

**Das Ende von allem:
Big Crunch, Big Freeze, Big Rip – der Tod des
Universums**

Vorwissenschaftliche Arbeit

vorgelegt von

Rilinda Bytyqi

8abiun

Betreuer: Mag. Norbert Steinkellner

BRG Kepler

Keplerstraße 1, 8020 Graz

03. März 2023

Abstract

Das Ende des Universums ist ein Thema, welches sowohl Wissenschaftler und Philosophen als auch die Öffentlichkeit seit Jahrzehnten beschäftigt. In meiner Arbeit werde ich Theorien aufzeigen, die eine hypothetische Antwort bieten. Die beiden führenden Theorien sind, der „Big Freeze“ und der „Big Crunch“. Im Big Freeze-Szenario wird das Universum weiter expandieren und sich schließlich in einem eisigen, leeren Zustand befinden, wenn alle Materie und Energie sich so weit verteilt haben, dass keine weitere physikalische Interaktion mehr möglich ist. Im Big Crunch-Szenario wird die Expansion des Universums durch die Schwerkraft gestoppt und in einen Kollaps umkehren. Das gesamte Universum würde in einem heißen und dichten Zustand zusammenfallen. Es gibt auch eine ungewöhnlichere Theorie wie die „Big Rip-Theorie“. Hier nimmt die Expansion des Universums so zu, dass sie die Materie und sogar die Atomkerne und Elementarteilchen zerreißt. Die Beobachtungen der Expansion des Universums und der kosmologischen Daten wie der Hintergrundstrahlung, der Verteilung von Galaxien und Dunkler Materie/Energie geben wichtige Hinweise darauf, welches Ende des Universums realistisch ist oder ausgeschlossen werden kann. Um das ultimative Schicksal des Universums zu verstehen, sind jedoch noch viele weitere Beobachtungen und theoretische Durchbrüche erforderlich. Mein Ziel ist es, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand zu geben und zur weiteren Erforschung und Diskussionen anzuregen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Historische, kosmologische und mathematische Grundlagen der drei Hypothesen	3
2.1	Das kosmologische Prinzip	3
2.2	Das Hubble-Gesetz: Hubble-Konstante & Rotverschiebung.....	5
2.3	Die Friedmann-Gleichung und die Expansion des Universums	7
2.3.1	Herleitung der 1. Friedmann-Lemaître-Expansionsgleichung anhand Newtonscher Näherungen.....	8
2.3.2	Herleitung der 2. Friedmann-Lemaître-Expansionsgleichung unter Verwendung der Thermodynamik und der ART.....	10
2.3.3	Die Friedmann-Weltmodelle und die Krümmungstypen des Universums	12
3	Big Crunch – der umgekehrte Urknall.....	19
3.1	Hypothetischer Ablauf.....	19
3.2	„Big Bounce“ – vom Big Crunch zum erneuten Urknall.....	21
3.3	Stand der Forschung.....	22
4	Big Freeze – Hitzetod des Universums.....	25
4.1	Hypothetischer Ablauf.....	25
4.2	Stand der Forschung.....	27
5	Big Rip – Das große Zerreißen.....	29
5.1	Hypothetischer Ablauf.....	29
5.2	Stand der Forschung.....	31
6	Resümee	33
7	Literaturverzeichnis	34
8	Abbildungsverzeichnis	39
9	Anhang.....	40

1 Einleitung

Vor 13.8 Milliarden Jahren befand sich unser Universum in einem heißen und dichten Zustand. Eine ursprüngliche Singularität sorgte für die Entstehung der Fundamente unseres Kosmos. Mithilfe der darauffolgenden Explosion begann die Ausdehnung und Abkühlung unseres Universums innerhalb von Sekundenbruchteilen. Bevor es jedoch zum Leuchten der Sterne kam, bewohnten Neutronen und Protonen unseren sekunden-jungen Weltraum. Später entstehen die ursprünglichen Wasserstoffatome und Elemente wie Helium und Lithium. Weil ein Gravitationsdruck auf die damals bestehenden Gaswolken wirkte, beginnen erst 100 bis 200 Millionen Jahre nach dem Urknall, in der zweiten Phase der Nukleosynthese, die ersten Sterne zu leuchten. Erst nach etwa 300-400 Millionen Jahren formen sich Galaxien und andere große, komplexe Strukturen.¹

Bereits seit fast einem Jahrhundert werden die Geburtsstunden unseres Alls untersucht. Jedoch hat man bereits vor der Entstehung der Urknalltheorie nach einer Lösung der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie für den Fall eines expandierenden Universums, gesucht.

Aus Konklusionen zahlreicher Wissenschaftler wie *Georges Lemaitre*, *Alexander Friedmann* und *Edwin Hubble*, die besagen, dass sich unser Universum ausdehnt und der Abkühlungsprozess unbeschränkt fortläuft, werden drei Theorien aufgestellt: Die *Big Crunch*-, *Big Freeze* und *Big Rip*-*Theorie*. Mithilfe dieser Theorien wird es uns ermöglicht, Modelle zu möglichem Ende unseres Universums zu gewinnen.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, nicht nur diese Theorien darzulegen und eine klare Skizze der hypothetischen Abläufe zu schaffen, sondern auch die mathematischen und historischen Zusammenhänge zu beleuchten. Im Rahmen dieser vorwissenschaftlichen Arbeit werden mathematische Modelle aufgegriffen und in Zusammenhang mit den drei Theorien thematisiert. Diese Arbeit hat somit das Anliegen, scheinbar komplexe physikalische und astronomische Abläufe und Grundgedanken verständlich zu veranschaulichen.

Hierbei werden wesentliche Fragen behandelt wie: in welchem Verhältnis die Expansion und Abkühlung des Universums und andere kosmologische Modelle zum möglichen Tod unseres Alls stehen; oder welche Konsequenzen sich aus der Friedmann-Gleichung und dem Lambda-CDM-Modell ergeben. Die Grundlage der Arbeit bildet die Ausarbeitung der hypothetischen Abläufe

¹ Vgl. Ziegler, 2021.

der Big-Crunch-, Big-Freeze- und zuletzt der Big-Rip-Theorie. Darüber hinaus wird der aktuelle Stand der Forschung und die fachlichen Meinungen zahlreicher WissenschaftlerInnen auch behandelt. Um dieses Thema darzulegen, bedient sich die folgende Arbeit eines Literaturbezogenen Verfahrens. Wissenschaftlichen Zeitungsartikel/berichte, Forschungsberichte/arbeiten und Bücher ermöglichen es mir den Leitfragen nachzugehen.

Nach der Einleitung legt das darauffolgende Kapitel zunächst die historischen, kosmologischen und mathematischen Grundlagen der Big-Crunch-, Big-Freeze- und Big-Rip-Theorie dar. Im Folgenden werden die hypothetischen Abläufe der drei Theorien angeführt. Anschließend werden die aktuell laufenden Forschungen betrachtet und dargelegt. Abschließend wird die Skepsis von Seiten der, sowohl heutigen als auch damaligen Wissenschaftler, Bezug genommen.

2 Historische, kosmologische und mathematische Grundlagen der drei Hypothesen

Der Erste Teil dieser Arbeit stellt die essenziellen Grundlagen für die Erläuterung der eingangs erwähnten Theorien vor. Beginnend mit der kosmologischen und mathematischen Basis, wie beispielsweise die Darlegung des kosmologischen Prinzips, der Friedmann-Gleichung und des Lambda-CDM-Modells. Die Behandlung dieser grundlegenden Aspekte wird die Entfaltung unseres Universums seit dem Urknall beleuchten.

2.1 Das kosmologische Prinzip

Die Grundlage des kosmologischen Prinzips ist das „kopernikanische Prinzip“, welches von Hermann Bondi nach Nikolaus Kopernikus benannt wurde. Ginge es nach dem kopernikanischen Prinzip, hat der Mensch keine ausgezeichnete Position im Universum, sondern lediglich eine durchschnittliche Stellung. Nikolaus Kopernikus' einflussreichstes Werk „De revolutionibus orbium coelestium“ revolutionierte unser antiquiertes geozentrische Weltbild.²

Dieses Werk führte im 17. Jahrhundert zu der als „Kopernikanische Wende“ bekannten Umwälzung, welche eine der historischen Zäsuren am Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit darstellt. Die Erde wurde nicht mehr als Zentrum betrachtet, sondern war fortan nur einer der vielen Planeten, welche sich um die Sonne drehen. Jedoch beschränkte sich die Entlarvung der geozentrischen Anschauung später nicht nur auf das Sonnensystem.³

Der Mathematiker und Astrophysiker Edward Arthur Milne entwickelte im Jahr 1933 das kosmologische Prinzip. Das kosmologische Prinzip besagt, dass kein Ort im Weltall gegenüber einem anderen „ausgezeichnet“ ist. Genau wie die Erde nach der kopernikanischen Wende nicht länger der Mittelpunkt des Universums war. Arthur Milne verwendete die spezielle Relativitätstheorie, um die Ausdehnung des Kosmos mathematisch auszudrücken. Das Weltall ist in diesem Fall homogen und isotrop.⁴

² Vgl. Harvey, 2022.

³ Vgl. Dierse, 2003, S. 3–6.

⁴ Vgl. Böhringer, 2013.

Unter Homogenität und Isotropie versteht man:

- **Homogenität des Universums:** Allgemein beschreibt die Homogenität die Gleichartigkeit von Eigenschaften in allen Dimensionen eines Systems. Beispielsweise ist bei einem homogenen elektischen Feld die Feldstärke überall gleich stark. Ein weiteres Beispiel wäre die Gleichheit des Universums aller Beobachtungsstandpunkte. Ein homogenes Universum sieht für einen Beobachter, unabhängig von seiner Position, gleich aus. Essenziell ist in diesem Zusammenhang das von Milne aufgestellte Grundprinzip der Kosmologie - das Homogenitätspostulat oder auch Weltpostulat genannt. Die Relativitätstheorie besagt, dass es innerhalb unseres gesamten Weltalls und kein Zentrum geben könnte. Das Weltpostulat ist demnach ein Folge-Prinzip der Relativitätstheorie, welche auf den homogenen Standpunkt eines Beobachters zurückgreift. Daraus resultieren zwei Erkenntnisse: 1) Es existiert eine gleichmäßige Verteilung der Materie im Raum. 2) Die Ausdehnung des Universums zeigt sich von jedem Punkt aus auf die gleiche Weise.⁵
- **Isotropie des Universums:** Isotropie bezeichnet die Unabhängigkeit physikalischer Prozesse von der Richtung. Isotropie tritt hauptsächlich in amorphen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen auf. Das Gegenstück der Isotropie ist die sogenannte *Anisotropie*. Im Zusammenhang mit dem kosmologischen Prinzip, bezieht sich die Isotropie auf die Beobachtungsrichtung. Unabhängig von der Blickrichtung sieht das Universum überall gleich aus. Daher ist keine Perspektive „ausgezeichnet“⁶

Das bedeutet, dass in einem homogenen Raum Eigenschaften Standpunkt-unabhängig sind und in einem isotropen Raum richtungsunabhängig. Die durchschnittliche Dichte von Galaxien ist im gesamten Kosmos gleich und variiert nicht mit Entfernung oder Richtung. Wissenschaftlich betrachtet scheint unser Universum sowohl homogen als auch isotrop zu sein. Jedoch erzeugt die unmittelbare Umgebung unseres Heimatplaneten einen vermeintlichen Widerspruch. Konträr zu den Grundsätzen des kosmologischen Prinzips, verteilt sich die Materie scheinbar nicht gleichmäßig, sondern verdichtet sich in Sternen oder Nachbarplaneten und es entstehen sogenannte „Massenverdichtungen“. Erst wenn wir unser Universum bei einer Skala von einigen

⁵ Vgl. Müller, o. D.

10 Megaparsec betrachten, wird die Homogenität des Kosmos deutlich. Auf der anderen Seite wird die Isotropie des Universums erst bei einer Entfernungsskala von einigen hundert Millionen bis Milliarden Parsec erkennbar.⁶

Die Steady-State-Theorie ist ein kosmologisches Modell, welches von Fred Hoyle, Hermann Bondi und Thomas Gold im Jahr 1948 aufgestellt wurde und dem kosmologischen Prinzip folgt. Diese Theorie besagt, dass das stationäre Universum räumlich und zeitlich unendlich ist und demgemäß keine anfängliche Singularität hat. Daher bestreitet die Steady-State Theorie die Existenz eines Urknalls. Um die Rotverschiebung und somit die von Edwin Hubble belegte beobachtbare Expansion des Universums jedoch im Zuge der Steady-State-Theorie zu erläutern, muss im gesamten Universum kontinuierlich neue Materie produziert werden. Allerdings entsteht nach der Entdeckung der Hintergrundstrahlung ein Widerspruch. Die Radioastronomen Arno Penzias und Robert Wilson entdeckten unbeabsichtigt ein bedeutsames Relikt aus der Frühzeit unseres Universums - ein scheinbares Echo des Urknalls in Form eines Rauschens. Der wichtige Fund der Hintergrundstrahlung widerlegte die Idee der drei Astronomen endgültig.⁷

2.2. Das Hubble-Gesetz: Hubble-Konstante & Rotverschiebung

Das Hubble-Gesetz, auch Hubble-Lemaître-Gesetz genannt besagt, dass sich Galaxien mit Geschwindigkeiten von der Erde wegbewegen, die proportional zu ihrer Entfernung sind:

$$V = H_0 \cdot r$$

Daher entfernen sie sich umso schneller von der Erde, je weiter sie entfernt sind - d.h. Galaxien, oder genauer gesagt, Galaxienhaufen, die doppelt so weit entfernt sind, entfernen sich doppelt so schnell von uns. Die Rotverschiebung der Galaxien, eine Verschiebung des von ihnen emittierten Lichts zum roten Ende des sichtbaren Spektrums, wurde zur Berechnung ihrer Geschwindigkeiten verwendet.⁸

Das Gesetz von Hubble ist eines der heute am häufigsten genutzten Argumente für die Urknalltheorie. Sie gilt als erste Beobachtungsbasis für die Expansion des Universums. Der

⁶ Vgl. Müller, o. D.

⁷ Vgl. Podbregar, 2018, S. 4.

⁸ Vgl. Overbye, 2017.

Hubble-Fluss ist die Bezeichnung für die Bewegung astronomischer Objekte, die nur durch den Vorgang der homogenen Expansion verursacht wird.⁹

Georges Lemaître berechnete 1927 unabhängig von Friedmanns Expansionsgleichungen im Jahr 1922, dass sich das Universum ausdehnen könnte. Aufgrund der Proportionalität zwischen der Rezessionsgeschwindigkeit und dem Abstand zu entfernten Körpern schlug Lemaître daraufhin einen geschätzten Wert für die Proportionalitätskonstante vor. Diese Konstante wurde schließlich nach Edwin Hubble als Hubble-Konstante bezeichnet, nachdem er später eine kosmische Expansion bestätigt und einen genaueren Wert dafür bestimmt hatte.¹⁰

Eine der wesentlichen Größen in der Kosmologie ist diese Hubble-Konstante H_0 . Diese beschreibt das aktuelle Expansionstempo des Universums. Da die Hubble-Konstante streng genommen keine Konstante ist, sondern dynamisch ist und sich über die Zeit verändert, wird inzwischen auch häufig der Begriff „Hubble-Parameter“ verwendet. Zahlreiche Messungen aus dem 20. und 21. Jahrhundert ergaben Werte zwischen $65 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ und $74,3 \pm 2,1 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$.¹¹

Ein Megaparsec (Mpc) entspricht einer Entfernung von ca. 3 Millionen Lichtjahren. Galaxien oder Galaxienhaufen entfernen sich für jeden Megaparsec mit zusätzlichen 70 km/s . Das bedeutet jedoch nicht, dass sich Galaxien jenseits von Galaxien oder Galaxienhaufen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit entfernen (*Hubble-Radius*), sich schneller als Lichtgeschwindigkeit wegbewegen. Denn nichts kann schneller durch den Weltraum reisen als Licht. Diese Galaxien entfernen sich tatsächlich schneller als Licht von uns - allerdings tun sie das nicht, indem sie sich durch den Weltraum bewegen. Es ist der Raum zwischen diesen Galaxien der sich ausdehnt.¹²

Oftmals wird die Rotverschiebung auch *relativistischer Dopplereffekt* genannt und mit dem *akustischen Dopplereffekt* in Verbindung gebracht. Der Unterschied zwischen diesen besteht darin, dass der akustische Dopplereffekt seine Ursache in der Relativbewegung von A und B zueinander hat – in diesem Fall Sender und Empfänger. Während bei der kosmologischen Rotverschiebung der Raum dazwischen expandiert – d.h. Punkt A und B bleiben an ihren Raumpunkt.

⁹ Vgl. Hubble Flow | COSMOS, o. D.

¹⁰ Vgl. Van Den Bergh, 2011, S. 151.

¹¹ Vgl. Hurcha, 2008.

¹² Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 104.

2.3 Die Friedmann-Gleichung und die Expansion des Universums

Die zeitliche Entwicklung des Kosmos kann man mithilfe der zwei Friedmann-Gleichungen erläutern. Diese Gleichungen vereinfachen die einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie. Hierbei werden die Homogenität und Isotropie des Universums angenommen. Weil diese Gleichungen, unabhängig von Alexander Friedmann, auch von *Georges Lemaitre* entdeckt wurden, werden sie oftmals auch Friedmann-Lemaitre-Gleichungen genannt. Die Allgemeine Relativitätstheorie besitzt Faktoren, welche mit Ausdehnung des Universums zusammenhängen.

Die Friedmann-Gleichung legt dar, wie sich die Expansionsrate in einem homogenen und isotropen Weltall im Laufe der Zeit ändert und warum sie sich ändert. Albert Einstein ging ursprünglich von einem statischen Universum aus, welches sich weder ausdehnt noch zusammenzieht. Um diese These in der Relativitätstheorie abzubilden, musste er in die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Konstante einführen - die kosmologische Konstante Lambda (Λ).¹³

Friedman wies diese Annahme eines statischen Universums zurück und fand im Jahr 1922 einen Weg, die kosmologische Konstante abzuschaffen: Er setzte sie gleich Null. Durch Hubbles Entdeckung der Rotverschiebung stellte sich 1929 heraus, dass sich fast alle Galaxien voneinander wegbewegen. Dies wurde später als Expansion des Universums gedeutet.¹⁴

Das kosmologische Prinzip besagt ja, dass das Universum homogen und isotrop ist. Diese Annahme kann man mathematisch mittels sogenannter Tensoren darstellen. Der *Energie-Impuls-Tensor* wird in Einsteins Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie gemeinsam mit der kosmologischen Konstanten Lambda (Λ), eingesetzt. Unter Verwendung von Lambda kann die *Robertson-Walker-Metrik* abgeleitet werden. Die Robertson-Walker-Metrik oder auch *Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker-Metrik* (FLRW-Metrik), wurde nach *Alexander Friedmann*, *Georges Lemaitre*, *Howard P. Robertson* und *Arthur Geoffrey Walker* benannt. Sie ist eine genaue Auflösung der einsteinschen Feldgleichungen.

¹³ Vgl. Tyson/Soter, 2001.

¹⁴ Vgl. Schröder, 2006, S. 2.

Das Linienelement der Robertson-Walker-Metrik wird mit dem Lambda-Term in die Einstein-Feldgleichungen eingesetzt und ergibt ein System aus zwei unabhängigen Differentialgleichungen zweiter Ordnung - den Friedman-Gleichungen.¹⁵

Bei der Recherche wurde mir jedoch klar, dass diese Herleitung über die Schulmathematik weit hinausgeht. Somit erschien der mathematische Aufwand dafür unverhältnismäßig groß. Demzufolge habe ich für diese Arbeit ein Weg gefunden, die Herleitung auch mit einer Modellierung eines kugelförmigen Bereichs des Raumes mit Newtonscher Gravitation darzulegen.

2.3.1 Herleitung der 1. Friedmann-Lemaitre-Expansionsgleichung anhand Newtonscher Näherungen

Um diese Gleichungen herzuleiten, wird nicht die allgemeine Relativitätstheorie verwendet, sondern ein einfacheres Modell. Weil unser Universum sich in einer beliebigen Form ausdehnen kann, betrachten wir für ein einfaches Modell dazu eine Kugel und die Dynamik eines beliebigen Punktes in dieser Kugel. Wir betrachten die Dynamik eines Universums, welches sich kontinuierlich ändert. Weil das Universum homogen und isotrop ist, kann man einen beliebigen Punkt nehmen, der für jeden Punkt im Universum steht. In einem Abstand R betrachtet man einen massenreichen Testkörper oder eine Galaxie um diesen Punkt herum.¹⁶

Diesen Abstand R kann man im weiteren Verlauf mit dem Skalenfaktor $a(t)$ belegen. Der Skalenfaktor beschreibt die Vergrößerung des Raumes im Verlauf der Expansion, welche von der Zeit t abhängt:

$$R = a(t) \cdot R_0$$

Wenn man R nach der Zeit ableitet, erhält man:

$$\dot{R} = \dot{a}(t) \cdot R_0$$

Beide Ausdrücke kann man nun wie folgt zusammenfassen:

$$\dot{R} = \frac{\dot{a}}{a} \cdot R$$

¹⁵ Vgl. Brandt, S. 5–6.

¹⁶ vgl. Urknall, Weltall und das Leben, 2021, TC 3:20.

Weil nach dem Hubble Gesetz $v = H \cdot R$ gilt und das \dot{R} in diesem Fall eine Fluchtgeschwindigkeit darstellt, ist $\frac{\dot{a}}{a}$ die Hubble-Konstante:

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Daraufhin beobachtet man wie sich diese Galaxie verhält. Dafür betrachtet man die Energieerhaltung. Wichtig hierfür ist zunächst die kinetische Energie. Die kinetische Energie beschreibt die Energie eines Körpers aufgrund seiner Bewegung. Eine Änderung der kinetischen Energie tritt nur dann auf, wenn ein Objekt seine Geschwindigkeit ändert. Weil sich im Falle einer Expansion der Abstand R mit der Zeit ändert, erhält man folgenden Ausdruck:

$$\frac{m}{2} \cdot \dot{R}^2$$

Weil die Gravitation anziehend wirkt, hat man nun ein negatives Vorzeichen. Hier wird die kinetische Energie E_{kin} vom Gravitationspotential $\frac{GM \cdot m}{R}$ subtrahiert. So erhält man die Gesamtenergie E_{ges} , welche man in diesem Fall eine Konstante ist:¹⁷

$$\frac{m}{2} \cdot \dot{R}^2 - \frac{GM \cdot m}{R} = E_{\text{ges}} \quad | \cdot \frac{2}{m}$$

Wenn man das Volumen dieser Kugel durch die Dichte rechnet, erhält man die Masse M . Für R und \dot{R} werden die obigen Ausdrücke eingesetzt und somit kommt der Skalenfaktor $a(t)$ in Spiel. Das gedachten Volumen um unseren Punkt hat hier die Dichte ρ . Hierbei kürzt sich darüber hinaus das m weg, weil ich auf beiden Seiten $\frac{2}{m}$ multipliziert habe.

$$(\dot{a}(t) \cdot R_0)^2 - G \frac{2 \cdot 4\pi a(t)^3 R_0^3}{a(t) \cdot R_0 3} \cdot \rho = \frac{2 \cdot E_{\text{ges}}}{m} \quad | \div R_0^2$$

Durch Ausmultiplizieren und dem Kürzen von R_0 erhält man folgendes:

$$\dot{a}(t)^2 - \frac{8\pi G}{3} \cdot a(t)^2 \cdot \rho(t) = \frac{2 \cdot E_{\text{ges}}}{m \cdot R_0^2} \quad | \div a(t)^2 \quad | \div a(t)^2$$

Aus jeder Konstante kann man einen anderen konstanten Faktor rausziehen. Um mit der Lösung übereinzustimmen, die eine allgemein relativistische Berechnung liefert, wird nun die Konstante

¹⁷ vgl. Urknall, Weltall und das Leben, 2021, TC 7:35.

c^2 rausgezogen. Zunächst habe ich das $a(t)^2$ gekürzt und das $\dot{a}(t)$ durch das a geteilt. Weil der Skalenfaktor $a(t)^2$ auf der rechten Seite aber keine Konstante ist, wird nun der Faktor K mal der rausgezogenen Konstante c^2 durch den Skalenfaktor $a(t)^2$ geteilt. So erhält man schließlich die Friedmann-Gleichung, welche nun die Dynamik des oben genannten Skalenfaktors beschreibt: ¹⁸

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{Kc^2}{a(t)^2}$$

1. Friedmann-Lemaitre-DGL

$H(t)$: Hubble-Parameter $\rho(t)$: Dichte G : Gravitationskonstante $6,742 \times 10^{-11}$
 $a(t)$: Skalenfaktor K : Krümmung der Raumzeit

2.3.2 Herleitung der 2. Friedmann-Lemaitre-Expansionsgleichung unter Verwendung der Thermodynamik und der ART

Um die 2. Friedmann-Lemaitre-DGL herzuleiten, wird die allgemeine Relativitätstheorie und die Thermodynamik benötigt. Um die Dichte $\dot{\rho}a^2$ auszudrücken, greife ich zum 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser HS besagt, dass die Änderung der Energie gleich einer Änderung des Druckes in einem Volumenelement (dV) ist.

Den ersten HS der Thermodynamik schreib man wie folgt an:

$$dU = -p \cdot dV$$

Den erste Hauptsatz der Thermodynamik schreibt in Form der ART so an:¹⁹

$$\frac{d}{dt}(c^2 \rho a^3) = -p \frac{d a^3}{d t}$$

Hier leite ich mit der Produktregel ab – äußere Ableitung mal innere Ableitung:

$$\dot{\rho}a^3 + 3\rho a^2 \dot{a} = -3p a^2 \frac{\dot{a}}{c^2}$$

¹⁸ Vgl. Urknall, Weltall und das Leben, 2021, TC 11:00.

¹⁹ Vgl. Schröder, 2006, S. 4

$$\dot{\rho}a^2 = -a\dot{a}\left(3\frac{p}{c^2} + 3\rho\right)$$

Wenn wir nun beide Seiten der 1. Friedmann-Lemaitre-DGL nach der Zeit differenzieren, erhalten wir folgendes:²⁰

$$2\ddot{a}a = \frac{8\pi G}{3}(\dot{\rho}a^2 + 2a\dot{a}\rho)$$

In $\dot{\rho}a^2$ setzen wir nun den oben dazugehörigen Term ein und wir erhalten somit:²¹

$$\begin{aligned} 2\ddot{a}a &= \frac{8\pi G}{3}\left[-a\dot{a}\left(3\rho + 3\frac{p}{c^2} - 2\rho\right)\right] \\ &= \frac{8\pi G}{3}a\dot{a}\left(3\rho + 3\frac{p}{c^2} - 2\rho\right) \quad | \div 2 \quad | \div a \quad | \div \dot{a} \end{aligned}$$

Schließlich erhält man die **2. Friedmann-Gleichung**:²²

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\frac{3p}{c^2} + \rho\right)$$

2. Friedmann-Lemaitre-DGL

Der negative Ausdruck $\frac{4\pi G}{3}$ zeigt, dass es sich hierbei um eine anziehende Kraft handelt. Der Term $\left(\frac{3p}{c^2} + \rho\right)$ muss also diese Bremswirkung auf die Expansion kompensieren. Hierbei ordnet man einen Term zu, welcher dem Vakuum eine Dichte und einen Druck p zuschreibt. V beschreibt das Volumen und ist: $R_0^3 \cdot a^3$. Für das E muss man die spezielle Relativitätstheorie und die Formel $E = m \cdot c^2$ heranziehen. Weil ich hier das mitbewegte Volumen berücksichtige, gilt: $E = \rho_v c^2 \cdot V$.²³

$$dE = -p_v dV$$

$$dE = \rho_v c^2 dV$$

Zwischen den beiden Ausdrücken besteht eine entscheidende Beziehung: $\rho_v = \frac{-p_v}{c^2}$. Im Falle eines negativen Drucks bekommt man insgesamt einen negativen Term $\left(\frac{3P}{c^2} + \rho\right)$, weil der Druck

²⁰ Vgl. Schröder, 2006, S. 4

²¹ Vgl. ebd., S. 4–5.

²² ebd., S. 4–5.

²³ Vgl. Urknall, Weltall und das Leben, 2021b, TC 28:35.

dreifach gewichtet ist. Deshalb kann die rechte Seite der Gleichung, trotz der positiven Materiedichte und des negativen Drucks, positiv sein. Dichte führt in einem Vakuum zu einem negativen Druck – diese Erkenntnis hat man gebraucht, um die kosmologische Konstante später einzuführen.²⁴

2.3.3 Die Friedmann-Weltmodelle und die Krümmungstypen des Universums

Infolgedessen konstruierte Friedmann drei Modelle des expandierenden Universums unter Verwendung der nach ihm benannten Friedman-Gleichungen. Man muss aber vorerst die drei Krümmungstypen des Universums konkretisieren:²⁵

- Wenn die Krümmung der Raumzeit positiv ist, ist das Universum „**sphärisch**“ - die Raumzeit ist in diesem gegebenen Fall positiv ($K = 1$). Analog kann man die Manifestation eines sphärischen Universums mit einer Kugeloberfläche vergleichen. Darüber hinaus ist ein sphärisches Weltall geschlossen und unendlich. Ein sphärisches Universums jedoch endliches Volumen (Abb.1).²⁶
- Das Universum wird als „flach“ oder „**euklidisch**“ bezeichnet, wenn der Kosmos entweder: 1.) offen und unendlich ist, oder 2.) geschlossen und endlich. ($K = 0$) (Abb.1).²⁷
- Anders wie beim euklidischen Modell, kann auch ein „**hyperbolisches**“ Universum, je nach Topologie, sowohl geschlossen und endlich als auch offen und unendlich sein. Hierbei weist die Raumzeit eine negative Krümmung vor ($K = -1$) (Abb.1).²⁸

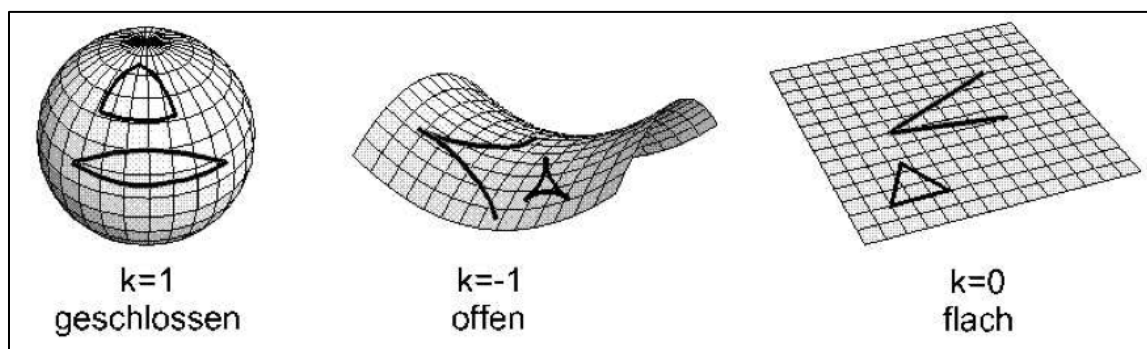


Abbildung 1: Raumanteil der Robertson-Walker-Metrik in Abhängigkeit von k [Quelle: pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de]

²⁴ Vgl. Urknall, Weltall und das Leben, 2021b, TC 30:00.

²⁵ Vgl. Coble et al., 2021.

²⁶ Vgl. Müller, o. D.b.

²⁷ Vgl. ebd., o. D.b.

²⁸ ebd., o. D.b.

1. Friedmann-Modell

Das erste Friedmann-Modell erhalten wir, indem wir die Integrationskonstante $K < 0$ setzen.

Dann gilt:²⁹

$\forall t \in [0; \infty[$:

$$\dot{a}(t) = \underbrace{\frac{8\pi G}{3} \rho(t) a(t)^2}_{\geq 0} - \underbrace{K c^2}_{\geq 0} > 0$$

Hiermit wird klar, dass das Universum für alle Zeit t expandiert. Dies lässt sich auch feststellen, wenn man beobachtet, was im Grenzverhalten passiert. Der Skalenfaktor ist positiv – daher ist die Veränderung des Raumes im Laufe der Expansion positiv. Es gilt folgendes (Abb.2):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{a}(t) = \infty$$

2. Friedmann-Modell: Einstein-De-Sitter-Modell:

Nun wird das zweite Friedmann-Modell betrachtet, welches auch als Einstein-De-Sitter-Modell bezeichnet wird. Hier wird der statische Kosmos von Einstein mit dem Modell De-Sitters verbunden. Hierbei gilt:³⁰

$$\dot{a}(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) a(t)^2$$

Man schreibt die Dichte $\rho = \frac{m}{V}$ hier als $\rho = \frac{m}{V_0 a^3}$ an. Weil $\frac{m}{V_0} = \rho_0$ und somit $\rho = \frac{\rho_0}{a^3}$ gilt, erhält man:

$$\dot{a}(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 \frac{1}{a(t)} > 0$$

Wenn wir im Folgenden sehen, geht der Grenzwert hierbei nicht gegen ∞ , sondern gegen 0.

$$\lim_{t \rightarrow 0} \dot{a}(t) = 0$$

²⁹ Vgl. Schröder, 2006, S. 5.

³⁰ Vgl. ebd., S. 5.

Das lässt sich wie folgt leicht erklären: Weil das Universum in diesem Fall immer weiter expandiert, wird $a(t)$ immer größer. Aber wenn $a(t)$ immer größer wird, wird $\frac{1}{a(t)}$ immer kleiner. Deswegen geht der Grenzwert hier gegen 0 (Abb.2).

3. Friedmann-Modell:

Das dritte Friedmann-Modell erhalten wir, indem wir die Integrationskonstante $K > 0$ setzen. Demnach gilt:³¹

$$\dot{a}(t) = \underbrace{\frac{8\pi G}{3}\rho(t)a(t)^2}_{> 0} - \underbrace{Kc^2}_{< 0}$$

Um das Verhalten des Terms darzulegen, muss man die Extremstellen bestimmen. Wenn man nun $\dot{a}(t)$ ableitet und gleich 0 setzen, erhält man folgendes:

$$a(t_E)a_{max} = \frac{8\pi G\rho_0}{3Kc^2} > 0$$

Wenn man nun die 2. Friedmann-Gleichung $\ddot{a}(t)$ ableitet und gleich 0 setzen, erhält man folgendes:

$$\begin{aligned}\ddot{a}(t_E) &= -\frac{4\pi G}{3}\left(\frac{3P}{c^2} + \rho(t_E)\right)a(t_E) \\ &= -\frac{4\pi G}{3}\left(\frac{3P}{c^2} + \rho_0\frac{1}{a(t_E)^3}\right)a(t_E)\end{aligned}$$

Nun wird für das $a(t_E)$ der Ausdruck $\frac{8\pi G\rho_0}{3Kc^2}$ eingesetzt, um zu ermitteln, ob $a(t_E)$ ein Hochpunkt ist:³²

$$= -\frac{4\pi G}{3}\left(\frac{3P}{c^2} + \rho_0\frac{1}{\left(\frac{8\pi G\rho_0}{3Kc^2}\right)^3}\right)\frac{8\pi G\rho_0}{3Kc^2} < 0$$

Es gilt:

$$\ddot{a}(t_E) < 0$$

³¹ Vgl. Schröder, 2006, S. 6.

³² Vgl. ebd., S. 6.

Das bedeutet, dass $a(t_E)$ ein Hochpunkt ist. Daraus kann man folgendes schließen: Das Universum expandiert im Zeitraum $[0, t_E]$ und kollabiert somit im Zeitraum $]t_E, \infty[$. Nach diesem Modell könnte sich die Zukunft des Universums so entwickeln, dass der Big Crunch passiert. In anderen Worten, ein „negativer Urknall“ (Abb.2).³³

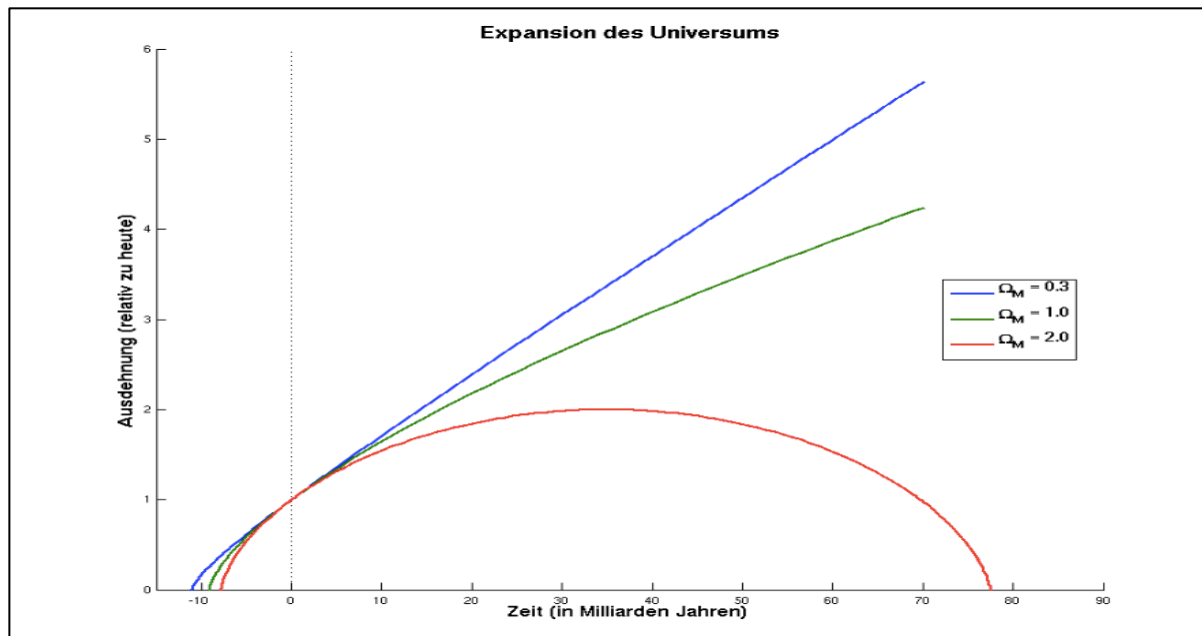


Abbildung 2: Modelle zur Expansion des Universums [Quelle: peter-junglas.de]

³³ Vgl. Schröder, 2006, S. 6.

2.4 Lambda-CDM-Modell – Standardmodell des Universums

Lambda bezieht sich auf die berühmte kosmologische Konstante in Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Bei ihrer Lösung kann man einen konstanten Term hinzuzufügen, den Einstein mit dem griechischen Großbuchstaben Λ bezeichnet hat und der theoretisch im Grunde unbestimmt ist.

Lambda zeigt eine Energiedichte an, die der Raumzeit selbst innewohnt. Einstein kalibrierte Lambda, um der Netto-Schwerkraft auf kosmologischen Skalen entgegenzuwirken, so dass er ein statisches Universum erhalten konnte, welches weder expandierend noch kontrahierend ist. Später nannte er das seinen „*größten Fehler*“.³⁴

Erst Jahre später wurde jedoch entdeckt, dass Lambda zwar nicht den für ein statisches Universum erforderlichen Wert hat, aber scheinbar ungleich Null ist. Die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch Perlmutter und Riess und ihrer Forschungsgruppen im Jahr 1996, die ihnen im Jahr 2011 den Nobelpreis einbrachte, scheint ziemlich schlüssig auf eine kosmologische Konstante ungleich Null hinzuweisen.³⁵

Diese Entdeckung wurde durch die Untersuchung der Rotverschiebung von Supernovae im gesamten beobachtbaren Universum ermöglicht. Hierbei hat man bestimmt, wie die Rotverschiebung von der Entfernung abhängt. Weil Licht aus größerer Entfernung länger braucht, um uns zu erreichen, kann man die Expansionsrate des Universums über großen Zeitskalen rekonstruieren. Lambda ist nun der Begriff, der das darstellt, was wir heute auch *Dunkle Energie* nennen.³⁶

CDM bezieht sich auf *kalte Dunkle Materie (Cold Dark Matter)*. Die *Dunkle Materie* wird postuliert, weil sie einige ansonsten anomale Beobachtungen erklärt. Die berühmtesten Anomalien sind u.a. Rotationskurven von Galaxien. Basierend auf der beobachteten Materie, würde das dritte Keplersche Gesetz und die Gravitationsgesetze der Physik ergeben, dass die Umlaufgeschwindigkeit von Sternen in Galaxien oder Galaxienhaufen abnehmen sollte,

³⁴vgl. Müller, o. D.c.

³⁵ Vgl. Kayser, 2011

³⁶ Vgl. Wright, 2011.

wenn man weiter hinausschauen – bzw. wenn der Abstand vom Zentrum größer ist. Aber das tut es nicht (Abb.3).³⁷

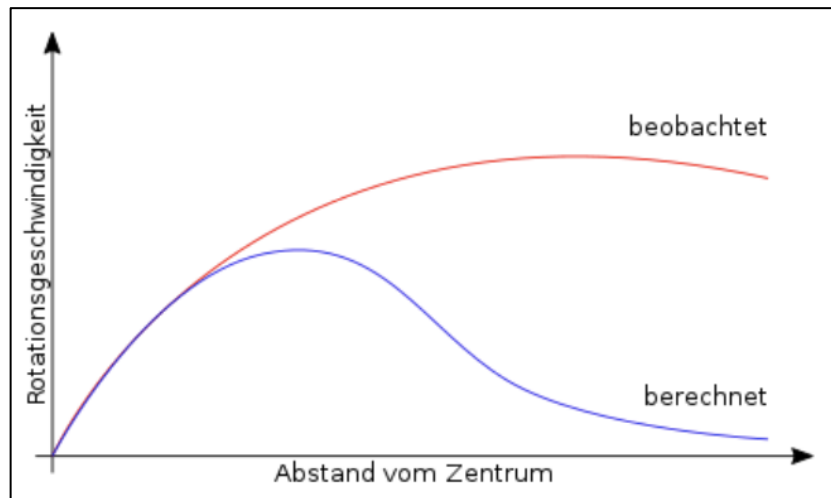


Abbildung 3: Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne in Galaxien [Quelle: de.wikipedia.org]

Der Schweizer Physiker und Astronom Fritz Zwicky stellte im Jahr 1933 fest, dass ein Galaxienhaufen nicht allein durch die Gravitationswirkung seiner sichtbaren Bestandteile verbunden wird. Er fand heraus, dass man das 400-fache der sichtbaren Masse braucht, um Galaxiehaufen gravitativ zusammenzuhalten (Abb.3). Zwicky schlug fehlende Materie vor: *Dunkle Materie*. Zwickys Annahme, dass diese fehlende Masse in Form von Dunkler Materie vorliegt, wurde von Experten vorerst weitgehend abgelehnt.³⁸

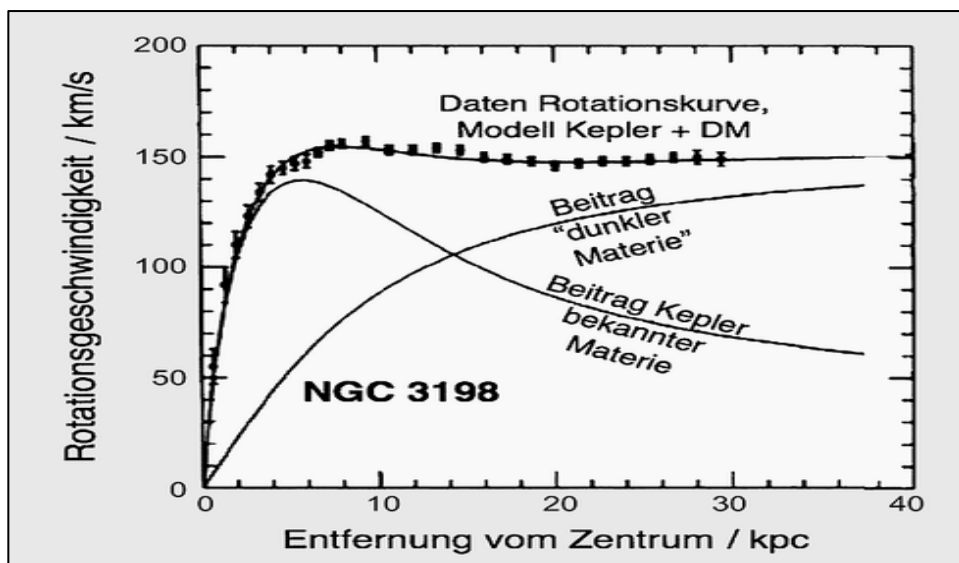


Abbildung 4: Galaxierotation inkl. Beitrag der dunklen Materie [Quelle: Physik des Monats]

³⁷ vgl. de Boer, 2000.

³⁸ Vgl. Comparat/Predehl, 2022, S. 64–71.

Demnach ist Lambda-CDM ein kosmologisches Modell, das unser Universum in Bezug auf Ausdehnung, Materie- und Energiegehalt beschreibt. In diesem Modell beträgt die aktuelle Expansionsrate etwa $70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$. Diese ergibt folgende Zusammensetzung des Universums: etwa 73 % dunkle Energie, 23 % dunkle Materie, etwa 4 % „gewöhnliche Materie“ wie Atome und 0,3 % Neutrinos. „Gewöhnliche Materie“ wird unterteilt in selbstleuchtende Bestandteile wie Sterne und nicht leuchtende Bestandteile wie Planeten. Die Ausdehnung verlangsamt sich, wenn Materie sich anzieht. Auf der anderen Seite, beschleunigt sich die Expansion aufgrund der Dunklen Energie. Die bewirkt, dass sich die Expansionsrate im Laufe der Zeit ändert.³⁹

Lambda-CDM ist bei weitem die beste Beschreibung, die man für eine Vielzahl von Beobachtungen des Universums hat – u.a. die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB), die ein Beleg für die Urknalltheorie ist. Darüber hinaus ist es auch ein Mittel für die Bestimmung der Ausdehnungsgeschwindigkeit durch die Beobachtung von Supernovae in fernen Galaxien.⁴⁰

Grundsätzlich hat jede Messung, die man im großen Maßstab durchführen konnte, das Lambda-CDM-Modell belegen können. Dies ist erstaunlich, weil völlig unabhängige Messungen alle auf das gleiche Verhältnis von ca. 70 % dunkle Energie zu 30 % dunkle und gewöhnliche Materie hinweisen, obwohl sie sehr unterschiedliche Ausartungen und eine andere Systematik haben.

Big Crunch, Big Freeze, Big Rip – Dies sind die drei Theorien, welche das voraussichtliche Ende unseres Universums beschreiben. Hierbei spielen die Eigenschaften der Dunklen Energie und Dunklen Materie eine entscheidende Rolle. Wir wissen zwar, dass das Universum vor ca. 13,7 Milliarden Jahren aus dem „Big Bang“ entstand – aber wie findet unser Kosmos sein Ende? Mit dieser Frage beschäftigt sich das folgende Kapitel. Eine hypothetische Antwort bieten die folgenden drei Theorien.

³⁹ Vgl. Schlaepfer, 2001, S. 11.

⁴⁰ Vgl. Spergel et al., 2007.

3 Big Crunch – der umgekehrte Urknall

Big Crunch ist englisch für *Das große Zusammenkrachen* – in der Kosmologie wird diese Theorie oftmals auch als *umgekehrter Urknall* bezeichnet. Neben dem *Big Freeze* und dem *Big Rip* beschreibt die Big Crunch-Theorie einen hypothetischen zeitlichen Tod unseres Universums. Diese Hypothese beschäftigt sich mit der Frage, ob sich die Ausdehnung des Universums auch zurückbilden kann und daraus ein umgekehrter *Big Bang* resultieren könnte.

3.1. Hypothetischer Ablauf

Jedes Objekt, welches man mit einem kraftvollen Schwung senkrecht nach oben katapultiert, wird zweifellos wieder herunterfallen. Ein passendes Beispiel hierfür wäre ein einfacher Ball. Bevor dieser Ball herabfällt, wird er vorerst langsamer und schwebt für eine kurze Zeit bewegungslos in der Luft. Der Grund dafür: *Gravitation*.

Auch wenn die Schwerkraft die schwächste der 4 Grundkräfte ist, hat sie einen enormen Einfluss auf unseren Kosmos. Die Gravitation ist beispielsweise der Grund, wieso sich die Milchstraße und ihre Nachbarin, die Andromeda-Galaxie, gegenseitig anziehen.⁴¹

Nun versucht man zu verstehen, ob die physikalischen Prinzipien eines Ballwurfes der Physik des ausdehnenden Universums ähneln. Je stärker der Wurf eines Balles nach oben ist, desto länger dauert es, bis dieses Objekt seinen Ruhestand erreicht und mit dem Zurückfallen beginnt. Unserem Universum soll es nach der Big Crunch-Theorie da nicht anders ergehen. Man stelle sich vor, dass das schwungvolle Hochwerfen von kosmischer Materie einen „anfänglichen Schub“ auslöst.⁴² In diesem gegebenen Fall ereignet sich der Urknall. Ab diesem Moment beginnt die Ausdehnung des entstandenen Universums. Jedoch wirkt die Schwerkraft dieser scheinbar unhaltbaren Expansion entgegen. Daher wird man mit der Frage konfrontiert, ob dieser „anfängliche Schub“ genügt, um der Schwerkraft entgegenzuwirken.⁴³

Wie auch beim Ball, soll es auch bei der Expansion des Universums einen bestimmten *Ruhepunkt* geben. Hierbei würde die Ausdehnung stoppen, bevor es zum langsamen Zusammenziehen oder „Zusammenkrachen“ kommt.

⁴¹ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 75.

⁴² Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 75.

⁴³ Vgl. ebd., S. 75.

Zunächst werden sich jene Galaxien und Galaxienhaufen langsam auf und zubewegen, welche sich in unserem oder knapp jenseits unseres kosmischen Umfelds befinden. Der eingangs erwähnte *Ruhepunkt* wird in diesem Fall ein dahintergelegener Raum sein, der scheinbar zum Stillstand gekommen ist. Weil weiter entfernte Galaxien und Galaxienhaufen trotz alledem rotverschoben sind, werden wir den Eindruck haben, dass diese sich weiter von uns wegbewegen. Doch diesen rotverschobenen Galaxien werden wir nach einer Zeit keine Beachtung mehr schenken, weil nähere Galaxien immer weiter herantreten und der *Stillstandradius* dahinter, weiter nach außen rückt. Das bedeutet, dass sich weiter entfernte Galaxien rotverschoben erscheinen und sich scheinbar weiterhin von uns entfernen.⁴⁴ Zu Beginn wird es Galaxienkollisionen und -umstrukturierungen geben. Während Galaxien näher zusammenrücken und sich regelmäßiger verbinden, wird das blaue Licht neu entstandener Sterne ausbruchsartig am Himmel zu sehen sein. Enorme Strahlungs- und Partikelfontäne werden durch den kosmischen Raum strömen. Die Kollision von Sternen wird zu Beginn eher unwahrscheinlich sein.⁴⁵

Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung ist ein Nachleuchten des Urknalls und ein Relikt aus der Frühzeit unseres Universums. Aufgrund der Ausdehnung entfernen sich nicht nur Galaxienhaufen von uns, sondern auch die Photonen der Hintergrundstrahlung werden so weit gestreckt und isoliert, dass man sie heute nur mehr als schwaches Rauschen wahrnehmen kann. Während sich aber die Expansion im Falle eines kollabierenden Universums zurückbildet, verschiebt sich zugleich auch die Hintergrundstrahlung. Ihre darauffolgende Intensität wird mit der Zeit einen fatalen Grad erreichen.⁴⁶

Weil sich das Universum immer weiter verdichtet, wird sich die Gesamtstrahlung von Sternen und die energiereichen Teilchenfontäne zu höheren Energien blauverschieben. Das Ausmaß dieser Kräfte kann die Oberfläche von Sternen entzünden. Folglich würde die Atmosphäre von Sternen durch nukleare Explosionen zerstört werden und das Universum mit heißem Plasma füllen. In seinen letzten Stadien würde ein kollabierendes Universum unbeschreibliche Dichten und Temperaturen erreichen.⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 77.

⁴⁵ Vgl. ebd., S. 78.

⁴⁶ Vgl. ebd., S. 79.

⁴⁷ ebd., S. 80.

Sekunden vor dem Zusammenkrachen würde es zu einer Verschmelzung von „supermassiven“ Schwarzen Löchern kommen. Schließlich ist alle Materie in einem einzigen „Schwarzen Megaloch“ enthalten, welches am Ende den gesamten Kosmos verschlingt, einschließlich sich selbst.

Damit dieses Szenario eintritt, muss die Materie in einem kollabierenden All, jenseits der kritischen Dichte liegen. Auf der anderen Seite würde sich die Dunkle Energie, welche die beschleunigte Expansion des Universums verursacht, verringern. Dies würde bedeuten, dass die Schwerkraft in diesem Fall stärker wäre als die Dunkle Energie. Somit würde sich die Ausdehnung des Kosmos vorerst verlangsamen und später zurückbilden. Zur Folge hätte dies ein beschleunigtes Zusammenziehen und daher das Eintreten des Big Crunch.⁴⁸

3.2. „Big Bounce“ – vom Big Crunch zum erneuten Urknall

Das Zusammenkrachen des Universums könnte scheinbar zur Geburt eines neuen Weltraums führen. In diesem Fall würde das All einen unendlichen Zyklus und einen ewigen *Recycling-Prozess* durchlaufen. Sogar Albert Einstein beschäftigte sich mit dem Konzept eines oszillierenden Kosmos. Die Singularität ist ein grenzenloser dichter Zustand der Raumzeit. Ginge es nach der einsteinschen Gravitationstheorie, so durchlief jedes Universum mit einer ausreichenden Menge an Materie einen vorbestimmten Prozess. Es begäme mit einer Singularität und endet mit einer Singularität. Jedoch sieht die ART keinen Mechanismus für den Übergang von einer „Endsingularität“ zu einer „Anfangssingularität“ vor. In diesem Zusammenhang, ein Übergang vom Big Crunch zum erneuten Urknall.⁴⁹

Bereits die Stoiker vertraten die Idee eines *zyklischen Universums*. Da sich diese den Kosmos als riesige Kugel vorstellten, durchlief es Phasen der Ausdehnung und Verdünnung und später Vorgänge der Verdichtung und Kontraktion. Daher ist die reizbare Vorstellung eines zyklischen Weltraums nicht neu.

Aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie entdeckte Alexander Friedmann, dass die Expansion des Kosmos auch gestoppt werden kann. Daher trifft hier das 3. Friedmann-Weltmodell zu und das Universum wäre in diesem Zusammenhang geschlossen. Das Universum würde sich zuerst zu einem Punkt zusammenziehen, später wieder bis zu einem bestimmten Zeitpunkt ausdehnen

⁴⁸ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 84-85.

⁴⁹ Vgl. ebd., S. 81.

und schließlich erneut kontrahieren. Im Falle eines zyklischen Universums entsteht Materie nicht mehr aus dem „Nichts“ und die Problematik der „Anfangssingularität“ wäre somit irrelevant.⁵⁰

Jedoch steht der zyklischen Weltsicht die Asymmetrie und Unordnung zwischen einem neuen, ausdehnenden und einem kollabierenden Weltraum im Weg.⁵¹ Hierbei spielt die Entropie eine ausschlaggebende Rolle. Der Begriff Entropie beschreibt die ungeordnete Bewegung von Energie und Teilchen. Ginge es nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, nimmt in einem geschlossenen System die Intensität der Unordnung immer zu. Wenn die Entropie ansteigt und das Universum kontinuierlich kontrahiert, dann werden mehr ungeordnete Teilchen zusammengepresst. Dies wird jedoch bei einem erneuten „Anfang“, oder genauer gesagt, Urknall, stärkere Spaltungen auslösen. Aus diesem Grund dauert jeder nachfolgende Zyklus länger als sein Vorläufer. Hierfür wurde aber ein alternatives Modell erarbeitet – *die konforme zyklische Kosmologie (Conformal Cyclic Cosmology)*. Dieses Konzept geht davon aus, dass sich in der Nähe einer Singularität die Beschaffenheit der Entropie anders verhält. Daher sei die Entropie an der Grenze zwischen *Endzyklus* und *Anfangszyklus* gering. Jedoch hat man diese Theorie noch nicht eindeutig belegen können.⁵²

3.3. Stand der Forschung

Wie bereits erwähnt, ist der Grund für die Expansion des Universums die Dunkle Energie. Nach dem Standardmodell der Kosmologie, macht die Dunkle Energie fast zwei Drittel unseres Universums aus. Jedoch hinterfragt beispielsweise der französische und südkoreanische Physiker Young-Wook Lee von der Yonsei-Universität die Existenz Dunkler Energie. Nach der klassischen Candlestick-Methode (Standardkerzen) verhalten sich alle Sterne scheinbar unabhängig vom kosmischen Alter. Standardkerzen sind leuchtende Objekte mit bekannter oder einfach berechenbarer absoluter Helligkeit. Laut einer Studie von Lee und seinem Team sind diese Supernovae aufgrund ihrer Alterserscheinungen kein zuverlässiger Maßstab mehr. Ginge es nach seinen Entdeckungen, wären sowohl errechnete Abschätzungen der kosmischen Ausdehnung als auch vorherige Distanzmessungen falsch. Dies würde zu einer deutlichen systematischen Verzerrung der *look-back time (Rückblick-Zeit)* führen. Demnach wäre Dunkle Energie lediglich ein Artefakt, welches auf einer zweifelhaften Annahme beruht. Deswegen bestreitet Lee die

⁵⁰ Vgl. Podbregar, 2019, S. 3.

⁵¹ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 81-82.

⁵² Vgl. ebd., S. 205.

Existenz von Dunkler Energie in unserem Universum - daher auch die beschleunigte Expansion des Weltraums.⁵³

Jedoch traf Lees Annahme auf heftige Kritik. Beispielweise erklärt der theoretische Physiker der John-Hopkins-Universität Marc Kamionkowski in einem Interview mit dem ORF, dass die Existenz der Dunklen Energie unbestreitbar ist. So äußert sich Kamionkowski: *„Die Geschwindigkeit [Geschwindigkeit der Expansion] nimmt immer weiter zu! Irgendetwas im Universum muss für diese Beschleunigung verantwortlich sein. Das ist die Dunkle Energie.“*⁵⁴

Der südkoreanischen Physiker hinterfragt die Rolle der untersuchten Supernovae und behauptet, dass diese keine erwiesene Maßstäbe sind. Dagegen erklärt Komionkowski, dass Lee und sein Team nur wenige Sternexplosionen untersucht haben. Daher haben sie unzählige Supernovae außer Acht gelassen, welche die Existenz Dunkler Energie nachweisen. Darüber hinaus legt Komionkowski alternative Messungen dar, welche die Expansion des Universums belegen. Demzufolge zeigt der theoretische Physiker auf: *„Davon abgesehen beruhen unsere Modelle auch auf vielen anderen Quellen, die kosmische Hintergrundstrahlung, Galaxiencluster und viele andere Messungen zeigen uns: Das Universum dehnt sich immer schneller aus.“*⁵⁵

Jedoch stellt sich heraus, dass die Messungen der Expansionsrate des Universums inkonsistent sind. Man kann die Ausdehnung des Universums mithilfe verschiedener Methoden bestimmen. Die Untersuchung von Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung ist eine Methode. Die lokale Messung von Galaxiengeschwindigkeiten ist eine andere. Beide Vorgehensweisen sind zuverlässig, jedoch sind die Messwerte unterschiedlich. Daher erklärt Kamionkowski: *„Im einen Fall liegt der Wert [Wert des Hubble-Parameters] bei 67 (Kilometer pro Sekunde und Megapersec [sic!], Anm.) im anderen bei 73. Und der Widerspruch scheint auch nicht zu verschwinden, wir nennen dieses Problem „Hubble-Tension“.“*⁵⁶

Diese erwähnte Abweichung wächst seit Jahren. Da neue Studien des frühen und späten Universums immer genauere Ergebnisse liefern, werden Wissenschaftler auf beiden Seiten ratlos

⁵³ Vgl. Kang et al., 2020, S. 1–4.

⁵⁴ Vgl. Czepel, 2020.

⁵⁵ Vgl. Ebd., 2020.

⁵⁶ Ebd., 2020.

zurücklassen. Schließlich ist es möglich, dass beide Seiten den Kosmos nicht eindeutig einschätzen.⁵⁷

Wenn die Dunkle Energie konstant bleibt, wird sich das Universum weiter ausdehnen. Jedoch entdeckten zwei Gruppen von Astronomen im Jahr 1998, dass Supernovae in fernen Galaxien schwächer sind als ursprünglich erwartet. Analyse von Arman Shafieloo, Varun Sahni und Alexei A. Starobinsky, passt die Helligkeit von Sternexplosionen in Entfernungen von bis zu 2 Milliarden Lichtjahren am besten zu Modellen abnehmender Dunkler Energie im gegenwärtigen kosmischen Zeitalter.⁵⁸

Trotz alledem deutet die heutige Datenlage auf eine endlose Ausdehnung hin, weil aktuelle Messungen auf keine Überschreitung der Materie von der kritischen Dichte hinweisen.

⁵⁷ Vgl. Sloman, 2019.

⁵⁸ Vgl. Kayser, 2009.

4 Big Freeze – Hitzetod des Universums

Big Freeze ist englisch für *Das große Erfrieren*. Diese Theorie wird in der Kosmologie oftmals auch *Big Whimper* (*großes Wimmern*) oder *Big Chill* (*große Kühle*) genannt. Die Big Freeze-Theorie beschäftigt sich mit der Frage, wie sich der Tod des Universums ereignet, wenn die Expansion ewig fort dauert und durch die Dunkle Energie noch weiter beschleunigt wird.

4.1 Hypothetischer Ablauf

Wirft man nun wieder einen Ball aus kosmischer Materie mit übermenschlicher Kraft senkrecht nach oben, nähert sich das Objekt einer konstanten Geschwindigkeit, da die Schwerkraft der Erde immer weniger Einfluss hat. Weil das Universum in diesem Fall nicht genügend Materie enthält, kann sich die Expansion nicht mehr zurückbilden. Das Weltall würde sich ewig ausdehnen. Daher trifft hier das 1. Friedmann-Weltmodell zu und das Universum wäre in diesem Zusammenhang offen.⁵⁹

Wenn ein positiver Wert der kosmologische Konstante unseren Kosmos bezwingen würde, versinkt das ganze Universum in Dunkelheit und Leere. Aufgrund der beschleunigten Expansion, die durch die Dunkle Energie ausgelöst wird, werden entfernte Galaxien aus dem Hubble-Radius verschwinden. Insofern wird das Licht der weit entfernten Galaxien, welche uns einen Blick in die Vergangenheit gewähren, bald in Dunkelheit untergehen.⁶⁰

Zunächst werden zahlreiche Galaxiehaufen verschmelzen und Supergalaxien bilden. Mit der Zeit werden Sterne als Supernovae explodieren, einen Teil ihrer Materie verlieren und sich zu Schwarzen Löchern oder Neutronensternen transformieren. Bald werden Galaxien schließlich aus einem gravitativ begrenzten System aus Schwarzen Löchern, Neutronensternen, kalten weißen Zwergen und kalter interstellarer Materie in Form von Planeten, Asteroiden, Meteoriten, Staub usw. bestehen.⁶¹

Einige schwarze Löcher wachsen, indem sie die Restbestände der explodierenden Sterne verschlingen. Weil sich aber das Universum immer weiter ausdehnt und sich Materie daher nicht ausreichend weit nähert, werden sich andere schwarze Löcher nicht länger ausbreiten können. Anschließend werden alle Sterne der Dunkelheit verfallen. Zuletzt beginnt der endgültige Zerfall

⁵⁹ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 88-91

⁶⁰ Vgl. ebd., S. 107

⁶¹ Vgl. Islam, 1977, S. 4.

des ewig expandierenden Universums mit dem Verdampfen dieser schwarzen Löcher. Ursprünglich hat man gedacht, dass schwarze Löcher niemals Masse verlieren können. Jedoch ermittelte *Stephen Hawking* in den 1970er Jahren, dass Quanteneffekte am Horizont von schwarzen Löchern ein Leuchten auslösten. Weil dieses Leuchten Energie und somit Masse entzieht, werden auch supermassive schwarze Löcher mit der Zeit verschwinden müssen. Nicht nur schwarze Löcher, sondern auch Materieteilchen werden mit der Zeit zerfallen und demnach Energie und Materie verlieren. Ein Neutron zum Beispiel zerfällt in ein Positron, ein Elektron und ein Antineutrino.⁶²

Dementsprechend werden alle Neutronensterne und kalte Weißen Zwerge schließlich zu Schwarzen Löchern verschmelzen, die dann durch den Hawking-Prozess zerfallen. Durch Verdunstung verlieren andere Stoffe nach und nach Atome. Man kann also argumentieren, dass der Kosmos bei einer ewigen Expansion ausschließlich aus streuenden Protonen, Elektronen, Neutrinos und Photonen bestehen wird.⁶³ In etwa 10^{33} Jahren würden mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Wasserstoffatome nicht mehr existieren.⁶⁴

Um den Begriff *Hitzetod* zu erklären, ist diesem Szenario die Entropie des Universums eine entscheidend. Im Zusammenhang mit der Big Freeze-Theorie, ist nicht der Tod von Hitze gemeint, sondern der Tod des Universums durch maximale Entropie (Hitze). Wie bereits erklärt, kann in einem geschlossenen System die Intensität der Unordnung mit der Zeit nur zunehmen und nicht sinken. Entropie kann es ohne Temperatur (Wärme) nicht geben. Wenn Sterne ausbrennen, Teilchen zerfallen oder schwarze Löcher verdampfen, verwandelt sich Materie in Entropie und breitet sich im ganzen Universum aus. *Stephen Hawking* und *Jacob Bekenstein* stellten heraus, dass schwarze Löcher ihre eigene Entropie haben und demnach auch Wärme erzeugen können. Das bedeutet, dass schwarze Löcher in diesem Fall vor allem Strahlung und Teilchen emittieren. Somit sind schwarze Löcher nicht wirklich „schwarz“. Man kann also davon ausgehen, dass schwarze Löcher, wenn sie ihren thermischen Tod erreichen, tatsächlich verdampfen und Strahlung zurücklassen, die in ein ausdehnendes Universum emittiert wird, welches immer dunkler und leerer wird.⁶⁵

⁶² Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 108-109

⁶³ Vgl. Islam, 1977, S. 7.

⁶⁴ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 108-109

⁶⁵ Vgl. ebd., S. 112-115

Um zu erklären wieso das Universum im Falle der ewigen Ausdehnung nicht nur leer und dunkel, sondern auch kalt sein wird, hat der Astronom *Willem de Sitter* den sogenannten *de-Sitter-Raum* entwickelt. Sobald das Universum einen Zustand kontinuierlicher exponentieller Expansion erreicht, kann man einen Radius bestimmen, jenseits dessen der Rest des Universums immer verborgen bleibt. Entropie und damit Temperatur werden innerhalb dieses Horizonts existieren. Der einzige Unterschied zum Horizont schwarzer Löcher besteht darin, dass die Hitze nach innen und nicht nach außen gehen wird. Die Temperatur wird daraufhin außerordentlich niedrig sein – geschätzt 10^{-40} Grad über dem absoluten Nullpunkt. Diese Strahlung wird jedoch immer noch die gesamte Entropie des Universums enthalten. Nachdem der Kosmos diesen reinen *de Sitter-Zustand* erreicht hat, wird es ein Universum mit maximaler Entropie geben. Weil aber die Entropie des Universums nicht länger steigen kann, werden kosmische Entwicklungen und Prozesse nicht mehr stattfinden. Denn Energie muss immer von einem Punkt zum anderen fließen, damit etwas Bleibendes existiert. Energie kann nicht zwischen zwei Orten übertragen werden, wenn die Entropie nicht steigen kann. Somit wird diese *kalte Hitze* keinen Nutzen mehr haben und sich als obsolet erweisen. Infolgedessen wird die mechanische Bewegung im Universum ein Ende nehmen. Katie Mack fasst diese Tatsache in ihrem Buch wie folgt zusammen: „*Wärme ist nutzlos. Wärme [Hitze] ist Tod.*“.⁶⁶

4.2 Stand der Forschung

Die Messung des sogenannten Abbremsparameters soll den Unterschied zwischen den durch den Urknall ausgelösten Impulsen und der Anziehungskraft der Gravitation ergeben. In anderen Worten vergleicht man die Geschwindigkeit der Expansion in der Vergangenheit und die derzeitige Ausdehnungsgeschwindigkeit. Es gilt folgendes: Je größer der Abbremsparameter, desto stärker wirkt die Gravitation. Ein niedriger Wert deutet auf eine zwar verlangsamende, aber ewige Expansion hin. Im Jahr 1998 fand man aber heraus, dass der Abbremsparameter einen negativen Wert hat. Demnach verlangsamt sich die Ausdehnung nicht – sie beschleunigt sich.⁶⁷

Der Nobelpreisträger *Adam Riess* hat sich in einem Interview mit der Neuen Zürcher Zeitung zur scheinbar beschleunigten Expansion geäußert. Riess erklärt, wie man vorerst glaubte, dass der Kosmos hauptsächlich aus Materie besteht, die durch ihre Anziehungskraft die Expansion so weit verlangsamt, dass sie schließlich das Universum erneut zum Einsturz bringen kann. Aber man hat

⁶⁶ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 116-118

⁶⁷ Vgl. ebd., S. 88 -91

später festgestellt, dass sich die Ausdehnung des Kosmos nicht verlangsamt, sondern beschleunigt. So äußert sich Riess: *„Daraus folgte unmittelbar, dass die Materie nicht die wichtigste Zutat des Universums ist. Es muss vielmehr etwas geben, was der Anziehungskraft der Materie entgegenwirkt und die Expansion beschleunigt [Dunkle Energie].“*⁶⁸

Jedoch hat es lange gedauert, bis sich die Idee der beschleunigten Expansion bei Kosmologen etabliert hat. Auch bei Adam Riess soll es 5 Jahre gedauert haben. Seine spätere Überzeugung wurde maßgeblich durch Beobachtungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung unterstützt, die mit dem WMAP-Satelliten der NASA und mit dem Planck-Satelliten der Europäischen Weltraumorganisation erhalten wurden. Dahin gehend erklärt der Astrophysiker: *„Diese bestätigten, dass es im Universum tatsächlich mehr Materie und Energie geben muss als die fünf Prozent, die wir sehen können. Diese Messungen passten sehr gut zum Bild der beschleunigten Expansion.“*⁶⁹

Das Standardmodell der Kosmologie wird jedoch immer mehr auf den Prüfstand gestellt. Riess deutet drauf hin, dass das Universum sich schneller auszudehnen scheint, als das Standardmodell vorhersagen würde. Mithilfe des Standardmodells kann man scheinbar kalkulieren, wie schnell sich das Universum ausdehnt. Die Hubble-Konstante ergibt jedoch eine höhere Zahl. Daraufhin erklärt Riess aber, dass die Messungen mittlerweile zuverlässig sind. Daher klärt der Physiker auf: *„Wir arbeiten schon seit vielen Jahren daran, die Hubble-Konstante immer genauer zu messen. Die Messwerte haben sich kaum verändert. Aber die Fehlerbalken sind immer kleiner geworden.“*⁷⁰

Die Hypothese der beschleunigten Expansion basiert auch auf vielen zusätzlichen Quellen. Die kosmische Hintergrundstrahlung, Galaxienhaufen und viele weitere Messungen offenbaren schließlich, dass das Universum immer schneller expandiert.

Das Eintreffen des Big Freeze hängt auch von dem Wert des Parameters w in der Zustandsgleichung der Dunklen Energie ab. Wenn w den Wert -1 hat ist das Universum zum Hitzetod verurteilt. Ein kleinerer Wert würde in das „Zerreißen“ des Universums resultieren - dem „Big-Rip“. Diese Theorie wird im nächsten Kapitel erläutert.

⁶⁸ Vgl. Speicher, 2019.

⁶⁹ Vgl. Ebd., 2019.

⁷⁰ Ebd., 2019.

5 Big Rip – Das große Zerreißen

Big Rip ist englisch für *Das große Zerreißen* und ist die letzte der 3 Theorien für das Ende des Universums. Die Big Rip-Theorie schlägt vor, dass die Expansionsrate des Kosmos von einer wachsenden *Phantom-Energie* getrieben wird und folglich alle Strukturen im Universum zerreißen wird.

5.1 Hypothetischer Ablauf

Auch wenn die Unbeschränktheit der Dunklen Energie plausibel erscheinen mag, hat die Dunkle Energie einen begrenzten Einfluss. Sie bewirkt zwar, dass sich auch die massivsten Galaxiehaufen voneinander entfernen. Jedoch hat sie keinen Effekt auf bereits gravitativ verbundene Strukturen und kann diese nicht trennen. Dafür ist die Dichtekonstanz der Dunklen Energie verantwortlich. Deswegen nennt man die Dunkle Energie auch „kosmologische Konstante“. Allerdings ist nicht die Ausdehnungsgeschwindigkeit konstant, sondern die Dichte der Dunklen Energie. Wie bereits erklärt, wird sich die beschleunigte Expansion demnach nicht verlangsamen. Das bedeutet, dass die Dichte der Dunkler Energie auch nach mehreren Milliarden Jahren unverändert bleiben wird.⁷¹ Hierzu erläutert Katie Mack:

„Der Grund für diese kleine Gnade der Dunklen Energie [...] ist deren Konstanz – jedenfalls dann, wenn sie eine kosmologische Konstante ist. Das sie als solche definierende Merkmal ist dann, dass ihre Dichte in jedem Bereich des Weltraums konstant bleibt, wenn sich dieser ausdehnt.“⁷²

Allerdings kann es sein, dass die Dunkle Energie nicht lediglich eine kosmologische Konstante ist, welche die Expansion des Universums auslöst, sondern etwas Mächtigeres. In diesem Zusammenhang ist der Begriff *Unterdruck* von großer Bedeutung. Ginge es nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist Druck eine alternative Form von Energie und demnach gravitativ anziehend. Weil Druck mit Masse vergleichbar ist, spielt die Raumkrümmung hierbei eine entscheidende Rolle. Es gilt beispielsweise: Je schwerer eine Kugel oder je mehr Innendruck sie hat, desto tiefer ist die Raumzeitkrümmung. Angesichts dessen bezeichnet man einen negativen Wert für den Druck einer Substanz *Unterdruck*.⁷³

⁷¹ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 128-129

⁷² Vgl. Ebd., S. 128

⁷³ ebd., S. 130

Katie Mack erklärt dazu:

„Wenn der Druck einer seltsamen Substanz negativ sein kann, bedeutet das, dass er deren Masse ausgleichen kann, was die Auswirkung auf die Krümmung der Raumzeit betrifft.“⁷⁴

In einer sogenannten *Zustandsgleichung* der Dunklen Energie legt man die Beziehung zwischen dem Druck und der Dichte mit dem Parameter w da. Dieser entspricht dem Druck geteilt durch die Energiedichte. Ist die Dunkle Energie eine kosmologische Konstante dann müssen Dichte und Druck genau entgegengesetzt sein und der Wert von w wäre in diesem Fall -1 . In dieser Zustandsgleichung ist das Gewicht des Unterdrucks größer. Demnach bewirkt die kosmologische Konstante die beschleunigte Expansion des Kosmos. Wenn die kosmologische Konstante nun genau den Wert -1 trägt, hat sie eine Gesamtenergie, welche im Verlauf der Ausdehnung des Universums konstant bleibt. Jedoch trifft das nur zu, wenn w auch genau diesen Wert hat.⁷⁵

In Anbetracht dieser Tatsache kann die Dunkle Energie nur eine kosmologische Konstante sein, wenn w immer den Wert -1 hat. Wäre dies nicht der Fall, ist die Dunkle Energie dynamisch und ihre Auswirkung auf unseren Weltraum würde sich mit der Zeit ändern. Daraufhin versuchten Astronomen den Wert von w zu präzisieren. Erst später stellten sich Robert Caldwell und seine Kollegen die Frage, ob w sogar kleiner sein könnte – zum Beispiel $-1,5$ oder -2 . Caldwell nannte die Dunkle Energie mit w kleiner -1 „*dunkle Phantom-Energie*“. Demzufolge bleibt die Dichte der kosmologischen Konstante im Verlauf der Expansion konstant, während die Dichte der dunklen Phantom-Energie mit der Zeit zunimmt (Abb.5).⁷⁶

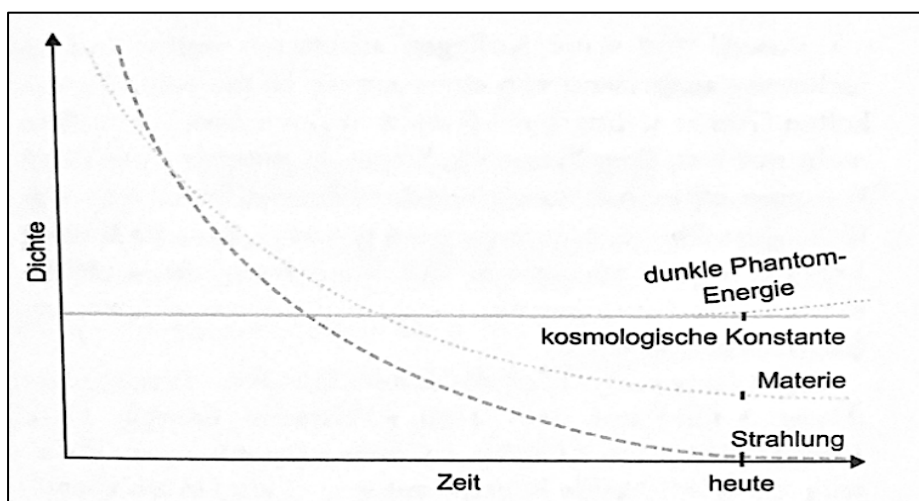


Abbildung 5: Entwicklung der Dunklen Energie qua kosmologischer Konstante und qua dunkler Phantom-Energie

⁷⁴ Vgl. Ebd., S. 130

⁷⁵ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 130-131

⁷⁶ Vgl. ebd., S. 131-133

Ein Wert von w der kleiner als -1 ist, würde daraufhin zu einem kosmischen Zerreißen aller Strukturen des Universums führen. Im Falle des Big Rip erreicht der Kosmos nach etwa 22 Milliarden Jahren sein Ende. Die Galaxienhaufen lösen sich auf und die Galaxien werden aus ihrer Gravitationsbindung herausgerissen. Die Milchstraße und andere Galaxien würden etwa 60 Millionen Jahre vor dem Ende in einzelne Sterne zerfallen, weil die Schwerkraft im Vergleich zur Expansion so schwach wäre, dass sie sie nicht mehr zusammenhalten könnte. Etwa drei Monate vor dem Ende würde sich das Sonnensystem gravitativ lösen. In den letzten Minuten würden Sterne und Planeten verdampfen.⁷⁷

Die elektromagnetischen Kräfte, die Atome und Moleküle zusammenhalten, werden schließlich der kontinuierlichen Ausdehnung nicht mehr entgegenwirken können. Später zerfallen die Moleküle und Atome werden zersplittern. Als nächstes zerreißen auch die Atomkerne mit ihrer ultradichten Substanz. Dann werden die immens dichten Kerne der Schwarzen Löcher zerstört. Letztlich wird selbst das Raumgefüge des Universums auseinandergerissen.⁷⁸

5.2 Stand der Forschung

Im Jahr 2003 veröffentlichten die Physiker Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski und Nevin N. Weinberg den Artikel „*Phantom Energy and Cosmic Doomsday*“. In diesem Artikel wird die dunkle Phantom-Energie zum ersten Mal eingeführt. Sie fanden nicht nur heraus, dass Werte für w kleiner als -1 mit den schon bekannten Daten übereinstimmten, sondern stellten durch eine Berechnung fest, dass die Dunkle Energie den Kosmos auseinanderreißen würde, sollte w auch nur geringfügig kleiner als -1 sein. In Caldwell's Modell wird eine aus Phantom-Energie bestehende Dunkle Energie, mit einer Hubblekonstante $H_0 = 70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$, einem Dichteparameter $\Omega_m = 0.3$ und mit $w = -1.5$ angenommen.⁷⁹

Wenn w vorausgesetzt konstant ist, liefern die WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)-Ergebnisse einen w -Parameter von $-1,20 \pm 0,14$. Der von WMAP-Daten unabhängige Wert $w = -1,12 \pm 0,12$ kann aus von Adam Riess unternommenen Messungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop an Supernovae unter der Annahme gefunden werden, dass w konstant ist. Die von WMAP und Riess beobachteten w -Werte stimmen mit einem Modell überein, welche

⁷⁷ Vgl. Mack/Hagestedt, 2021, S. 134-135

⁷⁸ Vgl. ebd., S. 136

⁷⁹ Vgl. Caldwell et al., 2003.

die Dunkle Energie mit der kosmologischen Konstante Λ oder $w = -1$ verknüpft. Somit wird die Wahrscheinlichkeit der Phantom-Energiethorie verringert. Die Ergebnisse zeigen jedoch noch, dass w im Laufe der Zeit sehr wenig zu Schwanken scheint. Dies impliziert, dass man von einem Modell der Dunklen Energie in Form der kosmologischen Konstante ausgehen kann.⁸⁰

⁸⁰ Vgl. Ulmschneider, 2013, S. 39–40.

6 Resümee

Das endgültige Schicksal des Universums ist immer noch ein Thema vieler Spekulationen und Studien unter Astronomen und Physikern. Diese haben sich lange gefragt, ob das Universum irgendwann wieder zusammenbrechen und mit einem Big Crunch enden, sich für immer ausdehnen und zunehmend kalt und leer, oder zerreißen werden wird.

Die aktuellen verfügbaren Belege deuten darauf hin, dass unser Universum irgendwo in der Nähe der unmerklich dünnen Grenze zwischen *Phantomenergie* und der *kosmologischen Konstante* steht. Die wahre Natur der dunklen Energie wird durch zukünftige Forschung und die neuen WMAP-Daten bestimmt werden. In der Zwischenzeit bin ich gespannt, mehr über dieses denkbare neue kosmische Schicksal, dem Big Rip, zu erfahren, welches sich von der ewigen Abkühlung oder dem erneuten Zusammenkrachen unterscheidet.

Dies sind nur 3 der vielen Theorien über die Zukunft des Universums, und bis jetzt gibt es nicht genügend Belege, um definitiv zu sagen, welche davon, die Richtige ist. Das Schicksal des Universums ist eine der größten Fragen in der Wissenschaft, und Forscher untersuchen es weiterhin mit einer Vielzahl von Werkzeugen und Techniken.

7 Literaturverzeichnis

de Boer, K.S.: Physik des Monats, Astrophysik: Dunkle Materie. Weshalb? Wieviel? Wo?, in: astro.uni-bonn.de, 10.04.2000, [online] <https://astro.uni-bonn.de/%7Edeboer/pdm/pdmdmtxt.html> [abgerufen am 27.12.2022].

Böhringer, Hans: Das kosmologische Prinzip, in: weltderphysik.de, 23.10.2013, [online] <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmologie/das-kosmologische-prinzip/> [abgerufen am 17.09.2022].

Brandt, Bastian: Das Standardmodell der Kosmologie Die Friedmann-Gleichung, in: Seminar: Theorie der Teilchen und Felder, o. D., [online] https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/Seminare/teilchen/teilchen_ss05/Friedmann.pdf.

Caldwell, Robert R./Marc Kamionkowski/Nevin N. Weinberg: Phantom Energy: Dark Energy with $w < -1$ Causes a Cosmic Doomsday, in: Physical Review Letters, American Physical Society (APS), Bd. 91, Nr. 7, 13.08.2003, [online] [doi:10.1103/physrevlett.91.071301](https://doi.org/10.1103/physrevlett.91.071301).

Coble, Kim/Kevin Mcllin/Lynn Cominsky: 17.3: The Friedmann Equation and the Fate of the Universe, in: Physics LibreTexts, 20.08.2021, [online] [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Big_Ideas_in_Cosmology_\(Coble_et_al.\)/17%3ADark_Energy_and_the_Fate_of_the_Universe/17.03%3A_The_Friedmann_Equation_and_the_Fate_of_the_Universe](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Big_Ideas_in_Cosmology_(Coble_et_al.)/17%3ADark_Energy_and_the_Fate_of_the_Universe/17.03%3A_The_Friedmann_Equation_and_the_Fate_of_the_Universe) [abgerufen am 24.09.2022].

Comparat, Johan/Peter Predehl: Mit eROSITA und eBOSS auf der Jagd nach Dunkler Materie und Energie, in: Physik in unserer Zeit, Wiley, Bd. 53, Nr. 2, 03.2022, [online] [doi:10.1002/piuz.202101628](https://doi.org/10.1002/piuz.202101628), S. 64–71.

Czepel, Robert: Risse im Fundament, in: science.ORF.at, 10.02.2020, [online] <https://science.orf.at/v2/stories/2998426/> [abgerufen am 07.01.2023].

Dierse, Ulrich: Untersuchung über das Begriffspaar Theorie & Praxis bei Hans Blumenbergs philosophischen Reflexionen der 'kopernikanischen Wende', 2003, [Homepage.ruhr-uni-bochum.de] https://homepage.ruhr-uni-bochum.de/andreas.plaas/Plaasi/Texte_files/blumenberg.pdf.

Dunkle Materie – Chemie-Schule: o. D., [online] https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Dunkle_Materie [abgerufen am 27.12.2022].

Ellis, Georg/Henk van Elst: Cosmological models (Cargèse lectures 1998), in: Theoretical and Observational Cosmology, Kulwer, 02.09.2008, S. 1–116.

Harvey, Ailsa: Heliocentrism: Definition, origin and model, in: Space.com, 08.04.2022, [online] <https://www.space.com/heliocentrism> [abgerufen am 11.02.2023].

Hollmann, Helia/Joachim Lindig: Das Standardmodell der Kosmologie, 18.02.1997, [Saalburg.aei.mpg.de] <https://saalburg.aei.mpg.de/wp-content/uploads/sites/25/2017/03/wipf.pdf>.

Hurcha, John P.: The Hubble Constant, 2008, [online] <https://lweb.cfa.harvard.edu/%7Edfabricant/huchra/hubble/> [abgerufen am 26.01.2023].

Islam, Jamal N.: Possible Ultimate Fate of the Universe, in: Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, Bd. 18, 01.03.1977, [online] <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1977QJRAS..18....3I>.

Junglas, Peter: Standard-Modelle der Kosmologie, in: peter-junglas.de, 09.07.2007, [online] <http://www.peter-junglas.de/pers/astro/DunkleMaterie/html/text8.html> [abgerufen am 27.12.2022].

Kang, Yijung/Young-Wook Lee/Young-Lo Kim/Chul Chung/Chang Hee Ree: Early-type Host Galaxies of Type Ia Supernovae. II. Evidence for Luminosity Evolution in Supernova Cosmology, in: The Astrophysical Journal, American Astronomical Society, Bd. 889, Nr. 1, 20.01.2020, [online] doi:10.3847/1538-4357/ab5afc, S. 8.

Kayser, Rainer: Supernovae: Nimmt die Dunkle Energie ab?, in: astronews.com, 14.04.2009, [online] <https://www.astronews.com/news/artikel/2009/04/0904-016.shtml> [abgerufen am 09.01.2023].

Kayser, Rainer Jens Kube: Nobelpreis für Physik 2011 geht an Perlmutter, Schmidt und Riess, 04.10.2011a, [online] <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2011/nobelpreis-fuer-physik-2011-geht-an-perlmutter-schmidt-und-riess/> [abgerufen am 27.12.2022].

Kayser, Rainer Jens Kube: Nobelpreis für Physik 2011 geht an Perlmutter, Schmidt und Riess, 04.10.2011b, [online]

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2011/nobelpreis-fuer-physik-2011-geht-an-perlmutter-schmidt-und-riess/> [abgerufen am 27.12.2022].

Lambda - Die Konstante, welche nicht sterben will: o. D., [online]

http://meaulnes.legler.org/Artikel/Kosmologische_Konstante.html (abgerufen am 02.01.2023).

Lichtenberg, Georg Christoph: Nikolaus Kopernikus, 2. Aufl., Differenz-Verlag, 2021, [Www.differenz-verlag.de].

Mack, Katie/Jens Hagedstedt: Das Ende von allem*: * astrophysikalisch betrachtet | New York Times Bestseller - Astronomie verstehen, 3. Aufl., Piper, 01.09.2021.

Michael, Markus: Die Robertson-Walker-Metrik und die Friedmann-Gleichung, 02.11.2011, [Uni.muenster.de] <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/fileadmin/lehre/teilchen/ws1112/FRWMetrikFriedmannGleichung.pdf>.

Müller, Andreas: Friedmann-Weltmodell, in: Lexikon der Astronomie, o. D.a, [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/friedmann-weltmodell/136> [abgerufen am 15.09.2022].

Müller, Andreas: Kosmologisches Prinzip, in: Lexikon der Astronomie, o. D.b, [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/kosmologisches-prinzip/242> [abgerufen am 18.09.2022].

Müller, Andreas: Lambda-Universum, in: Lexikon der Astronomie, o. D.c, [online] <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/lambda-universum/253> [abgerufen am 02.01.2023].

Overbye, Dennis: Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?, in: The New York Times, 20.02.2017a, [online] <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html> [abgerufen am 26.01.2023].

Podbregar, Nadja: Der Widersacher: Fred Hoyle und sein Steady-State-Modell, in: scinexx | Das Wissensmagazin, 05.11.2018, [online] <https://www.scinexx.de/dossierartikel/der-widersacher/> [abgerufen am 18.09.2022].

Podbregar, Nadja: Übergang statt Uranfang?, in: scinexx | Das Wissensmagazin, 07.05.2019, [online] <https://www.scinexx.de/dossierartikel/uebergang-statt-uranfang/> [abgerufen am 06.01.2023].

Schlaepfer, Hansjörg: In Search of the Dark Matter in the Universe in the Universe, in: Spatium, Nr. 7, 05.2001, [online] http://www.issibern.ch/PDF-Files/Spatium_7.pdf.

Schröder, Carl: Klassische Friedmann-Modelle des Universums, in: Seminar zu Gewöhnliche Differentialgleichungen WiSe 2006/07, 2006, [Fachbereich Mathematik der Universität Hamburg] https://www.math.uni-hamburg.de/home/gunesch/Vorlesung/WiSe2006-7/Sem_ODE/Materialien/Schroeder/gdgl-seminar.pdf.

Sloman, Leila: Hubble Tension Headache: Clashing Measurements Make the Universe's Expansion a Lingering Mystery, in: Scientific American, 29.07.2019, [online] <https://www.scientificamerican.com/article/hubble-tension-headache-clashing-measurements-make-the-universes-expansion-a-lingering-mystery/> [abgerufen am 09.01.2023].

Speicher, Christian: Kosmologie: Der Nobelpreisträger Adam Riess im Interview, in: Neue Zürcher Zeitung, 06.07.2019, [online] <https://www.nzz.ch/wissenschaft/kosmologie-der-nobelpreistraeger-adam-riess-im-interview-ld.1492134?reduced=true> [abgerufen am 04.02.2023].

Spergel, D. N./R. Bean/O. Dore/M. R.olta/C. L. Bennett/J. Dunkley/G. Hinshaw/N. Jarosik/E. Komatsu/L. Page/H. V. Peiris/L. Verde/M. Halpern/R. S. Hill/A. Kogut/M. Limon/S. S. Meyer/N. Odegard/G. S. Tucker/J. L. Weiland/E. Wollack/E. L. Wright: Three-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Implications for Cosmology, in: The Astrophysical Journal Supplement Series, American Astronomical Society, Bd. 170, Nr. 2, 06.2007, [online] doi:10.1086/513700, S. 377–408.

Teuber, Anja: Friedmann-Robertson-Walker-Metrik und Friedmann-Gleichung, 29.10.2008, [Uni-muenster.de] <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/typo3/fileadmin/lehre/teilchen/ws0809/FRWMetrikFriedmannGleichung.pdf>.

The SAO Encyclopedia of Astronomy: Hubble Flow | COSMOS, in: astronomy.swin.edu.au, o. D., [online] <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/h/hubble+flow> [abgerufen am 26.01.2023].

Tyson, Neil De Grasse/Steven Soter: Cosmic Horizons: Astronomy at the Cutting Edge (American Museum of Natural History Book), Illustrated, The New Press, 01.05.2001.

Ulmschneider, Peter: Vom Urknall zum modernen Menschen: Die Entwicklung der Welt in zehn Schritten, 2014. Aufl., Springer Spektrum, 24.09.2013.

Urknall, Weltall und das Leben: Friedmann-Gleichung (Herleitung) • Expandierendes Universum • Kosmologie • vAzS (70) | Josef M. Gaßner, Gaßner (Hrsg.), , 02.09.2021, [YouTube] <https://www.youtube.com/watch?v=kNMz1jHaXiw> [abgerufen am 01.11.2022].

Urknall, Weltall und das Leben: Zweite Friedmann-Gleichung bestimmt Schicksal des Kosmos. Welche Kraft übt Expansion aus? | vAzS (72), 07.10.2021b, [YouTube] <https://www.youtube.com/watch?v=027cvKB3was> [abgerufen am 20.01.2023].

Van Den Bergh, Sidney: The Curious Case of Lemaître's Equation No. 24, in: Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Royal Astronomical Society of Canada, Bd. 105, Nr. 4, 01.08.2011, [online] <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011JRASC.105..151V/abstract>, S. 151.

Wright, Alison: Nobel Prize 2011: Perlmutter, Schmidt & Riess, in: Nature Physics, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 7, Nr. 11, 04.10.2011, [online] doi:10.1038/nphys2131, S. 833–833.

Ziegler, Siegfried Klaschka Und Wiebke: Universum: Urknall, in: Planet Wissen, 01.07.2021, [online] <https://www.planet-wissen.de/natur/weltall/universum/pwiederurknall100.html> [abgerufen am 25.01.2023].

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kromer, Markus: Markus, Kromer: Weltmodelle I: Friedmann-Modell des Universums, in: Vortrag im Rahmen des Kompaktseminars WiSe 2003/04 - Universität Tübingen, 22.03.2004, S.11.

Abbildung 2: Junglas, Peter: Standard-Modelle der Kosmologie, in: peter.junglas.de, 09.07.2007, [online] <http://www.peter-junglas.de/pers/astro/DunkleMaterie/html/text8.html>

Abbildung 3: Wikipedia-Autoren: Dunkle Materie.png – Wikipedia, 2007, [online] https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Dunkle_Materie.png

Abbildung 4: de Boer, K.S.: Physik des Monats, Astrophysik: Dunkle Materie. Weshalb? Wieviel? Wo?, in: astro.uni-bonn.de, 10.04.2000, [online] <https://astro.uni-bonn.de/%7Edeboer/pdm/pdmdmtxt.html>

Abbildung 5: Mack, Katie/Jens Hagedstedt: Das Ende von allem*: * astrophysikalisch betrachtet | New York Times Bestseller - Astronomie verstehen, 3. Aufl., Piper, 01.09.2021.

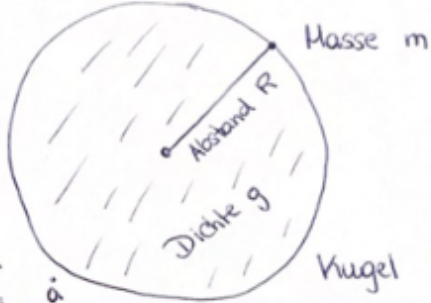
9 Anhang

Zwischenschritte – Herleitung der 1. Friedmann-Lemaitre-DGL:

Ich nehme einen beliebigen Punkt, der für jeden Punkt im Universum steht. In einem Abstand R betrachtet man einen massenreichen Testkörper um diesen Punkt herum. Diesen Abstand R kann man im weiteren Verlauf mit dem Skalenfaktor $a(t)$ belegen:

$$\begin{aligned} R &= a(t) \cdot R_0 \\ \dot{R} &= \dot{a}(t) \cdot R_0 \end{aligned}$$

Hubbee - Gesetz:
 $H_0 \cdot r \quad \dot{R} = H \cdot R$
 $\hookrightarrow H = \frac{\dot{a}}{a}$



Daraufhin beobachtet man wie sich diese Galaxie verhält. Dafür betrachtet man die Energieerhaltung:

$$\frac{m}{2} \cdot \dot{R}^2$$

Weil die Gravitation anziehend wirkt, hat man nun ein negatives Vorzeichen. Also subtrahiere die kinetische Energie E_{kin} vom Gravitationspotential $\frac{GM \cdot m}{R}$. So erhalte ich die Gesamtenergie E_{ges} :

$$\frac{m}{2} \cdot \dot{R}^2 - G \frac{Mm}{R} = E_{ges}$$

Hierbei kürzt sich darüber hinaus das m weg, weil ich auf beiden Seiten $\frac{2}{m}$ multipliziert habe.

$$\frac{m}{2} \cdot \dot{R}^2 - \frac{GMm}{R} = E_{ges} \quad \left| \frac{2}{m} \right.$$

Für \dot{R}^2 setze ich $\dot{a}(t) \cdot R_0$ ein und für R $a(t) \cdot R_0$:

$$\frac{M}{2} \dot{R}^2 - G \frac{2HM}{R} = \frac{2E_{\text{ges}}}{m}$$

$$\rightarrow \dot{R}^2 - G \frac{2M}{R} = \frac{2E_{\text{ges}}}{m} \quad \left[\begin{array}{l} U \text{ ist das Volumen der Kugel mal} \\ \text{der Dichte } \rho: M = \frac{4\pi R^3}{3} \cdot \rho \end{array} \right]$$

$$\rightarrow (\dot{a}(t) \cdot R_0)^2 - G \frac{2 \cdot 4\pi R^3}{R^3} \cdot \rho = \frac{2E_{\text{ges}}}{m}$$

$$\rightarrow (\dot{a}(t) \cdot R_0)^2 - G \frac{8\pi a(t)^3 R_0^3}{a(t) R_0^3} \cdot \rho = \frac{2E_{\text{ges}}}{m} \quad \Big| R_0^2$$

$$\rightarrow \dot{a}(t)^2 \cancel{R_0^2} - G \frac{8\pi a(t)^2 R_0^2}{3} \cdot \rho = \frac{2E_{\text{ges}}}{m \cdot R_0^2}$$

$$\rightarrow \dot{a}(t)^2 - \frac{8\pi G}{3} \cdot a(t)^2 \cdot \rho = \text{const}$$

Um mit einer Lösung übereinzustimmen, die eine allgemein relativistische Berechnung liefert, habe ich aus der Konstante eine andere Konstante rausgezogen – in diesem Fall c^2 .

Dann dividiere ich das $a(t)^2$ durch das $\dot{a}(t)^2$:

$$\dot{a}(t)^2 - \frac{8\pi G}{3} \rho \cdot a(t)^2 = \text{const} \quad \Big| : a(t)^2 \Big| a(t)$$

$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \cdot a(t)^2 = \text{const}$$

Weil das $a(t)^2$ keine Konstante ist, ziehe ich das $a(t)^2$ auf die andere Seite und bekomme ich k für die Krümmung mal das rausgezogene c^2 durch $a(t)^2$ und somit die 1. Friedmann-Lemaître-DGL:

$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k \cdot c^2}{a(t)^2}$$

$$= \text{1. Friedmann - Lemaître - DGL}$$

Zwischenschritte – Herleitung der 2. Friedmann-Lemaitre-DGL:

Zunächst leite ich die 1. Friedmann-Gleichung nach der Zeit ab. Weil das Kc^2 null ist, fällt es hier weg:

$$\dot{a}(t)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \cdot a(t)^2$$

Hier leite ich mit der Produktregel ab – äußere Ableitung mal innere Ableitung:

$$2\dot{a}\ddot{a} = \frac{8\pi G}{3} (\dot{\rho}a^2 + \rho 2a\dot{a})$$

Um die Dichte ρa^2 auszudrücken, greife ich zum 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$dE = -pdV \quad [V \text{ beschreibt das Volumen: } R_0^3 \cdot a^3]$$

Um den folgenden Term darzulegen, ziehe ich die SRT und Formel $E = m \cdot c^2$ heran. Weil ich hier das Volumen berücksichtige, bekomme ich:

$$E = \rho c^2 \cdot V$$
$$E = \rho c^2 \cdot R_0^3 a^3$$

Nun differenziere ich E und V nach der Zeit – hier leite ich wieder mit der Produktregel ab und ziehe die Konstanten R_0^3 und c^2 raus:

$$c^2 \cdot R_0^3 \frac{d}{dt} (\rho a^3) = -p \frac{d}{dt} (a^3) \cdot R_0^3$$
$$c^2 \cancel{R_0^3} \frac{d}{dt} (\rho a^3) = -p \frac{d}{dt} (a^3) \cdot \cancel{R_0^3} \quad | : c^2$$
$$\rightarrow \dot{\rho} a^3 + \rho 3a^2 \dot{a} = -\frac{p}{c^2} \cdot 3a^2 \dot{a}$$
$$\rightarrow \dot{\rho} a^3 + \rho 3a^2 \dot{a} = -\frac{p}{c^2} \cdot 3a^2 \dot{a} \quad | - \rho \cdot 3a^2 \dot{a} \quad | \cdot 3\rho$$
$$\rightarrow \dot{\rho} a^2 = -\dot{a} \left(3\rho + \frac{3p}{c^2} \right) \quad * [\text{Das } c^2 \text{ wurde rausgezogen}]$$

Jetzt setze ich das $\dot{\rho} a^2$ in die obige Formel ein und erhalte die 2. Friedmann-Lemaitre-DGL:

$$2\dot{a}\ddot{a} = \frac{8\pi G}{3} \left[-\dot{a} \left(3\rho + 3\frac{p}{c^2} - 2\rho \right) \right] \quad | : 2 \quad | : -a$$
$$\rightarrow \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8/2\pi G}{3} \underbrace{\left(3\rho + 3\frac{p}{c^2} - 2\rho \right)}_{\ominus}$$
$$\rightarrow \frac{\ddot{a}}{a} = \frac{4\pi G}{3} \left(\frac{3p}{c^2} + \rho \right) = \text{2. Friedmann-Lemaitre-DGL}$$

Selbstständigkeitserklärung

„Ich erkläre, dass ich die vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.“

Graz, am 03. März 2023