

**Ursprung und Bedeutung der kosmischen
Hintergrundstrahlung**

Ein empirischer und quantitativer Nachweis der kosmologischen Wirklichkeit

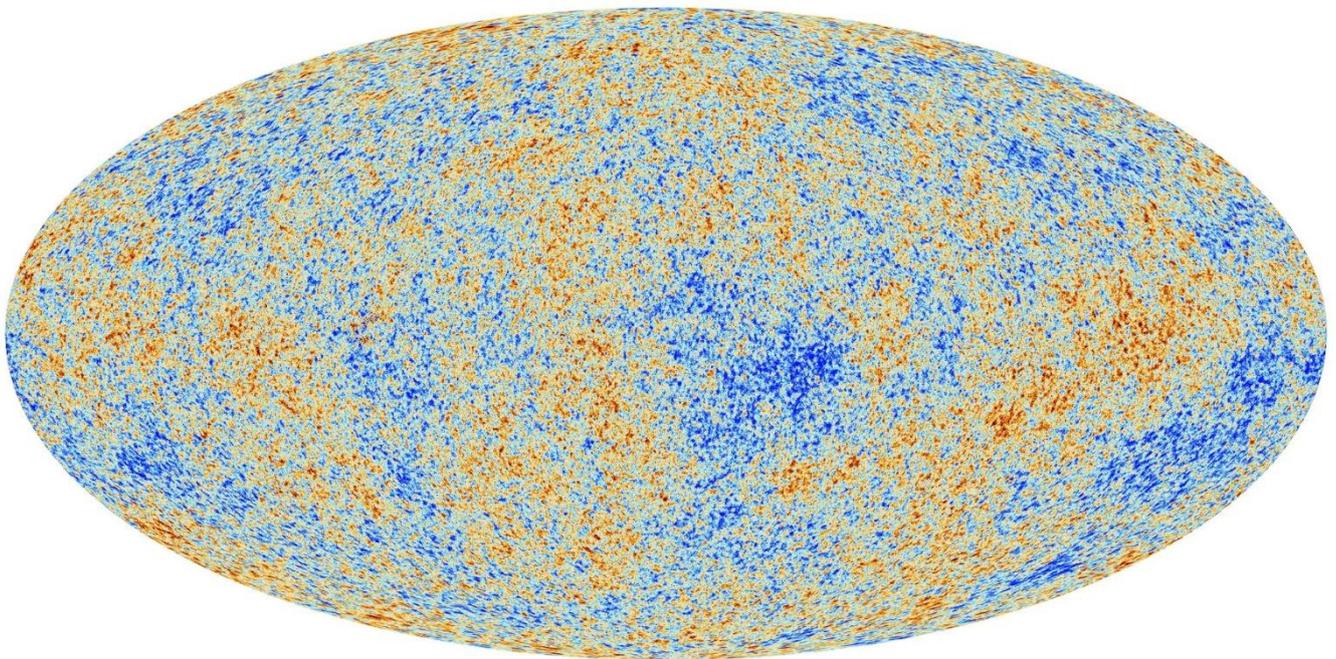


Abbildung 1: Kosmische Hintergrundstrahlung

URL:

https://www.weltderphysik.de/media/?tx_wdpmedia_pi2%5Baction%5D=image&tx_wdpmedia_pi2%5Bcontroller%5D=Gallery&tx_wdpmedia_pi2%5Bimage%5D=4993&cHash=61dcba1ed4f62067e7a339f85fe987b5

Anja Dudar
Seminarfach: Astronomie 2023/2024
Fachlehrer: Florian Riemer
Abgabe: 21.02.2024
Bramsche, 11.01.2024

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	2
2	ENTDECKUNG DER KOSMISCHEN HINTERGRUNDSTRAHLUNG	2
2.1	Theoretische Vorhersage 1948	2
2.2	Entdeckung durch Penzias und Wilson 1965	4
3	EIGENSCHAFTEN DER KOSMISCHEN HINTERGRUNDSTRAHLUNG	4
3.1	Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung	4
3.2	Spektrale Verteilung	6
3.3	Homogenität und Isotropie	8
4	URSPRUNG DER KOSMISCHEN HINTERGRUNDSTRAHLUNG.....	9
4.1	Urknalltheorie und Entstehung des Universums	9
4.2	Entstehung der CMB.....	10
5	BEDEUTUNG DER KOSMISCHEN HINTERGRUNDSTRAHLUNG.....	11
5.1	Bestätigung der Big-Bang Theorie.....	11
5.2	Struktur und Entwicklung des Universums.....	12
5.3	Inflationstheorie	14
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	16
7	ANHANG.....	17
7.1	Verzeichnisse	17
7.1.1	Abbildungsverzeichnis	17
7.1.2	Literaturverzeichnis Schriftquellen	18
7.1.3	Literaturverzeichnis Internetquellen	19
7.2	Register	21
7.2.1	Sachwortregister	21
7.3	Erklärungen	23
7.3.1	Selbstständigkeitserklärung	23
7.3.2	Veröffentlichung.....	23

1 Einführung

Die kosmische Hintergrundstrahlung gilt heute als ein Fenster in die Zeit des Frühuniversums und verrät uns unheimlich viel darüber, warum unser Universum so ist wie es ist. Sie entstand knapp 380.000 Jahre nach dem Urknall und liefert uns auch fast 14 Milliarden Jahre später noch Informationen über die ersten Zustände des Universums und erklärt gleichzeitig heutige Zustände. 1948 zuerst von Gamow und Alpher mit unglaublicher Präzision der Temperaturangabe vorhergesagt, wurde sie 1965 versehentlich von Wilson und Penzias entdeckt, obgleich viele Forscher gezielt versuchten diese Strahlung zu finden. Die Entdeckung dieser Strahlung läutete eine neue Ära der Kosmologie ein, da man mithilfe der CMB(Cosmic-Microwave-Background) qualitative Nachweise für bestimmte Theorien hatte und andere wiederum ausschließen konnte. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist essentiell für die Theorie des Urknalls und konnte mit ihrer Entdeckung viele Zweifel an der Theorie klären. Doch auch zeigt sie, was kurz nach dem Urknall geschah und den Einfluss dunkler Materie, womit die Existenz derer noch sicherer vorhergesagt werden kann, obwohl ein direkter Nachweis bis heute noch nicht gelungen ist. Ein anderer großer Erfolg darf auch nicht vernachlässigt werden, und zwar die Struktur unseres Universums, die als flach bezeichnet werden kann, also dass es keine nennenswerte Krümmung besitzt und wie jegliche Strukturen aus Dichtefluktuationen gebildet werden konnten. Eindrucksvoll ist hierbei der Fakt, dass Computersimulationen hinsichtlich aller Parameter, die wir von unserem Universum kennen, aus den Dichtefluktuationen alle heutigen Strukturen, die wir sehen können, ziemlich exakt nachbilden.

In dieser Seminararbeit werde ich die kosmische Hintergrundstrahlung von der Entdeckung bis hin zur heutigen Bedeutung untersuchen und dabei den Ursprung und all die vielen Informationen, die wir der CMB entnehmen können, herausarbeiten und darstellen.

2 Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung

2.1 Theoretische Vorhersage 1948

In den 1940er Jahren stellten George Gamow und sein Student Ralph Alpher als Erste eine Rechnung zur Entstehung der Elemente nach dem Urknall an. Zuerst erwarteten sie herausfinden zu können, dass alle Elemente ihren Ursprung im

Urknall haben, jedoch stellte sich schnell heraus, dass es anfangs nur die leichtesten Elemente wie Wasserstoff und Helium gegeben haben müsste. Zu diesem Entschluss kamen sie durch die Entwicklung der Alpher-Bethe-Gamow Theorie, wobei der Name von Hans Bethe, einem deutschen Physiker der nicht an der Forschung beteiligt war, nur zum Spaß als Anlehnung zum griechischen Alphabet α - β - γ genutzt wurde¹. Für die Theorie muss man sich den ersten Zustand des Universums als ein heißes und unglaublich komprimiertes Neutronengas vorstellen, aus welchem sich im Laufe der Expansion des Universums und der damit einhergehenden Druckminderung, Protonen und Elektronen bildeten². Dabei veränderte sich das Verhältnis so, dass es mehr Protonen als Neutronen gab, denn die Temperatur von 1 Milliarde Kelvin und damit auch Wärmeenergie, welche kurz nach dem Urknall herrschte, reichte nicht mehr aus, um die Massendifferenz laut $E=mc^2$ zwischen den Protonen und Neutronen auszugleichen, weil Neutronen eine höhere Masse als Protonen besitzen und damit mehr Energie erforderlich ist, um Neutronen entstehen zu lassen. Im Zuge dessen konnte sich Deuterium (schwerer Wasserstoff) bilden, das wiederum noch ein Proton und Elektron aufnehmen kann, um Helium zu bilden. Dieser Prozess vollzog sich 380.000 Jahre, bis die Photonen nicht mehr energiereich genug waren, um dem Wasserstoff die Elektronen zu entziehen. Aus ionisiertem Wasserstoff konnte neutraler Wasserstoff gebildet werden und die Photonen konnten sich frei bewegen³. Genau dies erkannten 1948 Alpher³ und Robert Hermann, welcher ein Weiterer von Gamows Student war, und berechneten die Temperatur dieser Strahlung auf 5 Kelvin⁴. Wie sich 1965 herausstellen sollte, sagten die Beiden die kosmische Hintergrundstrahlung mit einem ziemlich nahen Wert an der Realität voraus.

¹ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 280-281

² (Alpher, Bethe, & Gamow, 1948) S. 803

³ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 285-287

⁴ (Alpher & Herman, 1948) S. 775

2.2 Entdeckung durch Penzias und Wilson 1965

Auch wenn die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung einen Meilenstein in der Astrophysik darstellen sollte, so fand sie doch zufällig statt. Die beiden

Wissenschaftler Arno A. Penzias und Robert W. Wilson forschten in den 1960er Jahre an einer Möglichkeit per Satellit Funkverbindungen über weite

Strecken hinweg herzustellen, und zwar mit einer überaus empfindlichen Hornantenne. Dabei gab es nur ein Problem: Selbst nach Bereinigung aller Störsignale war immer ein Rauschen zu hören, was selbst nach einer gründlichen Reinigung der Antenne nicht verschwand⁵. Diese Strahlung befand sich im Mikrowellenbereich und kam gleichmäßig von allen Seiten, wobei sich der Strahlung eine Temperatur von 3 Kelvin zuschreiben ließ. 1965 veröffentlichten sie ihre Entdeckung und erhielten 1978 den Nobelpreis für Physik, denn jetzt hatte man einen klaren Beweis für die Existenz der CMB und konnte aus dieser Strahlung auf viele weitere Eigenschaften unseres Universums schließen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher erläutert werden⁶.

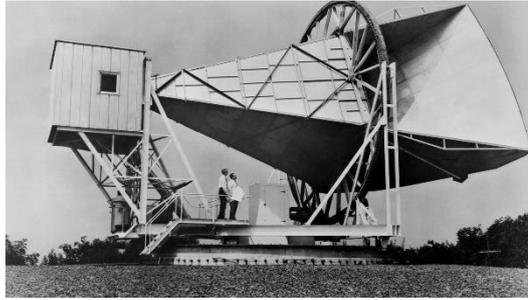


Abbildung 2: Penzias und Wilsons Hornantenne URL:

https://bilder.deutschlandfunk.de/FI/LE/_6/08/FILE_608d05fb1e57238f138da924f326a6c3/20210110a-holmdel-antenna-jpg-100-1920x1080.jpg

3 Eigenschaften der kosmischen Hintergrundstrahlung

3.1 Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung

Ab diesem Punkt fragt man sich zurecht, wie es möglich ist die Temperatur dieser Strahlung zu bestimmen und welche Bedeutung sie hat. Fangen wir damit an, was Temperatur überhaupt ist. In einer Flüssigkeit haben Moleküle relative Geschwindigkeiten zueinander, das heißt, sie bewegen sich in einer Flüssigkeit mit einer bestimmten Geschwindigkeit zueinander. Je niedriger die Temperatur nun ist, desto kleiner sind diese Relativgeschwindigkeiten zueinander und umgekehrt ebenso. Bei festen Stoffen ist die Temperatur die Stärke der

⁵ (Lorenzen, 2021)

⁶ (Reichert, 2015) S. 41

Schwingungen von den Molekülen, wohingegen es bei Gasen wieder die Relativgeschwindigkeit ist. Misst man nun die Temperatur von einem Stoff, so wird Bewegungsenergie der Moleküle übertragen und in Wärme umgewandelt. Das bedeutet, dass der ‘‘Messstoff‘‘ wie z.B. Quecksilber, wenn er die Temperatur angenommen hat, sich im thermischen Gleichgewicht mit dem zu messenden Stoff befindet, also die Temperatur angenommen hat. Doch wie ist es nun möglich eine Temperatur bei Strahlung zu messen? Da Atome aus positiven und negativen Ladungen bestehen, erzeugen sie beim Beschleunigen elektromagnetische Felder und diese Felder sind gleichzeitig auch Wärmestrahlungen, welche in Form von Photonen vorliegen. Die Leistung einer Wärmestrahlung lässt sich durch das Stefan-Boltzmann Gesetz $P = \sigma \times A \times T^4$ berechnen ⁷. Dabei gibt P die Strahlungsleistung an, σ die Stefan-Boltzmann Konstante, A die Fläche und T die absolute Temperatur, wobei diese Formel nur für einen Schwarzen Körper gilt, sprich ein Körper, der alle Strahlungen, die ihn treffen, vollständig absorbiert⁸. Je heißer nun ein Medium ist, desto höher ist auch die Leistung der Strahlung. Ohne dieses Gesetz gäbe es auch kein Leben auf der Erde, denn die Wärme der Sonne muss durch ein Vakuum zu uns gelangen, anders als die Übertragung von Molekül zu Molekül. Messbar wird die Temperatur nun dadurch, dass wie schon erwähnt, Wärmestrahlung aus Photonen besteht und damit auch gleichzeitig Licht ist. Nun hat die Wärmestrahlung ein bestimmtes Spektrum und dieses Spektrum zeigt an, wie viel Leistung bei einer Frequenz abgegeben wird. Das Spektrum hängt zudem ausschließlich von der Temperatur ab. Wie in Abbildung 3 zu sehen, ist die maximale Intensität je nach Temperatur immer anders, was sich mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz $\lambda_{max} = b \div T$ erklären lässt. Dabei ist b eine Konstante ($b = 2897,8 \mu\text{m} \times K$) und T die Temperatur der Strahlung. Misst man nun ein Spektrum einer Strahlung

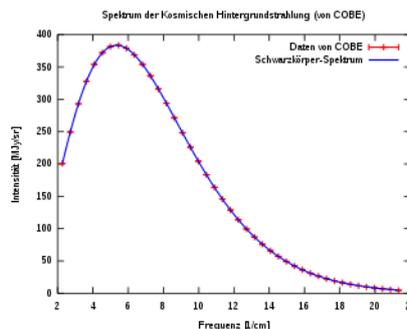


Abbildung 3: Aus COBEs Daten erstelltes Strahlungsspektrum der CMB

URL:
<https://www.biancahoegel.de/wissen/strahlung/bilder/langde-330px-Cmbr.svg.png>

⁷ (Konrad, 2022) 0:50 – 6:40

⁸ (AG, kein Datum)

und kennt das Maximum, so weiß man auch welche Temperatur die Strahlung hat. Dieses Prinzip hat man auch bei der kosmischen Hintergrundstrahlung angewendet und kam auf das Ergebnis, dass diese eine Temperatur von 2,73 Kelvin besitzt, denn die Messdaten, wie hier vom Cosmic Background Explorer (COBE) aufgenommen, passen so genau auf das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung von 2,73 K, wie noch nie zuvor gemessen (Abbildung 3)⁹.

3.2 Spektrale Verteilung

Das Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung verrät uns viel über die Zustände im Universum, wie die Materiedichte oder die Form. Dafür schauen wir uns das Diagramm stückweise an, wobei es sich in große und kleine Winkelskalen einteilen lässt und die gemessene Stärke der Fluktuationen in μK^2 zum Mittelwert 2,73K in Abhängigkeit zur Winkelskala angegeben ist. Die grüne Kurve zeigt die theoretische Berechnung nach dem Urknallmodell Λ CDM und die roten Punkte stellen Messwerte von WMAP mitsamt Unsicherheiten dar¹⁰. Bei dieser richtungsabhängigen Betrachtung spricht man auch von Anisotropie, das Gegenstück zur Isotropie, die in Kapitel 3.3 näher erläutert wird. Um nun diese Angaben auswerten zu können, werden die Temperaturen mithilfe von Kugelfunktionen zu Schwingungen gewandelt, die man

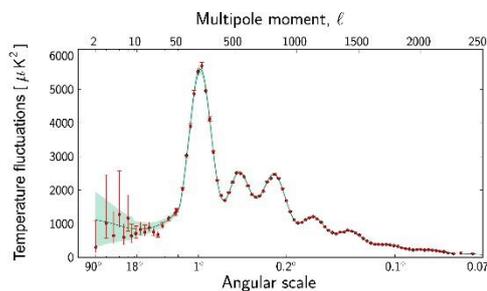


Abbildung 4: Leistungsspektrum der CMB

auch Moden nennt. Um dies besser zu verstehen führt man auch oft einen

Vergleich eines Orchesters an, denn die Fluktuationen lassen sich mit Schallwellen vergleichen und jede

URL: https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/mpa/institute/news_archives/news1303_aaa/fig2.jpg

Mode stellt ein eigenes Instrument dar. Dabei ordnet man jedem Ton eine Zahl n zu, die angibt, an wie vielen Stellen sich die Saite nicht bewegt, was auch Knoten genannt wird. Die Amplitude gibt die Lautstärke an und allgemein braucht man mehr Harmonische (Zahl n), je komplizierter eine Schwingung ist. Nun kommt

⁹ (Konrad, 2022) 6:40 -11

¹⁰ (HAE/HOR, 2013)

noch die Kugelform hinzu, wie es schon der Name verrät. Man hat eine zweidimensionale Kugelfläche und braucht damit zwei weitere Werte, die l und m genannt werden, um ein Moden darzustellen. Für jedes l braucht man ein m , das zwischen l und $-l$ liegt, was in der Kombination auch ein Multipol genannt wird, weil einem l mehrere m zugeordnet werden können. Verschiedene l haben auch verschiedene Bezeichnungen wie $l=1$, auch Dipol genannt, weil die halbe Kugeloberfläche nach innen und die andere Hälfte nach außen schwingt. Beachten muss man hierbei durch m , dass es drei Moden gibt und zwar $-1, 0, 1$ (da $l=1$). Final muss man noch wissen, dass sich dadurch jede Temperaturschwankung als Kugelfunktion angeben lässt, immer eine eigene Amplitude hat und man dadurch sehen kann, wie laut ein Instrument spielt, um auf die Analogie zurückzukommen. Doch kehren wir nach dem mathematischen Hintergrund zurück, was uns diese Messwerte jetzt mitteilen können. Im winkelabhängigen Leistungsspektrum beginnt die Kurve erst bei $l=2$, weil die vorherigen Werte keine Aussage haben¹¹.

Die anderen drei Peaks, auch Oszillationen genannt, beinhalten jeweils andere Informationen. Die erste Oszillation bei einem Winkelgrad von 1 sagt uns, dass die meisten Strukturen in den Fluktuationen dieser Größe entsprechen sollten, was sich bewahrheitet, wenn man sich die Karte (Abbildung 7) der Fluktuationen anschaut. Auch sagt uns dieser Peak, dass das Universum flach sein muss, denn die Lage zeigt, dass das Universum am euklidischen Grenzfall liegt, also Ω gleich 1 beträgt. Im hyperbolischen Fall, das heißt eine negative Krümmung des Raumes, müsste der Wert Ω kleiner als 1 sein und die Winkelsumme des Dreiecks würde weniger als 180

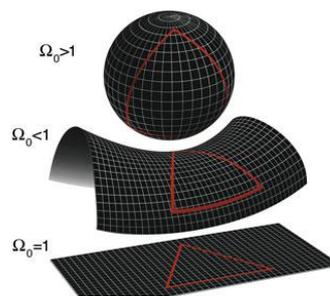


Abbildung 5:
Verschiedene Fälle der
Geometrie des
Universums

URL:
https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/990006/990006_320.jpg

Grad betragen, anders als bei unseren Messwerten, die genau 180 Grad ergeben. Dieses Ergebnis deckt sich zudem auch mit der Vermutung, dass die Inflation vorhandene Unebenheiten im Frühuniversum glatt gezogen hat¹². Die anderen Peaks, die bei einem halben, viertel und achtel Grad liegen, stellen die Dichtefluktuationen nach der Rekombinationsphase dar. Wenn sich das Baryonen-

¹¹ (Starkman & Schwarz, 2005) S. 30-34

¹² (Vaas, 2001) S. 52-57

Photon Gemisch ausdehnt, so nimmt der Druck ab, bis die dunkle Materie mit ihrer Gravitationskraft das Gemisch wieder zum Kollabieren bringt. Damit steigt der Druck wieder, da das Gemisch komprimiert wurde. Dies nennt man auch die baryonisch-akustische Oszillation. Diese Struktur wurde quasi in der Hintergrundstrahlung eingefroren und spiegelt sich im Leistungsspektrum wider¹³. Der immer geringer werdende Schluss kann mit der Silk-Dämpfung erklärt werden, die zu einer Homogenisierung der CMB führte. Die Silk-Dämpfung ist ein Effekt, welcher die Schwankungen der Strahlungsdichte während des Urknalls dämpfte, weil er kleinere Materieansammlungen der Baryonen verhinderte, indem Photonen beim Diffundieren von Bereichen, unterschiedlich hoher Dichten, diese transportierten. Dieser Effekt führte zur Homogenisierung der Hintergrundstrahlung und spricht auch gleichzeitig für die Existenz von dunkler Materie, weil die Fluktuationen im kleinen Winkelbereich nicht von Baryonen stammen können, sondern von dunkler Materie, die eben nicht mit Photonen interagieren¹⁴.

3.3 Homogenität und Isotropie

Um über Homogenität und Isotropie nachdenken zu können, sollte man die Begriffe verstehen können. Im astronomischen Sinne versteht man unter der Homogenität des Universums, dass das Universum für jeden Betrachter, egal wo sich dieser aufhalten mag, gleich aussieht, weil die Materie gleichmäßig verteilt ist. Diese Hypothese wird auch das kosmologische Prinzip genannt. Die Isotropie hingegen beschreibt die Beobachtungsrichtung, was so viel bedeutet wie, dass egal in welche Richtung man blickt, Strukturen wieder gleich aussehen¹⁵. Überträgt man nun diese Prinzipien auf die kosmische Hintergrundstrahlung, so muss auch diese sehr gleichförmig gewesen sein und schon in den 1970er Jahren versuchte Wilkinson dem nachzugehen. Dabei stellte man Abweichungen von 0,006 Kelvin fest, was sich jedoch schnell auf die Dopplerverschiebung zurückführen ließ. Sie kommt dadurch zustande, dass sich die Galaxien infolge der Expansion des Universums bewegen, sich diese wiederum aufgrund der Gravitationsanziehung gegenseitig individuell bewegen und sich unsere Sonne

¹³ (Konrad, Strukturen in der Hintergrundstrahlung- Was verraten sie uns?, 2023) 18:30-19:43

¹⁴ (Lesch, 2005) 4:20- 13

¹⁵ (Konitzer, 2013)

auch noch um das Zentrum der Milchstraße bewegt. Addiert man jetzt alle Geschwindigkeiten, so stellt man fest, dass wir uns 300 km/s relativ zur kosmischen Hintergrundstrahlung bewegen. Wilkinson erkannte das und stellte die These auf, dass es trotzdem kleinste Abweichungen geben muss, denn wäre das Universum komplett homogen, so wären nie Strukturen wie Galaxien, Sterne, Planeten und letztendlich die Menschheit an sich, entstanden. Im frühen Universum wäre es ausreichend, wenn es eine Region gäbe, die eine leicht erhöhte Materiedichte hätte aufgrund der gravitativen Instabilität. Wird auch nur ein Wasserstoffatom angezogen, so entsteht ein Dominoeffekt, weil die Masse in der Region erhöht wird und die Gravitation stärker wirkt. Doch zu Anfang hielten die Photonen mit ihrem Druck die Materie davon ab zu verklumpen und würde dieser Prozess erst ablaufen, als das Universum durchsichtig wurde, so müssten die Fluktuationen der CMB größer sein, als unsere Messwerte es hergeben. Um diese Diskrepanz erklären zu können, stellte Jim Peebles in den 1980er Jahren die Theorie der dunklen Materie in den Raum. Wir können die dunkle Materie bis heute nicht erfassen, da sie nicht mit der natürlichen Materie wie z.B. Photonen oder Protonen interagiert, sich aber durch ihre gravitative Wirkung bemerkbar macht¹⁶. Bisherige Beobachtungen deuten indirekt auf die Existenz hin wie Galaxienhaufen, die sich bei beobachtbaren Geschwindigkeiten und Masse eigentlich auflösen müssten. Eine denkbare Erklärung wäre hier die Existenz einer unsichtbaren Masse, die kosmische Strukturen durch ihre Anziehungskraft stabilisieren müsste. Es entstand die Theorie der dunklen Materie¹⁷. Mithilfe dieser Theorie konnte man auch sagen, dass die CMB nur Fluktuationen im Bereich von einem Hunderttausendstel Kelvin haben könnte und damit nicht vollständig homogen sein dürfte.

4 Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung

4.1 Urknalltheorie und Entstehung des Universums

Die klassische Urknalltheorie, wie sie heute fast jeder kennt, gab es nicht schon immer und sie musste erst Stück für Stück erarbeitet werden. Dass das Universum expandiert, fand man erst in den 1920er Jahren durch Edwin Hubble heraus, welcher Galaxien vermessen und dabei feststellen musste, dass sie sich schneller

¹⁶ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 290-293

¹⁷ (Kayser, 2023)

bewegen, je weiter weg sie sind. Daraus und durch andere Faktoren stellte man die Theorie auf, dass das Universum in der Vergangenheit mal sehr klein gewesen sein musste und sich erst mit der Zeit ausdehnte¹⁸. Um nachvollziehen zu können, woher die kosmische Hintergrundstrahlung ihren Ursprung hat,

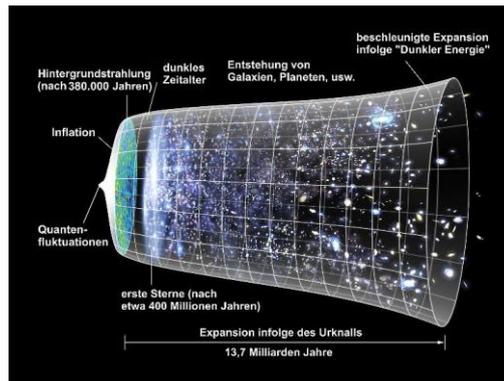


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung des Universums seit dem Urknall

ist es wichtig zu wissen, in welchen Schritten unser Universum nach heutigem Verständnis entstand. Zu Beginn unserer Zeit, um genau zu sein 1

URL: <https://apps-cloud.n-tv.de/img/10764091-1370420593000/4-3/750/Urknall.jpg>

Sekunde nachdem Big-Bang, gab es keinerlei Strukturen wie wir sie heute kennen, wie z.B. Sterne oder Galaxien, geschweige denn überhaupt Atome. Dafür war es mit einer Temperatur von 10 Milliarden Kelvin viel zu heiß und die Dichte viel zu hoch und es existierten nur Elektronen, Protonen, Neutronen, Photonen, Positronen sowie dunkle Materie, dessen Existenz zwar noch nicht bewiesen ist, jedoch viele Faktoren eher für die Existenz sprechen¹⁹. Schon nach zweieinhalb Minuten kühlte sich das Universum in Folge der starken Inflation, welche in Kapitel 5.3 näher beschrieben wird, auf eine Milliarde Kelvin ab und die Kernfusion von Neutronen und Protonen wurde möglich. Es entstanden die leichtesten Elemente wie Wasserstoff, Helium und weitere Elemente, jedoch hörte auch dieser Prozess der Nukleosynthese nach einigen Minuten auf, da das Universum schon zu weit abkühlte²⁰.

4.2 Entstehung der CMB

Nichtsdestotrotz war das Universum immer noch im Zustand eines Plasmas, was bedeutet, dass sich Atomkerne und Elektronen frei bewegen können und damit einzelne, geladene Teilchen sind. Auch wenn sich Elektronen an die Atomkerne gebunden haben, so gab es in diesem Stadium Unmengen an energiereichen Photonen, die streuten, sobald sie auf Elektronen trafen und damit auch jegliche

¹⁸ (De Boer, 2007)

¹⁹ S. 279 (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019)

²⁰ S. 280-281 (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019)

Bindungen, die existierten, trennten²¹. Deswegen war das Universum zu Beginn seiner Existenz auch undurchsichtig, was sich erst änderte, als es nach 380.000 Jahren auf 3000K abkühlte. Ab diesem Moment hatten die Photonen nicht mehr die benötigte Energie, um Atome zu ionisieren und waren in der Lage frei in jede Richtung zu strömen, was gleichzeitig in der Durchsichtigkeit des Universums resultierte. Diesen Übergang zeigt uns auch die kosmische Hintergrundstrahlung, denn die emittierten Photonen lassen sich heute noch empfangen, wobei sich einiges im Lauf der Jahre änderte. Zum einen befindet sich die Strahlung heute durch die Expansion und die damit einhergehende Rotverschiebung, im Mikrowellenbereich und hat damit eine Wellenlänge von einem Millimeter, obwohl sie zu Beginn eine Wellenlänge von einem Mikrometer gehabt haben muss. Dies weiß man dadurch, dass die CMB eines Schwarzkörperspektrum von 3000K entspricht und dieser ideale Zustand wie in Kapitel 3.1 erläutert, eine Wellenlänge von 1 Mikrometer in diesem Temperaturbereich hat. Zum anderen, wie schon erwähnt, betrug die Temperatur einst 3000K und heute nur 2,73K, weil sich das Universum seit der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung um den Faktor 1000 vergrößerte²².

5 Bedeutung der kosmischen Hintergrundstrahlung

5.1 Bestätigung der Big-Bang Theorie

Schon immer fragte sich die Menschheit wie unser Universum entstand, was zwangsläufig zu vielen Theorien führte. Aristoteles, ein berühmter griechischer Philosoph, beschrieb schon 300v. Chr. in seinem Werk „De Caelo“, dass das Universum weder einen Anfang noch ein Ende hat, sondern zeitlich und räumlich unendlich ist²³. Auch Albert Einstein war lange Zeit von dieser Theorie überzeugt und es existierten generell viele Zweifel an der Urknall-Theorie. Dies änderte sich 1916 zuerst stückweit mit Einsteins Relativitätstheorie, die auf eine Singularität des Universums hindeutet, wenn man die Gleichungen löst. Doch auch das überzeugte noch lange nicht die Mehrheit, sondern erst die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung²⁴. Noch bevor sie entdeckt wurde, gab es zwei

²¹ (Podbregar, 2024)

²² (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 287-288

²³ (Wirth, 2018) Kapitel 2.1 Werk und Bedeutung S. 4-5

²⁴ (Wolf, 2015) S. 42-45

konkurrierende Theorien, und zwar die des Urknalls und die Steady-State-Theorie der Unveränderlichkeit. Dabei war man sich durch Vorhersagen, wie die von Gamow aus Kapitel 1.1 sicher, dass wenn es einen Urknall gab, ein Rest von isotroper, thermischer Strahlung z.B. in Form eines Schwarzkörpers existieren muss. Durch den Fund der CMB erschien nun die Urknalltheorie viel plausibler und weitere Messdaten, die eine Schwarzkörperstrahlung ergaben, sprachen umso mehr für diese Theorie²⁵.

5.2 Struktur und Entwicklung des Universums

Die Karte des WMAP-Satelliten von der CMB wird heute von vielen Forschern auch als Babyfoto des Universums betitelt. Die Karte zeigt dabei in Blau eine etwas unterdurchschnittliche Temperatur, Rot eine Temperatur über dem Durchschnitt und Grün stellt die Übergänge dar. Diese Fluktuationen im Hunderttausendstelbereich sind

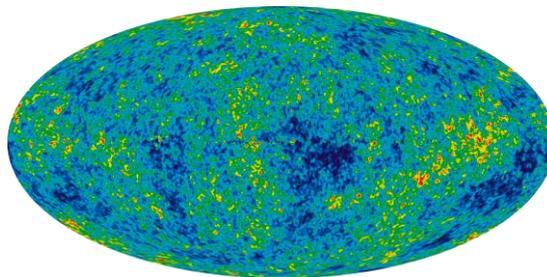


Abbildung 7: Karte der CMB, Erstellt aus WMAP-Daten

URL:

https://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/i/lc_9yr_moll320.jpg

nun auch ein Hinweis auf die Materieverteilung im frühen Universum, die wir gezielt nutzen können, um heutige Strukturen nachzuweisen. Dazu nahm man die Karte der Sloan Digital Sky Survey, kurz SDSS, bei dem Kosmologen mit Teleskopen die Rotverschiebung mehrerer Millionen Galaxien ausgemessen haben und daraus dann eine Karte mit der Position der Galaxien erstellen. Jeder Punkt in dieser Karte stellt eine Galaxie dar und die Farbe zeigt die lokale Dichte an²⁶. Beachtet man nun die gravitative Instabilität, also dass Materie durch die

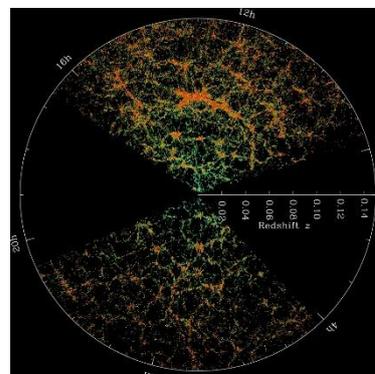


Abbildung 8: Karte der SDSS

URL:

<https://www.sdss4.org/wp-content/uploads/2014/06/orangepie.jpg>

Gravitation immer mehr verklumpt, bis es zum Kollaps nach Überschreitung der Jeans-Masse kommt, und die Expansion des Universums, so kann man mit einer

²⁵ (Reitz, 2007)

²⁶ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 296-301

Computersimulation feststellen, dass die auf dem Urknallmodell beruhenden Berechnungen der Materiefluktuationen, sehr genau die heute beobachtbaren Strukturen des Universums nachbilden, was einen unglaublichen Beweis der Urknall-Theorie darstellt. Noch einen wichtigen Faktor stellt das Alter der kosmischen Hintergrundstrahlung dar. Die ältesten Strukturen, die wir heute kennen übersteigen bei weitem nicht das Alter dieser Strahlung, womit wir keine Diskrepanz mit der Urknalltheorie feststellen können²⁷. Wie schon Ende Kapitel 3.2 erklärt, liefert uns die CMB auch Hinweise auf die Geometrie des Universums und damit auch zum Teil die zukünftige Entwicklung. Das Universum kann zunächst aufgrund der Isotropie, die durch die allgemeine Relativitätstheorie festgemacht wurde, nur eine gleichmäßige Krümmung haben. Ausgehend davon, definierte Gauß verschiedene Fälle einer möglichen Geometrie des Universums nämlich den hyperbolischen, flachen und 3-Sphären Fall. Beim hyperbolischen Fall würde das Universum eine negative Krümmung aufweisen und hätte eine Winkelsumme von über 180° , während der flache Fall keine Krümmung aufweisen würde und schließlich eine Winkelsumme von genau 180° haben muss. Der 3-Sphären Fall hätte konsequenterweise eine positive Krümmung und damit eine Winkelsumme kleiner als im euklidischen Fall. Interessant dabei ist, dass die letzte Form in einem Big-Crunch enden würde, da die Gravitationsanziehung ab einem gewissen Punkt ein Zusammenziehen des Universums verursachen würde²⁸.

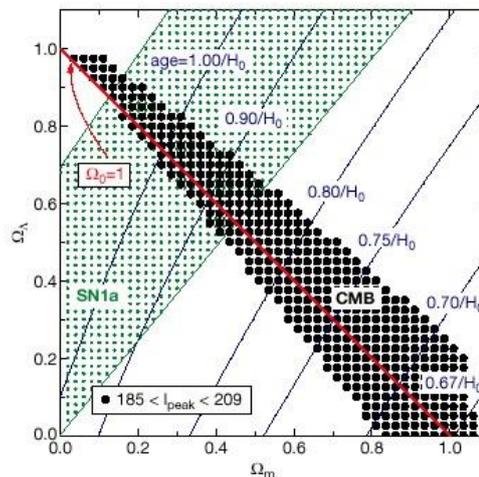


Abbildung 9: Kosmologische Modelle hinsichtlich CMB und Standardkerze SN1a

URL:

<https://www.valdostamuseum.com/hamsmith/flatboomerang.gif>

Nun stellt sich aber die Frage, wie man detailliert auf das Ergebnis eines flachen Universums gekommen ist.

Dafür benötigen wir zwei kosmologische Parameter Ω_Λ und Ω_m . Ω_Λ gibt die Vakuumenergiedichte mit der Funktion $\Omega_\Lambda = 8\pi G\rho_{vak}/3H_0^2$ an, wobei ρ_{vak} die

²⁷ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 285

²⁸ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 465-468

Energiedichte der Dunklen Energie, gleichzeitig Vakuumenergiedichte, im heutigen Universum angibt und Λ dessen Verhalten beschreibt, wie es Einstein schon mit seiner kosmischen Konstante tat. G ist hier die Gravitationskonstante Newtons und H_0 die Hubble Konstante, die die Expansionsrate des Universums angibt (aktuell: $H_0 = 70 \frac{km}{s \times Mpc}$). Zu guter Letzt steht der gesamte Nenner für die kinetische Energie der Expansion und der Zähler die Vakuumenergie. Ähnliches gilt auch für $\Omega_m = 8\pi G \rho_m / 3H_0^2$, nur dass hier die durchschnittliche Materiedichte inklusive Dunkler Materie angegeben wird. Nun muss $\Omega_0 = \Omega_\Lambda + \Omega_m = 1$ ergeben, da die Inflationstheorie, wie im nächsten Kapitel besprochen, einen Ausgleich von Vakuum- und Gravitationsenergie schafft. Im Diagramm gibt die rote Linie jetzt den Fall $\Omega_0 = 1$ an, die schwarzen Punkte geben realistische Modelle anhand der Boomerang-Ballon-Projektdateen an und die grünen Punkte zulässige Modelle nach Beobachtungen von Supernova Typ 1a, eine Standardkerzen in der Kosmologie. Nehmen wir nun noch das heutige Alter des Universums, was mit dem Kehrwert der Hubble Konstante beschrieben wird, so kommen wir auf fast genaue Werte von $\Omega_\Lambda = 0,7$ und $\Omega_m = 0,3$, was 1 ergibt und die These des flachen Universums gut stützt²⁹, wie auch schon in Kapitel 3.2 erwähnt.

5.3 Inflationstheorie

Da die Urknalltheorie allein bestimmte Probleme aufweist, wie das Horizontproblem oder das Ausbleiben magnetischer Monopole, überlegte man sich eine weitere Theorie. Die Inflationstheorie wurde erstmalig 1981 von Alan Guth in den Raum gestellt, indem der Anfang des Urknalls einen endlichen Umfang hat und mit fortschreitender Zeit exponentiell am Umfang zunimmt, wie in Abbildung 10 zu sehen. Man geht heute davon aus, dass das Universum fast direkt nach dem Urknall sehr stark mit einem Faktor von 100 Größenverdopplungen

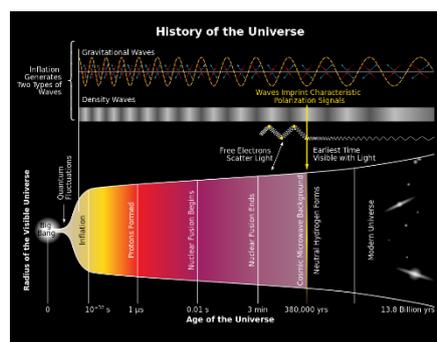


Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Geschichte des Universums

URL: [https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Datei:History_of_the_Universe_\(multilingual\).svg](https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Datei:History_of_the_Universe_(multilingual).svg)

²⁹ (Strauss, Gott, & De Grasse Tyson, 2019) S. 487-491

expandierte. Beim Ausarbeiten der Theorie stellte Guth fest, dass es eine Art Vakuumenergie gibt, die trotz Vergrößerung des Raumes gleichbleibt. Mit diesem geht auch ein Gravitationsfeld einher, bei dem die Energie allerdings negativ ist und zusammen gleichen sich beide Energien aus, womit das Universum flach wird. Erklärt wird die Inflation damit, dass das Vakuum des Universums zu Beginn nicht das absolute Minimum an Energie besaß und womit der negative Druck nach außen wirkt. Der Raum expandiert bis das Feld ins Energieminimum rutscht und ab da an, expandiert das Universum, wie wir es heute kennen, mit einer vergleichbar geringen Geschwindigkeit³⁰. Doch was hat jetzt die kosmische Hintergrundstrahlung mit der Inflation zu tun? Beim Horizont-Problem geht man davon aus, dass das Universum nicht von Anfang an homogen war, denn die Wahrscheinlichkeit dieses Falls ist schlicht zu gering, und dass es sich erst thermisch angleichen musste, denn in der kosmischen Hintergrundstrahlung beobachten wir ja eine fast komplett gleichförmige Temperatur von 2,73K. Dafür muss man verstehen, dass Licht eine endliche Geschwindigkeit hat und es keine Interaktionen gibt, die schneller als Licht ablaufen können. Weil unser Universum nur ein endliches Alter und Interaktionen auch nur eine endliche Geschwindigkeit haben, so können sich nur Bereiche mit einem beschränkten Abstand thermisch angleichen, wobei das maximale Volumen der Angleichung durch die Strecke des Lichts seit Anbeginn der Zeit vorgegeben ist, auch kosmischer Horizont genannt. Nun sagt das Urknallmodell an sich voraus, dass heute sehr weit entfernte Punkte in der kosmischen Hintergrundstrahlung sich thermisch nie angleichen konnten, was zu einem Problem führt. Entweder gab es die Inflation, die eine thermische Angleichung ermöglichte oder man entscheidet sich für den höchst unwahrscheinlichen Fall, dass das Universum schon zu Beginn homogen war³¹, womit die kosmische Hintergrundstrahlung eher für die Inflationstheorie spricht. Zudem zeigt uns die CMB, dass das Universum flach sein muss, was sich mit der Inflationstheorie in Einklang bringen lässt, da diese sich, wie schon erwähnt, mit Gravitationsenergie und Vakuumenergie ausgleicht und damit einen Fall von $\Omega=1$ ermöglicht³².

³⁰ (Rojas, 2018)

³¹ (Konrad, Kosmische Inflation- der Ursprung aller Strukturen?!, 2023) 9:30-16

³² (Rojas, 2018)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach dieser ausführlichen Zusammenfassung lässt sich über die kosmische Hintergrundstrahlung nur staunen. Sie wurde fast perfekt 20 Jahre vor ihrer Entdeckung vorhergesagt, aus einem bloßen Zufall entdeckt, obwohl viele Forscher gezielt danach suchten und sie enthält eine schier unglaubliche Menge an Informationen über unser Universum. Sie passt perfekt zum Verlauf einer Schwarzkörperstrahlung und die spektrale Verteilung an sich enthält Informationen über die Geometrie des Universums und dass es mit höchster Wahrscheinlichkeit flach ist, die Fluktuationsgrößen, der baryonisch-akustischen Oszillationen während der Rekombinationsphase und der Silk-Dämpfung, die auch für die Existenz der dunklen Materie spricht. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist auch so homogen und isotrop wie sie sein sollte, jedoch mit kleinen Abweichungen, welche die Existenz aller heute vorhandenen Strukturen gründeten. Schließlich schloss ihr Fund die Ready-State-Theorie aus und lieferte eine fast absolut sichere Evidenz für die Urknall-Theorie auf der die heutige Kosmologie gründet. Es bleibt auch nicht beim bloßen Beweis, sie erweiterte das Verständnis für die Abläufe während des Urknalls und spricht für die Inflationstheorie. Es lässt sich also durchaus sagen, dass die CMB einen qualitativen und empirischen Beweis für die Urknalltheorie darstellt und eine neue Ära der modernen Kosmologie einläutete. Auch heute ist sie nicht mehr wegzudenken und stellt eine Stütze für viele Theorien und unser Verständnis des Universums dar. Mit Sicherheit lässt sich sagen, dass es in Zukunft mehr Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus dieser besonderen Strahlung längst vergangener Zeiten geben wird und sie die Menschheit zu dem Punkt in der Kosmologie gebracht hat, denn wir heute kennen und bewundern.

7 Anhang

7.1 Verzeichnisse

7.1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kosmische Hintergrundstrahlung	1
Abbildung 2: Penzias und Wilsons Hornantenne URL: https://bilder.deutschlandfunk.de/FILE/_6/08/FILE_608d05fb1e57238f138da924f326a6c3/20210110a-holmdel-antenna-jpg-100-1920x1080.jpg	4
Abbildung 3 Aus COBEs Daten erstelltes Strahlungsspektrum der CMB	5
Abbildung 4 Leistungsspektrum der CMB	6
Abbildung 5 Verschiedene Fälle der Geometrie des Universums	7
Abbildung 6 Beispielhafte Darstellung des Universums seit dem Urknall	10
Abbildung 7 Karte der CMB, Erstellt aus WMAP-Daten	12
Abbildung 8 Karte der SDSS	12
Abbildung 9 Kosmologische Modelle hinsichtlich CMB und Standardkerze SN1a	13
Abbildung 10 Beispielhafte Darstellung der Geschichte des Universums	14

7.1.2 Literaturverzeichnis Schriftquellen

A:

- Alpher, R. A., & Herman, R. (13. November 1948). Evolution of the Universe. *Nature Magazine*.
- Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1. April 1948). The Origin Of Chemical Elements. *Physical Review Letters (PRL)*.

R:

- Reichert, U. (Februar 2015). Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung. *Spektrum der Wissenschaft*.

S:

- Starkman, G. D., & Schwarz, D. J. (Dezember 2005). Missklänge im Universum. *Spektrum der Wissenschaft*.
- Strauss, M. A., Gott, R. J., & De Grasse Tyson, N. (2019). *Herzlich Willkommen Im Universum*. München: FinanzBuch Verlag.

V:

- Vaas, R. (Juni 2001). Die flache Welt. *Bild der Wissenschaft*.

W:

- Wirth, S. (2018). *Die Weltentstehung nach Aristoteles „De Caelo“ und dessen Kritik am platonischen „Timaios“*. Grin.
- Wolf, C. (Februar 2015). Urknall oder nicht? *Sterne und Weltraum Dossier-Einsteins Kosmos*.

7.1.3 Literaturverzeichnis Internetquellen

A:

-AG, L. (kein Datum). *Stefan-Boltzmann-Gesetz*. Von Chemie.de:
<https://www.chemie.de/lexikon/Stefan-Boltzmann-Gesetz.html>

D:

-De Boer, K. S. (17. August 2007). *Die kosmische Hintergrundstrahlung*. Von Weltderphysik.de:
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmologie/die-kosmische-hintergrundstrahlung/>

F:

-Freistetter, F. (22. Dezember 2023). *Sternengeschichten Folge 578: Das Lambda-CDM-Modell*. Von sternengeschichten.podigee.io:
<https://sternengeschichten.podigee.io/578-sternengeschichten-folge-578-das-lambda-cdm-modell>

H:

-HAE/HOR. (21. März 2013). *Planck findet ein fast perfektes Universum*. Von Max-Planck-Gesellschaft.de:
https://www.mpg.de/7042307/kartierung_planck

K:

- Kayser, R. (20. April 2023). *Dunkle Materie*. Von weltderphysik.de:
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/>
- Konitzer, F. (23. Oktober 2013). *Das kosmologische Prinzip*. Von weltderphysik.de:
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmologie/das-kosmologische-prinzip/#:~:text=Die%20Gleichm%C3%A4%C3%9Figkeit%20der%20kosmischen%20Mikrowellenhintergrundstrahlung,ist%20allerdings%20noch%20nicht%20gekl%C3%A4rt.>
- Konrad, S. (3. Februar 2022). *Urknall-Theorie: Welche Temperatur hat Strahlung? Kosmische Hintergrundstrahlung* | Sara Konrad. *Urknall, Weltall und das Leben*: https://youtu.be/cSLGG_FOqPI?si=WjMNIFbHs2wkTVL
- Konrad, S. (1. Oktober 2023). *Kosmische Inflation- der Ursprung aller Strukturen?!* *Urknall, Weltall und das Leben*: <https://youtu.be/oZTN-CUxFQ0?si=IQIcKppbzE0KnW7G>
- Konrad, S. (3. September 2023). *Strukturen in der Hintergrundstrahlung- Was verraten sie uns? Urknall, Weltall und das Leben*: https://youtu.be/Fb4m_3zXMV0?si=ug6e5D6SvZOJkXEU

L:

- Lesch, H. (14. September 2005). *Was ist die Silk-Dämpfung?* *alpha-Centauri*: <https://www.ardmediathek.de/video/alpha-centauri/was-ist-die-silk-daempfung/ard-alpha/Y3JpZDovL2JyLmRIL3ZpZGVvLzRiMmM1N2E1LTQxN2QtNDQ5NC1iYjQxLTY0NTA4NjdhMGI5Yg>
- Lorenzen, D. (10. Januar 2021). *Urknall ohne Taubendreck*. Von deutschlandfunk.de: <https://www.deutschlandfunk.de/85-geburtstag-von-robert-woodrow-wilson-urknall-ohne-100.html>

M:

- Müller, A. (2007-2014). *Jeans-Masse*. Von Spektrum.de:
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/jeans-masse/209>
- Müller, A. (2007-2014). *Nukleosynthese*. Von Spektrum.de:
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/nukleosynthese/316#:~:text=Allgemein%20bezeichnet%20Nukleosynthese%20die%20Bildung,der%20Anzahl%20der%20Protonen%20bestimmt.>
- Müller-Hoissen, a. P. (2006). *Gibt es einen magnetischen Monopol?* Von ds.mpg.de: <https://www.ds.mpg.de/211177/03>

P:

- Podbregar, N. (17. Januar 2024). *Am Anfang war das Plasma*. Von Scinexx.de:
<https://www.scinexx.de/dossierartikel/anfang-war-das-plasma/>

R:

- Reitz, B.-E. (2007). *Kosmische Hintergrundstrahlung*. Von Max-Planck-Institut für Radioastronomie.de: https://www.mpifr-bonn.mpg.de/412991/bjoern_eric_reitz_b#:~:text=Was%20ist%20Kosmische%20Hintergrundstrahlung%3F,kann%20man%20nur%20Vermutungen%20anstellen.
- Rojas, R. (15. Juli 2018). *Die kosmische Inflation und die Suche nach Raum-Zeit-Fossilien*. Von Telepolis.de: <https://www.telepolis.de/features/Die-Kosmische-Inflation-und-die-Suche-nach-Raum-Zeit-Fossilien-4109978.html>

U:

- Unbekannter, A. (1998). *Thomson Streuung*. Von Spektrum.de:
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/thomson-streuung/14531>
- Unbekannter, A. (2010). *Elementarteilchen*. Von Lernhelfer.de:
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/elementarteilchen#>
- Unbekannter, A. (kein Datum). *Die Rotverschiebung*. Von mpifr-bonn.mpg.de:
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/530224/rotverschiebung#:~:text=Die%20Rotverschiebung%20ist%20ein%20spezieller,und%20der%20Ton%20wird%20tiefer.>
- Unbekannter, A. (kein Datum). *Entfernungsbestimmungen mit Cepheiden*. Von Leifiphysik.de:
<https://www.leifiphysik.de/astronomie/kosmologie/grundwissen/entfernungsbestimmung-mit-cepheiden>
- Unbekannter, A. (kein Datum). *Singularität (Astronomie)*. Von wikipedia.org:
[https://de.wikipedia.org/wiki/Singularit%C3%A4t_\(Astronomie\)#:~:text=Als%20Singularit%C3%A4t%20bezeichnet%20man%20in,umgangssprachlich%20also%20%E2%80%9Eunendlich%E2%80%9C%20ist](https://de.wikipedia.org/wiki/Singularit%C3%A4t_(Astronomie)#:~:text=Als%20Singularit%C3%A4t%20bezeichnet%20man%20in,umgangssprachlich%20also%20%E2%80%9Eunendlich%E2%80%9C%20ist)
- Unbekannter, A. (kein Datum). *Was ist Ionisation und welchen Effekt Vorgang?* Von Luftreinigerdepot.de:
<https://www.luftreinigerdepot.de/fachbegriffe/ionisation>

Alle Internetquellen wurden zuletzt am 19.02.2024 aufgerufen und überprüft.

7.2 Register

7.2.1 Sachwortregister

Baryonen-Photon Gemisch S.6: Zu Baryonen gehören Teilchen, die kleiner sind als ein Atom, aber doch mit relativ großer Masse wie z.B. Protonen oder Neutronen und Photonen, auch Lichtquanten genannt, sind die Teilchen aus denen elektromagnetische Strahlung besteht³³.

Ionisieren S.10: Die Ionisation ist ein Vorgang, bei dem Molekülen oder Atomen ein oder mehrere Elektronen entzogen werden und Ionen zurückbleiben³⁴.

Jeans-Masse S.12: Die Jeans-Masse ist eine Grenzmasse, bei dem ein Objekt gravitativ instabil wird und kollabiert. Sie kann berechnet werden mit der Formel $M_J = \pi^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{RT}{\mu G} \right)^{3/2}$ berechnet werden³⁵.

magnetische Monopole S.10: Ein magnetischer Monopol ist ein gedachter Magnet mit nur einem Pol. Die Theorie einer möglichen Existenz wurde 1931 aus der Tatsache, dass elektrische Ladungen immer ein Vielfaches der Ladung des Elektrons sind, aufgeworfen³⁶.

Nukleosynthese S.8: Allgemein bezeichnet der Begriff die Bildung von Atomkernen aus Kernteilchen zu einem Element³⁷.

Oszillationen S.5: Im physikalischen Sinne bezeichnet das Oszillieren eine Schwingung, also wiederholte Schwankungen wie es z.B. in einem Fadenpendel der Fall ist.

Rotverschiebung S.8: Die kosmologische Rotverschiebung kommt durch die Ausdehnung des Raumes durch die Expansion des Universums zustande und je weiter weg ein Objekt ist, desto stärker ist im Mittel die Rotverschiebung³⁸.

Singularität S.10: Im astronomischen Sinne ein Ort, an dem die Gravitation so groß ist, dass die Krümmung der Raumzeit unendlich ist³⁹.

Standardkerzen S.10: Mithilfe von Standardkerzen kann man Entfernungen von Objekten aufgrund ihrer leicht berechenbaren absoluten Helligkeit einfach und zuverlässig bestimmen.⁴⁰

³³ (Unbekannter, Elementarteilchen, 2010)

³⁴ (Unbekannter, Was ist Ionisation und welchen Effekt Vorgang?, kein Datum)

³⁵ (Müller, 2007-2014)

³⁶ (Müller-Hoissen, 2006)

³⁷ (Müller, Nukleosynthese, 2007-2014)

³⁸ (Unbekannter, kein Datum)

³⁹ (Unbekannter, Singularität (Astronomie), kein Datum)

streuen S.9: Hier ist die Thomson-Streuung gemeint, die die elastische Streuung von elektromagnetischen Wellen an geladenen Teilchen, beschreibt⁴¹.

Urknallmodell Λ CDM S.5: Ein kosmologisches Modell, das mit einigen Parametern (in Grundform 6) die Entwicklung des Universum seit dem Urknall beschreibt⁴².

⁴⁰ (Unbekannter, Entfernungsbestimmungen mit Cepheiden, kein Datum)

⁴¹ (Unbekannter, Thomson Streuung, 1998)

⁴² (Freistetter, 2023)

7.3 Erklärungen

7.3.1 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Bramsche, 08.02.2024

Unterschrift: _____

7.3.2 Veröffentlichung

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

Bramsche, 08.02.2024

Unterschrift: _____