

Die Hubble-Konstante

Facharbeit zum Seminarfach Astronomie

Julian Hafner

Fachlehrer: Florian Riemer

Jahrgang 12

Abgabedatum: 11.03.2020, Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Edwin Hubble.....	2
2.1. Allgemeines.....	2
2.2. Werke.....	2
2.3. Hubble-Weltraumteleskop.....	3
3. Begriffserklärung.....	3
3.1. Skalenfaktor.....	4
3.2. Spektrallinien.....	4
3.3. Rotverschiebung.....	4
4. Die Hubble-Konstante.....	6
4.1. Definition.....	7
4.2. Das Hubble-Diagramm.....	8
4.3. Die Hubble-Zeit.....	9
5. Kosmologische Entfernungsbestimmung.....	10
6. Astronomische Messung der Rotverschiebung.....	11
7. Das Hubble-Lemaître-Gesetz.....	12
8. Revolution des Weltbilds.....	13
9. Fazit.....	14
10. Quellenverzeichnis.....	15
11. Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit	17
12. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung	17

1. Einleitung

Fast jeder hat sich schon einmal damit auseinander gesetzt oder sich zumindest gefragt wie lange das Universum existiert, was es vor unserer Zeit gab, oder welche Weite das Universum umfasst.

Die Urknalltheorie geht davon aus, dass das Universum in einem bestimmten Augenblick, dem Urknall, aus einer Singularität heraus entstanden ist und sich seit dem Zeitpunkt ausdehnt. Viele Astronomen haben sich diesbezüglich mit der Frage beschäftigt, wie alt das Universum ist. Außerdem stellte sich die Frage wie sich das Universum seit dem Urknall entwickelt hat und ob man die Entwicklung in irgendeiner Weise erklären, oder sogar berechnen kann. Einige berühmte Astronomen, Physiker und Mathematiker wie zum Beispiel Edwin Hubble, Alexander Friedmann und Georges Lemaître haben sich mit der Materie der Expansion des Weltalls beschäftigt.

In dieser Facharbeit zum Seminarfach Astronomie soll ein verständlicher, umfassender und theoretischer Überblick zur „Hubble-Konstante“ geschaffen werden. Als Einstieg der Facharbeit wird der Namensgeber der Hubble-Konstante thematisiert. Des Weiteren werden für die Facharbeit wichtige Begrifflichkeiten erklärt und näher erläutert. Dieses soll dem Zwecke dienen, darauffolgende Abschnitte, in denen wissenschaftliche Zusammenhänge fachgerecht erklärt werden, leichter nachvollziehen zu können. Das Thema der Facharbeit wird im Folgenden komprimiert und nicht zu sehr in die Tiefe gehend erklärt um einen Einstieg in die detailliertere Erklärung zu erleichtern. Dann wird die ausführliche Definition erläutert, in der die zuvor erklärten Begriffe Grundlage des Textverständnisses sind. Im darauffolgenden Abschnitt werden zwei für die Hubble-Konstante wichtige Parameter näher definiert und es wird veranschaulicht in welcher Vorgehensweise die Werte gemessen oder berechnet werden. Im letzten Abschnitt wird darauf eingegangen, weshalb

das Gesetz einen anderen Namen zugewiesen bekommt und weshalb das kosmologische Standardmodell Hubbles immer mehr Fragen in der Wissenschaft aufwirft. Den Schluss bildet ein Fazit, welches die Kernaussagen der Erkenntnisse zusammenfasst. Außerdem wird auf offene gebliebene Fragen hingewiesen.

2. Edwin Hubble

2.1. Allgemeines

Edwin Powell Hubble hat in seinem Leben als US-amerikanischer Astronom gearbeitet. Er lebte vom 20. November 1889 bis zum 28. September 1953. Hauptsächlich befasste Hubble sich mit Spiralgalaxien und der Expansion des Weltalls. Außerdem gab er dem Hubble-Weltraumteleskop seinen Namen. Edwin Hubble hat Physik und Astronomie in Chicago studiert und bekam den Bachelor of Science im Jahre 1910. Daraufhin studierte er Rechtswissenschaften in Oxford, kam aber nach 3 Jahren wieder in die USA zurück, um dort Astronomie und Mathematik zu studieren. In seinem Leben hatte er die Himmelforschung revolutioniert und sorgte damit für einen neuen Blick auf unser Weltall¹.

2.2. Werke

1923 hat Hubble nachgewiesen, dass der Andromedanebel (M31) weit entfernt von unserer Galaxis ist. In „Cepheids in Spiral Nebulae“ legte er seine Beobachtungen und Rechnungen der American Astronomical Society vor. Weiter fand Hubble den gleichen linearen Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und der Verteilung extragalaktischer Nebel heraus, welchen zwei Jahre zuvor schon Lemaître entdeckte. Daraufhin entdeckten Hubble und Humason, dass der Anteil der rotverschobenen Spektren deutlich höher ist, als der der blauverschobenen. Aus diesen Informationen hat Edwin Hubble über den interpretierten Zusammenhang von

¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble

Frequenzverschiebung und Dopplereffekt herausgefunden, dass sich ein sehr großer Teil der Galaxien von uns entfernen. Somit konnte er den proportionalen Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung der Galaxien aufstellen, woraus er außerdem die scheinbare Geschwindigkeit schließen konnte. Diese scheinbare Geschwindigkeit bedeutet, dass sich Galaxien schneller fortbewegen umso weiter sie entfernt sind. Nach Edwin Hubble wird dann auch die Größe, welche die Expansion beschreibt, benannt. Sie lautet Hubble-Konstante und mit ihr kann zum Beispiel das ungefähre Alter des Weltraums berechnet werden².

2.3. Hubble-Weltraumteleskop

Mit dem Hubble-Weltraumteleskop können durch Benutzung einer Entfernungsskala, Distanzen im Universum und dadurch auch die Expansionsrate bestimmt werden³. Das Teleskop wurde in Zusammenarbeit von der NASA und der ESSA entwickelt. Mit dem Teleskop konnten Planeten, Sterne, Nebel, Galaxien und vieles andere beobachtet werden. Es über ein Teleskop außerhalb der Erdatmosphäre zu betrachten, bringt den Vorteil der besseren Auflösung mit sich. Außerdem können von außerhalb der Erdatmosphäre mehr Spektralbereiche eingesehen werden.

Ein wichtiges Projekt war die Beobachtung von Cepheiden⁴ im Umkreis von 20 Mpc und der Entfernungsbestimmung der Galaxie. Verglichen mit der Radialgeschwindigkeit einer Galaxie konnte darauffolgend die Hubble-Konstante berechnet werden⁵.

3. Begriffserklärung

Zum Verständnis der komplexeren Definition der Hubble-Konstante, werden im folgenden einige wichtige Begriffe näher erläutert und erklärt.

2 https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Edwin_Hubble

3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Weltraumteleskop>

4 Sterne mit periodischen Schwankungen in ihrer Helligkeit (<https://de.wikipedia.org/wiki/Cepheiden>)

5 <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Weltraumteleskop>

3.1. Skalenfaktor

Der Skalenfaktor gibt die relative Expansion des Universums an und ist ein Parameter des Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Modells. Durch

$a(t) = \frac{L}{\lambda}$ wird der Zusammenhang von einer physikalischen Koordinate

L und einer mitbewegten Koordinate λ dargestellt. In der modernen Kosmologie ist der Skalenfaktor meist dimensionslos, kann aber auch eine Längeneinheit besitzen. Mit Hilfe des Skalenfaktors kann letztendlich der Hubble-Parameter berechnet werden⁶.

3.2. Spektrallinien

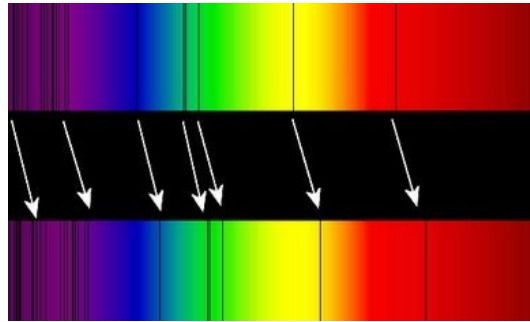
Das Licht- und Farbspektrum gehört zum elektromagnetischen Spektrum und ist der vom Menschen einsehbare Bereich. Spektrallinien oder Resonanzlinien sind einzelne streng voneinander getrennte Linien eines solchen Spektrums und werden durch Parameter wie Wellenlänge, Linienintensität und Linienbreite gekennzeichnet⁷.

3.3. Rotverschiebung

Vereinfacht gesagt wird bei der Rotverschiebung die Wellenlänge verändert. Dieses passiert wenn die Wellenlänge länger als die der ursprünglich entsandten Wellenlänge ist. Dadurch werden die Spektrallinien innerhalb des Spektrums in den roten Bereich verschoben.

⁶ <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Skalenfaktor>

⁷ <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spektrallinie>



Die Abbildung stellt die Rotverschiebung der Spektrallinien dar. In diesem Fall wird der Unterschied der Rotverschiebung zwischen der Sonne (oben) und dem Supergalaxienhaufen (BAS11) gezeigt⁸.

Bei der Rotverschiebung wird zwischen der auf dem Dopplereffekt⁹ basierende, und der gravitativen oder der kosmologischen Rotverschiebung unterschieden. Bei der ersten handelt es sich um eine Wellenverlängerung durch ein voneinander wegbewegen einer Strahlungsquelle und dem Beobachter. Dadurch wird die eigentliche Welle verlängert und somit Rotverschoben¹⁰. Bei der zweiten handelt es sich um die kosmologische Rotverschiebung. Da der Anteil vom Dopplereffekt ab einer Entfernung von wenigen 100 Mpc extrem niedrig ist wird ab dieser Entfernung mit der kosmologischen Rotverschiebung gearbeitet. Da sich Galaxien nicht voneinander entfernen, sondern sich der Raum zwischen ihnen ausdehnt, auch Expansion genannt, kann eine Wellenlängenänderung erfasst werden¹¹.

Da es bei sehr weit entfernten Objekten schwierig ist deren Entfernung zu messen, kommt man sehr gut über den Wert der Rotverschiebung an die Entfernung heran. Je größer die Rotverschiebung ist, desto weiter ist ein Objekt von Betrachter aus entfernt und umso länger ist das Objekt bereits im Kosmos vorhanden. Das liegt daran, dass Licht eine gewisse Zeit benötigt, um eine so große Entfernung zurückzulegen. Währenddessen expandiert der Raum und die Rotverschiebung nimmt zu¹².

8 <http://www.physikgrundlagen.de/redshift.html>

9 Zeitliche Stauchung/Dehnung einer Welle durch Änderung der Entfernung von Sender und Empfänger

10 <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/603171/rotverschiebung>

11 https://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung#Kosmologische_Rotverschiebung

12 <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/rotverschiebung/417>

4. Die Hubble-Konstante

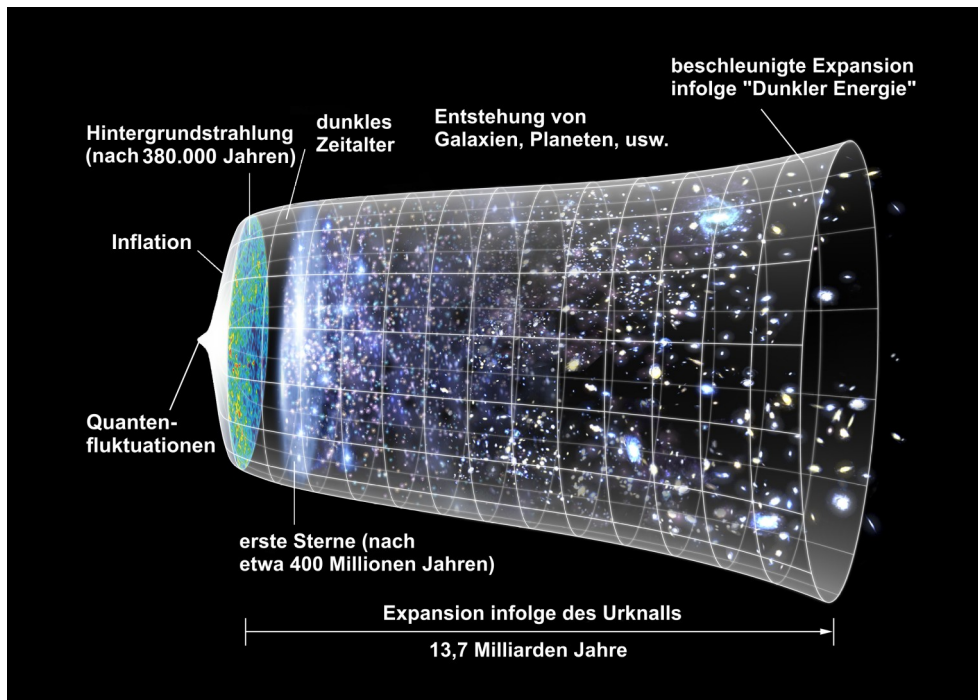
Die Hubble-Konstante wurde nach dem US-amerikanischen Astronom Edwin Hubble benannt. Sie beschreibt die Expansion des Universums und ist in der Kosmologie einer der bedeutendsten Größen geworden. Heutzutage wird eher der Begriff Hubble-Parameter verwendet, da die Hubble-Konstante eigentlich gar keine Konstante ist, sondern ein mit der Zeit verändernder Wert. Gemessen wird dieser Wert über die systematische Erfassung der Entfernung von astronomischen Objekten und der scheinbaren Geschwindigkeit dieser auf uns. Anfang des 21. Jahrhunderts haben Messungen Werte von ungefähr

$68 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ bis $74 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ ergeben¹³.

Da man die scheinbare Geschwindigkeit aus der Rotverschiebung eines kosmischen Objektes herleiten kann, gilt auch der proportionale Zusammenhang von der Entfernung und der Rotverschiebung. Die Linearität beider Werte gilt aber nur bis zu einem Wert der Rotverschiebung von $z \sim 0.1$ oder bis zu einer Distanz von ungefähr 400 Mpc¹⁴.

¹³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante>

¹⁴ <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-gesetz/187>



¹⁵ In der, nicht maßstäblichen Abbildung, werden die Entwicklungsstadien des Universums dargestellt. Der Beginn des Universums auf der linken Seite bei der Quantenfluktuation. Unten im Bild wird eine sehr vereinfachte Darstellung der Zeitachse seit dem Urknall dargestellt. Sie zeigt den Verlauf der Expansion des Universums infolge des Urknalls.

4.1. Definition

Der Skalenfaktor beschreibt quantitativ die Ausdehnung unseres Universums. Die Expansionsrate die durch den Hubble-Parameter

beschrieben wird, ist durch $H(t) = \frac{a'(t)}{a(t)}$ festgelegt. Dabei ist $a'(t)$

die Zeitliche Ableitung des Skalenfaktors. Der aktuelle Wert des Parameters wird als Hubble-Konstante H_0 bezeichnet: $H_0 = H(t_0)$ mit t_0 welches das Weltalter beschreibt.

Im Bereich des lokalen Universums gilt die Hubble-Konstante als Proportionalitätskonstante der linearen Beziehung von der Entfernung D

¹⁵ https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#/media/Datei:Expansion_des_Universums.png

einer Galaxie und der gemessenen Rotverschiebung z .

Die daraus resultierende Formel zeigt diesen Proportionalen Zusammenhang: $c*z \approx H_0*D$ wobei c in diesem Fall die Lichtgeschwindigkeit darstellt. Der exakte Zusammenhang von kosmologischer Rotverschiebung und Entfernung ist nicht linear und benötigt eine Integration des Skalenfaktors.

Die meist gebräuchliche Einheit von Messungen Hubbles war $\frac{km}{s*Mpc}$.

So werden bei Betrachtung zweier Galaxien von beiden jeweils die Spektrallinien gemessen. Wenn sich die Wellenlängen um einen gewissen Wert unterscheiden kann man daraus schließen wie viel weiter einer der beiden Galaxien von uns entfernt ist. Wenn also die zweite Galaxie einen 67,74 km/s höheren Wert vom Produkt $c*z$ hat, ist diese ungefähr 1 Mpc weiter von uns entfernt als die erste Galaxie.

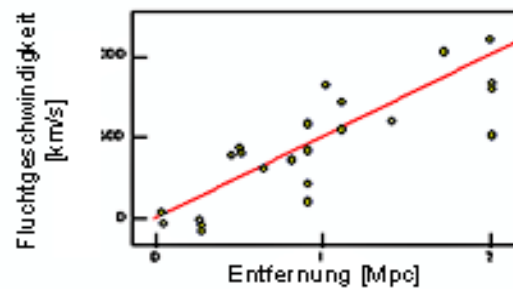
Galaxien haben zusätzlich zur Bewegung, die durch die Expansion ausgelöst wird, auch eine Eigenbewegung welche bei ein paar hundert km/h liegt. Um beide Effekte während der Messung voneinander zu trennen, muss eine große Menge von Galaxien in einem großen Entfernungsbereich betrachtet werden¹⁶.

4.2. Das Hubble-Diagramm

Die Werte, die für die Hubble-Konstante ausschlaggebend sind, lassen sich auch in einem Diagramm darstellen. Dabei wird die Rotverschiebung von astronomischen Objekten in Abhängigkeit zu ihrer Entfernung zur Erde dargestellt. Das Diagramm sollte bei einem sich gleichmäßig expandierenden Universum eine Ursprungsgerade zeigen. Die daraus resultierende Steigung ist dann die Hubble-Konstante.

¹⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Definition>

Hubbles Daten von 1929



¹⁷Edwin Hubble veröffentlichte das erste Hubble-Diagramm 1929, woraufhin er einen linearen Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung von Galaxien und deren Entfernung darstellt. Die Entfernung von weit entfernten astronomischen Objekten wird über die Helligkeit von Standardkerzen bestimmt. Wichtig ist dabei, dass die Auflösung des Objektes so gut ist, dass kein Licht von anderen astronomischen Objekten das Messergebnis verändert oder beeinflusst. Dieses Messverfahren wird mit größerer Entfernung immer schwieriger und komplexer. Der Wert der Hubble-Konstante wurde mit der Zeit immer genauer und nachvollziehbarer, da im Laufe der Entwicklung die messbaren Daten weiterer Entfernungen vermehrt wurden. Die ersten gemessenen Daten gingen bis zu einer Entfernung von ungefähr 2 Mpc. Heutzutage sind Messungen bis zu einem Radius von 700 Mpc ermöglicht worden¹⁸.

4.3. Die Hubble-Zeit

Bei einer gleichförmigen Expansion des Universums in einem leeren Raum wäre der Kehrwert $1/H_0$ der Hubble-Konstante das Weltalter, also die Zeit, die seit dem Urknall vergangen ist. Das Weltalter kann sich aber von der Hubble-Zeit unterscheiden, da Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie Bestand des Universums ist. Diese Faktoren können für einen verzögerten oder auch beschleunigten Expansionsvorgang sorgen.

¹⁷ <http://www.avgoe.de/StarChild/DOCS/STARCH00/questions/redshift.html>

¹⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Diagramm>

Um diese Faktoren in der Berechnung mit einfließen zu lassen, wird ein Korrekturterm zum Ursprungsterm hinzugefügt:

$$t_0 = \frac{1}{H_0} * F(\dots)$$

Der Zweite Faktor ist der hinzugefügte

Korrekturterm und beinhaltet verschiedene Dichteparameter. Dazu gehört Ω_r der Strahlungsdichte Ω_m der gesamten Materie, Ω_Λ der Dunklen Energie und Ω_k dem Krümmungsparameter. Heutige Messungen mit dem Planck-Weltraumteleskop ergeben eine Hubble-Zeit von 14,561 Mrd. Jahren. Der errechnete Wert hat einen mit dem Korrekturfaktor $F=1,0517$ höheren Wert als das tatsächliche Alter des Universums.

Bei der kritischen Bewertung der Hubble-Konstante war es sehr wichtig den Vergleich vom Alter des Universums und der Altersbestimmung von astronomischen Objekten wie Sterne oder Kugelsternhaufen zu betrachten. Denn die Messwerte haben nur soweit Aussagekraft, solange das Alter der gemessenen Himmelskörper nicht über dem des Weltalters sind¹⁹.

5. Kosmologische Entfernungsbestimmung

Im letzten Jahrhundert wurden viele verschiedene Methoden entwickelt, um Entfernungen von astronomischen Objekten zu ermitteln. Unterschieden wird in der Messung letztendlich zwischen der wahren Entfernung und der Leuchtkraft-Entfernung. Bei der wahren Entfernung wird die tatsächliche Distanz zu einem der astronomischen Objekte ermittelt. Zwar ist es nicht möglich eine Entfernung von vielen Lichtjahren direkt zu messen, aber es ist möglich einen solchen Wert über die Rotverschiebung zu erlangen.

$$dp = 2H_L \left(1 - \frac{1}{(1+z)^{0,5}}\right)$$

Diese Formel gilt nur im Einstein-de-Sitter-

Universum, ein Modell zur Beschreibung des Universums, da die Formel in anderen kosmologischen Modellen noch komplexere Zusammenhänge beinhaltet.

¹⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Zeit>

Viele der heutzutage angewandten Methoden liefern Werte als Leuchtkraft Entfernung, wobei diese auch mit der Rotverschiebung bestimmt werden:

$$d_L = \frac{cz}{H_0} \left(1 + \frac{z}{4}\right)$$

.Das Problem bei Verwendung dieser Formeln ist, dass

die Entfernungsbestimmung nur dann zuverlässig ist, wenn für den Hubble-Parameter ein annähernd exakter und belegter Wert vorliegt.

Ein weiterer Weg die Entfernung von astronomischen Objekten zu bestimmen, ist über die Helligkeit von Standardkerzen. Bei dieser Methode ist es wichtig, dass das Objekt leicht zu erkennen ist und deren absolute Helligkeit M gegeben ist. Bei Beobachtung einer solchen Standardkerze, wird über die vorher gemessene scheinbare Helligkeit m die Entfernung bestimmt: $m - M = 5(\log_{10} D_L - 1)$.

Darüber hinaus gibt es viele bekannte Methoden, die zur Bestimmung von kosmologischen Entfernungen dienen. Zum Einen gibt es die Bestimmung über Novae, Cepheiden oder auch Supernovae. Sie unterscheiden sich unter anderem in ihrer Reichweite. Dabei sticht aber die Supernovae, mit einer Entfernungsbestimmung von bis zu 500 Mpc, gegenüber allen anderen, heraus²⁰.

6. Astronomische Messung der Rotverschiebung

Eine Methode zur Messung der Rotverschiebung ist die Spektralanalyse²¹. Bei der Spektralanalyse zeichnet das sogenannte Spektrometer Strahlungen auf, welche im folgenden dann in verschiedene Eigenschaften wie zum Beispiel Energie, Wellen oder Masse zerlegt werden können²². Diese Messmethode ist durch digitale Erfassung optimiert worden, trotzdem muss eine Galaxie eine Mindest-Helligkeit aufweisen damit die Spektrallinien erfasst werden können.²³ Die Rotverschiebung wird meist mit der

20 http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/KosmologischeEntfernungen.pdf

21 <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Rotverschiebung>

22 <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spektroskopie>

23 <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Rotverschiebung>

dimensionslosen Größe z angegeben und stellt die Relation der Wellenlängenänderung zur ursprünglichen Wellenlänge λ_0 da:

$$z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}}}{\lambda_0} - 1$$

Als Beispiel zur Veranschaulichung der

Gleichung, sendet eine beliebige Galaxie Lichtwellen zur Erde. Auf der Entfernung hat sich die Expansion des Universums verdoppelt weshalb dann für $\lambda_{\text{beobachtet}}$ gilt: $2 * \lambda_0$. Beispielbezogen würde die Rotverschiebung

den Wert 1 annehmen: $z = \frac{2 * \lambda_0}{\lambda_0} - 1 = 1$ ²⁴.

7. Das Hubble-Lemaître-Gesetz

Das Gesetz, dass die Ausdehnung des Universums beschreibt, wurde schon vor Edwin Hubbles Hubble-Konstante entdeckt. Georges Lemaître stellte schon damals die bekannte Konstante in seinem Artikel „Annales de la Société Scientifique de Bruxelles“ vor. Diese Erkenntnis stellt in den letzten hundert Jahren einen enormen Schritt von Wichtigkeit für die Astronomie dar, und setzt damit das Grundgerüst für weitere Forschungen und Messungen. Edwin Hubble hat das Gesetz des Astrophysikers²⁵ 2 Jahre später²⁶ bestätigt und bekam die Aufmerksamkeit für diesen astronomischen Zusammenhang. Dies hängt damit zusammen, dass die Zeitschrift in der Lemaître seinen Artikel veröffentlichte auf Französisch war und nur eine geringe Reichweite besaß, wohingegen die Publikation von Hubble auf Englisch geschrieben war und Weltweit wahrgenommen wurde.

Da die IAU²⁷ die Bezeichnung von astronomischen Gesetzen nicht direkt festlegen kann, wird stattdessen eine Empfehlung an Wissenschaftler

24 <https://www.leifiphysik.de/astronomie/kosmologie/grundwissen/kosmologische-rotverschiebung>

25 <https://www.katholisch.de/artikel/19517-hubble-lemaitre-gesetz-astronomen-wuerdigen-belgischen-priester>

26 <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Geschichte>

27 Internationale Astronomische Union (<https://www.katholisch.de/artikel/19517-hubble-lemaitre-gesetz-astronomen-wuerdigen-belgischen-priester>)

ausgedrückt, welche die Benutzung des Begriffes „Hubble-Lemaître-Gesetz“ bevorzugt²⁸.

8. Revolution des Weltbilds

Schon 1988 wurde von einer beschleunigten Expansion des Weltalls ausgegangen. Dafür haben die Physiker Adam Riess, Brian Schmidt und Saul Perlmutter 2011 den Physiknobelpreis erhalten. Zwar wurden im Laufe der Zeit die Messmethoden immer exakter und erbrachten somit genauere Daten, jedoch war der Wert der Beschleunigung, mit der sich das Universum ausdehnt, noch nie so ungewiss. Die Exaktheit der gemessenen Werte sind so gut, dass nur noch ein recht kleiner Toleranzbereich bleibt. Da aber bei verschiedenen Messungen unterschiedliche Ergebnisse entstanden sind, die selbst unter maximaler Einberechnung der Fehlerquote zu weit auseinanderliegen, wird das kosmologische Modell des Hubble-Lemaître-Gesetzes infrage gestellt. Aufgrund dieser Theorie und der Unwissenheit dahinter wird auch gerne von neuer Physik gesprochen.

Ein weiteres Problem, welches nicht zur Lösungsfindung dieser Problematik beiträgt, sind sich widersprechende Werte des Hubble-Lemaître-Gesetzes und damit der daraus entsprungene Konstante. Denn diese Konstante ist nicht konstant²⁹, sondern ein zeitabhängiger Parameter³⁰. Es gibt verschiedene Arten diese Problematik zu deuten. Eine davon ist, dass das kosmologische Standardmodell unvollständig ist und nur eine neue Physik die Kontradiktion auflösen kann. Eine weitere Überlegung, in der von richtigen Ergebnissen der Messmethoden ausgegangen wird, könnte das Hubble-Lemaître-Gesetz im nahen kosmologischen Bereich anders sein, als in größerer Entfernung³¹.

28 <https://www.katholisch.de/artikel/19517-hubble-lemaitre-gesetz-astronomen-wuerdigen-belgischen-priester>

29 <https://www.welt.de/wissenschaft/article203010342/Hubble-Physiker-verzweifeln-ander-Expansion-des-Alls.html>

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

31 <https://www.welt.de/wissenschaft/article203010342/Hubble-Physiker-verzweifeln-ander-Expansion-des-Alls.html>

9. Fazit

Es wird noch eine lange Zeit darüber geforscht, ob sich das Hubble-Lemaître-Gesetz bewahrheiten wird, oder es in der Astronomie eine ganz neue Sichtweise auf unser Universum geben wird. Edwin Hubble hat durch seinen Beleg der Konstante damals schon die Astronomie verändert und die Expansion in einen Zusammenhang von Entfernung und Rotverschiebung gebracht. Dieser Wert der Konstante wurde in den letzten hundert Jahren durch genauere Messmethoden und korrektere Gleichungen mit Anpassungsthermen immer präziser. Anstatt Fragen zu beantworten wurden neue Fragen gestellt, da die Konstante nicht wirklich konstant ist und verschiedene Ergebnisse aufweist. Deshalb wird auch in Betracht gezogen, dass es bald eine neue Physik geben könnte, um diesen Vorgang der Expansion zu beschreiben. Daher wird sich auch in nächster Zeit immer wieder die Frage stellen, ob etwas Grundlegendes unwissend falsch interpretiert oder gemessen wurde, oder es für diese Frage weitaus komplexere, noch nicht entdeckte und verstandene Methoden gibt.

Interessant wäre es natürlich, wenn es irgendwann eine neue Physik zur Berechnung und Veranschaulichung unseres Universums geben würde. Zwar könnte man denken, dass viele Jahre der Forschung dann umsonst gewesen seien. Genau das ist in meinen Augen der falsche Ansatz, da die jahrelange Forschung erst ermöglicht hat, das Themenfeld einer denkbar neuen Physik zu betreten.

10. Quellenverzeichnis

- <http://www.avgoe.de/StarChild/DOCS/STARARCH00/questions/redshift.html>
→ 01.03.2020
- http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/KosmologischeEntfernungen.pdf
→ 01.03.2020
- <http://www.physikgrundlagen.de/redshift.html>
→ 01.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Cepheiden>
→ 01.03.2020
- https://de.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble
→ 01.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante>
→ 02.03.2020
- https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#/media/Datei:Expansion_des_Universums.png
→ 02.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Definition>
→ 02.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Geschichte>
→ 03.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Diagramm>
→ 03.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Zeit>
→ 03.03.2020
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Weltraumteleskop>
→ 03.03.2020
- https://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung#Kosmologische_Rotverschiebung
→ 03.03.2020
- https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Edwin_Hubble

- 04.03.2020
- <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Rotverschiebung>
→ 04.03.2020
 - <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Skalenfaktor>
→ 04.03.2020
 -
 - <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spektroskopie>
→ 05.03.2020
 - <https://www.katholisch.de/artikel/19517-hubble-lemaitre-gesetz-astronomen-wuerdigen-belgischen-priester>
→ 05.03.2020
 -
 - <https://www.leifiphysik.de/astronomie/kosmologie/grundwissen/kosmologische-rotverschiebung>
→ 05.03.2020
 - <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/603171/rotverschiebung>
→ 05.03.2020→
 - <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-gesetz/187>
→ 06.03.2020
 - <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/rotverschiebung/417>
→ 06.03.2020
 - <https://www.welt.de/wissenschaft/article203010342/Hubble-Physiker-verzweifeln-an-der-Expansion-des-Alls.html>
→ 06.03.2020

11. Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der

Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den 11.03.2020

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

12. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

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

Bramsche, den 11.03.2020

Unterschrift der Schülerin / des Schülers