

Seminararbeit

Die Kosmologische Inflation

Claas Hugenberg

Astronomie, Jahrgang 12

Herr Riemer

21. Februar 2024, Bramsche



I. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Kosmologische Grundlagen.....	1
2.1	Aufbau des Kosmos.....	2
2.2	Die Urknall- Theorie.....	2
2.3	Das Higgs-Feld.....	3
3	Das Standard- Inflationsmodell.....	3
3.1	Erklärung der kosmologischen Inflation.....	4
3.2	Die Notwendigkeit der Inflation.....	5
3.2.1	Die Probleme der Urknall-Theorie.....	5
3.2.2	Die Inflation als Antwort.....	7
3.3	Die Rolle der Quantenphysik.....	9
4	Zukunftsaussichten.....	10
4.1	Aktuelle Forschung.....	10
4.2	Offene Fragen.....	12
5	Résumé.....	12
6	Anhang.....	14
6.1	Literaturverzeichnis.....	14
6.1.1	Analoge Literatur:.....	14
6.1.2	Digitale Literatur:.....	14
6.2	Erklärungen.....	16
6.2.1	Erklärung zur eigenständigen Anfertigung.....	16
6.2.2	Erklärung zur Veröffentlichung.....	16

1 Einleitung

Den Begriff der Inflation verbinden viele, vor allem in der aktuellen Zeit, sehr wahrscheinlich mit der Wirtschaft und dem Wertverlust des Geldes. Ursprünglich bezeichnet dieser jedoch eine Aufblähung (lat. inflare=aufblähen, aufblasen) eines Objektes. Das Thema meiner Seminararbeit ist nicht die allgemein bekannte Aufblähung des Geldes, sondern die des Kosmos, auch bekannt als Inflations-Theorie.

Ich werde mich in dieser Seminararbeit nur auf die Standard-Inflationstheorie fokussieren, da der gegebene Seitenumfang nicht ausreichend Platz bietet, die verschiedenen Theorien inklusive ihrer Differenzen eingehend zu behandeln. Außerdem beziehe ich mich nur auf bereits vorhandene Literatur, da in diesem Bereich eigene Schlussfolgerungen, die noch nicht von den Experten gezogen wurden, nicht möglich sind. Zuerst gehe ich auf die kosmologischen Grundlagen (Kap. 2) ein, welche benötigt werden, um dem weiteren Verlauf dieser Arbeit folgen zu können. Zu diesen Grundlagen zählen der Aufbau des Kosmos (Kap. 2.1), die Urknall-Theorie (Kap.2.2) und das Higgs-Feld (2.3). Danach erkläre ich kurz das Standardmodell (Kap. 3) und erläutere den Vorgang der Inflation auf der physikalischen Ebene (Kap. 3.1). Daraufhin führe ich aus, weshalb die Inflations-Theorie überhaupt entwickelt wurde (Kap 3.2). Diesbezüglich belichte ich einerseits die Probleme und Fragen der Urknall-Theorie (Kap. 3.2.1) und andererseits lege ich dar, wie diese durch die Inflation gelöst werden (Kap 3.2.2). Darauffolgend beschreibe ich einen anderen Bereich der Physik, die Quantenphysik, und gehe auf dessen Rolle für die Inflation ein (Kap. 3.4). Zudem behandle ich die Aussichten für die Zukunft (Kap. 4), wobei ich den Fokus auf die aktuelle Forschung (Kap.4.1) und weiterhin bestehende Fragen (Kap. 4.2) lege. Abschließend komme ich in einem kurzen Résumé, in dem ich einerseits meine eigenen Arbeitsmethoden reflektiere, und andererseits die Quintessenz meiner Seminararbeit erneut aufgreife, um diese nach einer knappen Zusammenfassung mit Kritik zu konfrontieren.

2 Kosmologische Grundlagen

Um ein fundamentales Verständnis über das Universum zu schaffen, auf welchem die Arbeit aufbaut, werden zunächst die Grundlagen thematisiert. Da das Wissen

des Menschen über unser Universum bereits sehr komplex und vielfältig ist, werde ich mich bei den folgenden, kurzen Erklärungen auf das Größte beschränken.

2.1 Aufbau des Kosmos

Der Kosmos besteht aus Raum und Zeit, welche durch die Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit zusammenhängen¹. Der Raum ist mit verschiedenen Objekten gefüllt, wie z.B. Galaxien, Sternen, aber auch Planeten wie unsere Erde, welche Informationen in Form von Licht übermitteln. Da die Lichtgeschwindigkeit mit $c \approx 300.000 \text{ km/h}$ endlich ist, erhalten wir diese Informationen stets deutlich später, als sie emittiert wurden. Mithilfe von diesem „Blick in die Vergangenheit“² ist es den Wissenschaftlern gelungen, die Informationen auszuwerten und somit ein Modell unseres Kosmos der Gegenwart, aber auch im Hinblick auf die Entstehung und Entwicklung zu entwerfen.³

2.2 Die Urknall- Theorie

In den 1920er Jahren wurden erste Indizien dazu vorgestellt, dass das Universum sich ausdehnt, woraufhin später die beschleunigte kosmologische Expansion bewiesen wurde. Das bedeutet, dass der Kosmos sich ähnlich wie ein Luftballon aufbläht, wodurch sich alle räumlichen Distanzen gleichmäßig zueinander vergrößern. Wenn man nun diese Expansion rückwärtig berechnet, so erhält man einen Zeitpunkt, an dem diese Abstände praktisch null und somit auch die Energie- und Materiedichte praktisch unendlich ist. Dieser Zeitpunkt wird mit $t=0$ als Startpunkt des Universums definiert. Der Urknall beschreibt nun die räumliche Ausdehnung dieser Singularität⁴ von einer Planck-Zeit⁵ nach $t=0$ bis ca. 400.000 Jahren, also ab dem Zeitpunkt, wo sich die ersten Atome bildeten. Die Urknall-Theorie wurde 1927 von dem Astrophysiker Georges Lemaître veröffentlicht und gilt heutzutage als bestätigt und allgemein anerkannt.⁶

1 Bsp.: 1 Lichtjahr $\approx 10^{13} \text{ km}$, 1 Meter $\approx 3,3$ Licht-Nanosekunden (Vgl. Biermann, Frekers, S. 50)

2 Biermann, Frekers, 2023, S. 51

3 Vgl. Biermann, Frekers, 2023, S. 51

4 Im Astronomischen: Objekt, dessen Dichte und Gravitation gegen unendlich läuft

5 $5,391247 \times 10^{-44}$ Sekunden (<https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Zeit>)

6 Vgl. Wikipedia, Urknall, <https://de.wikipedia.org/wiki/Urknall>

2.3 Das Higgs-Feld

In der Physik gibt es viele verschiedene Felder, die man auch zu Teilen aus dem Alltag kennt. Gute Beispiele hierfür sind Magnetfelder, elektrische Felder oder auch Gravitationsfelder. Ein weniger geläufiges, aber umso wichtigeres Feld ist das nach dem schottischen Physiker Peter Higgs benannte Higgs-Feld. Ein ‚normales‘ Feld der Potenzialenergie verläuft ähnlich einer Schale, das bedeutet, je näher sich der x Wert, genannt Φ , der Mitte des Feldes nähert, desto geringer wird die potentielle Energie, bis sie schließlich in der Mulde bei $V(\Phi) = 0$ zum Stillstand kommt. Sie rollt also quasi die Schale hinunter. Ein Higgs-Feld hat einen ähnlichen Aufbau, mit nur einem entscheidenden Unterschied: In der Mitte des Feldes ist $V(\Phi) > 0$. Es gleicht damit also nicht einer Küchenschale, sondern eher einem Sombrero. Wenn die potentielle Energie nun gegen $\Phi = 0$ läuft, wird weder $\Phi = 0$, noch $V(\Phi) = 0$ erreicht, die niedrigstmögliche Potentialenergie besitzt also immer eine Distanz zur Mitte des Feldes und einen Wert über Null. Dieser Wert wird als *nichtverschwindender Vakuumserwartungswert des Higgs-Feldes* bezeichnet. Um nun wirklich $\Phi = 0$ zu erreichen, muss wieder Energie zu dem Feld hinzugefügt werden.⁷ Das Higgs-Feld hat eine fundamentale Bedeutung und Funktion in der Physik, da diese aber für die Inflation explizit nicht relevant ist, werde ich auf diese nicht eingehen.

3 Das Standard- Inflationmodell

Die Theorie der kosmologischen Inflation wurde erstmals von Alan Guth im Jahr 1979 veröffentlicht, jedoch von Andrei Linde im Laufe der achtziger Jahre optimiert. Laut der Standard-Theorie blähte sich das Universum in der Zeitspanne von 10^{-34} s bis 10^{-32} s um das 10^{29} -fache auf. Diese Expansion fand zu Teilen auch mit Überlichtgeschwindigkeit statt. Überlichtgeschwindigkeit ist zwar für Materie nicht zu erreichen, für den Raum jedoch schon. Dies bedeutet, dass der Raum expandierte und die sich in ihm befindliche Materie mitzog, ähnlich wie eine stillstehende Person in einem fahrenden Zug mitbewegt wird.⁸

⁷ Vgl. Greene, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, S. 295-298

⁸ Vgl. Bucher, Spergel, Was vor dem Urknall geschah, in: Spektrum der Wissenschaft, März 1999, S.57

3.1 Erklärung der kosmologischen Inflation

Physikalisch ist der Vorgang der kosmologischen Inflation sehr komplex. Im Allgemeinen beginnt er mit einem Phasenübergang in ein falsches Vakuum. Ein Vakuum beschreibt den Zustand der niedrigsten potenziellen Energie $V(\Phi)$, die ein Raum annehmen kann. Dies ist der energetisch stabilste Zustand, weswegen der Raum diesen anstrebt. Diese Potenzialenergie hat die Form eines besonderen Higgs-Feldes, dem sogenannten Inflaton-Feld.

Während dieses Vorgangs befindet sich im Raum keine Masse, sondern nur thermische Energie, wodurch sich eine Temperaturabhängigkeit der Energiedichte ergibt. Hieraus resultiert der proportionale Zusammenhang der Energiedichte ρ zu der Temperatur T^4 , d.h. $\rho \sim T^4$. Nun ist aber der Sonderfall gegeben, dass bei dem Grenzwert $T \rightarrow 0$, also einer Abkühlung des Raumes, ρ ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr abnimmt, sondern die niedrigstmögliche, konstante Energiedichte ρ_0 annimmt. Dieser Zustand ist das falsche Vakuum, der Wert in der Mitte dieses besonderen Higgs-Feldes, da ρ_0 zwar der momentane energetische Tiefpunkt ist, jedoch ein Absinken in eine noch geringere Energiedichte möglich ist (Siehe Abbildung 1). Der Begründer der Inflations-Theorie, Alan Guth, machte sich nun die Friedmann-Gleichung, welche die Expansion des Universums in Abhängigkeit verschiedenster Faktoren, wie z.B. ρ , T , und Druck p beschreibt, zunutze. Er stellte diese Gleichung so um, dass sie von der Änderungsrate der Temperatur \dot{T} abhängig ist. Bei abkühlender Temperatur, also $T \rightarrow 0$, ist irgendwann der Punkt erreicht, an dem $\rho_0 \dot{T}$ überwiegt, sodass sich laut der Gleichung $p\phi = -\rho\phi^9$ ein negativer Druck einstellt.¹⁰ Ein negativer Druck ist äquivalent zu einer Anti-Gravitation, da laut der Allgemeinen Relativitätstheorie die Gravitation von der Masse, der Energie, aber auch dem Druck abhängig ist, und sorgt somit für eine Ausdehnung des Raums.¹¹ Diese Expansion kann in einem Skalarfeld, dem sogenannten Inflaton-Feld, in Relation zu der potenziellen Energie $V(\Phi)$ gesetzt werden.

9 Ohio University <https://www.astronomy.ohio-state.edu/weinberg.21/A873/notes7.pdf>

10 Vgl. Spektrum, Müller, <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

11 Vgl. Greene, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, S. 317

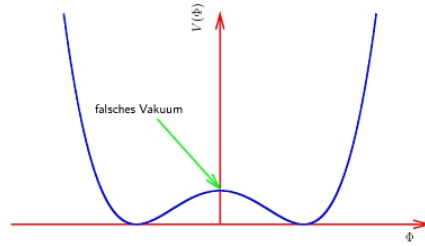


Abbildung 1: Die Potenzialenergie im Inflaton-Feld¹²

Durch die Ausdehnung des Raums sinkt nun die potenzielle Energie $V(\Phi)$, sozusagen „rollt“ das Inflatonfeld vom lokalen Minimum des falschen Vakuums hinunter in das echte Vakuum¹³. Sobald das wahre Minimum von $V(\Phi)$ erreicht ist, stoppt die inflationäre Phase. Laut dem Energie-Erhaltungsgesetz¹⁴ nimmt parallel zu der Abnahme von $V(\Phi)$ die thermische Energie zu, wodurch die extremen Temperaturen nach der Inflation entstanden sind. Dieser Vorgang wird Reheating genannt. Ab diesem Moment expandiert das Universum gemäß der Urknall-Theorie.¹⁵

3.2 Die Notwendigkeit der Inflation

Die Inflationstheorie wurde, wie bereits erwähnt, erst deutlich später als die Urknall-Theorie publiziert. Dies liegt daran, dass sie auf dem Konzept des Urknalls aufbaut und mehrere Probleme, die der Standard-Urknall nicht lösen kann, erklärt.

3.2.1 Die Probleme der Urknall-Theorie

Die Theorie des Urknalls, oder auch Big-Bang-Theory ist allgemein anerkannt, um die Entstehung unseres Universums zu erklären. Jedoch gibt es in unserem Kosmos auch Phänomene, die durch den Urknall nicht begründet werden können. Die zwei signifikantesten sind dabei einmal das Flachheits-Problem und das

¹² <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

¹³ Spektrum, Müller, <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

¹⁴ Energie kann nicht erschaffen oder zerstört werden, sondern nur umgewandelt

¹⁵ Vgl. Spektrum, Müller, <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

Horizont- oder auch Homogenitäts-Problem. Das Homogenitäts¹⁶-Problem beinhaltet zudem noch das Unterproblem der Inhomogenität¹⁷.

Der Kosmos besitzt keine Raumkrümmung, das bedeutet, dass er flach ist. Die euklidischen Gesetze der Mathematik gelten in so einem Raum, z.B. die Winkelsumme eines Dreiecks, die in einem flachen Raum immer 180° beträgt. Eine flache Raumzeit ist gegeben, wenn der Dichte-Anteil Ω des Universums = 1 ist. Also anders gesagt, die Dichte ρ des Universums ist genauso groß wie die kritische Dichte ρ_{krit} , welche ein Raum für keine Krümmung haben muss. Es gilt

$\frac{\rho}{\rho_{\text{krit}}} = \Omega$. Bei $\Omega > 1$ wäre das Universum positiv gekrümmt und würde einer Kugel gleichen, bei $\Omega < 1$ entstünde eine negative Krümmung, was einem Sattelleiche. Die kritische Dichte ist der Ausgleich von der durch die Masse erzeugte Gravitation, die als kontrahierende Kraft wirkt, und der expandierenden Kraft des Universums.¹⁸ Wäre Ω zum Zeitpunkt des Urknalls von 1 abgewichen, so würde mit zunehmender Expansion die Differenz immer weiter zunehmen, und das Universum entweder bei Dominanz der Gravitation ($\Omega > 1$) kollabieren oder bei Dominanz der expandierenden Kraft ($\Omega < 1$) sich so schnell ausdehnen, dass der Raum praktisch nichts enthalten würde. Dies impliziert eine maximale Differenz von 10^{-18} zu 1 während des Urknalls, da sonst das Universum nicht mehr existieren würde.¹⁹ Doch die Urknall- Theorie erklärt nicht, wie diese Flachheit zustande kommt.

Die zweite von dem Urknall unbeantwortete Frage nennt sich Horizont-Problem. Wie am Anfang bereits erwähnt, ist die maximale Geschwindigkeit, mit der Informationen ausgetauscht werden können, die Lichtgeschwindigkeit mit ca. 300.000 km/h. Wenn man nun Galaxien, andere Himmelskörper oder auch die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, auf die ich später noch einmal eingehen werde, aus zwei entgegengesetzten Himmelsrichtungen beobachtet, lässt sich eine Isotropie, also eine richtungsunabhängige Gleichheit erkennen, die als Homogenität des Universums bezeichnet wird. Diese Homogenität ist eigentlich widersprüchlich, da das von den jeweils weit voneinander entfernten Galaxien emittierte Licht bisher noch keine Chance hatte, mit den anderen weit entfernten

16 Gleichmäßigkeit

17 Ungleichmäßigkeit

18 Vgl. Biermann, Frekers, 2023, S. 61f

19 Vgl. Bucher, Spergel, Was vor dem Urknall geschah, in: Spektrum der Wissenschaft, März 1999, S.56

Galaxien zu wechselwirken. Sie liegen außerhalb des anderen Ereignishorizontes, also dem Bereich eines Objektes, in dem es durch das Licht Informationen übermitteln kann. Zum Beispiel können zwei Galaxien, die jeweils 10.000.000 Lichtjahre von der Erde entfernt sind, Informationen das erste Mal in 20.000.000 Lichtjahren austauschen, wobei diese Zahl aufgrund der fortwährenden Inflation stetig steigen würde. Da das Universum erst ca. 14.000.000 Jahre alt ist, ist eine Wechselwirkung zwischen diesen beiden Galaxien unmöglich. Dennoch weisen beide Galaxien dieselbe Struktur, dieselbe Dichte, und dieselbe Temperatur auf. Zudem treffen genau diese Eigenschaften auch auf die Galaxien zu, die gerade erst in den Ereignishorizont, also in das beobachtbare Universum, eingetreten sind. Auch diese nahezu perfekte Homogenität des Universums kann die Urknall-Theorie nicht erklären.²⁰ Im Zusammenhang mit der fast gänzlichen Gleichförmigkeit stellt sich nicht nur die Frage, wieso diese entstanden ist, sondern auch, wieso diese nur fast perfekt ist und woher diese minimalen Abweichungen stammen. Ohne diese marginalen Differenzen wären Galaxien bzw. alles, was die Homogenität stört, nämlich niemals entstanden.²¹

3.2.2 Die Inflation als Antwort

Wohingegen die Urknall-Theorie für beide dieser Probleme keine Antwort geben kann, sondern sich einfach damit abfindet, dass am Anfang Ω fast exakt 1 war und es eventuell Zufall ist, dass der beobachtbare Kosmos überall extrem homogen aufgebaut ist, kann das inflationistische Universum uns Antworten darauf liefern. Betrachten wir zuerst das Homogenitäts-Problem: Wie bereits erklärt, weisen zwei kosmologische Objekte, die jeweils außerhalb des anderen Ereignishorizontes liegen, sehr gleiche Strukturen auf. Wenn nun in der Zeit zurück rechnet, und zwar auf den Zeitpunkt, wo sich der Abstand dieser beiden Objekte halbiert, so könnte man meinen, dass diese beiden Körper nun interagieren können. Dieser simple Gedanke hat nur einen Haken: Bei so einer Zurückrechnung muss beachtet werden, dass die Zeit auch mit zurückgedreht wird, sodass nun ebenfalls nur die Hälfte der Zeit zum Wechselwirken zur Verfügung steht. Man muss also so lange weiter zurückrechnen, bis man zu einem Punkt kommt, an dem die Halbierung der Distanz nicht auch ebenso einer Halbierung der Zeit entspricht. Und genau dieser

²⁰ Vgl. Biermann, Frekers, 2023, S. 60f

²¹ Vgl. Bucher, Spergel, Was vor dem Urknall geschah, in: Spektrum der Wissenschaft, März 1999, S.55

Zeitpunkt ist während der Inflation. Führt man diese Form der rückwärtigen Berechnungen durch, so kommt man bei der Verringerung der Distanz um die Hälfte bei weitem nicht auf die Hälfte der Zeit, da eine unvorstellbar große Ausdehnung in zwar sehr, sehr kleinem, aber dennoch in keinem Vergleich zur Größenordnung der Expansion stehenden, Zeitfenster stattfand. Vor diesem Zeitpunkt konnten alle existierenden Formen von Energie, Strahlungen und Teilchen miteinander interagieren. So konnte sich vor der Inflation bzw. Expansion schon ein Gleichgewicht einstellen, welches während der Expansion nun beibehalten wird.²² Aufgrund dieser gleichen Startbedingungen entwickelten sich die kausal getrennten Orte dennoch gleich, sodass sie heute immer noch dieselben Merkmale, was Struktur, Temperatur, etc. angeht, aufweisen. Daher besitzt auch alles, was jetzt erst in unseren Ereignishorizont der Erde eintritt, diese Homogenität.²³ Auf diese Weise ergänzt die Inflations-Theorie das Urknall-Modell, um das Problem der Homogenität zu lösen. Auf die Frage der kleinen Abweichungen, aufgrund derer sich Materie sammeln konnte, werde ich in Kapitel 3.4 eingehen.

Das zweite zu lösende Problem ist die Frage der Flachheit. Doch auch hier liefert die Inflation ein Lösungsmodell: Gravitation bewirkt, dass sich Massen anziehen und vergrößert so die Dichte im Raum, auf den die Gravitation wirkt. So entstehen und vergrößern sich die Abweichungen von der kritischen Dichte. Doch wie bereits festgestellt, wirkte während der inflationistischen Phase eine Art Anti-Gravitation, die das genaue Gegenteil bewirkt – also eine Verringerung der Abweichungen. Dies lässt sich mit der schieren Größe des Kosmos begründen. Unser beobachtbarer Teil des Universums ist nur ein sehr kleiner Ausschnitt des gesamten Universums, da es durch die Inflation so immens aufgebläht wurde. Deshalb erscheint uns dieser Teil als nicht gekrümmt, die Dichte wird sozusagen gezwungen, den Wert der kritischen Dichte anzunehmen. Um dieses Phänomen zu veranschaulichen, gibt es ein alltägliches Beispiel - unsere Erde. Wenn man nur den von einem Menschen beobachtbaren Teil der Erdoberfläche nimmt, wirkt dieser auch flach. Wie wir alle jedoch wissen, ist die Erde alles andere als Flach, man braucht nur die richtige Größenordnung, in der man beobachtet. Genauso, nur in unvorstellbar größeren Dimensionen, verhält es sich auch mit dem Kosmos

22 Vgl. Greene, *Der Stoff, aus dem der Kosmos ist*, S. 327-330

23 Vgl. Biermann, *Frekers*, 2023, S. 64 f.

im Horizont der Erde und dem gesamten Kosmos.²⁴ So liefert die Inflations-Theorie eine weitere, den Urknall ergänzende, Lösung auf ein Problem, das Lemaître mit seiner Theorie alleine nicht lösen konnte.

3.3 Die Rolle der Quantenphysik

Die Quantenebene ist die aller kleinste Ebene der Wirklichkeit. Und im Gegensatz dazu steht die komische Ebene, die aller größte Ebene der Wirklichkeit. Doch diese beiden Bereiche der Physik, die nicht weiter auseinander liegen könnten, haben auch Einflüsse aufeinander. Wie in Kapitel 3.2.1 bereits aufgegriffen, ist der Kosmos bei extrem hoher Skalierung homogen. Wenn nun aber nur kleinere Teile betrachtet werden, weist dieser extrem hohe Dichte- und somit Materieschwankungen auf. Diese sind eine Folge minimalster Schwankungen in der frühesten Zeit, der Inflation. Durch die Gravitation sammelte sich mehr Materie um diese minimalen Dichteschwankungen, wodurch diese nach dem Schneeballprinzip kontinuierlich größer wurden. Doch wie konnten bei eigentlich perfekter Gleichförmigkeit diese minimalen Differenzen entstehen?

Um diese Frage zu beantworten, machten sich Astrophysiker die Heisenbergsche Unschärferelation oder auch Unbestimmtheitsrelation zu Nutze. Im Groben besagt diese, dass bei Bestimmung des Ortes eines Teilchens man nicht die dessen Geschwindigkeit bestimmen kann. Somit kann man auch nicht den nächsten Ort dieses Teilchens voraussagen. Andersherum fällt bei genauer Bestimmung der Geschwindigkeit die des Ortes deutlich ungenauer aus.²⁵ Durch diese Unbestimmtheit ergibt sich außerdem der Zusammenhang $E \times t \geq h$, wobei E die Energie, t die Zeit und h die Planck-Konstante $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ²⁶ ist. Das bedeutet, dass, solange das Zeitfenster extrem klein ist, die Energie für diesen Augenblick ansteigen kann. Und wie die wohl bekannteste Gleichung der Welt besagt, ist $E = mc^2$. Also kann diese Energie auch in Form von Masse auftreten. Laut dem Erhaltungsgesetz muss bei der Entstehung von Dingen die Summe der Erhaltungsgrößen, wie z.B. Ladung immer gleich Null bleiben, also muss zum Beispiel, wenn ein Teilchen mit negativer Ladung entsteht, ebenso eines mit einer

²⁴ Vgl. Greene, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, S. 330-334

²⁵ Vgl. Greene, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, S. 347

²⁶ Wikipedia, Planck-Konstante <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Konstante>

positiven Ladung auftreten. Dies führt zu einem direkten Ausgleich, wodurch beide Teilchen instantan verschwinden. Diese Energien, oder auch Massen, die den Bruchteil einer Sekunde da sind und dann wieder verschwinden, werden Quantenfluktuationen genannt.²⁷ Doch was haben diese Quantenfluktuationen nun für einen Einfluss auf die Strukturbildung des Kosmos?

Wie bereits erläutert, befand sich das Universum vor der Inflation auf dem Plateau des Inflaton-Feldes. Die Energiedichte war annähernd konstant. Jedoch schwankte der Wert immer minimal aufgrund der Quantenfluktuationen. Nun wird angenommen, dass durch eine besonders starke Fluktuation das Plateau verlassen wird und das Universum sozusagen ins Rollen kommt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, sinkt die potenzielle Energie nun, bis sie sich im echten Vakuum befindet. Zur Veranschaulichung wurde dieses Feld zweidimensional abgebildet, für diesen Vorgang stellen wir uns dieses nun aber dreidimensional vor, sodass es eine Form ähnlich eines Sombreros annimmt. Da dieses Hinabrollen nun nicht genau zeitgleich in alle Richtungen beginnt, und beim Abnehmen der Potenzialenergie weiterhin durch die Quantenfluktuationen beeinflusst wird, kommen auch nicht alle Teile gleichzeitig unten im echten Vakuum an. Hieraus resultieren dann diese mikroskopischen Differenzen der Homogenität, die durch die immense Expansion auf makroskopische Dimensionen vergrößert wurden. Um diese Inhomogenitäten bildeten sich dann, wie bereits beschrieben, zuerst Materiehaufen, aus denen sich dann Sterne, Planeten, Galaxien, etc. entwickelten.²⁸

4 Zukunftsaussichten

Wie beinahe alles in der Kosmologie, ist die Inflation noch nicht vollständig erforscht, genauer gesagt noch nicht einmal bewiesen. Doch welche Probleme und offene Fragen sind immer noch nicht erklärt und welche Forschungen werden aktuell betrieben, um diese zu lösen?

²⁷Vgl. Gaßner, Unbestimmtheitsrelation Casimir Effekt Lambshift Quantenfluktuation • AzS (31), Minute 13-15 https://www.youtube.com/watch?v=S_catiHOWiw

²⁸ Vgl. Gaßner, Was war der Knall des Urknalls? Kosmische Inflation löst Urknall-Probleme, Minute 16-29, <https://www.youtube.com/watch?v=Oo4z8DGM9xQ>

4.1 Aktuelle Forschung

Die Planck-Raumsonde nahm im Jahr 2010 das erste Mal ein vollständiges Bild der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung auf. Auf dieser Graphik (Abb. 2) erkennt man die Inhomogenitäten der Hintergrundstrahlung. Diese Abweichungen sind zwar immer nur wenige Tausendstel Kelvin, aber brechen dennoch die Symmetrie. Sie sind, ebenso wie die Ansammlungen von Materie, eine Folge der Quantenfluktuation.²⁹

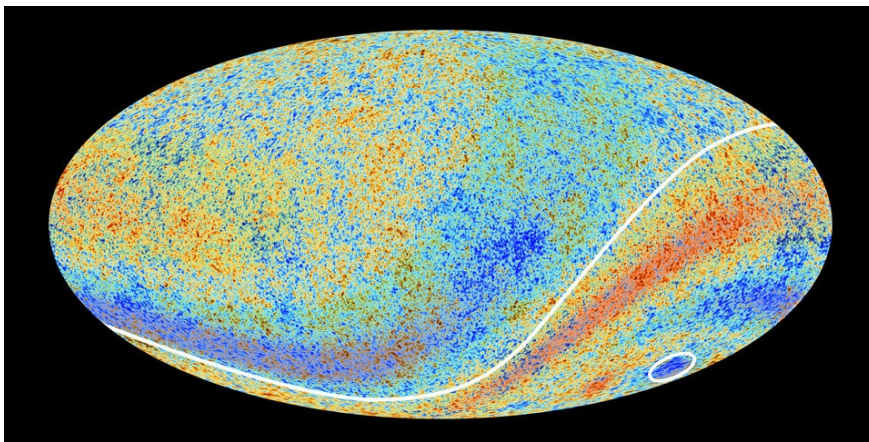


Abbildung 2: Die kosmische Hintergrundstrahlung (die roten Gebiete liegen über dem Durchschnittswert, die blauen darunter)³⁰

Aktuell wird davon ausgegangen, dass, da die Fluktuationen zufällig sind, sie der Gaußschen Normalverteilung unterliegen. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung vom Erwartungswert in Abhängigkeit zu der Standardabweichung.

²⁹Vgl. European Space Agency, o.A., https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_offenbart_uns_ein_fast_perfektes_Universum

³⁰Vgl. European Space Agency, o.A., https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_offenbart_uns_ein_fast_perfektes_Universum

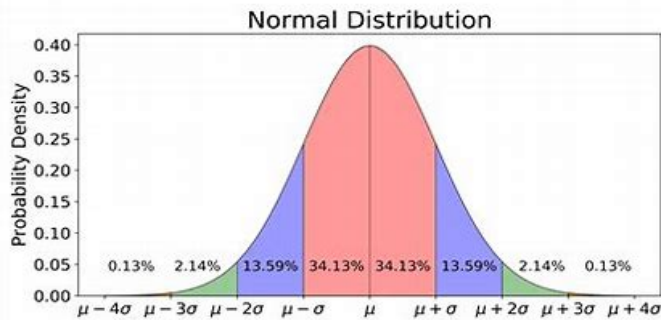


Abbildung 3: Gaußsche Normalverteilung (μ als Erwartungswert, σ als Standardabweichung)³¹

Der Mittelwert einer Gaußschen Verteilung ist immer Null. Dieser steht in diesem Fall für die durchschnittliche Stärke der Schwankungen der Hintergrundstrahlung und somit auch der Dichte. Diese Stärke gilt es momentan für Forscher zu bestimmen, da man aus ihr die komplette Verteilung berechnen kann. So kann man Rückschlüsse auf die Quantenfluktuationen bezüglich ihrer Stärke und Anzahl ziehen. Daraus lässt sich dann wiederum bestimmen, ob es nur ein Inflaton-Feld gab oder sogar mehrere. Ein Ergebnis hat die aktuelle Forschung allerdings noch nicht.³²

4.2 Offene Fragen

Sich direkt an die eben aufgeworfene Frage anschließend gibt es noch weitere Unklarheiten hinsichtlich des Inflaton-Feldes. Die Theorie der Inflation fungiert sozusagen als Gerüst, das je nach Parameterwahl anders aussieht, im Kern aber dennoch gleichbleibt. Aufgrund dessen ist es zum Beispiel nicht bekannt, wie viel potenzielle Energie im falschen Vakuum vorlag, wie steil das Universum in das echte Vakuum hinunterrollte, daher auch, wie schnell das Universum expandierte, beziehungsweise wie stark die anti-gravitative Kraft wirkte oder wie genau das Universum sich seinen eigenen Startpunkt ausgesucht hat.³³ All diese ungeklärten Fragen gilt es in der Astrophysik noch zu beantworten.

5 Résumé

Durch die intensive Auseinandersetzung mit diesem Thema konnte ich mir umfangreiche Kenntnisse zu den ersten Augenblicken unseres Universums verschaffen. Die Komplexität veranlasste mich, bei meinen Nachforschungen sehr

³¹ https://www.ztable.net/normal-distribution/?utm_content=cmp-true

³² Vgl. Niemeyer, Schwarz, Inflation- der Auftakt zum Urknall in: Sterne und Weltraum, Januar 2011, S. 56

³³ Vgl. Greene, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, S. 326 f.

in die Tiefe zu gehen, um überhaupt ein umfassendes Verständnis für diesen Vorgang zu entwickeln. Dieser Vorgang erforderte eine vielschichtige Recherche, damit überhaupt eine Aneignung der notwendigen Grundlagen möglich war. Das letztendliche Durchdringen meines ausgewählten Themas steigerte mein vorhandenes Interesse an der Astrophysik und erleichterte mir somit den Arbeitsprozess.

Die Inflation war ein genialer Einfall Guths, der viele Einblicke in das frühe Universum gewährt und die Urknall-Theorie konstruktiv ergänzt. Sie erklärt viele Phänomene des Universums, wo andere Theorien gescheitert sind. Und dennoch ist es immer noch nur eine Theorie, die nicht belegt ist und weiterhin viele offene Fragen bietet.

6 Anhang

6.1 Literaturverzeichnis

6.1.1 Analoge Literatur:

Bucher, Martin, Spergel, David, Was vor dem Urknall geschah, in: Spektrum der Wissenschaft, März 1999

Biermann, Peter, Frekers, Dieter, Weltall, Neutrinos, Sterne und Leben, Faszinierendes aus der Astroforschung, 1. Auflage, Münster 2021

Greene, Brian, Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, Raum, Zeit und die Beschaffenheit der Wirklichkeit, 3. Auflage, München 2008

Niemeyer, Nils, Schwarz, Dominik, Inflation, der Auftakt zum Urknall, in: Sterne und Weltraum, Januar 2011

6.1.2 Digitale Literatur:

European Space Agency (o.A.), Planck offenbart uns ein fast perfektes Universum (21.03.2013) URL:

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_offenbart_uns_ein_fast_perfektes_Universum

Gaßner, Josef, Unbestimmtheitsrelation Casimir Effekt Lambshift
Quantenfluktuation • AzS (31) (29.07.2018), URL:

https://www.youtube.com/watch?v=S_catiHOwiw

Gaßner, Josef, Was war der Knall des Urknalls? Kosmische Inflation löst Urknall-Probleme (13.01.2022), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Oo4z8DGM9xQ>

Müller, Andreas, Inflation (o.D.), URL:

<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inflation/197>

Normal Distribution | Gaussian Distribution | Bell Curve | Normal Curve (o.A., o.D.), URL: https://www.ztable.net/normal-distribution/?utm_content=cmp-true

Ohio University (o.A., o.D.), URL: <https://www.astronomy.ohio-state.edu/weinberg.21/A873/notes7.pdf>

Wikipedia, Planck-Konstante (o.A., o.D.), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Konstante>

Wikipedia, Planck-Zeit (o.A., o.D.), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Zeit>

Wikipedia, Urknall (o.A., o.D.), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Urknall>

6.2 Erklärungen

6.2.1 Erklärung zur eigenständigen Anfertigung

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.

Ort, Datum und Unterschrift

6.2.2 Erklärung zur Veröffentlichung

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

Ort, Datum und Unterschrift