

Astrophysik aktuell

Helmut Hetznecker

Expansions- geschichte des Universums

A Cosmic Microwave Background (CMB) radiation map showing temperature fluctuations across the sky. The map is overlaid on a grid of latitude and longitude lines, representing the celestial sphere. The colors range from dark blue (cooler) to red and yellow (warmer), showing the distribution of matter and energy in the early universe.

Vom heißen Urknall
zum kalten Kosmos

SACHBUCH

 Springer

Astrophysik aktuell

Reihe herausgegeben von

Andreas Burkert
Astronomisches Institut
Universität München
München, Deutschland

Helmut Hetznecker
Übersee, Deutschland

Andreas Müller
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesells
Heidelberg, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe: <https://link.springer.com/bookseries/8367>

Helmut Hetznecker

Expansions- geschichte des Universums

Vom heißen Urknall
zum kalten Kosmos

2. Auflage 2022

 Springer

Helmut Hetznecker
Übersee, Deutschland

ISSN 2731-3514

ISSN 2731-3522 (electronic)

Astrophysik aktuell

ISBN 978-3-662-63553-7

ISBN 978-3-662-63554-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63554-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2007, 2022
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Cover-Abbildung: Das „2dF Galaxy Redshift Survey“ des Australian Astronomical Observatory zeigt die räumliche Verteilung von 230.000 Galaxien in einem Ausschnitt unserer kosmischen Umgebung innerhalb von 4 Milliarden Lichtjahren. Quelle: The 2dF Galaxy Redshift Survey team, www.2dfgrs.net

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

In Liebe für Steffi

Sokrates: Man wird zwar die Gestirne, diese Zierden des Himmels, für das Schönste und Regelreichteste halten unter allem Sichtbaren, aber da sie nun mal im Sichtbaren gebildet sind, so wird man zugeben, dass sie weit hinter dem Wahrhaften zurückbleiben [...]. Dies ist denn nur mit dem Verstand zu fassen nicht durch das Gesicht. Oder meinst du etwa?

Glaukon: Nimmermehr.

Platon, Der Staat, VII, 529c–d

Prolog: Was ist die Welt?

Wir leben in einer Welt, die einen Anfang hatte. Vor etwa 14 Milliarden Jahren hat sich das Universum in einem immer noch völlig unverstandenen Akt in seine Existenz geworfen. Seit seinem Beginn dehnt es sich aus, es expandiert, oder um präzise zu sein: Der Raum breitet sich aus. Einhergehend mit der immer noch andauernden Expansion kühlt sich das Universum fortwährend ab. Die Theorie des Urknalls als modernes kosmologisches Standardmodell kann die Expansion des Universums, die Entstehung der leichten Elemente und die heute beobachtete Temperatur erklären. Was dieses Modell nicht erklärt, ist der Grund für den Beginn der kosmischen Entwicklung. Die Kosmologie beschreibt nur die Innenarchitektur des Weltalls, nicht das Davor und nicht das, was außerhalb des Universums sein könnte. Sie schweigt über die Ursache der Expansion des Raumes, aber beschreibt, wie das einmal in Bewegung geratene Universum immer weiter expandiert, oder – je nach Gesamtmasse – wieder in sich zusammenfällt. Die Kosmologie stellt sich einem alten philosophischen Problem: Woraus besteht die Welt und welche Kräfte sind darin am Werk? Von diesen Fragen handelt dieses Buch, es erzählt vom Entstehen und Werden des ganzen Universums.

Woher nehmen Physiker eigentlich den Mut solche Fragen zu stellen? Wieso soll das Universum als Ganzes überhaupt in irgendeiner Weise verständlich sein? Schließlich ist der Weltraum *alles*, nicht irgendwas. „Da draußen“ ist es ja offenbar ganz anders als bei uns auf der Erde und trotzdem versuchen Menschen die Entwicklung und sogar die Entstehung des Universums zu

verstehen. Auf den ersten Blick scheint ein solches Unterfangen völlig aussichtslos, denn unser Erkenntnisapparat ist geschult an der unmittelbaren Anschauung. Anders gesagt: Die mit bloßen Augen und Ohren uns direkt zugänglichen Naturphänomene haben die Fähigkeiten unseres Gehirns hervorgebracht. Hätte das menschliche Gehirn keinen erheblichen Vorteil für das Überleben der Gattung Mensch gebracht, so hätte es sich nicht weiter entwickelt. Nur wenn eine Funktion in irgendeiner Weise von Nutzen für den Erhalt einer Spezies ist, wird sie von der Natur vorangebracht. Organe, die nicht nützlich sind in diesem Sinne, sterben ab. Unser Gehirn gehört also ganz offenbar zur erfolgreichen Ausstattung des Menschen, weil es Erfahrungen aus der direkten Umwelt zum Vorteil des Einzelnen verarbeitet.

Der Weltraum ist von einer nachgerade bestürzenden Leere. Das Licht sehr weit entfernter Sterne kann uns ja überhaupt nur deshalb erreichen, weil das Universum fast ganz leer ist. Unsere Umgebung, zum Beispiel die Luft in der Atmosphäre, ist von einer hohen Dichte geprägt. In einem Kubikzentimeter Luft schwirren 10^{20} Teilchen herum, die mittlere Dichte im Universum hingegen ist 26 Größenordnungen kleiner. Da draußen ist in der Tat fast nichts. Also noch mal, woher kommt der Mut der Physiker sich mit dem Universum als Untersuchungsgegenstand wissenschaftlich auseinanderzusetzen?

Er hängt mit einer ziemlich unglaublichen Hypothese zusammen. Die Kosmologen gehen davon aus, dass die auf der Erde gültigen Naturgesetze *überall* im Universum Bestand haben. Das mag auf den ersten Blick sehr anmaßend erscheinen, doch es hat seine Berechtigung. Denn die direkte Anschauung, die Sinneserfahrung, ist längst nicht mehr die Grundlage der modernen Physik, die sich vielmehr auf mathematische Abstraktion gründet. Die Kosmologie entspringt der Hypothese, dass wir die Natur als Ganzes durch ein Netz mathematisch formulierter Gesetze beschreiben können. Durch die Kombination von indirekten Hinweisen und mathematisch formulierten Theorien ist die Physik längst zu einer der intensivsten und weitest entwickelten intellektuellen Projekte der Menschheit geworden. Auf dem gesamten Globus forschen Menschen an den physikalischen Eigenschaften der Materie, des Lichts, des Raums und der Zeit. Durch die strikte

Durchführung ausgeklügelter Forschungsvorhaben ist es gelungen herauszufinden, woraus Materie besteht oder wie Licht und Materie interagieren. Und wir verstehen heute, wie grundlegende Voraussetzungen unseres Erkenntnisvermögens – Raum und Zeit! – sich verändern, wenn man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Alle diese Triumphe der modernen Physik basieren auf dem strengen Verfahren der Falsifikation. Falsifizieren – das bedeutet, eine falsche Aussage der Unwahrheit zu überführen. Zwar *suchen* die Physiker nach Wahrheit, doch sie können sich ihrer nie sicher sein. Deshalb haben sie sich auf den umgekehrten Weg gemacht. Theorien müssen falsifizierbar sein, sie müssen Vorhersagen machen, die im Experiment *überprüfbar* sind. Wenn das Experiment der Vorhersage entspricht, dann ist *vorläufig* auch die Theorie bestätigt. Die Geschichte der Physik zeigt jedoch, dass kaum eine Theorie ewig „lebt“. Früher oder später treten experimentelle Resultate auf, die die Grenzen der alten Lehre sichtbar und eine neue, umfassendere Theorie notwendig machen. Diese schafft neue Vorhersagen, die dann ihrerseits dem Experiment ausgesetzt werden.

Die Geschichte der Relativitätstheorie von Albert Einstein liefert ein wunderbares Beispiel für einen solchen Umfangsvorgang: Sie beschreibt die Physik schnell bewegter Systeme, sogar bis zur Lichtgeschwindigkeit. Sie umfasst die Mechanik Isaak Newtons, dessen Gleichungen nur für Geschwindigkeiten gültig sind, die viel kleiner sind als die des Lichts. Beide Theorien sind weithin anerkannt. Aber die eine, die Newtonsche Physik, ist eingebettet in Einsteins Theorie – die nichts mehr mit unserer durch den Alltag geschulden Anschauung zu tun hat. Im Gegenteil: Die Relativitätstheorie ist geradezu das Paradebeispiel für die Abstraktionsfähigkeit des menschlichen Gehirns. Einstein hat weit über die Welt der normalen Sinneserfahrungen hinausgedacht. Er ging davon aus, dass die mathematisch formulierten Naturgesetze in allen Bezugssystemen stets die gleiche Form haben sollten: Er verlangte deren *Invarianz*. Für Bezugssysteme, die sich mit sehr hohen Geschwindigkeiten bewegen, war diese Invarianz aus den Newtonschen Gesetzen heraus aber nicht zu erreichen. Außerdem gab es eine ganze Reihe von Experimenten mit Lichtstrahlen, die