

Annäherung an den Ursprung des Universums aus physikalischer Sicht

Vortrag im Rahmen der Veranstaltung
IN PRINCIPIO
Maria Saal, 2. 7. 2010

Franz Embacher
Fakultät für Physik der Universität Wien

Einleitungsworte

Ich möchte Ihnen im Folgenden ein bisschen darüber erzählen, wie sich die Physik der Frage nach dem Ursprung des Universums annähert. Thematisch muss ich mich dabei auf wenige Aspekte beschränken, möchte aber doch einen Eindruck vermitteln, wie die empirischen Belege, die der Kosmologie zur Verfügung stehen, und wie die Argumentationen, die zur Hypothesenbildung in diesem Gebiet führen, beschaffen sind.

Das expandierende Universum

Nicht einmal hundert Jahre ist die Erkenntnis her, dass viele der diffusen Flecken am Nachthimmel, die zuvor als *Nebel* bezeichnet wurden, in Wahrheit Sternsysteme wie unsere Milchstraße sind, zunächst *Welteninseln* genannt, dann *Galaxien*, bestehend aus Hunderten von Milliarden von Sternen und selbst Hunderte von Milliarden an der Zahl. Die Größe des Universums, oder zumindest des Teils, den wir sehen können, war damit zu unermesslichen Milliarden von Lichtjahren angestiegen. (Das Licht benötigt 8 Minuten, um bis zur Sonne zu gelangen – die Strecke, die es in einer Milliarde Jahren zurücklegt, steckt die Größenordnung ab, mit der es die Kosmologie zu tun hat). In den 1920er Jahren wurde von Carl Wirtz und Edwin Hubble erkannt, dass sich alle – ausgenommen die allernächsten – Galaxien von unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von ihr entfernt sind. Dieses Phänomen der *Galaxienflucht* wurde zum zentralen Paradigma der Kosmologie: Das Universum *expandiert*. Gegenwärtig wird es in jedem Jahr um 7 Milliardstel Prozent größer.

Der Urknall

Die Vorstellung eines expandierenden Universums regt Physiker sofort zum Rechnen an, und zwar zum radikalen Rechnen – zurück in die Vergangenheit, zu Zuständen, in denen es heißer und dichter war als heute, bis zum jenem hypothetischen Zeitpunkt, in dem alle Entfernungen auf Null geschrumpft sind – dem *Urknall*. Und ausgehend vom Urknall wieder zurück in die Zukunft, um die Geschichte des Universums, dessen Lebensalter auf 14 Milliarden Jahre geschätzt wird, zu rekonstruieren.

Der frühe Zustand der Materie kann vielleicht am besten als heißes, aber langsam abkühlendes Feuer charakterisiert werden – die Physik sieht ihn als Gewimmel bekannter

und unbekannter Elementarteilchen, unter denen sich neben den Photonen, den Teilchen des Lichts, auch die Elektronen, Protonen und Neutronen befanden, aus denen die Materie, die uns umgibt, und auch wir selbst bestehen. Bereits eine Millionstel Sekunde nach dem Urknall war das Universum auf Temperaturen abgekühlt, bei denen sich die Materie in einer der heutigen Physik bekannten Weise verhält. Nach 3 Monaten war es gerade einmal so heiß wie heute das Zentrum der Sonne, und nach knapp 400000 Jahren war eine Temperatur von 3000 Kelvin (also 3000 Grad über dem absoluten Nullpunkt) erreicht.

Die Rekombination

Zu diesem Zeitpunkt konnten sich zum ersten Mal *Atome* bilden. Atome sind elektrisch neutral, und das Licht lässt sich von ihnen wesentlich schlechter einfangen als von den elektrisch geladenen Elektronen und Protonen. Mit anderen Worten: Das Universum wurde *durchsichtig*. Die Kosmologie bezeichnet diese Phase des Universums als *Rekombination* – ein Vorgang, der jenem ähnelt, den wir an der Spitze einer Kerzenflamme beobachten können, wo das undurchsichtige Feuer in durchsichtige Luft übergeht. Ab nun konnte sich das Licht mehr oder weniger ungehindert ausbreiten. Während sich die Materie in der Folgezeit unter der Wirkung ihrer eigenen Schwerkraft zu Klumpen zusammenballte, aus denen dann die Galaxien und Galaxienhaufen und – im Kleinen – die Sterne und Planeten entstanden, bildete das Licht ein Bad von Photonen, die sich kreuz und quer durch das Universum bewegten – und auch heute noch tun!

Die kosmische Mikrowellenstrahlung

Diese Idee wurde im Jahr 1948 von George Gamow, Ralph Alpher und Herbert Herman vorgetragen: Wenn die Urknallhypothese stimmt, so sollte das Universum von einer Strahlung erfüllt sein, die sich überall mit der gleichen Stärke und aus allen Richtungen gleichermaßen bemerkbar macht, und die direkt aus jener Epoche stammt, in der das Universum durchsichtig wurde. Allerdings sollte sie heute nicht als "normales" Licht zu sehen sein – genau genommen gar nicht als Licht –, sondern als Mikrowellenstrahlung, also als genau die Art von Strahlung, die in Ihrer Küche die mitgebrachte Lasagne auf die richtige Temperatur bringt. Warum? Zahlenmäßig ist das Licht zwar in der Überzahl – es gab und gibt ungefähr 2 Milliarden mal so viele Photonen wie Protonen und Neutronen –, aber die Expansion des Universum dehnte seine Wellenlänge, nahm ihm Energie weg, verschob es ins Rote, dann weiter in den für menschliche Augen nicht wahrnehmbaren Bereich des Infraroten und schließlich in den Bereich der Mikrowellenstrahlung. Heute sollte es – so die Prognose – eine Wellenlänge von einigen Millimetern oder, wie die Physik sich ausdrückt, eine Temperatur von einigen Kelvin haben und eine *kosmische Hintergrundstrahlung* bilden.

Ihren ersten Triumph konnte der Urknallhypothese dann im Jahr 1964 feiern, als diese Strahlung von Arno Penzias und Robert Wilson – im Grunde zufällig – entdeckt wurde. Mit einer Temperatur von 2.7 Kelvin lag sie im erwarteten Wellenlängenbereich, und genauere Vermessungen während der nächsten Jahrzehnte ergaben, dass sie phantastisch gleichmäßig (oder, wie die Physik sagt, *isotrop*) ist: Sie kommt aus jeder Richtung mit der

gleichen Temperatur. Sie können sie sich auch selbst anschauen: Wenn Sie die Senderwahl Ihres Fernsehgeräts zwischen zwei Kanälen auf "Rauschen" stellen, so stammt etwa 1 Prozent davon direkt aus der Zeit der Rekombination!

Eine sich über den Himmel erstreckende Karte der kosmische Mikrowellenstrahlung kann gewissermaßen als "fotografische Aufnahme" jenes früheren Zustands des Universums betrachtet werden, als es sich gerade in der Phase der Rekombination, des Durchsichtig-Werdens, befand. Aber es war eine recht langweilige Aufnahme – so, als würden Sie eine gleichmäßig helle Scheibe anschauen. Schließlich war diese Strahlung isotrop – sie kam aus allen Richtungen mit den gleichen physikalischen Eigenschaften. Was konnte man mehr von ihr erwarten?

Die Anisotropie der Hintergrundstrahlung

Andererseits: Das Universum ist nicht vollständig gleichmäßig. Es beherbergt ja lokale Zusammenballungen von Materie: die Galaxien und Galaxienhaufen, die Sterne und Planeten – Strukturen, die es in einem vollständig homogenen Universum nicht gäbe. Woher kommen diese Unregelmäßigkeiten? Müsste es sie nicht schon früher gegeben haben, zur Zeit der Rekombination?

Wir springen in die 1990er Jahre, als der Satellit COBE (*Cosmic Background Explorer*) ein winziges Ausmaß an Anisotropie, an Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung entdeckte. Die Hintergrundstrahlung kommt also doch nicht aus jeder Richtung mit exakt der gleichen Temperatur, sondern weist Schwankungen von etwa einem Hunderttausendstel Kelvin auf. COBEs Bilder waren noch ein bisschen unscharf. Ab 2001 liefert die Satellitenmission WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) wunderbar scharfe Bilder, in denen sich die Anisotropie klar erkennen lässt.

Die von WMAP gelieferten Daten gehören zu den ergiebigsten Quellen der heutigen kosmologischen Forschung. Abbildung 1 stellt eine Aufnahme des gesamten Himmels dar. Die Strahlung, deren räumliches Verteilungsmuster sie zeigt, wurde zwar heute empfangen, aber knapp 400000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt – als das Universum gewissermaßen noch ein Baby war. Gelbe und rote Flecken entsprechen einer etwas wärmeren, blaue und schwarze Flecken entsprechen einer etwas kühleren Strahlung. Die Unterschiede sind sehr klein – wie gesagt nur ein Hunderttausendstel Kelvin – und hier übertrieben dargestellt. Hat das Universum also damals tatsächlich so ausgesehen? Woher kommen die unterschiedlichen Farben?

Was hier zu erkennen ist, sind *Dichteschwankungen* der damaligen Materie, die das Licht gewissermaßen speichern konnte, da es das Gravitationsfeld von Massen spürt. Läuft Licht von einer schweren Masse weg, so wird es ein bisschen ins Rote verschoben, verliert also an Temperatur. Die blauen und schwarzen Flecken zeigen daher Regionen, in denen die Materie etwas dichter war als im Durchschnitt, die gelben und roten Flecken zeigen Regionen, in denen die Materie etwas weniger dicht war als im Durchschnitt.

Eine andere, sehr reizvolle Darstellung zeigt Abbildung 2 nach Art eine Sternenkarte. Sie müssen sich vorstellen, das Muster der Anisotropie vom Mittelpunkt dieser Kugel aus

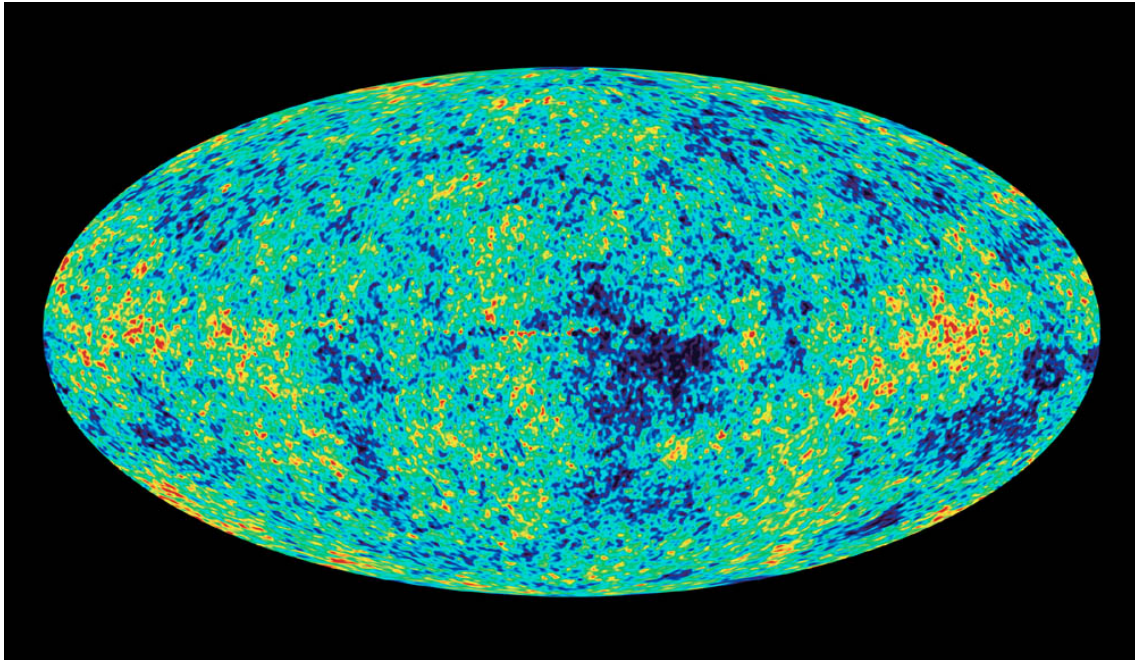


Abbildung 1: Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung. Quelle: <http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/TALKS/Australis/wmap.jpg>

zu betrachten. Wir haben also tatsächlich ein Abbild der *frühesten Epoche*, die wir mit Hilfe elektromagnetischer Signale überhaupt sehen können, vor uns!

Strukturbildung und Entstehung der schweren Elemente seit der Rekombination

Da drängt sich die Frage auf, was aus den Dichteschwankungen, die wir hier sehen, seither geworden ist. In der Zwischenzeit haben sich die Entfernungen im Universum vertausendfacht. Ein Fleck von der Größe eines Winkelgrades – was den kleineren der Farbtupfer entspricht – war zur Zeit der Rekombination eine knappe Million Lichtjahre groß. Durch die Expansion des Universums ist so ein Bereich heute auf eine stattliche Milliarde Lichtjahre angewachsen. Das ist fast die Dimension, die ein Galaxien-Superhaufen oder ein großer Leerraum (ein so genannter *void*) heute einnimmt. Die Rekombination stellt den Anfangspunkt einer intensiven Strukturbildung im Universum dar: Die dichteren Regionen zogen sich unter der Wirkung ihrer Schwerkraft zusammen und bildeten so das großräumige Muster der Materieverteilung, das wir heute in groß angelegten Himmelsdurchmusterungen beobachten.

Aber damit nicht genug: Die chemischen Elemente, die es schon in sehr frühen Zeiten gegeben haben muss, vor allem Wasserstoff und Helium, bildeten das Rohmaterial in (von der heutigen Physik gut verstandenen) Prozessen, die im Inneren von Sternen und bei gewaltigen Sternexplosionen stattfanden und zur Entstehung der schweren Elemente führten. All die Stoffe, die es im Universum gibt, auch jene, aus denen wir selbst bestehen, wie etwa der Kohlenstoff und der Sauerstoff, aber auch das Eisen, und die die Grundlage

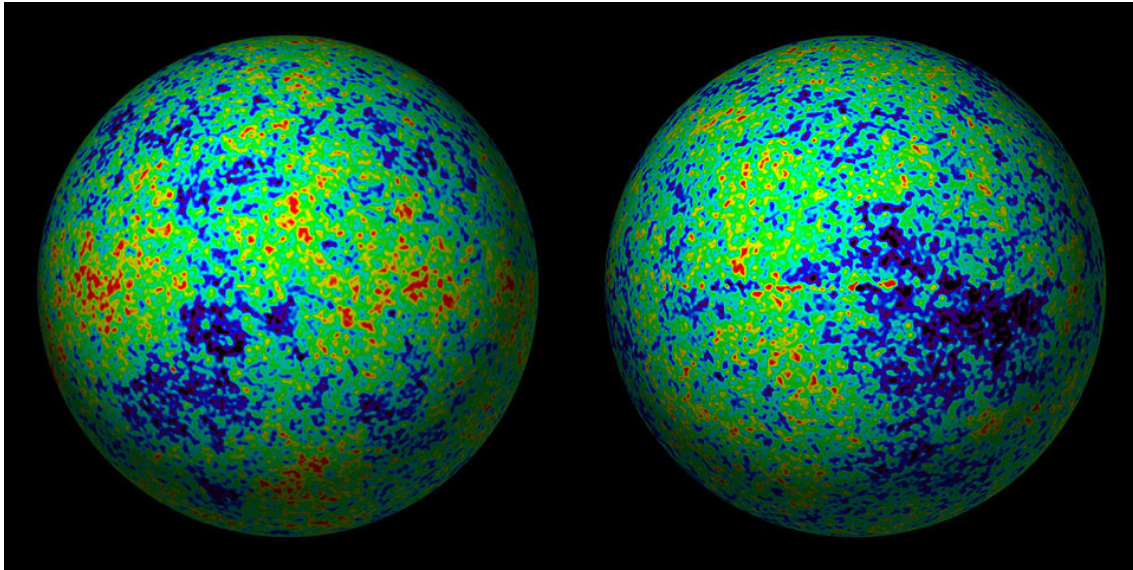


Abbildung 2: Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung. Quelle: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/fap/image/0312/globes_wmap_big.jpg

für die Entstehung komplexer lebender Organismen sind, mussten nicht von Anfang an da gewesen sein.

Mit diesem Szenario, das die Entwicklung des Universums vom Zeitalter der Rekombination bis heute umfasst, darf die Hypothese, das Universum habe einen *Anfang* gehabt, und alle seine Strukturen, von den schweren chemischen Elementen bis zur Bildung und räumlichen Verteilung der Galaxien, hätten sich seither *entwickelt*, ihren zweiten Triumph feiern.

Dichtefluktuationen vor der Rekombination

Und jetzt wird es spannend: Bei genauerer Betrachtung dürfte es die Dichteschwankungen, die wir in den beiden Abbildungen sehen, gar nicht geben! Bis kurz vor der Rekombination, als die Strahlung noch kräftig mitmischte, herrschte ein *Strahlungsdruck*, der alle zufälligen Unregelmäßigkeiten hätte ausglätten müssen! Genauere Berechnungen zeigen, dass die Dichteschwankungen *zu groß* sind – das Universum hätte homogener sein müssen! Wir müssen froh sein, dass es das nicht war, denn ansonsten gäbe es uns nicht – aber wie konnten derartige Dichteschwankungen zustande kommen? Irgend etwas an der bisherigen Erklärung kann nicht stimmen!

Die Entstehung der leichten Elemente

Um eine Antwort auf dieses Problem zu finden, müssen wir uns in eine weit frühere Epoche zurückversetzen. Bereits wenige Sekunden nach dem Urknall kam eine Spezies in Bedrängnis, die für uns heute sehr wichtig ist: die Neutronen, elektrisch neutrale Bestandteile der Atomkerne. Ohne Neutronen gäbe es nur ein einziges chemisches Element, nämlich den Wasserstoff. Damals waren die Neutronen noch ungebunden, und es begann

ein Wettlauf gegen die Zeit. Einerseits hat ein ungebundenes Neutron die Tendenz, in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino zu zerfallen. Prozesse, in denen neue Neutronen entstehen, wurden immer seltener, so dass das Neutron vom Aussterben bedroht war. Andererseits finden bei hohen Temperaturen ähnliche Verschmelzungsprozesse statt wie in der Wasserstoffbombe. Konnte sich ein Proton ein Neutron schnappen, so bildeten sie gemeinsam einen so genannten Deuteriumkern, und das Neutron war gerettet. Weitere Verschmelzungen führten zur Bildung von Helium und einigen anderen leichten Atomkernen, die dann später den Rohstoff für die Bildung der schweren Elemente darstellen konnten. Die Kernphysik kennt derlei Prozesse sehr gut und kann daher die dramatischen Minuten nachvollziehen, in denen sich das Match entschied. Wie ist es ausgegangen? Wie viele Neutronen konnten an der Bildung von Atomkernen teilnehmen? Die Kernphysik sagt, dass das Ergebnis von der Dichte der Protonen und Neutronen abhängt. Um diese zu ermitteln, wird der Spieß umgedreht. Die Astronomen gehen vom Ergebnis aus und teilen der Kernphysik mit, welche Verteilung der leichten Elemente sie im Universum beobachten: 75 Prozent Wasserstoff (also Protonen), 25 Prozent Helium (das zur Hälfte aus Neutronen besteht), ein hundertstel Prozent Deuterium und Spurenelemente weiterer Elemente. Das beobachtete Verhältnis von Wasserstoff zu Helium stellt eine robuste Vorhersage aller Modelle dar, die das Universum mit einer heißen Phase beginnen lassen, und konsequenterweise ist es als ein (von der kosmischen Hintergrundstrahlung unabhängiges) Argument für die Urknallhypothese ins Treffen geführt worden. Aber das hundertstel Prozent Deuterium ist eine Feinheit, die nur unter bestimmten Bedingungen eintritt und der Kernphysik die Möglichkeit gibt, die damalige Dichte der Protonen und Neutronen zu bestimmen.

Die Dunkle Materie

Die Kosmologen rechnen wieder in die Zukunft, ermitteln, wie groß die Dichte der Protonen und Neutronen heute ist, vergleichen mit anderen Beobachtungen, die uns über die Gesamtdichte des Universums Aufschluss geben – und finden verblüffenderweise, dass die Dichte der Protonen und Neutronen viel kleiner ist als erwartet! Die "normale", aus Protonen und Neutronen (und den leichten Elektronen) bestehende Materie macht lediglich einen Anteil von *viereinhalb Prozent* der gesamten, im Universum vorhandenen Energiemenge aus! Der große Teil besteht aus etwas anderem. Drei Viertel davon werden von der so genannten *Dunklen Energie* beansprucht, die ein eigenes spannendes Thema darstellt, aber für das frühe Universum nicht sehr relevant ist. Also bleibt etwa ein Viertel für eine Materieform übrig, die *nicht* aus den uns bekannten Elementarteilchen besteht, offenbar auch nicht so leicht zu bemerken ist, nicht leuchtet und überhaupt kaum mit der normalen Materie zu wechselwirken scheint. Wir bezeichnen sie als *Dunkle Materie*. Das einzige, was sie aufgrund der von uns als gültig erachteten Naturgesetze tun *muss*, ist, sich durch ihre Gravitation bemerkbar zu machen. Und tatsächlich können wir sie im heutigen Universum lokalisieren: Die von Galaxien und Galaxienhaufen ausgeübten Gravitationskräfte sind stärker als aufgrund der in ihnen enthaltenen sichtbaren Materie erwartet – die meisten dieser Objekte scheinen von einem *Halo* aus Dunkler Materie umgeben zu sein.

Die Dunkle Materie ist die Antwort auf das Problem der Existenz von Dichteschwankungen in der Phase der Rekombination. Mangels ihrer Fähigkeit, mit normaler Materie zu wechselwirken, spürt die Dunkle Materie den Strahlungsdruck nicht und wird daher von diesem nicht ausgeglättet. Das Gemisch aus Dunkler und normaler Materie können wir jetzt bis hinunter zu einer Millionstel Sekunde nach dem Urknall verfolgen und physikalisch modellieren.

Das Horizontenproblem

Bevor aber die Sektkorken knallen, quält uns noch ein weiteres Problem. Teile der Hintergrundstrahlung, die aus ganz unterschiedlichen Richtungen kommen, haben, abgesehen von der kleinen Anisotropie, die gleiche Temperatur. Physikalisch deutet das auf einen Austauschprozess hin, der in ferner Vergangenheit stattgefunden haben müsste (ähnlich wie zwei Körper in thermischem Kontakt nach einiger Zeit die gleiche Temperatur annehmen). Nun zeigen aber die konkreten Modellierungen des frühen Universums, dass dazu keine Zeit war! Sofort nach dem Urknall waren die verschiedenen Regionen, aus denen heute die Hintergrundstrahlung kommt, kausal voneinander getrennt – sie konnten einander nicht beeinflussen!

Das inflationäre Universum

Eine mögliche Lösung dieses Problems wurde im Jahr 1981 von Alan Guth vorgeschlagen seither und in Form verschiedener Szenarien weiterentwickelt. Demnach fand unmittelbar nach dem Urknall während der abenteuerlich kleinen Zeitspanne von einem Milliardstel Milliardstel Milliardstel Milliardstel Sekunde eine rasante Ausdehnung um den Faktor 1 Milliarde Milliarde Milliarde Milliarden statt. Ein derartiger Faktor entspricht dem Größenunterschied zwischen einem Atom und dem gesamten heute sichtbaren Universum! Diese so genannte *inflationäre Phase* des Universums würde automatisch für die nötige Homogenisierung des Universums sorgen. Zudem wäre damit auch eine Erklärung gefunden, woher die Dichteschwankungen in der Dunklen Materie, die wir in den WMAP-Bildern sehen, ursprünglich kamen: Gemäß der Quantentheorie haben physikalische Größen keine festen Werte, sondern sind so genannten *Quantenfluktuationen* unterworfen. Im normalen Leben sind das mikroskopisch kleine Schwankungen, die sich beispielsweise innerhalb von Atomen abspielen. Die Idee ist nun, dass die inflationäre Expansion die mikroskopischen Quantenfluktuationen der Materie soweit aufbläst, dass sie durch die nachfolgende Entwicklung kosmologische Dimensionen erreichen. Der gesamte Bereich des heute sichtbaren Universums war nach dem Ende der inflationären Phase (je nach Modell) einige Zentimeter bis Meter groß. Wie klein er *vor* dieser Phase war, ist in Worten nicht auszumalen. In diesem Szenario werden die Fluktuationen der normalen Materie in der Phase des Feuers zwar durch den Strahlungsdruck ausgeglättet, aber jene der Dunklen Materie überleben – aus ihnen werden die Flecken in den WMAP-Bildern, und in noch späteren Zeiten werden sie zu den Keimen für die Bildung der größten kosmologischen Strukturen, die dann auch die normale, leuchtende Materie anziehen. Die – für uns sichtbare – großräumige Verteilung der Galaxien zeigt uns heute, wie die Schaumkronen auf den Wellen im Meer, die großen Anordnungsmuster der Dunklen Materie an. Das *ganz Kleine*

ist zum *ganz Großen* geworden.

Anisotropie durch Quantenfluktuationen

Und jetzt kommt der Höhepunkt: Die Quantentheorie sagt ein ganz bestimmtes Zusammenspiel von kleineren und größeren Fluktuationen voraus, ein so genanntes *Fluktuationsspektrum*, das die aufgeblasenen Fluktuationen der Dunklen Materie zur Zeit der Rekombination aufweisen sollten. Es ist sehr charakteristisch und kann von anderen Modellen, die die Schwankungen erklären wollen (etwa den so genannten *kosmischen Strings*), gut unterschieden werden. Und genau dieses von der Inflationstheorie erwartete Fluktuationsspektrum wurde in den WMAP-Daten nachgewiesen! Seither gilt die Existenz einer inflationären Phase als einer der vielversprechendsten Ansätze in den Bemühungen der Kosmologie, das *sehr* frühe Universum zu verstehen.

Bilanz

Jetzt darf der Champagner doch entkorkt werden: Die von COBE und WMAP gelieferten Daten sind als "Bilder vom Urknall" oder als das "Echo des Urknalls" bezeichnet worden. Einerseits ist das übertrieben, denn das Universum war zum Zeitpunkt der Rekombination immerhin bereits 400000 Jahre alt. Aber andererseits steckt doch ein Körnchen Wahrheit drin: Die moderne Kosmologie hat – wie ich versucht habe, zu schildern – ein physikalisches Szenario für die Geschichte des Universums entwickelt, das mit allen bekannten Naturgesetzen im Einklang steht, einige neue Hypothesen benötigt (nämlich die Dunkle Materie, die Dunkle Energie und die inflationäre Phase) und in der Lage ist, Voraussagen zu verifizieren, die sich auf Vorgänge unmittelbar nach dem Urknall beziehen. In der nächsten Satellitenmission *Planck*, die bereits unterwegs ist¹, wird die Hintergrundstrahlung noch genauer vermessen werden, und es ist zu erwarten, dass damit der Kreis der Szenarien weiter eingeeengt oder – wie das in der Naturwissenschaft so ist – insgesamt in Frage gestellt wird. Es sei aber noch hinzugefügt, dass die Kosmologie auch aus anderen Beobachtungen Erkenntnisse gewinnt und das Netz von *cross checks*, also voneinander unabhängigen Bestätigungen der Hypothesen, immer dichter wird.

Offene Fragen

Immer, wenn die Naturwissenschaft der Wahrheit näher kommt, stellen sich mehr neue Fragen als alte beantwortet werden können. Exemplarisch seien einige genannt:

- Wieso gibt es mehr Teilchen (Protonen und Elektronen) als Antiteilchen (Antiprotonen und Positronen)? Ist die Natur unsymmetrisch oder war das Zufall? Eine Kosmologie, die *alles* erklären will, muss auch das erklären. Eine Antwort wird von der so genannten *Großen Vereinheitlichten Theorie* erwartet, die zwar noch nicht gelungen, aber eines der großen Ziele der Teilchenphysik ist.
- Woraus besteht die Dunkle Materie? Vielleicht wird die Antwort darauf in den nächsten Jahren am LHC, dem spektakulären Teilchenbeschleuniger des CERN, gefunden werden.

¹ Genau 3 Tage nach meinem Vortrag hat *Planck* die erste Durchmusterung des Himmels gemeldet!

- Wodurch wurde die inflationäre Phase ausgelöst? Seit der ersten Formulierung der Inflationshypothese wächst unser Wissen über die teilchenphysikalischen Aspekte von Inflationsszenarien, obwohl es noch keine allgemein anerkannte Theorie dazu gibt.
- Gab es ein Universum vor dem Universum? Oder war der Urknall tatsächlich der Beginn? Falls ja – können wir ihn physikalisch verstehen? Ist das Universum in einer Art Quanten-Tunneleffekt aus dem “Nichts” oder aus einer Art “Raum-Zeit-Schaum” entstanden? Wird es eines Tages eine physikalische Theorie geben – es müsste eine Quantengravitationstheorie (also eine *Super-Große Vereinheitlichte Theorie*) sein – die das beschreibt?
- Und schließlich, um den Blick auch in die Zukunft zu richten: Was ist die Dunkle Energie? Diese unverstandene Komponente zwingt das Universum gegenwärtig zu einer beschleunigten Expansion und wird für seine weitere Entwicklung entscheidend sein.

Schlusswort

Mit den Beobachtungen und Theorien der modernen Kosmologie sind wir dem Ursprung, wie die Physik ihn sieht – dem Urknall – bis auf winzige Bruchteile von Sekunden nahe gekommen. Ich hoffe, dass Sie diesen Streifzug vom ganz Großen zum ganz Kleinen, in die fernste Vergangenheit und wieder zurück, genossen haben.