



Kosmische Hintergrundstrahlung

Eine Facharbeit im Seminarfach Astronomie

Moritz Schwarznecker

Fachlehrer: Herr Riemer

Schuljahr 2021/22

Abgabetermin: 07.03.2022, Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	2
2 Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung.....	3
2.1 Entdeckung.....	3
2.2 Satelliten und Raumteleskope.....	3
2.3 BOOMERanG und MAXIMA.....	5
2.4 Heutiger Stand.....	5
3 Die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung.....	7
3.1 Frühuniversum.....	7
3.2 Entwicklung bis heute und in der Zukunft.....	8
4 Weiterführende Informationen über das Universum.....	9
4.1 Urknalltheorie.....	9
4.2 Inflationstheorie.....	10
4.3 Materieverteilung.....	10
4.4 Struktur und Größe.....	12
4.5 Alter.....	13
5 Fazit.....	14
6 Glossar.....	15
7 Quellenverzeichnis.....	17
8 Erklärungen.....	20

1 Einleitung

Der Ursprung unseres Universums ist seit Jahrzehnten eine überaus bedeutende Fragestellung der Astronomie und übersteigt oftmals die menschliche Vorstellungskraft. Es entstanden verschiedene Theorien zur Entstehung und frühen Entwicklung unseres Universums, die unterschiedlich starke Popularität und Zustimmung bekamen. Auch wenn viele Aspekte der Theorien dazu sehr abstrakt wirken mögen, kann die moderne Wissenschaft dabei auf Informationen von einem direkten Zeitzeugen der Frühphase des Kosmos zurückgreifen: Der 1964 entdeckten kosmischen Hintergrundstrahlung. Sie gilt als 13,8 Milliarden Jahre alt und als ältestes empfangbares Licht überhaupt¹, womit sie eine hervorragende Quelle ist. Allerdings können dank ihrer energischen Erforschung auch ganz andere Aspekte unseres Universums beleuchtet werden, als nur dessen Entstehung. In dieser Facharbeit soll ein umfassender Überblick über die kosmische Hintergrundstrahlung verschafft werden. Dazu wird zunächst ihre Entdeckung und Erforschung thematisiert, um zu verstehen, woher die Erkenntnisse zur kosmischen Hintergrundstrahlung stammen. Danach wird ihre Entstehung und anschließende Entwicklung erläutert. Nach einer Erklärung, was die kosmische Hintergrundstrahlung weiterführend über die Eigenschaften und Entwicklung unseres Universums aussagen könnte, wird in einem Fazit ihre Bedeutung reflektiert und es werden ungelöste Probleme aufgegriffen. Fachbegriffe, die im Text nicht näher erläutert werden, werden im Glossar erklärt und mit einer tiefgestellten Zahl gekennzeichnet.

¹ <https://svs.gsfc.nasa.gov/30133>

2 Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung

2.1 Entdeckung

Die Existenz einer kosmischen Hintergrundstrahlung wurde gegen Ende der 1940er- Jahre auf Grundlage theoretischer Erkenntnisse erstmals vorausgesagt. George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman hatten die Entstehung der ersten Atome aus Protonen und Neutronen² untersucht. Sie kamen zu dem Schluss, dass dieser Vorgang nur unter immens hohen Temperaturen möglich gewesen sein konnte. Sie gingen davon aus, dass eine übriggebliebene Strahlung aus dieser heißen Frühphase überall im Universum sein musste und schätzten ihre heutige Temperatur auf 5 Kelvin³. 1964 versuchten die Wissenschaftler Arno Penzias und Robert Wilson mit einer höchst sensitiven Antenne von New Jersey aus Mikrowellen aus dem Weltall aufzuzeichnen, erhielten aber ein konstantes Hintergrundrauschen mit einer Temperatur von annähernd 3 Kelvin⁴, das wesentlich energieärmer war als die Strahlung der Milchstraße⁵. Nach mehreren Versuchen, das vermeintliche Störgeräusch abzuschalten, gingen sie davon aus, dass es sich um ein isotropes Signal handeln musste, das den gesamten Weltraum erfüllt. Der Astronom Robert Dicke interpretierte den Befund als Beweis für die bereits vorausgesagte kosmische Hintergrundstrahlung, nach seiner Veröffentlichung dazu erhielt er von seinen Kollegen breite Zustimmung⁵.

2.2 Satelliten und Raumteleskope

Weitere wichtige Forschungsergebnisse nach dieser Entdeckung lieferten insbesondere mehrere Satelliten. Der 1989 gestartete Satellit COBE (Cosmic Background Explorer) der NASA kartierte die kosmische Hintergrundstrahlung am Himmel und fand 1992 lokal bedingte, winzige

2 https://de.wikipedia.org/wiki/Primordiale_Nukleosynthese

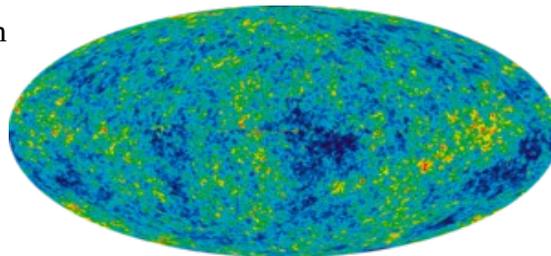
3 https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background

4 https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background

5 https://en.wikipedia.org/wiki/Arno_Allan_Penzias

Differenzen ihrer Intensität, womit er ihre perfekte Isotropie¹ widerlegte⁶. COBE konnte mit einem anderen Instrument das Spektrum kosmischer Hintergrundstrahlung mit einem Schwarzkörper vergleichen und fand heraus, dass sie ein Schwarzkörper² war. Ihre Temperatur maß COBE bei 2,725 +/- 0,002 Kelvin⁶. Im gleichen Jahr schafften es Wissenschaftler anhand von Daten des russischen Experiments RELIKT-1, das an Bord des bereits 1983 gestarteten Satelliten Prognoz 9 stattfand, die Anisotropie³ ebenfalls nachzuweisen⁴. Den nächsten Meilenstein bildete der 2001 gestartete amerikanische Satellit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), der eine zwanzig mal genauere Karte als sein Vorgänger COBE erstellen konnte, da er Temperaturunterschiede in einem Bereich von einem 20 Millionstel Grad maß (siehe Abb.1) und Hinweise auf die Verteilung von Masse im Frühuniversum gab⁷. Außerdem zeichnete WMAP erstmals die Polarisation⁴ der kosmischen

Hintergrundstrahlung auf⁸. Das letzte größere Projekt zur kosmischen



Hintergrundstrahlung war

Planck. Das Planck-Weltraumteleskop gehörte zur ersten Mission der ESA zu

Abbildung 1: Von WMAP gemessene Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung, rot höhere Temperatur, blau niedrigere. (https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Datei:WMAP_2010.png)

bis 2013⁹. Ihm gelangen 5 vollständige Himmelsablichtungen mit dreifach besserer Auflösung als WMAP und weniger Beeinflussung durch Störstrahlung⁷. Neben einer Verbesserung der Ergebnisse von WMAP bezüglich der Materieverteilung des Frühuniversums, konnten Wissenschaftler aufgrund der Ergebnisse von Planck das bisher angenommene Alter des Universums minimal von 13,7 auf 13,82

6 <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

7 https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Wilkinson_Microwave_Anisotropy_Probe

8 https://wmap.gsfc.nasa.gov/mission/sgoals_parameters_polar.html

9 https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Planck

Milliarden Jahre erhöhen¹⁰.

2.3 BOOMERanG und MAXIMA

Auch vom Boden aus wurden einige wichtige Experimente zur Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung gestartet und durchgeführt.

Hervorzuheben ist hier das sogenannte BOOMERanG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics)- Experiment, das als Projekt internationaler Universitäten und Forschungsinstituten zwischen 1998/99 und 2003 ablief und mit Ballonflügen am Südpol operierte.

BOOMERanG zeichnete das Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung auf, dessen Form Rückschlüsse auf kosmologische Parameter wie der Geometrie des Universums zulässt¹¹. Zusätzlich nahm das Experiment die zu diesem Zeitpunkt genauesten Daten zu Temperaturschwankungen und Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung auf¹². Das ebenfalls in 1998/99 mit Ballonflügen durchgeführte Experiment MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment Imaging Array) startete von Nordamerika aus. Es konnte im Vergleich zu BOOMERanG nur einen kleineren Abschnitt des Himmels auf Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung untersuchen, war dafür aber genauer und half entscheidend beim Kalkulieren ihres Leistungsspektrums. Außerdem konnte MAXIMA die Ergebnisse von BOOMERanG letztendlich bestätigen¹³.

2.4 Heutiger Stand

Das neueste größere Projekt, genannt CMB- S4, soll in den nächsten Jahren mithilfe von Observatorien aus Chile und vom Südpol stattfinden¹⁴. Doch obwohl immer wieder neue Erkenntnisse gemacht werden, ist die Wesensart

10 <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Weltraumteleskop>

11 DORAN, MICHAEL: Klarer Blick zum kosmischen Hintergrund In: Sterne und Weltraum Dossier, 1/2006, S.13

12 https://en.wikipedia.org/wiki/BOOMERanG_experiment

13 https://en.wikipedia.org/wiki/Millimeter_Anisotropy_eXperiment_IMaging_Array

14 <https://newscenter.lbl.gov/2020/09/09/lead-lab-selected-for-next-generation-cosmic-microwave-background-experiment/>

der kosmischen Hintergrundstrahlung dank jahrzehntelanger Arbeit sehr gut erforscht. Demnach besteht die kosmische Hintergrundstrahlung aus Photonen, die im gesamte Universum mit nahezu gleicher Konzentration vorhanden sind, nämlich etwa 400 Photonen pro Kubikzentimeter³. Diese isotrope und elektromagnetische Strahlung erreicht ihren Höchststand bei einer Frequenz⁵ von 160,4 Gigahertz, was mit einer Wellenlänge⁶ von 1,9 mm übereinstimmt, welche wiederum im Mikrowellenbereich liegt und somit für den Menschen nicht sichtbar ist¹⁵. Insgesamt kann die Wellenlänge der Hintergrundstrahlung zwischen einem Millimeter und einundzwanzig Zentimetern variieren¹⁶.

Dementsprechend kann sie von Radio-, Ferninfrarot- oder Mikrowellenteleskopen aufgenommen werden. Mit einer Temperatur von circa 2,7 Kelvin liegt sie gerade über dem absoluten Nullpunkt und

sie kommt dem Idealbild eines Schwarzen Körpers sehr nah, da ihr Spektrum der Planckschen Strahlungskurve⁷

für einen Körper mit einer Temperatur von 2,7 K beinahe gleich¹⁷ (siehe Abb.2). Die Intensität der Hintergrundstrahlung kann je nach Stelle am Himmel variieren, allerdings gerade einmal zu einem Hunderttausendstel³. Nur ein geringer Anteil der Hintergrundstrahlung ist polarisiert¹⁸.

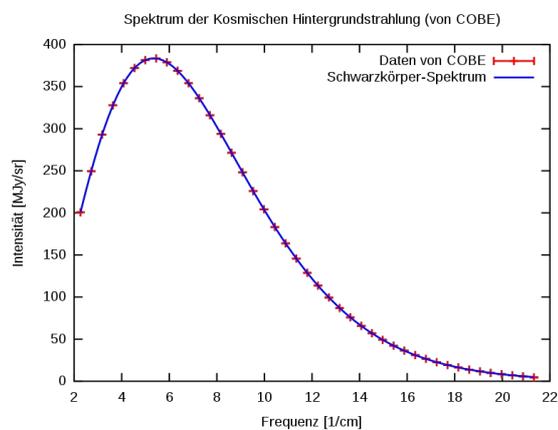


Abbildung 2: Rot: Spektrum der Hintergrundstrahlung nach COBE, Blau: Plancksche Strahlungskurve für einen Schwarzkörper von 2,7 Kelvin. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung#/media/Datei:Cmbr.svg>)

15 https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/wp/c/Cosmic_microwave_background_radiation.htm

16 KELLER, HANS-ULRICH: Das Kosmos Himmelsjahr 1997, 1996, S.81

17 <https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung>

18 <https://sci.esa.int/web/planck/-/60506-the-cosmic-microwave-background-temperature-and-polarisation>

3 Die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung

3.1 Frühuniversum

Die geläufigste und anerkannteste Theorie, die die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung und ihrer Eigenschaften erklärt, geht von einem Urknall als Beginn des Universums aus. Die Dichte und Temperatur in dieser Frühphase des Universums lassen sich bereits durch die Atom- und Plasmaphysik bestimmen. Demnach war es kurz nach dem Urknall extrem heiß im damals sehr kleinen Universum, Materie bestand nur in Form von Plasma, in dem sich noch keine Atome bilden konnten. Stattdessen waren Ionen, Elektronen, Neutronen und Photonen in dauerhafter Wechselwirkung miteinander, sodass die Photonen sich nicht frei ausbreiten konnten, das Universum war für sie nicht durchlässig. Die Temperatur dieses Plasmas sank aber innerhalb von dreihunderttausend Jahren nach dem Urknall von mehreren Billionen auf zehntausend Grad Celsius, da sich der Raum ausdehnte und die Dichte sank. Infolgedessen trat der Joule-Thomson-Effekt⁸ ein, die Materie kühlte ab. Nach dem Fall der Temperatur auf unter zehntausend Grad entstanden die ersten Wasserstoffatome und das Universum fing an, durchlässig für Photonen zu werden. Innerhalb der nächsten achtzigtausend Jahre kühlte der Kosmos weiter auf knapp 3000 Kelvin ab, womit dieser Prozess, der in der Fachsprache Rekombination heißt, abgeschlossen wurde und sämtliche Photonen sich vollends frei bewegen konnten. Genau diese ersten freien Photonen breiteten sich im gesamten Universum aus und sind damit das älteste empfangbare Licht, das dreihundertachtzigtausend Jahre nach dem Urknall entstand¹⁹. Laut dieser Theorie empfangen Arno Penzias und Robert Wilson genau dieses Signal, aber nicht mehr als sichtbares Licht, sondern als Mikrowellenstrahlung. Dies wird im nächsten Unterkapitel erklärt.

¹⁹ https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_Dem_Urknall_ins_Auge_blicken

3.2 Entwicklung bis heute und in der Zukunft

Denn der Raum des Universums dehnte sich weiterhin aus und mit ihm die Hintergrundstrahlung. Die Energie der Photonen verringerte sich nach und nach, gleichzeitig vergrößerte sich ihre Wellenlänge, die direkt nach der Rekombination noch bei 0,5

Mikrometern lag, bis sie heute im Mikrowellenbereich liegt¹⁹. Dies wird als Rotverschiebung⁹ bezeichnet, welche auch beim Licht anderer Galaxien festgestellt werden kann. 880 Millionen Jahre nach dem Urknall war

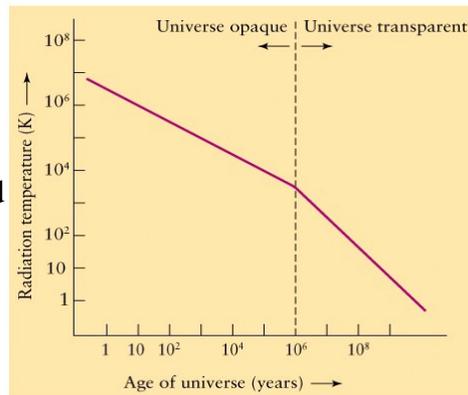


Abbildung 3: Temperaturentwicklung der kosmischen Hintergrundstrahlung in Abhängigkeit des Alters des Universums. (https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect31/figure28-11.JPG)

die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung bereits um den Faktor 1000 auf 16,4 bis 30,2 Kelvin gefallen, kosmologische Modelle hatten 20 Kelvin vorausgesagt (z.B siehe Abb.3)²⁰. Die kosmische Hintergrundstrahlung breitet sich seit 13,8 Milliarden Jahren im Universum aus und stammt vom Rand des beobachtbaren Universums, welches einen Radius von 46,6 Milliarden Lichtjahren hat²¹. Über diese Distanz hat sie sich also mindestens in alle Richtungen verbreitet. Da das Universum weiterhin expandiert, wird die Hintergrundstrahlung weiter abkühlen und rotverschoben werden. In mehreren Billionen Jahren wird sie deshalb nicht mehr nachweisbar sein²².

20 <https://www.scinexx.de/news/kosmos/fruecheste-temperaturmessung-des-kosmos-gelungen/>

21 https://de.wikipedia.org/wiki/Beobachtbares_Universum

22 <https://www.sciencefocus.com/space/will-the-cosmic-microwave-background-disappear/#:~:text=Yes.,will%20no%20longer%20be%20detectable.>

4 Weiterführende Informationen über das Universum

4.1 Urknalltheorie

Da diese Erklärung für die Herkunft der kosmischen Hintergrundstrahlung, die im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, eng mit einem sogenannten Urknall zusammenhängt, liegt es nahe, in ihr nach Beweisen für einen Urknall zu suchen. Eine Möglichkeit sind Gravitationswellen¹⁰. Wenn diese 2015 erstmals gemessenen Wellen²³ in der Hintergrundstrahlung nachweisbar wären, könnten sie nur durch die Entstehung aller Massen gleichzeitig, also dem Urknall, erfolgt sein, da es zum Zeitpunkt der Entstehung der Hintergrundstrahlung noch gar keine großen Massen wie Sterne oder Planeten gab²⁴. 2014 wollte tatsächlich ein Forschungsteam des Projektes BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) in der Polarisation der Hintergrundstrahlung die Struktur eines gradientenfreien B- Modes¹¹ erkannt haben, der durch eine starke Gravitationswelle entstanden war. Letztlich konnte diese Überlegung einer kritischer Überprüfung nicht standhalten, da die dortige Messung der Polarisation wahrscheinlich von galaktischem Staub verzerrt worden war²⁵. Allerdings ist das Urknallmodell das einzige kosmologische Modell, das die Hintergrundstrahlung erklären kann und seine Anhänger hatten vor ihrer Entdeckung bereits mit ihrer Existenz gerechnet. Beispielsweise stuft die Steady-State-Theorie¹² den Mikrowellenhintergrund als Licht sehr alter Sterne ein. Da die Hintergrundstrahlung jedoch sehr homogen ist, wären punktförmige Quellen wenig rational²⁶. Weitere Erforschungen widersprachen dem Urknallmodell bislang nicht, sondern führten eher zu seinem besseren Verständnis. Letztendlich sieht der Großteil der Experten und Wissenschaftlern aus diesen Gründen die Hintergrundstrahlung als

23 <https://science.orf.at/stories/3204632/>

24 WALTER, ULRICH: Im schwarzen Loch ist der Teufel los, 2016, S.32-33

25 <https://www.spektrum.de/news/bicep2-daten-loesen-sich-endgueltig-in-staub-auf/1330120#:~:text=Mit%20dem%20BICEP2%2DTeleskop%20hatten,kosmischen%20Mikrowellenhintergrundstrahlung%20ein%20Muster%20aufpr%C3%A4gen.>

26 <https://de.wikipedia.org/wiki/Steady-State-Theorie>

Beweis des Urknalls an²⁷. Ein finaler und direkter Beleg dafür ist wahrscheinlich nur hypothetisch.

4.2 Inflationstheorie

Eine Verbesserung, die das Urknallmodell betrifft, war die ab den 1970er-Jahren entwickelte Inflationstheorie. Denn die bis dahin angenommene Expansionsrate des Universums reichte nicht aus, um die hochgradige Isotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung und Homogenität des jetzigen Universums zu erklären²⁸. So beschreibt das Horizontproblem, dass Regionen im Universum eine nahezu gleiche Temperatur haben, obwohl sie so weit voneinander entfernt sind, dass das Licht der einen Region noch nicht bei der anderen ankommen konnte, es somit noch keinen Informationsaustausch gab und kein kausaler Kontakt existiert²⁹. Um diese Erklärungslücken zu füllen, besagt die Inflationstheorie, dass das Universum innerhalb von 10^{-35} bis 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall mindestens um den Faktor 10^{26} , die Lichtgeschwindigkeit überschreitend, expandierte. Anschließend habe sich die Expansionsgeschwindigkeit wieder normalisiert²⁸. Vor dieser Inflation sei das gesamte Universum somit in kausalem Kontakt gewesen und seine zu diesem Zeitpunkt bestehenden Eigenschaften überall ausgeprägt. Die dennoch vorhandenen Temperaturunterschiede der Hintergrundstrahlung sollen sich durch die Inflationsperiode stark ausgeglichen haben und die von der Theorie resultierende Anisotropie der Hintergrundstrahlung stimmt tatsächlich gut mit den Ergebnissen von WMAP und COBE überein²⁹. Da die Inflationstheorie auch die Bildung von Galaxien und Galaxienhaufen besser als eine Standardexpansion erklären kann²⁸, wird sie größtenteils anerkannt.

4.3 Materieverteilung

Die Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung spiegeln noch

27 <https://www.scinexx.de/dossierartikel/Urknall-kosmische-expansion-und-hintergrundstrahlung/>

28 [https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_\(Kosmologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_(Kosmologie))

29 <https://de.wikipedia.org/wiki/Horizontproblem>

heute noch die Materieverteilung im Universum wieder. Dabei gilt der Grundsatz, dass besonders kalte Abschnitte später zu leereren Regionen und besonders warme Abschnitte eher zu Galaxienhaufen oder Galaxien wurden, während kleinere Ausschläge am ehesten auf die Rotverschiebung und den Doppler- Effekt¹³, abhängig von der Bewegungsrichtung der Photonen, zurückzuführen sind¹⁷. Der Grund dieses Phänomens ist der Sachs- Wolfe-Effekt, der beschreibt, dass die Photonen Energie verloren haben, als sie Regionen mit sehr geringer Dichte erreichten, da sie die Anziehungskraft anderer Massen außerhalb der Region überwinden mussten, wozu ein Teil ihrer Energie benötigt wurde. Während sie also die Region durchqueren, vergrößert diese sich aufgrund der kosmischen Expansion und die Photonen erhalten beim Austritt weniger Energie zurück, als sie verloren haben³⁰. Ein Beispiel für so eine Region könnte der sogenannte Eridanus Supervoid sein, bei dem es sich um eine 1,8 Milliarden Lichtjahre große Region um das Sternbild Eridanus von unterdurchschnittlicher Dichte zu handeln scheint. Diese Dichte kann die Temperaturfluktuation in der Hintergrundstrahlung, die achtmal stärker als der Durchschnittsaus Schlag ist, jedoch nicht vollständig erklären, aber dieses Problem ist noch ungelöst³⁰. Doch kann aus der Hintergrundstrahlung nicht nur die regionale Verteilung von Masse, sondern auch die Zusammensetzung der Masse des Universums bestimmt werden. Um den Anteil von baryonischer Materie¹⁴ und dunkler Materie sowie dunkler Energie zum heutigen Zeitpunkt zu bestimmen, kann man sich das gemessene Leistungsspektrum der Hintergrundstrahlung, wobei ihre Temperaturfluktuationen in Abhängigkeit zum sogenannten Multipol-Moment¹⁵ gesetzt werden, zunutze machen³¹. Dieses offenbart drei Hochpunkte (siehe Abb.4, S.12). Der zweite Hochpunkt gibt Aufschluss darüber, wie viel baryonische Materie existiert. Da Materie sich gegenseitig anzieht, tendiert sie dazu, sich zu sammeln. Dies geht mit einer höheren Dichte einher. Baryonische Materie wird sich dabei auch erwärmen, da sie mit Licht interagiert, und der resultierende Druck führt zu einem

30 <https://astrobites.org/2021/12/21/eridanus-supervoid/>

31 <https://briankoberlein.com/blog/three-peaks-big-bang/>

Zurückdrängen des Materiehaufens. Deshalb gilt: Je mehr baryonische Materie, desto stärker das

Zurückdrängen und desto tiefer liegt der zweite Hochpunkt. Auf Grundlage dieser Überlegung ergibt sich ein Anteil baryonischer Materie von 4,9%³¹. Dunkle Materie

hingegen häuft sich zwar genau wie baryonische Materie an, interagiert allerdings nicht mit Licht und erfährt deswegen keinen Druck durch Licht. Der dritte Hochpunkt als Indikator für dunkle Materie gibt Aufschluss darüber, wie viel dunkle Materie im Vergleich zur gesamten Menge an Licht existiert. Der Anteil von 26,8%

dunkler Materie an der gesamten Masse kann aus diesem Verhältnis und dem bereits bekannten Verhältnis von baryonischer Materie und Licht abgeleitet werden³¹. Zieht man diese beiden Anteile von 100% ab, bleiben 68,3% übrig, die die dunkle Energie ausmacht. Die Planck- Mission lieferte diese bislang genauesten Ergebnisse, die auch im Einklang mit anderen Methoden der Massebestimmung stehen³¹.

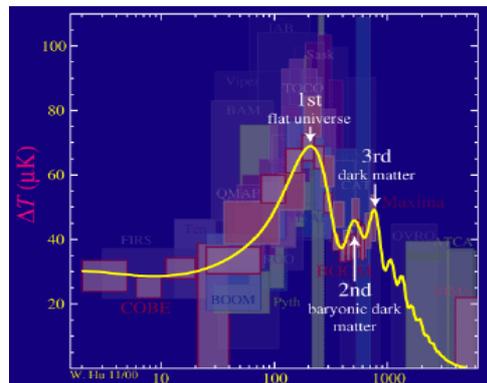


Abbildung 4: Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung. Auf der X-Achse der Multipol-Moment, auf der Y-Achse der Temperaturunterschied vom Mittelwert.

(<https://briankoberlein.com/blog/three-peaks-big-bang/cmb.png>)

4.4 Struktur und Größe

Der erste Hochpunkt des Leistungsspektrums ist ein Indikator dafür, ob das Universum positiv gekrümmt, negativ gekrümmt oder komplett flach gestreckt ist. Da die kosmische Hintergrundstrahlung das älteste wahrnehmbare Licht ist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sie, falls eine Krümmung vorhanden ist, durch diese verzerrt wurde, egal wie klein der Grad dieser Krümmung auch sein mag. Eine positive Krümmung, die dem Universum eine kugelhähnliche Struktur verleihen würde, würde die

Fluktuationen strecken und vergrößern, wodurch der erste Hochpunkt im Diagramm immer Richtung y-Achse verschoben werden würde. Eine negative Krümmung hätte den gegenteiligen Effekt³¹. Der tatsächliche Hochpunkt liegt bei einem Multipol- Moment von 200, was mit dem Modell eines nicht gekrümmten Universums so genau übereinstimmt, dass es eine perfekte Flachheit zu haben scheint, zumindest über die Distanz, die von Menschen untersucht werden kann³¹. Damit geht einher, dass das Universum möglicherweise unendlich, aber zumindest 150 mal größer als das beobachtbare Universum, sei³¹. Sein Durchmesser liege dann bei mindestens 13,950 Billionen Lichtjahren.

4.5 Alter

Die Anteile dunkler Materie und dunkler Energie, sowie der Nachweis eines flachen Universums, sind wichtige Bausteine, um das Alter des Universums, auch Weltalter genannt, aus der kosmischen Hintergrundstrahlung abzulesen. Das Weltalter gleicht annähernd dem Kehrwert der Hubble-Konstante, falls das Universum sich mit konstanter Geschwindigkeit ausdehnen würde³². Die Hubble- Konstante beschreibt die gegenwärtige Expansion unseres Universums, die wiederum durch die Masse an dunkler Energie beeinflusst wird³³. Die Hubble- Konstante kann unter anderem aus den Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung bestimmt werden³⁴. Diese sind, zusätzlich zur Expansionsrate, maßgeblich beeinflusst durch die Zusammensetzung und Dichte des Universums. Da die Zusammensetzung und die Dichte bereits gegeben sind (siehe Kapitel 4.3), lässt sich modellieren, wie schnell das Universum in der Vergangenheit expandierte und vor wie vielen Jahren die Expansion des Universums begann³⁵. Die Ergebnisse von WMAP ergaben mit einer Messungengenauigkeit von 0,4%, dass dieser Zeitpunkt vor 13,77 Milliarden Jahre stattfand. Planck erhöhte

32 <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltalter>

33 <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante>

34 https://de.wikipedia.org/wiki/Expansion_des_Universums

35 https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/uni_age.html

2018 auf 13,787 Milliarden Jahre³⁶. Die Werte für die Hubble- Konstante, die zusammen mit diesen Ergebnissen entstanden, unterscheiden sich jedoch um knapp neun Prozent von den Hubble- Konstanten, die mithilfe von der Rotverschiebung vom Licht ferner Galaxien errechnet wurden. Diese Differenz stellt für die Kosmologie eine wichtige Fragestellung dar³⁷. Der Kehrwert von Plancks Hubble- Konstante, 67,15 km/s, würde ein Weltalter von knapp 14,5 Milliarden Jahren ergeben³³.

5 Fazit

Festzuhalten bleibt, dass es noch einige Unklarheiten gibt, die im Zusammenhang mit der kosmischen Hintergrundstrahlung stehen, zum Beispiel den Eridanus Supervoid. Wir haben noch Potenzial, sie besser zu verstehen, trotz bereits hervorragender und höchst detaillierter Daten aus jahrzehntelanger Forschung. Aus diesen Daten lassen sich nämlich keine Fakten ablesen: Da wir nicht in die Vergangenheit reisen oder das Universum von außen betrachten können, bleibt uns nur übrig, zu modellieren, zu vergleichen und Zusammenhänge herzustellen. Die Anfänge des Universums können wir nur mit unserem menschlichem Wissen rekonstruieren. Ob uns dabei etwas entgeht, oder wir manches auch gar nicht erfassen können, bleibt offen. Die Entdeckung und Erforschung der Hintergrundstrahlung war jedenfalls bahnbrechend für die Astronomie. Durch sie konnten nahezu alle Modelle aussortiert, sowie das heutige Standardmodell der Kosmologie verbessert und verstanden, werden. Die Wissenschaft konnte und kann durch sie erstmals mit höchster Genauigkeit sagen, was sie für die Parameter des Kosmos berechnen konnte. Die kosmische Hintergrundstrahlung bildet zusammen mit Einsteins Relativitätstheorie einen der wichtigsten Meilensteine der Kosmologie des zwanzigsten Jahrhunderts und war Antrieb für einen wissenschaftlichen Fortschritt von enormer Geschwindigkeit. Warum sollte sie nicht auch in

36 https://en.wikipedia.org/wiki/Age_of_the_universe

37 <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2021/01/15/ask-ethan-how-does-the-cmb-reveal-the-hubble-constant/?sh=3ca05200293a>

Zukunft ein solcher Antrieb sein? Neue Projekte stehen bereits in den Startlöchern¹⁴.

6 Glossar

1- Isotropie:

Eine Isotropie ist dann gegeben, wenn Eigenschaften eines Stoffes richtungsunabhängig sind.

2- Schwarzkörper:

Ein Schwarzer Körper absorbiert jegliche elektromagnetische Strahlung vollständig und gibt selbst eine Wärmestrahlung ab. Er kommt in der Natur nicht in seiner Idealform vor.

3- Anisotropie:

Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften eines Stoffes.

4- Polarisation:

Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle beschreibt, in welcher Richtung diese schwingt.

5- Frequenz:

Die Frequenz f einer Welle gibt die Anzahl der vollen Schwingungen pro Zeiteinheit wieder.

6- Wellenlänge:

Die Wellenlänge λ einer Welle ist der Abstand zweier direkt benachbarter Punkte gleicher Phase.

7- Plancksche Strahlungskurve:

Die Plancksche Strahlungskurve gibt die Verteilung der elektromagnetischen Strahlungsleistung von der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers als Funktion der Wellenlänge oder Frequenz wieder.

8- Joule- Thomson- Effekt:

Der Joule- Thomson- Effekt beschreibt die Temperaturänderung eines Gases oder Gasgemisches bei Druckänderung.

9- Rotverschiebung:

Die Rotverschiebung beschreibt, dass die Wellenlänge einer elektromagnetischen Strahlung sich vergrößert, wenn Strahlungsquelle und Empfänger sich voneinander wegbewegen.

10- Gravitationswellen:

Gravitationswellen sind Wellen, die den Raum durchlaufen, wenn sich sehr massereiche Objekte schnell bewegen.

11- gradientenfreier B-Mode:

Ein gradientenfreier B-Mode ist ein spezielles Muster, das in Polarisierungen von Wellen vorkommen kann und dessen kosmologische Existenz als Nachweis für Gravitationswellen gelten würde.

12- Steady-State-Theorie:

Eine Theorie, die besagt, dass das Universum nicht expandiert und sein Zustand gleich bleibt.

13- Doppler-Effekt:

Der Doppler-Effekt beschreibt die Änderung der Frequenz einer Welle in Abhängigkeit davon, ob und wie sich Quelle und Empfänger zueinander bewegen.

14- baryonische Materie:

Materie, die aus Atomen aufgebaut ist.

15- Multipol-Moment:

Multipol-Momente sind Vorfaktoren einer mathematischen Reihe, die zur Beschreibung einer sehr komplexen Funktion dienen.

7 Quellenverzeichnis

Literaturquellen:

- KELLER, HANS-ULRICH: Das Kosmos Himmelsjahr 1997, 1996
- WALTER, ULRICH: Im Schwarzen Loch ist der Teufel los, 2016
- Sterne und Weltraum Dossier, 1/2006, mehrere Autoren

Internetquellen:

S.2

- <https://svs.gsfc.nasa.gov/30133>

S.3

- https://de.wikipedia.org/wiki/Primordiale_Nukleosynthese
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background
- https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background
- https://en.wikipedia.org/wiki/Arno_Allan_Penzias

S.4

- <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
- https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Wilkinson_Microwave_Anisotropy_Probe
- https://wmap.gsfc.nasa.gov/mission/sgoals_parameters_polar.html
- https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Planck

S.5

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Weltraumteleskop>
- https://en.wikipedia.org/wiki/BOOMERanG_experiment
- https://en.wikipedia.org/wiki/Millimeter_Anisotropy_eXperiment_I_Maging_Array
- <https://newscenter.lbl.gov/2020/09/09/lead-lab-selected-for-next-generation-cosmic-microwave-background-experiment/>

S.6

- https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/wp/c/Cosmic_microwave_background_radiation.htm
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung>
- <https://sci.esa.int/web/planck/-/60506-the-cosmic-microwave-background-temperature-and-polarisation>

S.7

- https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_De_m_Urknall_ins_Auge_blicken

S.8

- <https://www.scinexx.de/news/kosmos/fruecheste-temperaturmessung-des-kosmos-gelungen/>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Beobachtbares_Universum
- <https://www.sciencefocus.com/space/will-the-cosmic-microwave-background-disappear/#:~:text=Yes.,will%20no%20longer%20be%20detectable.>

S.9

- <https://science.orf.at/stories/3204632/>
- <https://www.spektrum.de/news/bicep2-daten-loesen-sich-endgueltig-in-staub-auf/1330120#:~:text=Mit%20dem%20BICEP2%2DTeleskop%20hatten,kosmischen%20Mikrowellenhintergrundstrahlung%20ein%20Muster%20aufpr%C3%A4gten.>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Steady-State-Theorie>

S.10

- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/Urknall-kosmische-expansion-und-hintergrund-strahlung/>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_\(Kosmologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Inflation_(Kosmologie))
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Horizontproblem>

S.11

- <https://astrobites.org/2021/12/21/eridanus-supervoid/>
- <https://briankoberlein.com/blog/three-peaks-big-bang/>

S.13

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltalter>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Expansion_des_Universums
- https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/uni_age.html

S.14

- https://en.wikipedia.org/wiki/Age_of_the_universe
- <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2021/01/15/ask-ethan-how-does-the-cmb-reveal-the-hubble-constant/?sh=3ca05200293a>

Sämtliche Internetquellen wurden zuletzt am 04.03.2022 abgerufen.

Bildquellen:

Deckblatt:

- [Logo_Vollton_0.jpg \(2563×923\) \(greselius.de\)](#)

S.4:

- https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Datei:WMAP_2010.png

S.6

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung#/media/Datei:Cmbr.svg>

S.8

- https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect31/figure28-11.JPG

S.12

- <https://briankoberlein.com/blog/three-peaks-big-bang/cmb.png>

8 Erklärungen

Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift des Schülers

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift des Schülers

