



GRESELIUS GYMNASIUM

JAHRGANG 12

SEMINARFACH ASTRONOMIE

HERR RIEMER

Expansion des Universums

-

Wie beeinflusst dunkle Energie die Expansion des
Universums und was steckt dahinter?

GERO WASMUTH

Abgabetermin: 26. Februar 2024

25. Februar 2024, Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Vermessung des Universums	4
2.1	Leuchtkraft	4
2.2	Rotverschiebung	4
2.2.1	Das Licht	5
2.2.2	Dopplereffekt	5
3	Die Vorgeschichte	6
3.1	Die Entdeckung der Expansion	6
3.2	Die Expansion beschleunigt	7
4	Probleme und Theorien	8
4.1	Ein Blick zur Relativitätstheorie	8
4.1.1	Krümmung	8
4.1.2	Urknall-Modell	10
4.1.3	Voraussetzungen	11
4.2	Vakuumenergie	12
4.3	Weitere Möglichkeiten	12
5	Aktuelle Forschungsprojekte	13
5.1	The Dark Energy Survey	13
5.1.1	Das Projekt	13
5.1.2	Der Gravitationslinseneffekt	14
5.1.3	Das Ziel	14
5.2	Dark Energy Spectroscopic Instrument	15
5.2.1	Das Instrument zum Vermessen	15
5.2.2	Das Ziel	15
6	Résumé	16
7	Anhang	17
7.1	Quellenverzeichnis	17
7.2	Abbildungsverzeichnis	21

1 Einleitung

1917 beschrieb Willem de Sitter das Universum mit Hilfe der von Albert Einstein aufgestellten Relativitätstheorie. Dabei kamen er und Albert Einstein zu dem Schluss, dass das Universum konstant sei. Damit Einsteins Feldgleichung dem entgegen kommt, fügte dieser die kosmologische Konstante ein, welche als Hilfhypothese diente und später von ihm als seine größte “Eselei“ beschrieben wurde. Nach heutigem Forschungsstand ist das Universum nicht statisch oder konstant, sondern es expandiert. [vgl. I5]

Die Expansion des Universums, wie wir sie heute kennen und wie diese durch Dunkle Energie beeinflusst wird, ist das Leitthema dieser Facharbeit.

Für einen tiefen Einblick in die Gedanken und Theorien der Physiker und Mathematiker wie Albert Einstein, Alexander Feldmann oder auch Edwin Hubble ist der recht knapp bemessenen Umfang einer Facharbeit des 12. Jahrgangs eines Gymnasiums etwas einschränkend.

Von mir werden zu Beginn die Methoden zur Vermessung des Universums und dessen Expansion näher erläutert. Dabei gehe ich auch auf Theorien dahinter ein und erkläre, worum es sich bei der Dunklen Energie handelt. Die Wissenschaft steht allerdings bei diesem Thema erst am Anfang ihrer Forschung. Deshalb werde ich, nach einer Erklärung von dem Thema Dunkle Energie und wie man auf diese Theorie gekommen ist, mich später mehr darauf konzentrieren, was anstelle oder andernfalls hinter dieser Dunklen Energie die Ursache für eine Beschleunigung der Expansion stecken könnte.

Abschließend wird von mir ein Teil des aktuellen Forschungsstandes anhand des ‘The Dark Energy Survey’¹ Projektes und des ‘Dark Energy Spectroscopic Instrument’² Projektes zusammengefasst und mögliche Forschungsergebnisse der Zukunft angerissen.

Da eigene Experimente in diesem Bereich als Schüler recht schwer, bis gar unmöglich, umzusetzen sind, wird diese Facharbeit, soweit möglich, auf die Wiedergabe und Zusammenfassung von seriösen Quellen zurückgreifen, um einen relativ guten Überblick über das Thema zu verschaffen.

Quellen- und Literaturverweise werden in Form einer Buchstabe-Zahlen-Kombinationen angegeben, wobei der Buchstabe auf den Typ³ und die Zahl auf die Quellennummer im jeweiligen Literaturverzeichnis verweist. Zudem wer-

¹mehr dazu unter <https://www.darkenergysurvey.org/>.

²kurz ‘DESI’ - mehr dazu ‘<https://www.desi.lbl.gov/>’.

³I => für digitale Internetquellen; L => für analoge Literatur, welche allerdings auch teilweise digital abrufbar ist.

den intertextuelle Referenzen, die sich innerhalb dieser Facharbeit bewegen, gesondert in Klammern dahinter gekennzeichnet. Lediglich Seiten- und/oder Zeilenangaben werden zusammen mit dem Verweis im Text beziehungsweise am Ende von Absätzen¹ vor dem letzten Satzende angegeben. Bei nötigem Erklärungsbedarf oder möglichen Falschinterpretationen werden Fußnoten angewandt, um für Klarheit beim Lesen der Arbeit zu sorgen.

Beim Schreiben und Bearbeiten selbst traten einige Komplikationen beim Einarbeiten und Umsetzen der Ideen/Vorgaben in L^AT_EX auf.

¹als Absatz kann auch 'seit letzter Quellenangabe' gelten.

2 Vermessung des Universums

Wenn im Universum Entfernungen angegeben werden, geschieht dies oft in Lichtjahren, welche bekanntermaßen eine Entfernung darstellen, die das Licht mit einer Geschwindigkeit von rund $300\,000 \frac{km}{s}$ in einem Jahr zurücklegt. [vgl. L3, Seite 198] Um die Expansion des Universums zu vermessen und zu beweisen gibt es mehrere Möglichkeiten. Dazu zählen unter anderem die Messung der Leuchtkraft und die Messung der Rotverschiebung.

2.1 Leuchtkraft

Eine der Varianten ist die, bei der die Leuchtkraft, welche von einem Stern oder einer Supernova ausgeht, verwendet wird, um die Entfernung zu messen. Eine oft als Standardkerze bezeichnete Lichtquelle wird dabei genommen, um die wahrgenommene Helligkeit¹ mit der tatsächlichen Leuchtkraft zu vergleichen. Für eine Lichtquelle, welche in jede Richtung elektromagnetische Wellen mit einem Raumwinkel von 4π abstrahlt, gilt die Gleichung $L = 4\pi * R^2 * f$. Dabei steht in der Formel das R für die Entfernung². Bei der Messung der Expansion wurde unter anderem der Supernovotyp 1A als Lichtquelle verwendet. [vgl. I5] Bei dieser speziellen Klasse von Supernovae handelt es sich um eine thermonukleare Explosion von Sternüberresten. Diese haben eine ähnliche Masse wie unsere Sonne, obwohl sie gerade etwa so groß sind wie die Erde. Sie sind demnach sehr stark komprimiert. [vgl. L3, Seite 202]

Beim Vermessen verwendet man möglichst den gleichen Typ einer Supernova, weil dessen "freigesetzte Energiemenge [...] immer ungefähr gleich" [vgl. I21] ist.

2.2 Rotverschiebung

Neben der Entfernung kann man auch die Bewegung, genauer gesagt die Geschwindigkeit, von Himmelskörpern messen und errechnen. Hierfür macht man sich gewisse Eigenschaften des Lichts zunutze.

¹das Licht, das beim Beobachter ankommt.

²und das f steht in der Formel für die Energieflussdichte.

2.2.1 Das Licht

Licht selbst besteht aus Elementarteilchen, welche Photonen genannt werden. Diese Teilchen haben besondere Eigenschaften. Sie verhalten sich nicht nur wie Teilchen, sondern haben auch gleichzeitig die Eigenschaften von Wellen. Das Licht wird demzufolge mit einem Welle-Teilchen-Dualismus¹ beschrieben. Wenn wir allerdings umgangssprachlich von Licht sprechen, geht es meistens nur um den relativ kleinen, für den Menschen sichtbaren, Bereich des elektromagnetischen Spektrums (siehe auch Abbildung 2.1). Dabei haben Wellen mit einer niedrigeren Frequenz einen rötlichen, und Wellen mit einer höheren Frequenz, einen bläulichen Farbton. [vgl. I8]

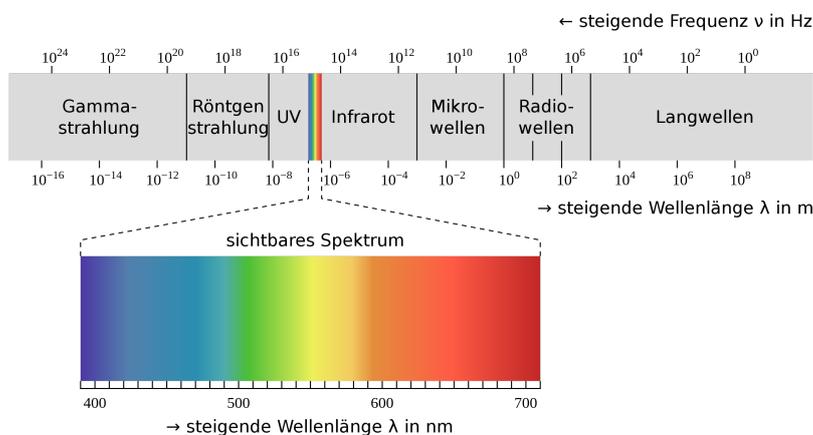


Abbildung 2.1: Das elektromagnetische Spektrum

Quelle: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:EM-Spektrum.svg> [Zuletzt aufgerufen am 01.02.2024]

2.2.2 Dopplereffekt

Dopplereffekt im Allgemeinen

Um die Bewegung von den Himmelskörpern zu vermessen, bedient man sich unter anderem des sogenannten Dopplereffekts². Bei diesem Effekt handelt es sich um das Phänomen, dass die Periodenzeit³ von Wellen verkürzt oder verlängert wird, je nachdem, ob sich der Abstand zwischen Wellenquelle und Beobachter vergrößert oder verkleinert. Vergrößert sich der Abstand zwischen den Objekten, so werden die Wellen länger gezogen, was für eine größere Wellenlänge⁴ sorgt. Verkleinert sich der Abstand allerdings, so werden die Wellen zusammengestaucht, welches eine kürzere Frequenz zur Folge hat. [vgl. I7]

¹“Erkenntnis der Quantenphysik, wonach den Objekten der Quantenphysik gleichermaßen die Eigenschaften von klassischen Wellen wie die von klassischen Teilchen zugeschrieben werden“, [I22].

²Bekannt durch und benannt nach Christian Doppler [vgl. I18].

³die benötigte Zeit für eine Periode (=> sinken und steigen, bis die Welle wieder auf Ausgangsposition/-richtung ist).

⁴ähnlich mit einer Verlängerung der Zeit, in der eine Periode abläuft = niedrigere Frequenz.

Dopplereffekt beim Licht

Das Licht verhält sich, wie bereits beschrieben, wie Wellen. Somit zeigt hier der Dopplereffekt ebenfalls seine Wirkung. Dabei verändert sich gemäß des Effekts die Frequenz der elektromagnetischen Wellen. Wenn sich beispielsweise der Abstand zwischen einer Supernova des Typs 1A und der Erde vergrößert - sie bewegen sich also voneinander weg - verschiebt sich das abgestrahlte sichtbare Licht in den rötlichen Bereich des Spektrums, weil die Wellen länger werden (Prinzip der Rotverschiebung). Verkleinert sich dieser - die Supernova und Erde bewegen sich also aufeinander zu - verschiebt sich das sichtbare Licht in den bläulichen Bereich, weil die Wellen kürzer werden. [vgl. I14]

3 Die Vorgeschichte

3.1 Die Entdeckung der Expansion

1929 kam Edwin P. Hubble nach vermessen von 24 Galaxien mit Hilfe der Rotverschiebung¹ zu dem Schluss, dass sich alle Galaxien von uns entfernen, egal in welche Richtung wir schauen. E. Hubble trug, durch Messung der Leuchtkraft und durch Messung der Entfernung mit der Methode der Parallaxe², die Entfernungen der Himmelskörper in Relation mit der durch die Rotverschiebung berechneten Geschwindigkeit in ein Diagramm gegeneinander auf. Hubble erkannte und folgerte daraus, dass sich alles von allem entferne, da egal in welche Richtung man sowohl die Entfernung als auch die Geschwindigkeit messen und berechnen würde, man immer zu einem gleichen Ergebnis käme. Mit Hilfe seiner Messdaten und des Diagramms (siehe Abbildung 3.1) kam er dabei erstmals auf einen Proportionalitätsfaktor von ca. 500 km/sek/Mpc . [vgl. I5] Ursprünglich ging man davon aus,

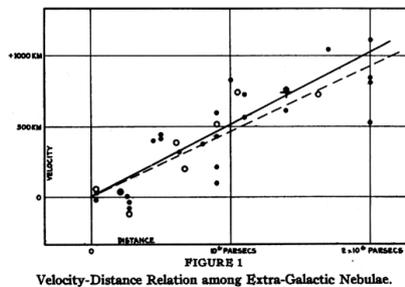


Abbildung 3.1: Relation zwischen gemessener Geschwindigkeit und Entfernungen der Galaxien

Die volle Linie stellt dabei Hubbles Messdaten dar.

Quelle: [I5]

¹bereits erläutert siehe Abschnitt 2.2.

²eine weitere Methode zur Entfernungsmessung, bei der wie beim menschlichen Sehvermögen Abstände ermittelt werden, indem von zwei Punkten aus ein dritter angepeilt wird, um dessen Entfernung zu berechnen [vgl. I4].

dass das Universum konstant sei. Albert Einstein hat sich dieser These angeschlossen und fügte in seiner Formel zur Beschreibung des Universums die so genannte kosmologische Konstante ein. Denn seine ursprüngliche Formel, auch genannt Feldgleichung, $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ beschrieb das Universum so, dass es entweder schrumpfen oder sich ausdehnen müsse. Er fügte in die Gleichung die kosmologische Konstante Λ so ein, dass das Universum von seiner neuen Formel $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$ als konstantes beschrieben wurde. [vgl. I6] Diese von Einstein eingeführte kosmologische Konstante entpuppte sich, wie bereits beschrieben, als Irrtum. Deswegen entfernte Einstein diese kurzerhand, wie wir heute Wissen voreilig, wieder. Einstein selbst sprach hinterher über diese “ad hoc“ eingeführten Konstante von der “größten Eselei“ seines Lebens“. [L2, Seite 53]

3.2 Die Expansion beschleunigt

Die Wissenschaft ging bisher davon aus, dass sich das Universum seit dem Urknall ausdehnt. Man dachte, dass durch die Gravitation das Universum immer langsamer expandieren müsse, da die Materie sich gegenseitig anzieht und die Expansion irgendwann sogar umkehre. Das Ende des Universums stand für die Physiker fest. Es würde irgendwann durch die Gravitation der Materie in sich selbst zusammenfallen und zu einem Punkt verdichten. [vgl. I6]

1998 haben zwei Forschergruppen die Expansion genauer untersucht. Sie wollten berechnen, ob sich die Expansion bereits verlangsamt und ob dies überhaupt schon messbar sei. Wenn die Expansion sich in einem messbaren Rahmen verlangsamen würde, wollten die Forscher berechnen, mit was für einem Faktor diese abbremsen würde. Es stellte sich allerdings heraus, dass das Universum ganz entgegengesetzt ihrer Erwartungen scheinbar beschleunigt expandieren würde. Zuerst waren sich die Forscher sicher, dass es sich um Fehler in ihren Messungen oder Berechnungen handle. Dies konnten sie jedoch nach mehrfachen Ansätzen ausschließen. [vgl. I11]

Für diese Forschungsergebnisse wurde zum ersten Mal in der Geschichte ein Nobelpreis für etwas bis heute nahezu völlig Unbekanntes vergeben. Daher stammt der Name “Dunkle Energie“. “Dunkel“ steht hier nämlich nicht für eine Farbe oder Helligkeit, sondern schlicht und einfach dafür, dass wir uns noch vollends im Dunkeln bei der Erforschung dieses Phänomens bewegen. [vgl. I10]

4 Probleme und Theorien

Wenn man sich mit der Beschleunigung auseinander setzt, taucht sehr schnell die Frage nach dem 'Warum?' und dem 'Was?' auf. Folgernd stellte man mehrere Theorien auf, um die Fragen zu beantworten. Um diese Theorien nach Richtigkeit zu untersuchen, muss man sich erst einmal die Voraussetzungen für die Beschleunigung der Expansion klar machen, das Problem isolieren und dann dieses bestmöglich lösen.

4.1 Ein Blick zur Relativitätstheorie

Die wohl bekannteste Theorie und Formel ist die Relativitätstheorie von Albert Einstein. Diese sagt bekanntlich aus, dass $E = mc^2$. Demnach müsste jegliche Energie eine Masse besitzen. Und alles, was eine Masse hat, wird von Gravitation beeinflusst. Jedoch scheinen die Eigenschaften der Dunklen Energie genau entgegengesetzt der Gravitation und Relativitätstheorie zu wirken. [vgl. I2] Einstein hat, wie bereits zuvor erläutert, im Zuge seiner Relativitätstheorie in seine Feldgleichung die kosmologische Konstante eingefügt [vgl. 3.1]. Der Grundgedanke der Dunklen Energie basiert auf dieser Feldgleichung. Dabei stellt man sich vor, dass man ein Feld durch das ganze Universum legt. Dieses Feld würde eine Energie bzw. Kraft auf das Universum wirken. Von dieser Kraft von diesem Feld würde das Universum auseinander gezogen und expandiert werden. [vgl. I10]

4.1.1 Krümmung

Einsteins Theorie läuft unter anderem darauf hinaus, dass der Raum gekrümmt werden kann. Auf den ersten Blick hat die Krümmung eines Raumes, vielmehr die des Universums, jedoch nichts mit der Dunklen Energie zu tun. Mit der Krümmung kann man allerdings das Verhalten des Universums relativ gut beschreiben. Dank Einsteins Relativitätstheorie wissen wir, dass Raum und Zeit keine starren Eigenschaften unseres Universums sind, sondern durch Materie gekrümmt werden können. Die Krümmung wirkt sich somit auch auf die Expansion aus, da die Gravitation der Masse dieser entgegen wirkt. [vgl. I3] Dabei kommt es zu drei Fällen:

Positive Krümmung

Wenn man sich das Universum so vorstellt, dass im Universum nur noch viel Materie alleine vorhanden sei, sodass die Masse bzw. die Dichte des Universums (fortan nur noch als $\rho_{\text{universum}}$) kleiner ist als die kritische Dichte (fortan nur noch als ρ_{kritisch}), dann wäre der Raum positiv gekrümmt (siehe Formel 4.1). Irgendwann würde es aufgrund der Gravitation der Materie/Masse wieder zusammenfallen können. [vgl. I10] Als Folge daraus würden zwei Linien, die an irgend einem Punkt parallel zueinander wären, sich irgendwann zwangsläufig schneiden. Demnach wäre auch die Innenwinkelsumme eines Dreiecks in diesem Universum größer als 180° (siehe Formel 4.2). [vgl. I3]

Wenn

$$\rho_{\text{universum}} > \rho_{\text{kritisch}} \quad (4.1)$$

dann

$$\alpha + \beta + \gamma > 180^\circ \quad (4.2)$$

Keine Krümmung

Wenn man sich nun stattdessen vorstellt, dass im Universum exakt genau so viel Materie, also Masse, vorhanden sei, sodass die Expansion ausgebremst, aber nicht umgekehrt werde. Nur dann wäre der Raum nicht gekrümmt. Dabei gilt $\rho_{\text{universum}}$ exakt gleich ρ_{kritisch} ist (siehe Formel 4.3). Als Folgerung daraus würden, wenn man sich wieder zwei Linien vorstellt, die an irgendeinem Punkt parallel zueinander wären, diese auch an jedem anderen Punkt parallel zueinander sein und bleiben. Demnach wäre auch die Innenwinkelsumme eines Dreiecks in diesem Universum genau gleich 180° (siehe Formel 4.4). [vgl. I3]

Wenn

$$\rho_{\text{universum}} = \rho_{\text{kritisch}} \quad (4.3)$$

dann

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (4.4)$$

Negative Krümmung

Und wenn man sich als dritte Möglichkeit vorstellt, dass im Universum zu wenig oder gar keine Materie bzw. Masse mehr vorhanden sei, dann wäre der Raum negativ gekrümmt. $\rho_{\text{universum}}$ wäre also kleiner als ρ_{kritisch} (siehe Formel 4.5). Es würde schlagartig auseinander fliegen, weil nichts die Ausdeh-

nung verhindern würde. [vgl. I10] Der Krümmung nach würden wieder zwei Linien, die an irgend einem Punkt parallel zueinander wären, diesmal sich zwangsläufig immer weiter voneinander entfernen. Demnach wäre auch die Innenwinkelsumme eines Dreiecks in diesem Universum kleiner als 180° (siehe Formel 4.6). [vgl. I3]

Wenn

$$\rho_{\text{universum}} < \rho_{\text{kritisch}} \quad (4.5)$$

dann

$$\alpha + \beta + \gamma < 180^\circ \quad (4.6)$$

4.1.2 Urknall-Modell

Nach den oben genannten Vorstellungen wird gefolgert, dass das Universum negativ gekrümmt sei. Denn es expandiert bekanntlich inflationär. Durch das Urknall-Modell (siehe Zeitablauf Abbildung 4.1) kommt man allerdings auf einen anderen Schluss.

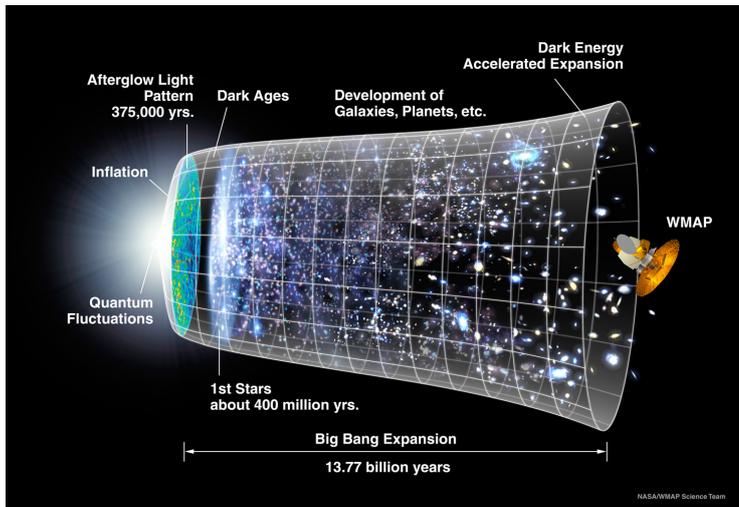


Abbildung 4.1: Timeline of the Universe

Eine Visualisierung des Universums seit seiner Geburt vor etwa 13.77 Milliarden Jahren. Ganz links sind die frühesten Momente zu sehen, die wir beobachten können, als eine Zeit der "Inflation" einen starken Schub an exponentiellen Wachstum für das Universum.

Quelle: [117]

Die Inflation

Im Zeitablauf des Urknall-Modells existiert ein Bereich, bei dem das Universum, wenige Nanosekunden nach seiner 'Geburt', schlagartig um 22 Größen-

ordnungen¹ expandierte (siehe Abbildung 4.1 ganz links). [vgl. I10] Der Raum expandierte so stark, dass, wenn man vom Mittelpunkt aus den Rand des Universums für diesen Zeitraum beobachtet hätte, dessen Oberfläche² wie bei einem Luftballon, der sich ausdehnt, immer mehr einer geraden Fläche entspräche. Aufgrund dessen ist die Krümmung des Universums somit nahezu exakt gleich 0. [vgl. I12]

Es gilt also für $\lim_{V_{universum} \rightarrow \infty}$, dass die Krümmung $\kappa_{rand} \rightarrow 0$ geht.

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Im Kosmos existiert eine sogenannte kosmische Hintergrundstrahlung. Vorausgesetzt und entdeckt wurde diese Strahlung von Geroge Gamov “als eine Folge des endlichen Anfangs unseres Universums“ [I9]. Vorausgesetzt, man hat zuvor die Störungen unserer Galaxie, Milchstraße und des Sonnensystems, welche durch z.B. Bewegung verursacht werden, vom Ergebnis abgezogen, bewegt sich diese Strahlung im Mikrowellenbereich. Diese kommt gemessen aus jeder Richtung des Universums mit annähernd der selben Wellenlängenverteilung bei uns an. [vgl. I9]

4.1.3 Voraussetzungen

Damit die Geometrie flach ist, genauer die Krümmung $\kappa_{universum} = 0$ ist, wie es aus der zuvor behandelten Theorie³ hervorgehen sollte, muss das Universum gewisse Anforderungen erfüllen. Dabei muss nämlich die Dichte $\rho_{universum}$ exakt gleich der kritischen Dichte $\rho_{kritisch}$ entsprechen. [vgl. I10] Ansonsten wäre die Geometrie, wie bereits bei der Krümmung⁴ beschrieben, nicht flach, sondern eher negativ gekrümmt.

Um dies zu überprüfen, kommt die kosmische Hintergrundstrahlung⁵ ins Spiel. Bei dieser Strahlung können in einem Wärmebild gewisse Temperaturfluktuationen von wenigen Millikelvin⁶ festgestellt werden. Diese geben Hinweise auf die Verteilung der Materie und der generellen Zusammensetzung des Raumes im frühen Universum. Dabei kommt man auf eine Zusammensetzung, bei der das Universum aus zusammengerechnet etwa 31.5% Materie und Strahlung bestehe. [vgl. I9]

Wenn man nun diese Energiedichte mit der kritischen Energiedichte $\rho_{kritisch}$ vergleicht, fehlen etwa 70% an 'irgendetwas'. Diese 70% sind interessanterwei-

¹ e^{50} sind 22 Größenordnungen.

²die Oberfläche des Randes des Universums -> man kann sich diese wie die einer Kugel vorstellen.

³siehe 'Unterunterabschnitt 4.1.2 - Die Inflation'.

⁴siehe 'Unterabschnitt 4.1.1 - Krümmung'.

⁵siehe 'Unterunterabschnitt 4.1.2 - Die kosmische Hintergrundstrahlung'.

⁶die Strahlung trägt durch die weite Distanz eine etwa ähnliche Leistung, wie ein Temperaturstrahler, der $\sim 2.7k$ ausstrahlt [vgl. I9].

se genau die Menge an Dunkler Energie, die benötigt werden würde, um die Beschleunigung der Expansion des Universums zu erklären. Wenn man sich daraufhin klar macht, was denn überhaupt für ein, dieser Energie entsprechenden, negativer Druck, ein Zug am Universum, benötigt werde, damit die Expansion des Universums beschleunigt, kommt man auf eine sehr kleine Zahl. Es ergibt sich etwa $\sim 10^{-29} \frac{g}{cm^3}$. [vgl. I10]

4.2 Vakuumenergie

Man kann daraufhin folgern, dass der Raum nicht gekrümmt, sondern flach ist. Und die Expansion beschleunigt. Dies sind die zwei 'Taten'¹, die die Dunkle Energie verursacht und die wir auch beobachten können. Damit dies so stattfindet, muss zudem der negative Druck $\approx 10^{-29} \frac{g}{cm^3}$ sein. [vgl. I10]

Wir brauchen demnach eine Theorie, die jeden cm^3 im Universum beschreibt. Diese wird durch die Quantenfeldtheorien² erfüllt. Ein Bestandteil von diesen Theorien ist die Vakuumenergie. [vgl. L1] Vakuumenergie, auch Nullpunktenergie genannt, ist die Energie, die in einem völlig leeren Raum zufällig vorhanden sein kann. Die Quantenmechanik besagt, dass in einem definierten Bereich/Raum zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit immer Paare aus Teilchen und Antiteilchen entstehen können, die sich daraufhin gegenseitig auslöschen. Diese Fluktuation im leeren Raum, im Vakuum, nennt man Vakuumfluktuation und stellt die Vakuumenergie dar. [vgl. I1]

Wenn man die Energie im Vakuum für die inflationäre Expansion verantwortlich machen will, braucht man $\sim 10^{-29} \frac{g}{cm^3}$. Die Vakuumenergie liefert uns aber eine Massenenergie-Dichte von $\approx 10^{91} \frac{g}{cm^3}$. Ein Unterschied von 120 Größenordnungen. Aufgrund dieses großen Unterschieds scheidet die Vakuumenergie als Verursacher der beschleunigten Expansion vollkommen aus. [vgl. L1]

4.3 Weitere Möglichkeiten

Anstelle der Vakuumenergie gibt es noch weitere mögliche Theorien als Antwort auf die Frage nach dem 'Was?', welche aus der Dunklen Energie hervorgehen könnten.

¹'Taten' wie in einem Gerichtsfall -> siehe 'Abschnitt 5.1 - The Dark Energy Survey'.

²diese beschreiben unter anderem die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilchen.

Neue Teilchen

Eine Möglichkeit, die Frage zu beantworten, wären neue Teilchen, die eine beschleunigende Wirkung auf die Expansion haben. Ein Problem ist jedoch, dass neue Teilchen keine Massen haben dürften. Wenn diese Teilchen eine Masse hätten, dann müssten diese nicht die Expansion beschleunigen, sondern eher verlangsamen¹. Also fallen diese ebenfalls weg. [vgl. I10]

Zeitabhängiges Feld

Was möglich wäre, ist ein zeitabhängiges Feld, welches sich bei der Geburt des Universums gebildet hat und nur noch schwach im Hintergrund seine Wirkung zeigt. [vgl. I10] Dafür spräche, dass im Verlauf der Zeit immer wieder neue Felder entdeckt worden sind. Zuletzt wurde beispielsweise das Higgsfeld² erst spekuliert und dann bewiesen. [vgl. I20]

Gravitationstheorie

Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Relativitätstheorie im Bezug zur Gravitation entweder komplett falsch oder nur noch nicht ganz ausgereift ist. Die Gravitation im Universum führt dementsprechend auf irgendeine Art und Weise dazu, dass die Expansion immer weiter beschleunigt. [vgl. L1]

5 Aktuelle Forschungsprojekte

5.1 The Dark Energy Survey

Ein aktuelles Projekt, welches sich mit möglichen Ansätzen für die dunkle Energie auseinandersetzt, ist das 'Dark Energy Survey'³ Projekt.

5.1.1 Das Projekt

In diesem Projekt erforscht eine internationale Gruppe von etwa 400 Forschern von etwa 25 Institutionen aus den USA, Spanien, dem Vereinigten Königreich, Brasilien, Deutschland, Schweiz und Australien die Dunkle Energie. Das Projekt baute und untersucht das Universum mit einem vier Meter Teleskop auf dem M. Blanco in Chile. An diesem ist eine sehr empfindliche Kamera mit

¹siehe 'Unterunterabschnitt 4.1.1 - Positive Krümmung'.

²die Stärke der Kopplung zwischen Higgs-Bosonen, dem Higgsfeld, und Teilchen definiert die Masse dieser Teilchen [I15].

³kurz auch 'DES' - mehr dazu '<https://www.darkenergysurvey.org>'.

einem 570 Megapixel großen Sensor montiert. Mit diesem konnte etwa 7 Milliarden Jahre in die Vergangenheit zurück geblickt werden. In der 'Year 3 Results: Constraints on extensions to Λ CDM with weak lensing and galaxy clustering' Veröffentlichung haben sie in 345 Beobachtungsnächten etwa ein Achtel des Himmels untersucht. Dabei wurden etwa 226 Millionen Galaxien im elektromagnetischen Wellenbereich zwischen ca. 400-1080nm beobachtet. Konzentriert wurde sich dabei auf die Verteilung der Galaxien im Universum in der Zeit von bis vor 7 Milliarden Jahren. [vgl. L1]

5.1.2 Der Gravitationslinseneffekt

Besonders half in der angesprochenen Veröffentlichung der Gravitationslinseneffekt zur Untersuchung der Materieverteilung im Universum. Bei diesem Effekt handelt es sich um durch Masse erzeugte Raumkrümmung abgelenktes Licht, wodurch man im Universum sogar Objekte, die eigentlich hinter anderen Objekten versteckt sein sollten, betrachten kann. Dies ist möglich, da das Licht um das Objekt im Vordergrund von der Gravitation herum gebogen wird. [I10]

5.1.3 Das Ziel

Ziel des Ganzen war, mögliche Theorien entweder zu bestätigen oder zu widerlegen. Dabei wurden folgende Theorien genauer untersucht:

- Zeitabhängige Gravitationsgleichungen
- Alternative Raumgeometrie (siehe Unterabschnitt 4.1.1 - Krümmung)
- Zusätzliche relativistische Freiheitsgrade
- Neue Teilchen (siehe Unterabschnitt 4.3 - Neue Teilchen) - Bsp. Sterile Neutrinos
- Modifikation der Gravitationsphysik
- Veränderliche Wachstumsrate kosmischer Strukturen¹

Diese Möglichkeiten kann man mit einer Kosmologie vergleichen, die darauf beruht, dass eine kosmologische Konstante mit einem Wert von $\approx 10^{-29} \frac{g}{cm^3}$ existiert. Nachdem all diese Möglichkeiten untersucht wurden, kam das Forscher Team zu dem Schluss, dass die sechs untersuchten Theorien keine Alternative zur kosmologische Konstante bieten würden, welche laut ihnen am besten als Erklärung zu den Beobachtungen passe. [vgl. L1]

¹hierbei geht es darum, wie die Galaxien bzw. Zwerggalaxien gewachsen sind.

5.2 Dark Energy Spectroscopic Instrument

Ein weiteres ähnliches Projekt ist das 'Dark Energy Spectroscopic Instrument'¹. Mit diesem möchte man, anders als bei 'The Dark Energy Survey', bei welchem man die Dunkle Energie selbst untersucht, die Auswirkungen der Dunklen Energie auf die Expansion des Universums genauer untersuchen. Ziel ist es, von mehreren 10 Millionen Galaxien und Quasaren eine dreidimensionale Karte zu konstruieren, die nahezu 11 Milliarden Lichtjahre groß sein soll. Um das Projekt zu realisieren, wurde das 4m große Mayall Teleskop beim Kitt-Peak² Nationalobservatorium verwendet. [vgl. I13]

5.2.1 Das Instrument zum Vermessen

Auf diesem Teleskop wurde das von dem Projekt entwickelte Instrument zum Vermessen des Universums im Jahr 2018 montiert. Dieses besteht aus mehreren Linsen, welche aus Quarzglas bestehen. Diese bündeln das ankommende Licht aus einem 3° weitem Sichtfeld auf eine Brennplatte. Die Brennplatte besteht aus 5 000 kleinen Roboter-Positionierern, welche innerhalb von 3 Minuten neu konfiguriert werden können, um neue Galaxien zu beobachten. An diesen sind über optische Glasfaserkabel 10 breit-band Spektrographen angeschlossen, welche einen Wellenbereich von 360nm bis 980nm mit einer Auflösung³ von 2 000 bis 5 000 abdecken. Sämtliche Steuerung und Datenübertragungen werden durch das 'Instrument Control System' gesteuert. [vgl. I13]

5.2.2 Das Ziel

Ebenso wie 'The Dark Energy Survey' will DESI die Vergangenheit des Universums im Bezug zur Dunklen Energie beobachten. Dabei wollen sie die Vergangenheit des Universums über 11 Milliarden Lichtjahre beobachten. DESI selbst misst dabei die Position und Geschwindigkeiten von ausgewählten, ca. 40 Millionen, Galaxien. Die Auswahl trat dabei durch eine Untersuchung von Bildern des Kosmos, die im Bereich von DESI tiefere Einblicke boten, noch bevor das Projekt startet. [vgl. I13]

¹kurz 'DESI' - mehr dazu '<https://www.desi.lbl.gov>'.

²der Kitt Peak ist ein 2097m hoher Berg im US-Bundesstaat Arizona [vgl. I19].

³"Die spektrale Auflösung ist in Kombination mit der geometrischen und der temporalen Auflösung ein wesentliches Kennzeichen von Fernerkundungssensoren und entscheidend für die Nutzbarkeit der Daten der verschiedenen Sensoren", [I16].

6 Résumé

Bis vor 30 Jahren war die Expansion des Universums eigentlich ein altes, längst beendetes Kapitel der kosmologischen Physik. Inzwischen lässt sich befürchten, dass die kosmologische Physik, die Innenarchitektur des Universums, von uns möglicherweise niemals ergründet werden kann. Alleine eine kosmologische Konstante zu entdecken, von dessen Erklärung jegliche Spur fehlt, versetzt uns in einen Zustand, in dem, anders als zuvor angenommen, man nicht mehr das Universum mit der herkömmlichen Physik beschreiben kann. Wir müssen uns also zugestehen, dass wir nicht möglicherweise in der Kosmologie, wie auch in der Teilchenphysik, in einem erkenntnistheoretischen Stillstand gelandet sind. [vgl. I10]

Ob die kosmologische Konstante am plausibelsten als Erklärung dient oder nicht, ist erst einmal nicht wichtig. Dass allerdings ein Phänomen, die Beschleunigung der Expansion, existiert, von dem wir bis heute nur Ansatzweise eine Erklärung erahnen können, erschüttert die Physik und ihr bisheriges Verständnis des Kosmos. Und dass obwohl man sich zuvor sicher war, dass das Thema längst abgeschlossen sei.

Am besten lässt sich das Thema zum Schluss mit einem Zitat von Harald Lesch beschreiben: “Ihr glaubt, ihr hättet das Universum verstanden? Ha, Ha, Ha“, [I10, Minute 21:08].

7 Anhang

7.1 Quellenverzeichnis

Literaturquellen

- [L1] T. M. C. Abbott et al, “Dark Energy Survey Year 3 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing.”, *Physical Review D*, 105, no. 2, ISSN 2470-0029, doi:10.1103/physrevd.105.023520, URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.105.023520>, [Zuletzt aufgerufen am: 14.02.2024].
- [L2] Helmut Hetznecker, *Expansionsgeschichte des Universums*, Springer-Verlag Berlin, 2007, ISBN 978-3-8274-1848-7.
- [L3] Matthias Steinmetz, “Die Vermessung des Universums.”, In “Grötschel, Martin/Knobloch, Eberhard/Schiffers, Juliane/Woisnitza, Mimmi/Ziegler, Günter M.(Hg.): Vision als Aufgabe: das Leibniz-Universum im 21. Jahrhundert.”, pp. 197–210. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, ISBN 978-3-939818-67-0, Type: EDOC, URL: https://edoc.bbaw.de/files/2631/14_Jahresthema2015_16_Steinmetz_edoc.pdf, [Zuletzt aufgerufen am: 28.01.2024].

Internetquellen

- [I1] 100SekundenPhysik, “Das Mysterium des leeren Raums.”, 29.09.2019,
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=C7NuqgvgwUo>, [Zuletzt
aufgerufen am: 17.02.2024].
- [I2] 100SekundenPhysik, “Dunkle Energie.”, 28.05.2017,
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kreUyJDCcNY>, [Zuletzt
aufgerufen am: 12.02.2024].
- [I3] 100SekundenPhysik, “Dunkle Energie.”, 03.03.2022,
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=BJroxik9kBg>, [Zuletzt
aufgerufen am: 13.02.2024].
- [I4] Klaas S. de Boer, “Entfernungsbestimmungen im Universum – Teil 1: bis
zu den Grenzen unserer Milchstraße.”, 06.01.2010,
URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/astromische-massstaebe/entfernungen-teil1/>, [Zuletzt aufgerufen am:
07.02.2024].
- [I5] Klaas S. de Boer, “Wie konnte Hubble zeigen, dass das Universum expan-
diert?”, 01.03.2019,
URL: <https://astro.uni-bonn.de/~deboer/hubble/hubble.html>,
[Zuletzt aufgerufen am: 18.01.2024].
- [I6] Cedric Engels, “Dunkle Energie.”, 14.09.2016,
URL: https://www.youtube.com/watch?v=SsGQLPqqM_w, [Zuletzt
aufgerufen am: 09.02.2024].
- [I7] Philip Häusser, “Doppler-Effekt mit Saxofon [...]”, 14.09.2016, Doppler
Effekt beschrieben mit Hilfe eines Saxofons,
URL: https://youtu.be/gdvkK_P-9Ig, [Zuletzt aufgerufen am:
25.01.2024].
- [I8] Kurzgesagt in a Nutshell, “What is light?”, 15.10.2015,
URL: <https://youtu.be/IXxZRZxafEQ>, [Zuletzt aufgerufen am:
31.01.2024].
- [I9] LEIFiPhysik, “Kosmische Hintergrundstrahlung.”, o.D.,
URL: <https://www.leifiphysik.de/astronomie/kosmologie/grundwissen/kosmische-hintergrundstrahlung>, [Zuletzt aufgerufen am:
16.02.2024].
- [I10] Harald Lesch, “Dunkle Energie: was steckt dahinter? Krise der Kosmo-
logie Teil 1 [...]”, 18.01.2023,

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0ZGIX7N-n7Y>, [Zuletzt aufgerufen am: 12.02.2024].

[I11] Dirk Lorenzen, “Was stimmt nicht mit der Expansion des Universums?“, 06.06.2021,

URL: <https://www.deutschlandfunk.de/hubble-konstante-was-stimmt-nicht-mit-der-expansion-des-100.html>, [Zuletzt aufgerufen am: 09.02.2024].

[I12] Jan Lublinski, “Anzeichen für ein flaches Universum.“, 23.03.2014,

URL: <https://www.deutschlandfunk.de/kosmologie-anzeichen-fuer-ein-flaches-universum-100.html>, [Zuletzt aufgerufen am: 13.02.2024].

[I13] U.S. Department of Energy Office of Science, “Dark Energy Spectroscopic Instrument.“, o.D.,

URL: <https://www.desi.lbl.gov/>, [Zuletzt aufgerufen am: 22.02.2024].

[I14] Spektrum, “Doppler-Effekt.“, 1998,

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/doppler-effekt/3275>, [Zuletzt aufgerufen am: 08.02.2024].

[I15] Spektrum, “Higgs-Teilchen.“, 2000,

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/higgs-teilchen/176>, [Zuletzt aufgerufen am: 24.02.2024].

[I16] Spektrum, “spektrale Auflösung.“, 2000,

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/spektrale-aufloesung/15292>, [Zuletzt aufgerufen am: 24.02.2024].

[I17] NASA / WMAP Science Team, “Timeline Of The Universe.“, o.D.,

URL: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>, [Zuletzt aufgerufen am: 15.02.2024].

[I18] Wikipedia, “Christian Doppler.“, 01.01.2024,

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler, [Zuletzt aufgerufen am: 08.02.2024].

[I19] Wikipedia, “Kitt Peak.“, 01.01.2023,

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Kitt_Peak, [Zuletzt aufgerufen am: 24.02.2024].

[I20] Wikipedia, “Quantenfeldtheorie.“, 11.11.2023,

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenfeldtheorie>, [Zuletzt aufgerufen am: 17.02.2024].

- [I21] Wikipedia, “Supernova.”, 17.12.2023,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>, [Zuletzt aufgerufen
am: 08.02.2024].
- [I22] Wikipedia, “Welle-Teilchen-Dualismus.”, 01.09.2023,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Welle-Teilchen-Dualismus>,
[Zuletzt aufgerufen am: 31.01.2024].

7.2 Abbildungsverzeichnis

2.1	Das elektromagnetische Spektrum	5
3.1	Relation zwischen gemessener Geschwindigkeit und Entfernun- gen der Galaxien	6
4.1	Timeline of the Universe	10

7.3 Erklärungen

7.3.1 Selbstständigkeitserklärung

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

Bramsche, den 25. Februar 2024

Unterschrift des Schülers

7.3.2 Veröffentlichungserklärung

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

Bramsche, den 25. Februar 2024

Unterschrift des Schülers