

OHNE UHR

& STAB

OHNE UHR & METERSTAB

DER URSPRUNG VON ZEIT UND RAUM

CHRISTOF WETTERICH

Einfache Fragen erfordern oft komplexe Antworten. Das gilt auch für die Frage, was eigentlich vor dem Urknall war. Vieles, was Forscher dazu sagen können, ist Spekulation, anderes steht auf scheinbar gesicherten Füßen. Zweifelsfrei ist nur eines: Wer sich der Frage wissenschaftlich nähern will, muss eingefahrene Denkweisen radikal überwinden.



PROF. DR. CHRISTOF WETTERICH lehrt und forscht seit 1992 am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg. Zuvor arbeitete er an der Universität Freiburg, am Europäischen Forschungszentrum CERN in Genf, an der Universität Bern und am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. 2005 wurde der Physiker für seinen Vorschlag einer dynamischen Dunklen Energie mit dem Max-Planck-Forschungspreis ausgezeichnet. 2012 erhielt er für seine Arbeiten zur funktionalen Renormierung einen ERC Advanced Grant. Seine Forschungsinteressen erstrecken sich über ein breites Feld der theoretischen Physik: Kosmologie der Dunklen Energie und des inflationären Universums, Quantengravitation und höherdimensionale Gravitationstheorien, Neutrino-massen, Higgs-Boson und Phasenübergänge in der Elementarteilchenphysik, Grundlagen der Quantenmechanik sowie Festkörperphysik und ultrakalte Quantengase. Christof Wetterich ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.

Kontakt: c.wetterich@thphys.uni-heidelberg.de

W

Was war vor dem Urknall? Diese Frage wird oft gestellt, nach Vorträgen über das frühe Universum oder die dunkle Energie beispielsweise. So einfach sie zu stellen ist, so schwer ist sie zu beantworten. Gesicherte Erkenntnisse über die Phase vor dem Urknall gibt es keine, und wer nach Antworten sucht, kann schnell auf den schmalen Grat zwischen Physik und Metaphysik geraten.

Besonders hartnäckig hält sich die Vorstellung, dass unser Weltall irgendwie räumlich oder zeitlich im „Nichts“ eingebettet ist. Das zeigt sich an Formulierungen wie: „Hier ist das Weltall, draußen ist nichts“ oder „Ab dem Urknall gibt es das Weltall, vorher war nichts“. Diese Vorstellung hat ihre Wurzeln in einem früheren Weltbild der Physik, welches das Vakuum mit dem Nichts gleichsetzte. In diesem Vakuum bewegen sich Körper wie Sterne oder Atome – oder eben das Weltall.

Die moderne Physik hat eine diametral entgegengesetzte Vorstellung vom Vakuum. Heute gehen die Physiker davon aus, dass das Vakuum komplex und ebenso materiell ist wie die Körper, die sich in ihm bewegen. Mehr noch: Die Eigenschaften des Vakuums bestimmen die Gesetze, nach denen sich Elementarteilchen, Atome oder Galaxien bewegen. Diese Eigenschaften können sich mit der Zeit ändern, denn das Universum ist nicht statisch.

Von der Festkörperphysik ist bekannt: Die Gesetze für Anregungen hängen vom Zustand des Systems ab. In vielen Materialien sind die Gesetze für Elektrizität und Magnetismus bei tiefen Temperaturen völlig verschieden von den gewohnten Maxwell-Gleichungen. So können solche Materialien zu Supraleitern werden. Einzuwenden wäre, dass in der Festkörperphysik der thermodynamische Gleichgewichtszustand oder auch der Grundzustand nicht das Vakuum sind, weil diese Zustände durch viele miteinander wechselwirkende Atome entstehen. Die Elementarteilchenphysik konnte jedoch zeigen, dass die gleichen Vorstellungen auch für das Vakuum gelten. Für viele theoretische Elementarteilchenphysiker ist ein wichtiges Anliegen, die Eigenschaften des Vakuums zu berechnen. Kürzlich wurden diese Vorstellungen durch die Entdeckung des sogenannten Higgs-Elementarteilchens glänzend bestätigt. In mancher Hinsicht ähnelt das Vakuum dem „Äther“ alter Zeiten, einer Substanz, die „überall und immer“ vorhanden ist.

Das Universum kurz nach seiner Entstehung

In der Kosmologie wird der Begriff Vakuum heute durch „den räumlich gemittelten Zustand des Universums zu einer bestimmten Zeit“ ersetzt. Dies gilt mit etwas zeitlichem Abstand auch für den Urknall. Das Universum dehnt sich aus und kühlt ab – sein Zustand ändert sich also mit der Zeit. Physiker können nun aufgrund der im Labor beobachtbaren Gesetze darauf schließen, in welchem Zustand das Universum bei den hohen Temperaturen war, die einige Sekunden oder Minuten nach dem Urknall geherrscht haben. Daraus lässt sich errechnen, wie die ersten Atomkerne im Universum gebildet wurden (Nukleosynthese). Diese Berechnungen wurden zwischenzeitlich durch verschiedene Beobachtungen eindrucksvoll bestätigt.

Die Kosmologen vertrauen deshalb darauf, die grundlegenden Aspekte der Naturgesetze gut genug zu kennen, um sich an Aussagen über den Zustand des Universums in der Nähe des Urknalls heranzuwagen. Sie haben beispielsweise den sogenannten Higgs-Mechanismus verstanden, eine wichtige Eigenschaft des Vakuums, die die Gesetze der schwachen Wechselwirkung und der Masse der Elektronen oder Quarks bestimmt. Das macht es möglich, folgende Aussage mit recht großer Sicherheit zu treffen: Die Gesetze für Elektromagnetismus und schwache Wechselwirkung waren in der Zeitspanne vom Urknall bis zum „elektroschwachen Phasenübergang“ (ungefähr ein Millionstel einer Millionstelsekunde nach dem Urknall) recht verschieden von den späteren Gesetzen. In der Frühphase des Universums war die schwache Wechselwirkung ebenso stark wie die elektromagnetische, und keines der heute bekannten Elementarteilchen hatte eine Masse.

Aus Sicht der modernen Kosmologie hängen nicht nur die Naturgesetze von den veränderlichen Eigenschaften des Vakuums ab. Auch die Übertragung von Energie aus dem Vakuum auf die Elementarteilchen oder das Erzeugen von Energie aus dem Vakuum spielen eine wichtige Rolle. Die heutige Sicht lässt sich so zusammenfassen: Zwischen Vakuum und Materie besteht kein grundlegender Unterschied. Es lässt sich daher ein verallgemeinerter Materiebegriff verwenden, der das Vakuum mit einschließt. Diese einheitliche Sicht auf Vakuum und Elementarteilchen ist für die Frage nach dem Anfang des Universums von großer Bedeutung.

griff verwenden, der das Vakuum mit einschließt. Diese einheitliche Sicht auf Vakuum und Elementarteilchen ist für die Frage nach dem Anfang des Universums von großer Bedeutung.

Raum und Zeit sind Eigenschaften des Vakuums

Raum und Zeit beschreiben Beziehungen zwischen verschiedenen Teilen der Materie. Sie sind keine vorgegebenen Strukturen, in die Materie „hineingesetzt“ wird. Weder Raum noch Zeit existieren unabhängig von Materie. In einem gewissen Sinn sind Raum und Zeit Eigenschaften des Vakuums – und diese Eigenschaften können durch die Anwesenheit von Atomen, Planeten oder Sternen beeinflusst werden.

Dass Raum und Zeit nicht ohne Materie existieren, scheint unserer alltäglichen Erfahrung zu widersprechen – aber nur auf den ersten Blick. Intuitiv gibt es „mehr Raum“ zwischen der Erde und dem Mond als zwischen Heidelberg und Mannheim. Aber woher wissen wir das? Wir könnten Laserstrahlen von Spiegeln auf dem Mond reflektieren lassen und ihre Laufzeit zurück zur Erde mit derjenigen zwischen Heidelberg und Mannheim vergleichen. Aus der längeren Laufzeit schließen wir dann auf den größeren Abstand: So wird das für Präzisionsmessungen des Abstands vom Mond tatsächlich gemacht. Wenn wir uns aber die Erde allein im Universum vorstellen, ohne Mond oder andere Materie, dann macht der Begriff eines Raumes außerhalb der Erde nicht mehr viel Sinn. Dann gibt es keine Möglichkeit mehr, diesen Raum in irgendeiner Weise zu erfahren. Auch Zeitmessungen sind immer nur Verknüpfungen materieller Ereignisse.

Einstein beschreibt in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie die Eigenschaften von Raum und Zeit durch ein metrisches Feld, kurz durch eine „Metrik“. Metrische Felder sind Größen, die für jede Raum-Zeit-Koordinate einen festen Wert haben. Sie haben überall ihre Feldwerte – nicht nur dort, wo es gerade einen Körper gibt. Es sind wichtige Größen, um den Zustand des Universums oder des Vakuums zu beschreiben. Das metrische Feld ist dabei konzeptionell nicht unterschieden

„Zeitmessungen sind immer nur Verknüpfungen materieller Ereignisse.“

WITHOUT A CLOCK OR YARD STICK

THE ORIGINS OF TIME AND SPACE

CHRISTOF WETTERICH

Simple questions frequently require complex answers. A good example is the question of what existed before the Big Bang. There is no reliable data on this phase – and those looking for scientific answers must put aside established ways of thinking. One of the most persistent notions is that in terms of time and space, our universe is somehow embedded in “emptiness”. This notion goes back to an earlier world view in physics that saw the vacuum as nothingness, a void containing moving bodies like stars or atoms – or the universe. Today, physicists believe that the vacuum is quite complex and just as material in nature as the bodies moving within it. Indeed, there is no fundamental difference between vacuum and matter. We must, then, broaden the meaning of the term “matter” to include the vacuum.

Space and time describe relationships between different parts of matter. And in a sense, space and time are characteristics of the vacuum. But they cannot effectively describe reality unless they are measurable. Such measurements are made possible by metric fields that provide a fixed value for every space-time coordinate and are thus able to precisely determine the distance between two bodies or the time between two events.

But can we use the terms of time and space in immediate temporal proximity to the Big Bang? Close to the Big Bang the properties of space-time become so extreme that a unique assignment of distances is no longer possible. Different observers could choose different metrics and describe the same universe with different geometries. Spoken figuratively, there is no regularly ticking clock and no yard stick close to the Big Bang that could give meaning to time and space. The concepts of space and time are lost in the chaos of fluctuations and indeterminism. Hence, the question of a “before the Big Bang” becomes meaningless. ●

PROF. DR. CHRISTOF WETTERICH has been a researcher and faculty member of Heidelberg University's Institute for Theoretical Physics since 1992. He has held positions at the University of Freiburg, the European Organization for Nuclear Research CERN in Geneva, the University of Bern and the German Electron Synchrotron DESY in Hamburg. In 2005, he received the Max Planck Research Award for his proposition of a dynamic dark energy. In 2012, he was selected for an ERC Advanced Grant for his work on functional renormalisation. His research interests cover a wide range of subjects in theoretical physics: the cosmology of dark energy and the inflationary universe, quantum gravity and higher-dimensional theories of gravity, neutrino masses, Higgs-Boson and phase transitions in elementary particle physics, the fundamentals of quantum mechanics, and solid-state physics and ultracold quantum gases. Christof Wetterich is a member of the Heidelberg Academy of Sciences and Humanities.

Contact: c.wetterich@thphys.uni-heidelberg.de

“It is only through the fundamental measurability of spatial and temporal distances that concepts like space and time, the orbits of planets or the frequency of atom oscillations become effective descriptions of reality.”

vom elektrischen Feld oder vom Magnetfeld: Ebenso wie wir ein elektrisches oder magnetisches Feld messen können, können wir auch das metrische Feld, das „Gravitationsfeld“, präzise messen – dies machen wir uns auch für praktische Zwecke wie die Erderkundung oder GPS zunutze.

Ohne Metrik gibt es keinen Raum und keine Zeit

Für Raum und Zeit spielt die Metrik eine besondere Rolle. Räumliche Abstände zwischen zwei Körpern oder zeitliche Abstände zwischen zwei Ereignissen sind durch Werte des metrischen Felds bestimmt (präziser formuliert: durch ein Integral über einer Kombination von Feldwerten). Ohne Metrik gibt es weder Raum noch Zeit. Man könnte zwei Körpern zwar noch willkürliche Koordinaten zuteilen; sie hätten aber keine physikalische Bedeutung mehr. Erst durch die prinzipielle Messbarkeit von räumlichen und zeitlichen Abständen werden Konzepte wie Raum und Zeit, die Bahnen von Planeten oder die Frequenzen von Atomschwingungen zu einer wirkungsvollen Beschreibung der Realität. Erst dadurch wird es möglich, dass sich verschiedene Beobachter auf die gleiche Geometrie für die Raum-Zeit einigen können.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es räumliche und zeitliche Abstände nur, wenn die Metrik nicht Null ist. (Für Experten: wenn die Determinante der Metrik endlich und von Null verschieden ist.) Einstein ging wohl von einer „a priori“-Vorstellung der Existenz von Raum und Zeit aus, bei der nur deren Eigenschaften durch die Metrik bestimmt werden. Er hat deshalb von Null verschiedene Werte der Metrik postuliert. Ein elektromagnetisches Feld hingegen kann beliebige positive oder negative Werte annehmen – und auch Null sein. Dieser Vergleich lässt fragen, ob auch die Metrik unter gewissen Umständen den Wert Null annehmen kann. Doch dann gäbe es weder Raum noch Zeit. Schon diese einfache Frage zeigt, dass wir bei Konzepten wie Zeit und Raum eine gewisse Vorsicht walten lassen sollten, wenn wir uns extremen Bedingungen wie denen am Urknall zuwenden.

„Erst durch die prinzipielle Messbarkeit von räumlichen und zeitlichen Abständen werden Konzepte wie Raum und Zeit zu einer wirkungsvollen Beschreibung der Realität.“

Kann man die Begriffe Zeit und Raum also beliebig nahe am Urknall verwenden? Diese Frage ist eng mit der Frage verknüpft, ob es das Universum „schon immer“ gegeben hat. Aber was heißt „schon immer“? Auf den ersten Blick scheint eine Antwort auf diese Frage einfach: Wir können

Haus der Astronomie

Das Haus der Astronomie (HdA) ist ein einzigartiges Zentrum für astronomische Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit. Ziel des HdA ist es, astronomische Forschung einer breiten Öffentlichkeit in verständlicher Form zugänglich zu machen und den Austausch von Wissenschaftlern zu fördern. Mit einem vielfältigen Angebot unter anderem von Vorträgen, Workshops und Schülerforschungsprojekten wendet sich das HdA insbesondere auch an Kinder und Jugendliche. Dabei arbeitet es mit zahlreichen regionalen, nationalen und internationalen Partnern zusammen, darunter auch in enger Kooperation mit dem Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg.

Das Haus der Astronomie wurde 2008 von der Max-Planck-Gesellschaft und der Klaus Tschira Stiftung gegründet. Weitere Partner sind die Stadt Heidelberg und die Ruperto Carola. 2011 bezog das HdA ein eigenes Gebäude auf dem Heidelberger Königstuhl in direkter Nachbarschaft der Landessternwarte der Universität und des Max-Planck-Instituts für Astronomie; die Architektur des markanten Gebäudes ist der Form und Dynamik einer Spiralgalaxie nachempfunden.

„Lösen sich Zeit und Raum in der Nähe des Urknalls ins Unbestimmte auf, verschwinden sozusagen im Nebel?“

ein Jahr in die Vergangenheit zurückschauen oder zwei Jahre oder beliebig viele Jahre. Auf dieser Zeitskala ereignete sich der Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren. Was aber war vor 20 Milliarden Jahren?

Das Jahr ist eine Zeitskala unserer menschlichen Erfahrungswelt. Sie ist durchaus brauchbar für die Geschichte von Zivilisationen, unseres Planeten oder auch der Milchstraße. Aber für den Urknall? In der Phase kurz nach dem Urknall, in der die ersten Atomkerne entstanden sind, haben sich wichtige Eigenschaften des Universums innerhalb von Minuten grundlegend geändert – das Jahr ist hierfür keine nützliche Zeitspanne mehr. Wie sieht es ersatzweise mit der Sekunde als Zeiteinheit aus? Noch näher am Urknall, während des elektroschwachen Phasenübergangs, war die charakteristische Zeitspanne für grundlegende Änderungen der Eigenschaften des Vakuums nur ein Millionstel einer Millionstelsekunde. Diese Verkürzung der Zeitspanne setzt sich immer weiter fort: Der Urknall ist nicht irgendein beliebiger Zeitpunkt auf der Zeitachse; er ist ein Punkt, in dessen Nähe die Eigenschaften von Raum und Zeit extrem werden – er ist eine „Singularität“.

Gibt es immer eine Metrik?

Gibt es auch beliebig nahe am Urknall noch Zeit und Raum? Gibt es also dann noch eine Metrik? Und vor allem: Ist eine solche Metrik eindeutig bestimmt? Oder lösen sich Zeit und Raum in der Nähe des Urknalls ins Unbestimmte auf, verschwinden sozusagen im Nebel? An diesen Fragen setzen unsere Forschungsarbeiten im Institut für Theoretische Physik der Heidelberger Universität an. Dazu nutzen wir beispielsweise mathematische Modelle, mit denen sich Fragen nach dem Urknall angehen lassen. Bei der Untersuchung solcher Modelle stellte sich heraus, dass die Metrik kein „fundamentales“ Feld sein muss. Es gibt Modelle, die nur mit „Fermionen“ formuliert werden können – Teilchen wie Elektronen, aus denen Materie besteht. Ein metrisches Feld wird dann als eine Eigenschaft des Fermi-

onen-Systemen erhalten, genauer gesagt als „Korrelationsfunktion“. Je nach den Parametern, die man für das Modell wählt, kann die Metrik Null sein – dann gibt es keinen Raum und keine Zeit – oder sie kann positive Werte annehmen, sodass die Abstände eine Bedeutung bekommen. Mit diesen Modellen der Quantengravitation lässt sich gut veranschaulichen, dass Zeit, Raum und Geometrie Eigenschaften der Materie sind. Sie ermöglichen es uns, Fragen nach der Bedeutung von Zeit und Raum bei extrem kleinen Abständen mathematisch konsistent zu behandeln.

Das vielleicht wichtigste Resultat dieser Untersuchungen ist: Es gibt nicht nur eine mögliche Metrik, sondern beliebig viele. Verschiedenen Beobachtern steht es prinzipiell frei, eine jeweils eigene Metrik zu wählen, um Abstände zu messen. Mit anderen Worten: Jeder kann seine eigene Geometrie zur Beschreibung des Universums wählen – was für den einen eine Kugel ist, ist für den anderen ein Pfannkuchen.

„Intelligente Wesen auf einem fernen Planeten finden dieselbe Geometrie des Universums heraus wie wir auf der Erde.“

Ganz so extrem ist es dann doch nicht: Bei Abständen, die verglichen mit einer winzigen fundamentalen Längenskala wie der „Planck-Länge“ groß sind, stellt sich Folgendes heraus: Abstände, die mit verschiedenen möglichen Metriken gemessen werden, sind proportional zueinander, zumindest bis auf winzige Korrekturen. Damit unterscheiden sich nur die Einheiten, in denen Abstände ausgedrückt werden. Es ist zwar nicht immer praktisch, wenn der eine Wissenschaftler Längen in Zentimetern misst, der zweite in Inches und der Dritte in Ellen. Aber man kann sich auf eine Umrechnung einigen – und jeder Beobachter erhält die gleiche Geometrie. Intelligente Wesen auf einem fernen Planeten finden dieselbe Geometrie des Universums heraus wie wir.

In der Nähe des Urknalls

Zurück in die Nähe des Urknalls. Wenn man in die Nähe der fundamentalen Zeit- und Längen-Skala kommt, gilt die Proportionalität der Abstände nicht mehr. Nun unterscheiden sich die Geometrien verschiedener möglicher Metriken stark voneinander. Es gibt kein universelles Maß für Abstände mehr. Zwar könnte jeder Beobachter Zeit und Raum noch nach seinem Belieben definieren; deren Bedeutung aber versinkt im Unbestimmten.

Was also war vor dem Urknall? Meine Antwort auf diese Frage ist: Es gibt kein „davor“, weil es keine Zeit gibt. Genauer gesagt: Es gibt kein universelles Konzept von Zeit, das in der unmittelbaren Nähe des Urknalls gültig bleibt.

„In der Nähe des Urknalls gibt es keine regelmäßig tickende Uhr und keinen Meterstab mehr, mit denen Zeit und Raum Bedeutung gegeben werden kann.“

Und damit kann die Frage „Was war vor dem Urknall?“ nicht mehr vernünftig gestellt werden. Auch im übertragenen Sinn gibt es am Urknall keine regelmäßig tickende Uhr und keinen Meterstab mehr, mit denen Zeit und Raum Bedeutung gegeben werden kann. Zeit und Raum versinken im Chaos der Fluktuationen und der Unbestimmtheit. ●

Sonderforschungsbereich/Transregio „The Dark Universe“

Dunkle Materie und Dunkle Energie machen gemeinsam mehr als 95 Prozent der Energiedichte des Universums aus. Ihre physikalische Natur und Zusammensetzung sind jedoch nach wie vor weitestgehend unbekannt.

Wesentliches Ziel des Sonderforschungsbereichs/Transregio „The Dark Universe“ (SFB/TR 33) ist es, die Eigenschaften beider Phänomene zu entschlüsseln. Die beteiligten Wissenschaftler befassen sich dabei unter anderem mit der Frage, ob Dunkle Energie von statischer oder dynamischer Natur ist. Etwaige Wechselwirkungen zwischen Dunkler Energie und Dunkler Materie und ein möglicher gemeinsamer Ursprung beider Phänomene sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Sprecher des SFB/TR „The Dark Universe“ ist der Direktor des Heidelberger Instituts für Theoretische Physik, Prof. Dr. Christof Wetterich. Beteiligt sind außer der Universität Heidelberg die Universität Bonn und die Ludwig-Maximilians-Universität München. In 18 Teilprojekten bündelt und intensiviert der Forschungsverbund die Arbeiten der drei Universitäten auf den Gebieten der Kosmologie, der Astro- und der Teilchenphysik. Er wurde 2006 eingerichtet und befindet sich derzeit in der zweiten Förderphase, für die rund zehn Millionen Euro zur Verfügung stehen.