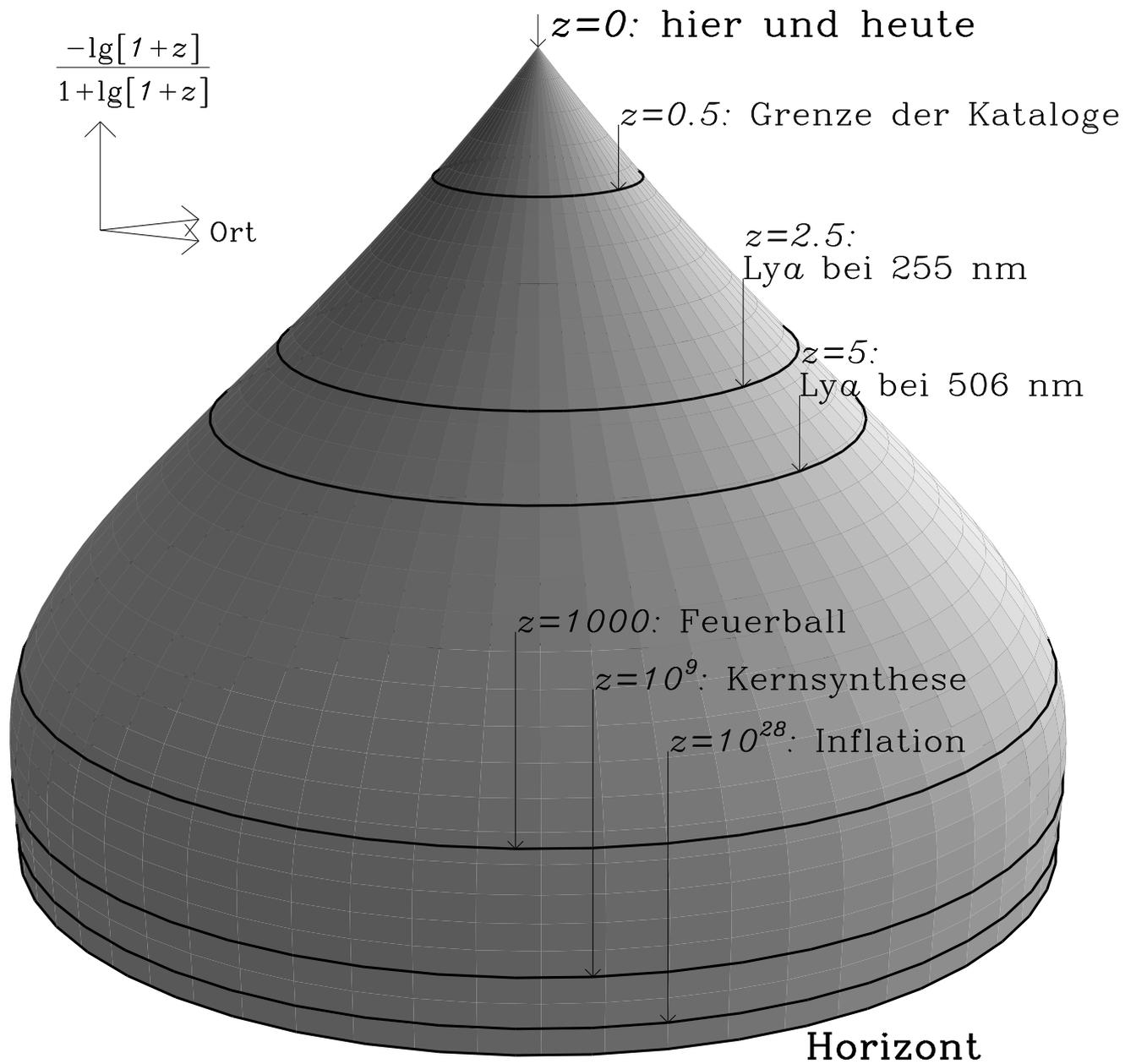


Abbildung 2: Blick in die Tiefe von Raum und Zeit

Die Abbildung zeigt wie das Gesichtsfeld wächst, je tiefer wir in die Vergangenheit sehen, und markiert einige wichtige Zeiten. Sie verdeutlicht auch den absoluten Horizont heutiger Beobachtungen. Die Ortskoordinaten sind expansionsbereinigt, d.h., die Koordinaten etwa einer Galaxie ohne Pekuliarbewegung ändern sich mit der Zeit *nicht*, so wie auch geographische Breite und Länge konstant blieben, wenn sich der Erdradius änderte..

Statt dessen ist der intergalaktische Raum im Vergleich zu den Galaxien leer, so wie der interstellare Raum im Vergleich zu den Sternsystemen und der interplanetare Raum im Vergleich zu den Planeten leer sind. Es muss Kondensationskeime gegeben haben, die sich im Beobachtungsbereich der Hintergrundstrahlung nicht zeigen: Wir nennen sie *dunkle Materie*. Sie darf nicht strahlen, darf die Hintergrundstrahlung nicht unmittelbar beeinflussen, darf in der Hintergrundstrahlung gerade *nicht* sichtbar werden. Beobachtbar wird sie zunächst nur durch ihre Masse, durch ihre Schwerewirkung auf die sichtbare Materie, die zu strahlen anfängt, wenn sie heiß genug ist. Der Schluss von der Schwerewirkung auf die Existenz noch nicht beobachteter Materie muss auch bei Galaxien gezogen werden, die in den Außenbereichen schneller rotieren, als sie im Gleichgewicht eigentlich sollten, und er muss bei Galaxienhaufen gezogen werden, deren Mitglieder sich aufgeregter bewegen, als das im Gleichgewicht mit der Schwere der sichtbaren Materie möglich sein sollte⁸, und schließlich zeigen die Bilder der Gravitationslinsen, dass das Schwerfeld der Linsen nicht nur von der leuchtenden Materie stammen kann. Wenn man dunkle Materie in Betracht zieht, scheint nun das Bild der gravitativen Kondensation der Materie zu großen kosmischen Strukturen im Groben zu stimmen.

Nichts ist der Weisheit verhasster als allzu viel Scharfsinn⁹, so wird Seneca von E.A.Poe im Motto seiner berühmten Erzählung *Der gestohlene Brief* zitiert. Dank der Beobachtung der Verteilung der Galaxien in der Metagalaxis, der Verteilung kalter Gaswolken zwischen ihnen, der Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien und der präzisen Bestimmung der Ungleichförmigkeit der Hintergrundstrahlung können wir die Modelle der Strukturentstehung viel genauer beurteilen als das grobe theoretische Bild beschreibt. Dies ist das Ergebnis der Anstrengungen der letzten beiden Jahrzehnte. Rechnen wir nämlich genauer nach, finden wir viele ärgerliche Unstimmigkeiten. Es gibt jedoch auch großartige Bestätigungen der allgemeinen Vorstellung. So kann man im Spektrum der Ungleichförmigkeit der Hintergrundstrahlung den Abdruck eines Einschwingvorgangs (das sogenannte Doppler-peak), der stattgefunden haben muss, als die sichtbare Materie auf die dunklen Kondensationskeime fiel, tatsächlich sehen. Aber es ist problematisch, etwa das schon *sehr frühe* Auftreten hochkondensierter Objekte (Quasare, Schwarze Löcher) mit der immer noch nicht abgeschlossenen Kondensation der Galaxien, d.h., dem häufigen Auftreten von Unterstrukturen und den großräumigen Geschwindigkeitsfeldern, zu vereinbaren.

Die Gleichförmigkeit der Hintergrundstrahlung ist auch für die Beschreibung der Geschichte des Universums *vor* dem Aufklaren ein Problem. Wenn man nämlich die Expansion bis auf 10^{-30} zurückrechnen darf, sollten die gewöhnlichen thermischen Schwankungen

⁸Solch ein Schluss war auch schon erfolgreich, Neptun und Pluto wurden auf Grund solcher Hypothese gefunden. Man kann sich dabei auch irren: Der vor der Allgemeinen Relativitätstheorie noch unerklärte Rest der Periheldrehung des Merkur durfte nicht einem noch ungesehenen Planeten angelastet werden, obwohl bei der Durchforstung des sonnennahen Raums wurde schon eine Entdeckung vermutet und der neue Planet auf den Namen Vulkan getauft wurde. Dennoch war alles eine Täuschung. Hier war es die Theorie der Schwerkraft, die korrigiert werden musste.

⁹*Nihil sapientiae odiosius est acumine nimio.*

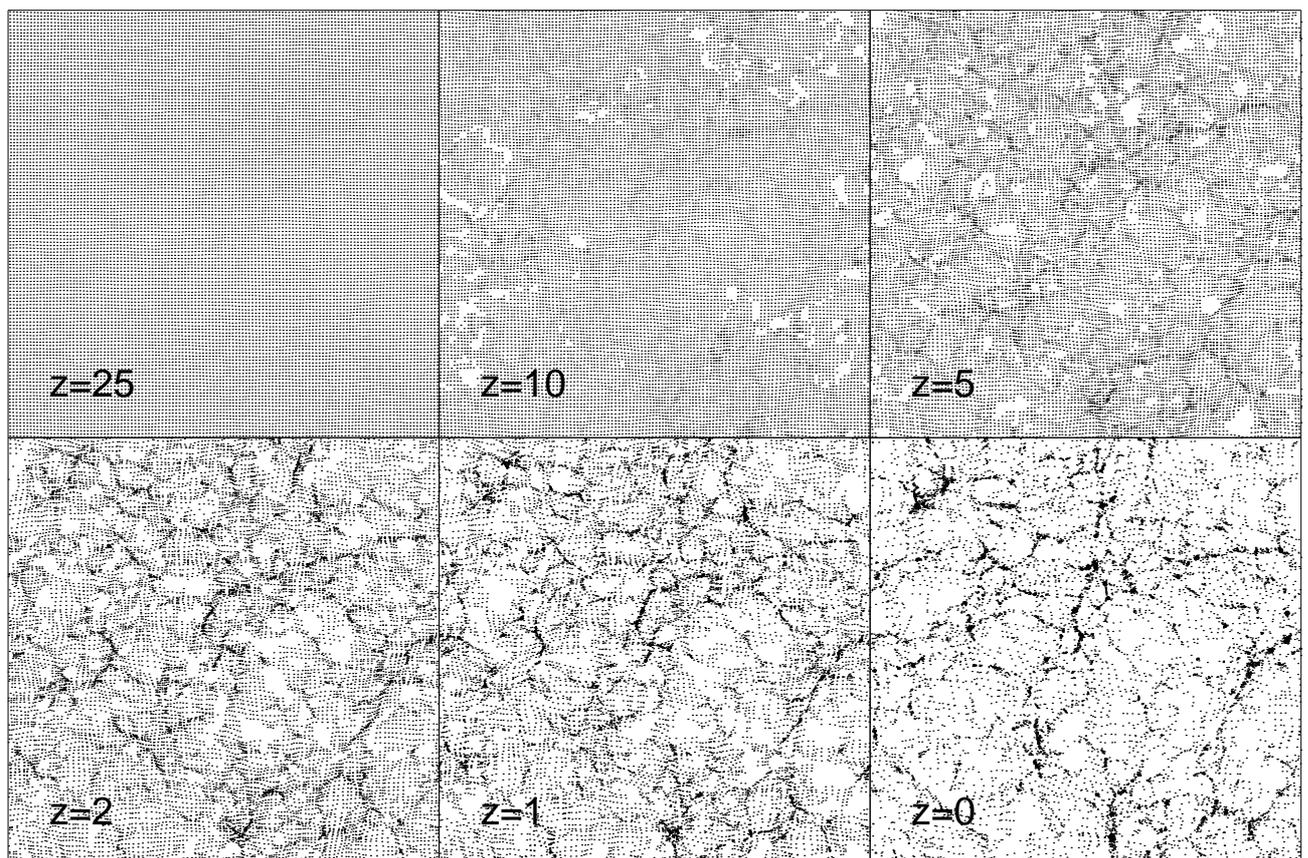


Abbildung 3: Gravitative Kondensation

Die Abbildung zeigt, wie die gravitative Kondensation in einer numerischen Simulation nachgestellt wird. Bei einer Rotverschiebung von $z = 25$ sieht man eigentlich noch keine Struktur, sie ist aber schon in den Geschwindigkeiten der einzelnen Punkte vorgezeichnet. Im Laufe der Entwicklung, d.h. mit abnehmender Rotverschiebung, werden die Strukturen deutlicher, bis wir heute die großen Hohlräume in der Galaxienverteilung und die Sammlung der Galaxien auf den Wänden und in den Knoten erkennen. Die Abbildung wurde von J.Retzlaff zur Verfügung gestellt.

einen gleichförmigen Zustand zum Zeitpunkt des Aufklarens unerreichbar machen. Was hat das Universum so geglättet? Wenn man die Expansion bis auf eine Temperatur von entsprechenden 10^{30} K zurückrechnen darf, sollte ein Zustand geherrscht haben, in dem die fundamentalen Wechselwirkungen *symmetrisch*¹⁰ waren. Dann müssten aber Fossilien (man kann sie mit dem Namen *Monopole* zusammenfassen) aus der Zeit der Symmetriebrechung übrigbleiben, die dem Universum ganz andere Eigenschaften geben als wir beobachten. Wo sind diese Fossilien geblieben?

Seit etwa zwanzig Jahren favorisiert man ein kosmologisches Modell, in welchem das Vakuum der symmetrischen Phase mit seiner hohen Energiedichte und seinem *negativen* Druck vor seinem Zerfall in gewöhnliche (und auch dunkle) Materie eine exponentielle Expansion (sie heißt *Inflation*) treibt, die die Monopole und thermischen Anregungen so verdünnt, dass man vor dem Zerfall mit einem Zustand am absoluten Nullpunkt der Temperatur rechnen kann. In diesem Modell werden die quantenphysikalischen Nullpunktschwankungen gerade zu den kleinen Ungleichförmigkeiten, die wir in der Hintergrundstrahlung beobachten. So weit, so gut.

Schnell ist eine Geschichte erzählt, nicht so schnell eine Tat vollendet, sagt ein russisches Sprichwort¹¹. Es ist der genaue Ablauf des hypothetischen Zerfalls des hypothetischen Hochtemperaturvakuums, der das Bild der heute beobachteten großen Strukturen formt, und da gibt es viele Varianten und viel Diskussion. Es wird eine Schlüsselbeobachtung geben, nämlich die Verfeinerung des Spektrums der Ungleichförmigkeiten der Hintergrundstrahlung, die mit den Folgesatelliten von COBE¹² erreicht werden soll. Dann werden wir den Zustand zum Zeitpunkt des Aufklarens genauer bestimmen können. Das wird dann seinerseits wieder Rückschlüsse auf die Frühgeschichte gestatten, genauer auf die Zeit des Zerfalls des Hochtemperaturvakuums. Was aber war davor?

Die inflationäre Expansion verdünnt alle Strukturen aus der Zeit davor bis zur Unkenntlichkeit. Das war ja der Grund, eine solche Entwicklungsphase überhaupt vorzuschlagen und in Betracht zu ziehen. Wir dürfen uns also nicht wundern, wenn das auch Erfolg hat und wir somit *nicht* erwarten können, irgendetwas aus der Zeit davor je zu beobachten. Allerdings muss es konsistente Modelle für die Geschichte dieser Zeit geben, die auf eine geeignete Inflation und ein geeignetes Ende der Inflation führen, denn dieses Ende ist es ja, das sich in den Ungleichförmigkeiten der Hintergrundstrahlung ausdrückt. Die Suche nach konsistenten Modellen auf der Basis der bekannten Physik ist aber ohnehin die erste Aufgabe der Kosmologie. Was wissen wir? Wir wissen, dass die einzige erfolgreiche Gravitationstheorie die Allgemeine Relativitätstheorie ist (so sehr sich Einstein auch darüber gewundert hätte). Wir wissen, dass für hohe Teilchenenergien und kleine Abstände nur die Quantentheorie zuverlässige Resultate liefert und dies auch regelmäßig

¹⁰Symmetrisch bedeutet hier einfach von gleicher Stärke.

¹¹*Skoro skazka skazyvaetsja, nesgoro delo delaetsja.*

¹²Cosmic Background Explorer startete 1989 und erreichte 10° Winkelauflösung, die geplanten MAP (2000) und Planck Surveyor (2007) werden eine Winkelauflösung von 0.1° erreichen.

Erfolg hat. Was können wir Anderes erwarten, als dass wir Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie in irgendeiner Form *vereinigen* müssen? Hier haben wir nun ein theoretisches Programm vor uns, wie es Einstein etwa hatte, als er die Newtonsche Theorie der Schwerkraft mit der Relativitätstheorie vereinen musste und er ohne alle beobachtungsseitige Basis beginnen musste, bevor er das Prinzip der Gleichheit von schwerer und träger Masse als Richtschnur erkannte.

Warum ist die Vereinigung von Quantentheorie und Gravitationstheorie so schwierig? Die Quantentheorie beschreibt die Entwicklung des Zustands der betrachteten Systeme in der Zeit. Die Allgemeine Relativitätstheorie impliziert aber, dass Zustand (nunmehr Struktur und Eigenschaften des *Raums*) und Zeit nicht ohne weiteres unterschieden werden können, eine Unterscheidung also eigentlich künstlich ist und dies auch berücksichtigen muss. Im einfachsten Fall versucht man, die Regeln der Quantentheorie auf eine zeitliche Folge von Raumstrukturen zu übertragen, wobei man berücksichtigt, dass verschiedene solche Folgen den gleichen Ablauf, die gleiche *Welt* beschreiben. Wir suchen dann Bahnen oder Fahrpläne durch den *Superraum* der Raumstrukturen. Was entsteht, ist ein Gesetz für Wahrscheinlichkeitsverteilungen in diesem Superraum, so wie die Quantenmechanik etwa Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und deren Veränderung im gewöhnlichen Raum bestimmt. Die erstaunlichste Entdeckung bei diesem Verfahren ist, dass die Gleichungen *keine zeitliche Entwicklung* beschreiben. Es geht um *eine* Verteilung im Superraum der denkbaren *räumlichen* Strukturen. Die Zeit verschwindet aus der Theorie und versteckt sich in der Wahlfreiheit der Beschreibung, die gerade dadurch zustande kommt, dass Raum *und* Zeit klassisch so eine unauflösbare Einheit bilden. Darin besteht das Rätsel der absoluten Frühgeschichte, und es ist nicht gelöst. Wenn auch immer wieder einmal laut ins Horn gestoßen wird, die Sau ist *nicht* tot.

Wenn man den Verkündern einer baldigen *Theory of everything* glauben darf, werden wir bald alles wissen. Damit sind wir am Ende des Jahrhundert, im letzten Jahr des Jahrtausends, an einer Stelle angelangt, an der sich auch v.Jolly glaubte, als er vor etwas über hundert Jahren dem Studenten Max Planck den berühmten Rat gab, nicht erst noch mit der Physik anzufangen, wo doch bis auf kleine Schönheitsfehler alles bekannt sei. Ich glaube eher George Bernhard Shaw, von dem das *Aperçu* stammt, Wissenschaft schlage doch immer fehl, nach jeder Antwort habe man mehr Fragen als vorher. Dabei hat er noch abgesehen von unerwarteten Entdeckungen. Manche Entdeckung ist dabei nur deshalb unerwartet, weil die Neigung zu gering ist, vermeintliche Spekulationen ernsthaft zu diskutieren. Hubbles Entdeckung der Fluchtbewegung der Galaxien war unerwartet, weil die allgemein-relativistischen kosmologischen Modelle nur von wenigen rezipiert worden waren, ebenso wie Gamows Vorstellung von einer heißen Frühphase mit dem abwertenden Spitznamen *Big bang* belegt wurde, bevor sie mit der Entdeckung der ebenso unerwarteten Mikrowellenhintergrundstrahlung ernst genommen werden musste und sich der Spitzname in einen Markennamen wandelte. Ich glaube eher, dass es noch viele überraschende Entwicklungen geben wird und die Kosmologie dann ein Feld bleibt, in dem neue Physik getestet werden kann und muss.

Was wird uns also in den nächsten zehn oder hundert Jahren erwarten? Wie immer, wächst die Erkenntnis an zwei Fronten. Die eine, sie erscheint uns im allgemeinen fassbarer, ist der Zuwachs an Beobachtungen und Beobachtungsmöglichkeiten. Eventuell werden wir nach erfolgreichen Starts von MAP und Planck Explorer in der Lage sein, das Spektrum der Inhomogenitäten der Hintergrundstrahlung so genau zu fixieren, dass der Verlauf der Vakuumenergie in der Zeit des Zerfalls des Hochtemperaturvakuum, d.h. der Zeit des Endes der Inflation, berechnet werden kann. Das wird ein wichtiger, vielleicht entscheidender Beitrag zur Präzisierung der Physik der extrem hohen Teilchenenergien (10^{15} GeV) sein. Vielleicht werden wir nach Fertigstellung der großen Galaxienkataloge wie dem Sloan Digital Survey in der Lage sein, die Skala genauer zu fixieren, auf der die Metagalaxis als homogen angesehen werden kann. Heute vermuten wir, dass dies 100 Mpc sind, aber sicher ist es nicht, und die Stimmen sind noch nicht verstummt, die Hierarchien in noch größeren Dimensionen zu erkennen glauben. Sie erhalten Unterstützung von mancher Überzeugung, die Symmetriebrechung, welche die Inflationsphase des Universums ermöglicht und steuert, führe auf eine Bereichsstruktur, deren innere Grenzen wir nur deshalb nicht sehen, weil sie hinter dem Horizont liegen. Zwischen den verschiedenen Bereichen des Universums könnten dann wie in den Weißschen Bezirken eines Ferromagneten, Unterschiede auftreten, nun nicht mehr in der Magnetisierungsrichtung, sondern in der Struktur der Elementarteilchen, die als Ergebnis der Symmetriebrechung entstehen. Das heißt aber nun, dass die physikalischen Gesetze in der von uns beobachteten Metagalaxis nicht mehr überall im Universum die gleichen sind – ein Grund mehr, die Überzeugung zu stärken, dass wir keine Chance haben, über das Universum *vor* der Inflation beobachtungsseitige Feststellungen treffen zu können.

Das Bild der Metagalaxis ist dabei, sehr viel bunter zu werden, als es sich das menschliche Auge vorstellen kann. Es ist nicht nur so, dass die Teleskope mehr Licht sammeln (Faktor 100) als zu Beginn unseres Jahrhunderts, oder dass unsere Detektoren 100 mal effektiver sind als die Photoplatte, die vor 100 Jahren die neue Technik (und das für lange Zeit) war, wir können auch in den anderen Spektralbereichen, vom Radio- und Infrarotbereich über das Ultraviolette bis in den Röntgen- und Gammabereich, empfindlich und genau beobachten. Vielleicht gelingt es auch in der kommenden Zeit, auch Neutrinos und Gravitationswellen zu einem Beobachtungswerkzeug zu entwickeln. Neutrinos erzählen uns bereits etwas über das Sonneninnere, allerdings in einer noch unklaren und nicht völlig entzifferten Sprache. Gravitationswellen sind noch nicht explizit nachgewiesen, obwohl sie implizit bestätigt sind¹³. Im Bereich der ganz zukünftigen Hoffnungen bleibt die Identifizierung der dunklen Materie. Auch wenn ihr Gewicht quantitativ noch nicht sicher ist, es bleibt etwas zu finden, sei es Neptun oder Vulkan, sei es Materie, die in unser Theorienschema passt oder sei es eine veränderte Sicht auf die Theorie des Schwerfeldes. Jeder neue Satellit, jedes neue Teleskop schärfen den Blick und entdecken kosmische Objekte und Vorgänge, die erklärt werden müssen. Viele dieser Entdeckungen sind einfach Astro-

¹³Die Bahnänderung der Doppelpulsare sprechen für den vorausgesagten Energieverlust durch Gravitationsstrahlung.

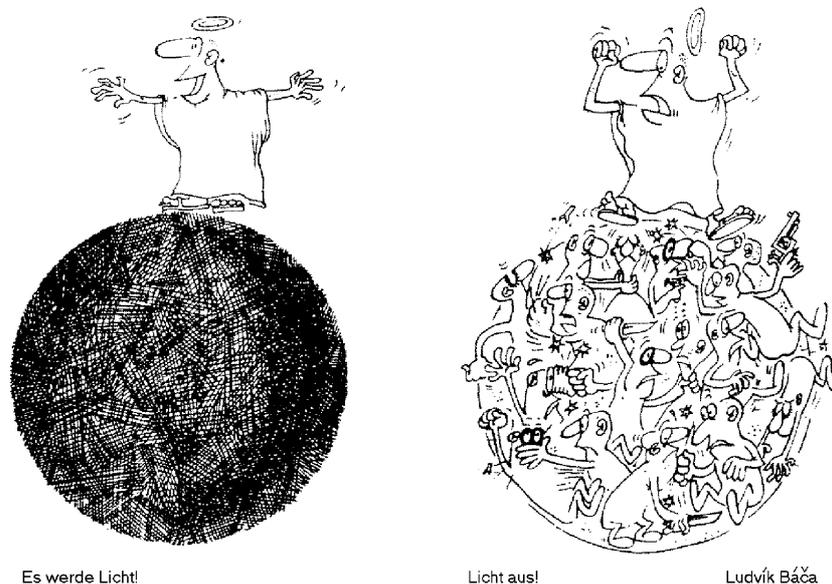


Abbildung 4: Anfang und Ende der Welt

physik, viele sind aber Feststellungen über Zustand und Entwicklung der Metagalaxis, die wir ja für das Universum nehmen müssen, und fordern nach Erklärung in Hinsicht auf die Kosmologie.

All diese Entwicklung kann aber nicht die Untersuchung der Konsistenzfrage ersetzen, und das ist zuallererst die Frage nach dem Zusammenspiel der Quanteneigenschaften und der gravitationsbedingten geometrischen Eigenschaften der Welt. Diese ist nun nicht ausschließlich für das Universum vor der Inflation von Bedeutung sondern auch für die Konsistenz der unitären Theorien im Elementarteilchengebiet. Die Wechselbeziehung zwischen Kosmologie und Elementarteilchenphysik, die mit der Rechnung zur primordialen Kernsynthese, Gamows Urknall, begann, setzt sich hier fort. Hier wird das Vorstellungsvermögen allerdings weit mehr gefordert als bei den Bildern, die wir von der Objekten der Metagalaxis gewinnen. Schließlich braucht die theoretische Entwicklung eine Sprache, in der das einzelne Zeichen wesentlich mehr zusammenfasst, als es ein Wort oder Satz der Umgangssprache überhaupt kann. Sprachen aber muss man lernen. Ist man nicht geübt in der Sprache der Theorie, sagt man leichthin, das sei zu schwierig, es ist aber weniger schwierig als fremd, also erlernbar, so wie Ungarisch oder Chinesisch uns fremd, aber erlernbar sind.

Immerhin gibt es grundlegende Fragen, und diese wenigstens können in der Alltagssprache gestellt werden. Eine haben wir schon angedeutet: Woher kommt die Zeit? Woher kommt die Verschiedenheit von Raum und Zeit? Woher kommt die Richtung des Zeita-

blaufs? Wir haben schon angedeutet, dass in den ersten Versuchen der Formulierung einer quantisierten Gravitationstheorie zeitfreie Gleichungen entstehen. Das Problem ist aber schon älter. Bereits in der klassischen Himmelsmechanik kann man zu Formulierungen kommen, in denen die Zeit eine nachgeordnete Rolle zu spielen scheint. Die Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik können so formuliert werden, dass sie Bahnen durch den Raum bestimmen, ohne deren Zeitverlauf festzulegen. Der Ablauf der Zeit wird danach so bestimmt, dass ein Erhaltungssatz der Energie gelten kann. Merkwürdigerweise war dieses Verfahren vor der Erfindung der Atomuhr überhaupt das beste Verfahren, die Zeit zu definieren. Sie heißt *Ephemeridenzeit* und wird direkt durch Beobachtung des Orts der Gestirne auf ihrer Bahn bestimmt. Ist die Zeit also solch ein sekundäres Phänomen, und wie muss dieses richtig beschrieben werden? Ich glaube, Fragen dieser Art werden noch lange ihrer Lösung harren, und hier gilt ganz sicher, dass jeder Lösungsschritt neue Fragen aufwerfen wird oder es erst ermöglichen wird, geeignete Fragen zu stellen.