

**DAS  
DUNKLE**

**UNIVERSUM**

DAS DUNKLE UNIVERSUM

# MODELLIERUNG DES UNBEKANNTEN

MATTHIAS BARTELMANN

**Die Kosmologie hat im letzten Jahrzehnt große Fortschritte erzielt. Noch vor zwanzig Jahren waren die Kenntnisse über das Universum höchst spekulativ, heute lassen sich die meisten Eigenschaften des Universums recht genau festlegen. Wissenschaftler am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg wollen mit ihren Arbeiten dazu beitragen, eines der größten Rätsel aktueller kosmologischer Forschung zu lösen: Was ist die Natur der Dunklen Materie?**

# S

Seit jeher sind Modelle die Grundlage unseres Bildes von der Welt. Weithin bekannte Beispiele sind das geozentrische Weltbild des Ptolemäus und das heliozentrische Weltbild des Kopernikus. Mit dem Universum befinden wir uns heute in einer durchaus vergleichbaren Situation: Es gibt ein Modell des Universums, das mit unseren tatsächlichen Beobachtungen auf vielfache Weise übereinstimmt. Wenn wir über die Eigenschaften unseres Universums reden, meinen wir die Eigenschaften dieses Modells, das mittlerweile eine Überzeugungskraft gewonnen hat, die selbst in der Physik selten ist. Wir sind deshalb geneigt, drei Schlussfolgerungen zu akzeptieren, zu denen uns das „Standardmodell der Kosmologie“ gleichsam nötigt: Es besagt erstens, dass die meiste Materie im Universum Dunkle Materie ist, deren Eigenschaften wir nur ansatzweise kennen. Es besagt zweitens, dass die meiste Energie im Universum keineswegs von Materie, sondern von einer Form Dunkler Energie beigetragen wird, die uns vor noch größere Rätsel stellt als die Dunkle Materie. Und es besagt drittens, dass alle Strukturen im Universum – wir Menschen inbegriffen – durch Schwankungen der Energiedichte eines Quantenfeldes entstanden sind, das in der Frühzeit des Universums als einzige Substanz vorhanden war.

Das Standardmodell der Kosmologie geht davon aus, dass von den vier fundamentalen Kräften, die der Physik bekannt sind, allein die Schwerkraft für die Entwicklung des Universums verantwortlich ist – denn nur die Schwerkraft hat die Reichweite, kosmische Entfernungen zu überbrücken. Die seit etwa einem Jahrhundert beste Theorie der Schwerkraft ist die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Ihre Grundgleichungen sind kompliziert und ohne vereinfachende Annahmen nicht zu lösen.

**Die vereinfachende Schlichtheit der Symmetrieanname**  
Einstein veröffentlichte die noch heute gültige Fassung seiner Relativitätstheorie am 25. November 1915. Wenige Jahre später, 1922, konstruierte der russische Mathematiker Alexander Friedmann eine spezielle Klasse von Lösungen der Einstein'schen Gleichungen. Sie liegen unserem heutigen Weltbild zugrunde. Friedmann ließ sich dabei allein vom Gedanken der mathematischen Einfachheit leiten und ging von der vereinfachenden Voraussetzung aus, dass das Universum für jeden seiner Einwohner in jeder Richtung

gleichartig aussehen solle. Darin stecken zwei gewaltige Annahmen: zum einen, dass wir in jeder Richtung am Himmel dieselben Eigenschaften des Universums feststellen, zum anderen, dass dies auch für jeden anderen hypothetischen Beobachter im Universum gilt. Der Mathematiker sorgte sich dabei ausdrücklich nicht um die physikalische Tragweite dieser Annahmen.

## „Mit dem Universum lassen sich keine Experimente machen.“

Alexander Friedmann tat damit keineswegs einen ungewöhnlichen Schritt: Fundamentale Überlegungen in der Physik beginnen häufig mit Symmetrieanahmen, die den Überlegungen eine Ordnung und einen Rahmen geben. Symmetrieanahmen setzen voraus, dass die fundamentalen Objekte der Theorie, die meist recht abstrakter Natur sind, unter bestimmten Transformationen unverändert bleiben. Friedmanns Gedanken sind typische Beispiele für solche

### Schwerpunktprogramm „Die ersten zehn Millionen Jahre des Sonnensystems“

Planeten sind die Grundlage unseres Lebens, dennoch haben wir über ihre Entstehung kaum gesicherte Erkenntnisse. Das Schwerpunktprogramm „Die ersten zehn Millionen Jahre des Sonnensystems“ (SPP 1385) erforscht die Vorgänge im frühen Sonnensystem – beginnend mit der Bildung der ersten Staubteilchen bis zum Prozess der Planetenentstehung vor 4,5 Milliarden Jahren. Hierzu analysieren die beteiligten Wissenschaftler extraterrestrische Materialien wie Meteorite und ihre Komponenten sowie Proben der Stardust-Mission und interplanetaren Staub. Unterschiedliche Teildisziplinen wie die analytische und experimentelle Kosmochemie, die Mineralogie, die Petrologie und die (Astro-)Physik arbeiten in dem Forschungsverbund fächerübergreifend zusammen.

Prof. Dr. Mario Trieloff von der Universität Heidelberg und Prof. Dr. Klaus Mezger von der Universität Bern (Schweiz) koordinieren das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Programm. Es umfasst aktuell 45 Forschungsvorhaben, von denen zehn an der Ruperto Carola sowie den Max-Planck-Instituten für Astronomie und für Kernphysik in Heidelberg durchgeführt werden. Das 2009 gestartete SSP läuft über insgesamt sechs Jahre und befindet sich derzeit in der zweiten Förderphase, für die rund 5,5 Millionen Euro zur Verfügung stehen.

Symmetrieanahmen: Sie besagen, dass wir keinen Unterschied feststellen würden, wenn der kosmische Raum um uns als Mittelpunkt gedreht würde; und sie besagen weiter, dass diese Eigenschaft bestehen bleibt, wenn man unsere Position im Universum räumlich verschiebt.

Nicht allein Friedmanns Lösungen sind aus solchen Symmetrieanahmen konstruierbar; auch die Relativitätstheorie selbst kann aus Symmetrieanahmen entwickelt werden, wenn auch auf einer höheren Abstraktionsstufe. In einem gewissen, mathematisch präzisierbaren Sinn ist die Allgemeine Relativitätstheorie die einfachste Theorie des Raumzeitgefüges, die bestimmten und wenigen allgemeinen Symmetrieanahmen genügt.

### Am Ausgangspunkt

Das ist der Ausgangspunkt unserer modernen Kosmologie. Es lohnt sich, bei diesem Gedanken kurz zu verweilen: Wir legen unseren kosmologischen Überlegungen eine Theorie der Schwerkraft zugrunde, die wenigen Symmetrieforderungen entspringt und in deren Rahmen sie die einfachste mögliche Theorie ist. Im Rahmen dieser Theorie fordern wir wiederum weitreichende Symmetrien. Das ist erforderlich, um überhaupt Lösungen ihrer Grundgleichungen angeben zu können. Daraus erwächst eine Klasse kosmologischer, also physikalischer Modelle für das gesamte Universum: die Klasse der Friedmann-Modelle.

Diese Modelle sind durch Parameter gekennzeichnet, die im Wesentlichen bestimmen, welche Mengen verschiedener Formen von Materie und Energie sie enthalten sollen. Wodurch aber ist die Erwartung gerechtfertigt, dass irgendeines dieser Modelle, die aus Symmetrieforderungen und Einfachheitsannahmen geboren wurden, das Universum beschreiben kann, in dem wir uns tatsächlich befinden?

### Eine zutreffende Beschreibung unserer Welt?

Die Schlussfolgerung aus Jahrzehnten astronomischer und kosmologischer Beobachtung ist: Es scheint ein Friedmann-Modell zu geben, in das sich alle bisherigen Beobachtungen des Universums einfügen. Präziser formuliert: Innerhalb der unendlichen Menge möglicher Parametereinstellungen der Friedmann-Modelle gibt es genau einen Satz von Parametern, die ein Modell des Universums festlegen, das von unserem wirklichen Universum kaum zu unterscheiden ist. Weil das so ist, weil es kaum mehr eine kosmologische Beobachtung gibt, die sich nicht problemlos in das kosmische Standardmodell fügt, hat es eine solche Überzeugungskraft gewonnen, dass wir es für eine zutreffende Beschreibung unserer Welt halten.

Dabei stellen die Beobachtungen, an denen sich jedes kosmologische Modell messen lassen muss, hohe Ansprüche. Schon in den 1920er-Jahren war bekannt, dass sich die meisten Galaxien von uns dergestalt entfernen, dass ihre



**PROF. DR. MATTHIAS BARTELMANN** forscht und lehrt seit dem Jahr 2003 am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg. Nach seiner Dissertation über Gravitationslinseneffekte an der Münchner LMU und dem Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching arbeitete er ab 1994 am „Harvard-Smithsonian-Center for Astrophysics“ (USA) und habilitierte sich 1998 in München. Bis zu seinem Wechsel nach Heidelberg leitete er fünf Jahre lang den deutschen Beitrag zur Satellitenmission „Planck“ der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA). Von 2006 bis 2008 war er Dekan der Heidelberger Fakultät für Physik und Astronomie.

Kontakt: bartelmann@uni-heidelberg.de

THE DARK UNIVERS

# MODELLING THE UNKNOWN

MATTHIAS BARTELMANN

Within the past decade or so, cosmology has developed from a highly speculative science to one of the most dynamic and successful branches of physics. There are two reasons for this rapid evolution. First, cosmology is based on a model constructed from few and simple assumptions. In the Theory of General Relativity, it is assumed that the universe at large is isotropic and homogeneous. These assumptions suffice to derive a class of model cosmologies defined by a handful of parameters which have to be adjusted through observation. Second, meticulous and large-scale observations of many different kinds have allowed us to determine these parameters with an accuracy that seemed impossible until now. Different observations show the universe as it was at different times in the past. Now, however, there is one model, defined by one set of reliable parameters, that is capable of describing virtually all cosmological observables.

This standard model of cosmology has been found to be so convincing that it seems more appropriate to accept its bold conclusions than to discard it. It asserts that matter in the universe is mostly composed of an unknown form of dark matter and that the total energy content of the universe is primarily accounted for by some form of dark energy whose nature is elusive.

Even if most of the universe is utterly dark, we can quantitatively analyse at least some of its contents. Material structures, be they dark or bright, deflect light and thus reveal their presence by characteristic distortions of objects in their background. From these mostly very weak distortions, we can reconstruct the amount and the distribution of dark matter. Dark energy is thought to be the cause of gravitational repulsion over very large distances, a phenomenon that influences the way in which cosmic structures grow in time. Subtle effects on the evolution of cosmic structures may become measurable in the near future and allow us at least some insight into the nature of dark energy. ●

**PROF. DR. MATTHIAS**

**BARTELMANN** joined Heidelberg University's Institute of Theoretical Astrophysics in 2003. After earning his doctorate with a thesis on gravitational lensing effects at LMU in Munich and the Max Planck Institute for Astrophysics in Garching, he accepted a position at the Harvard-Smithsonian-Center for Astrophysics (USA) in 1994. He completed his habilitation in 1998 in Munich. Before transferring to Heidelberg, he was scientific manager of the German contribution to the "Planck" satellite project of the European Space Agency ESA. From 2006 to 2008, he was Dean of Heidelberg University's Faculty of Physics and Astronomy.

Contact: bartelmann@  
uni-heidelberg.de

**“In hell, the condemned are made to suffer the agony of purgatory. Hence, hell is a form of punishment inflicted by God.”**

Fluchtgeschwindigkeit mit ihrer Entfernung zunimmt. Dieses Verhalten entspricht einer grundlegenden Eigenschaft der Friedmann-Modelle: Die räumliche Verteilung der Galaxien muss sich zeitlich verändern, sie muss sich ausdehnen oder zusammenziehen. Die Flucht ferner Galaxien legt nahe, dass sich unser Universum als Ganzes ausdehnt.

### Der „primordiale Feuerball“

Diese Ausdehnung und ihre Übereinstimmung mit den Friedmann-Modellen führten den Physiker Georges Lemaître bereits im Jahr 1927 zu dem Gedanken, dass unser Universum aus einem heißen, frühen Anfangszustand entsprungen sein könnte. Lemaître sprach vom „primordialen Feuerball“, und seine Überlegung lautete: Wenn unser Universum sich heute ausdehnt, muss es früher kleiner gewesen sein. Rückwärts in der Zeit gehend betrachtet, sollte es immer weiter schrumpfen. Damit würde die Materie, die sich in ihm befindet, zunehmend komprimiert und folglich heißer. Der Gedanke von Lemaître kann so weit in die ferne Vergangenheit extrapoliert werden, bis das gesamte Universum zu einem sehr heißen, kleinen und unvorstellbar dichten Gebilde geschrumpft ist. Diesen Anfangszustand nennen wir heute „Urknall“ – ohne im Detail angeben zu können, wie er beschaffen gewesen sein könnte.

Daraus ergeben sich zwei prüfbare Folgerungen. Zum einen muss der Urknall, sofern Lemaîtres Idee zutrifft, eine endliche Zeit zurückliegen. Das Universum muss dementsprechend ein endliches Alter haben, das das Alter aller seiner Teile übersteigt. Zum anderen müssen – wenn das Universum in seinem Anfang derart heiß war – sehr früh Prozesse abgelaufen sein, die jetzt in der großen Hitze im Inneren von Sternen ablaufen: Atomkerne leichter Elemente müssen zu schwereren Atomkernen verschmolzen sein.

Die erste Schlussfolgerung bedeutet, dass das Universum älter sein muss als die Erde – aber auch älter als die ältesten Objekte, die wir kennen. Aus verschiedenen Arten der Altersbestimmung ergibt sich, dass der Urknall knapp 14 Milliarden Jahre zurückliegt. Die zweite Schlussfolgerung bedeutet, dass das leichteste chemische Element, der Wasserstoff, bereits im sehr frühen Universum zumindest teilweise zu Helium verschmolzen sein muss. Dieser Prozess läuft erst bei Temperaturen von einigen Millionen Grad ab – eine Bedingung, die in den ersten wenigen Minuten nach dem Urknall vorlag. Damals muss so viel Helium erbrütet worden sein, dass etwa ein Viertel der Gasmasse im Universum aus Helium bestand. Denn genau das ist die Menge, die wir beobachten.

### Restwärme des Urknalls

Aus diesen Überlegungen ergeben sich weitere Folgerungen. Wenn das Universum in seiner frühen Entwicklung derart heiß war, muss immer noch ein Rest dieser Wärme vorhanden sein – obwohl sich das Universum seither gewaltig

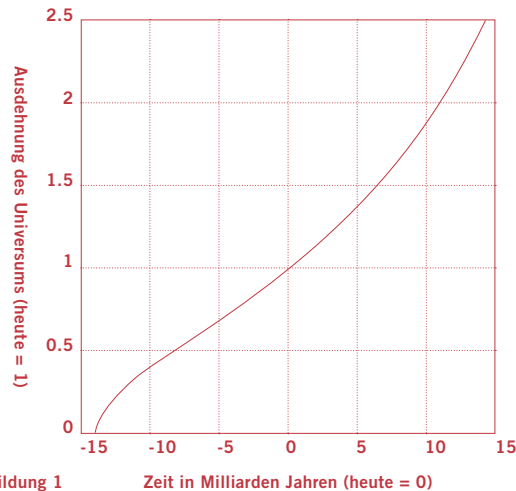


Abbildung 1 Zeit in Milliarden Jahren (heute = 0)

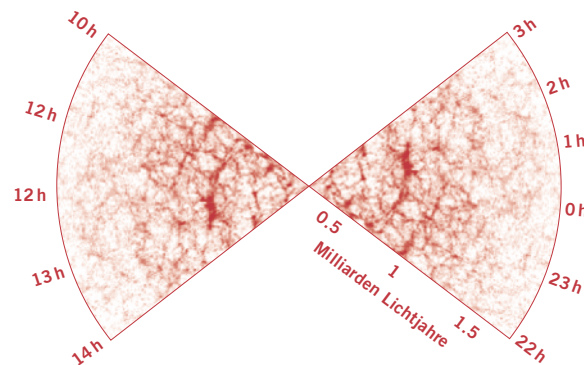


Abbildung 2

#### Abbildung 1

Die Kurve zeigt die Ausdehnung unseres Universums im Verlauf der Zeit. Heute, im Bild als Zeitpunkt Null gekennzeichnet, beginnt die Kurve, sich nach oben zu krümmen: Das Universum dehnt sich beschleunigt aus. Aller Voraussicht nach wird sich dieses Verhalten in der Zukunft verstärken.

#### Abbildung 2

Die Grafik zeigt unsere nähere kosmische Nachbarschaft, die reich strukturiert ist. Rot eingezeichnet sind die Galaxien, die bis in eine Entfernung von fast zwei Milliarden Lichtjahren gefunden wurden. Sie bilden eine netzartige Struktur, die zum größten Teil aus Dunkler Materie aufgebaut ist.

ausgedehnt und dabei abgekühlt hat. Tatsächlich wiesen US-amerikanische Forscher im Jahr 1965 eine charakteristische Wärmestrahlung nach, die sofort als Restwärme des Urknalls erkannt wurde – eine der faszinierendsten und folgenreichsten Entdeckungen in der Geschichte der modernen Kosmologie.

## „Der bei weitem größte Teil der Materie im Universum ist nicht imstande, mit Licht wechselzuwirken. Er ist dunkel.“

An dieser Stelle setzt die kosmologische Forschung ein, die wir am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg betreiben. Die Strahlung, die wir als Rest-

### Landessternwarte Königstuhl

Die Landessternwarte Königstuhl (LSW) wurde am 20. Juni 1898 als „Großherzogliche Bergsternwarte“ durch den Großherzog Friedrich I. von Baden eingeweiht. Sie befindet sich auf dem Westgipfel des Königstuhls und verfügt über sechs mit Teleskopen ausgestattete Beobachtungskuppeln. Seit 2005 ist sie nicht mehr Landesinstitut, sondern Teil des Zentrums für Astronomie (ZAH) der Universität Heidelberg. Geleitet wird sie von dem Heidelberger Astronomen Prof. Dr. Andreas Quirrenbach.

Die Wissenschaftler der Landessternwarte forschen auf den Gebieten der stellaren, extragalaktischen und theoretischen Astrophysik und beteiligen sich an der Entwicklung und am Bau astronomischer Instrumente. Arbeitsgruppen der Stellarphysik beschäftigen sich mit Planeten außerhalb des Sonnensystems, metallarmen und heißen Sternen, der Hochenergie-Astrophysik sowie aktiven Galaxien. Darüber hinaus sind die LSW-Wissenschaftler an internationalen Projekten beteiligt, insbesondere am Lucifer-Spektrografen für das Large Binocular Telescope, am H.E.S.S.-Teleskop für die Beobachtung höchstenergetischer Gammastrahlen oder am Carmenes-Projekt, das auf die Entdeckung erdähnlicher Planeten außerhalb des Sonnensystems zielt.

An der Landessternwarte finden regelmäßig Führungen für Besuchergruppen statt. Ziel ist es, über die Vermittlung der Astronomie insbesondere Kinder und Jugendliche für Naturwissenschaften zu begeistern.

wärme des Urknalls sehen, lässt präzise Rückschlüsse auf den physikalischen Zustand zu, in dem sich das Universum in seiner frühesten Jugend befand. Die genaue Analyse dieses Zustands ist eine wichtige Grundlage unserer Arbeit. Hierfür nutzen wir unter anderem die Daten, die der Satellit „Planck“ der Europäischen Weltraumorganisation ESA zwischen August 2009 und Januar 2012 geliefert hat.

Unser Universum ist heute von vielen Strukturen durchzogen: Sterne und Gas sind in Galaxien konzentriert, Galaxien sind in Galaxienhaufen versammelt und Galaxienhaufen bilden die Knoten eines kosmischen Netzwerks, dessen Maschen Durchmesser um 100 Millionen Lichtjahre erreichen. Wir erforschen die Entwicklung dieser reichen, heute sehr ausgeprägten kosmischen Strukturen. Dabei nehmen wir an, dass die kosmischen Strukturen keineswegs aus der Materie bestehen, die uns vertraut ist, sondern aus einer Materieform, die nicht mit Licht wechselwirken kann. Andernfalls hätten die Vorläufer dieser Strukturen erhebliche Eindrücke in der kosmischen Wärmestrahlung hinterlassen, die uns aus der Frühzeit des Universums erreicht. Zwar gibt es ganz geringe Schwankungen in der Temperatur dieser Wärmestrahlung, jedoch sind sie mit dem vergleichsweise gewaltigen Abdruck nicht verträglich, den gewöhnliche Materie hinterlassen hätte. Deswegen erscheint uns folgende Aussage im Rahmen des kosmologischen Standardmodells als unausweichlich: Der bei Weitem größte Teil der Materie im Universum ist nicht imstande, mit Licht wechselzuwirken. Er ist „dunkel“.

### Die Geheimnisse der Dunklen Materie

Eine andere Richtung unserer Forschung wird von einer weiteren interessanten Beobachtung vorgegeben: Bestimmte Ereignisse im Universum lassen bestimmte Typen von Sternen ein explosives Ende finden. Anhand dieser Ereignisse können wir nachmessen, wie die Ausdehnung des Universums zeitlich verlaufen ist. Dabei erweist sich, dass sich unser Universum heute beschleunigt ausdehnt. Das aber läuft unserer Intuition vollkommen zuwider: Wir erwarten von der Schwerkraft, dass sie jedes Auseinanderstreben von Massen verlangsamt und damit jede Ausdehnung abbremsst. Was wir beobachten ist das Gegenteil, zumindest auf den größten Skalen, die uns das Universum zeigt: Unser Universum verhält sich so, als wirke die Schwerkraft bei sehr großen Abständen abstoßend.

Die Relativitätstheorie kann ein solches Verhalten nur dann erklären, wenn ein wesentlicher Teil der Energie im Universum von einer Substanz beigetragen wird, deren Energiedichte so gut wie nicht abnimmt, wenn sich das Volumen vergrößert. Diese Substanz nennen wir Dunkle Energie. An der messbar beschleunigten Ausdehnungsrate unseres Universums lässt sich abschätzen, dass die Dichte der Dunklen Energie die der Dunklen Materie um mehr als das Dreifache übersteigen muss. Die Dichte der

Dunklen Materie wiederum übertrifft diejenige gewöhnlicher Materie um etwa das Fünffache. Da das Friedmann'sche Standardmodell der Kosmologie das Universum so präzise beschreibt, sind wir jedoch dazu bereit, folgende geradezu waghalsig erscheinenden Schlussfolgerungen hinzunehmen: Bei Weitem die meiste Energie im Universum ist Dunkle Energie, und die Materie wird von Dunkler Materie dominiert.

### **Annäherungen an die Dunkle Materie**

Mit unseren Forschungsarbeiten beteiligen wir uns intensiv an der Konstruktion und Ausgestaltung des kosmologischen Standardmodells. Wir arbeiten aber auch daran, alternative kosmologische Modelle zu finden, die ohne derart weitreichende Schlussfolgerungen auskommen. Ein wesentlicher Teil unserer Forschung beschäftigt sich damit, der Natur der Dunklen Materie durch möglichst genaue Beobachtungen und möglichst vorurteilsfreie Interpretationen näherzukommen. Dabei hilft uns, dass jede Art von Massenverteilung im Universum – mag sie dunkel sein oder leuchten – vorbeiziehendes Licht geringfügig auf eine Weise ablenkt, die der Ablenkung durch gewöhnliche Sammellinsen ähnelt. Dieser „Gravitationslinseneffekt“ führt zu charakteristischen Ver-

zerrungen. Aus ihrer Beobachtung können wir rekonstruieren, wie viel Materie auf welche Weise verteilt sein muss, um die Verzerrungen zu verursachen.

Auf diesem Gebiet ist in den letzten Jahren viel erreicht worden. Derzeit sind wir dabei, die Menge und die genaue Verteilung der Dunklen Materie in Galaxienhaufen so genau zu bestimmen, dass detaillierte Vergleiche mit theoretischen Modellen und Erwartungen möglich werden. Wir sind jedoch noch weit davon entfernt, die Natur der Dunklen Materie zu entschlüsseln – von der Dunklen Energie ganz zu schweigen. ●