

Die Entdeckung der Expansion

Wolfgang Albrecht; Reinhard Mawick

Auf dem Titelblatt der letzten „ANDROMEDA“ stand im Zentrum eine Gleichung:

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

Im zugehörigen Artikel wurde beschrieben, wie beobachtende Astronomen und theoretische Physiker am Anfang des 20. Jahrhunderts gemeinsam in einem zeitlich doch langen Prozess herausfanden, dass die bestehende Vorstellung des ewigen und unveränderlichen Weltalls korrigiert werden musste. Am Ende dieses Prozesses stand eine Gleichung, die seit Ende 2018 neben „Hubble“ zusätzlich den Namen „Lemaître“ trägt.

Es begann alles zu Anfang des 20. Jahrhunderts – zu einer Zeit, in der für fast alle Astronomen das Universum aus einer seit ewigen Zeiten weitgehend unveränderten Galaxie mit der Bezeichnung „Milchstraße“ bestand. Beobachtungen waren bis vor der Jahrhundertwende per Teleskop nur mit dem Auge und einem Skizzenblock für die Nachwelt festgehalten worden. Erst 1887 fertigte *Edward Emerson Barnards* die erste photographische Plattenaufnahme des Andromeda-Nebels an, eines Objektes, dessen Interpretation stellvertretend für viele solcher „Nebel“ für die Betrachtung des Kosmos „als Ganzes“ von entscheidender Bedeutung werden sollte (s. Titelbild). Bis etwa 1925 war nämlich unklar, um was es sich bei diesen Objekten handeln könnte. Es gab zwei Meinungen, die schließlich 1920 im Rahmen der „Großen Debatte“ aufeinandertrafen: *Harlow Shapley* vertrat die Meinung, dass unsere „Big Galaxy“ einzigartig und wesentlich größer sei als bisher angenommen (300.000 Lichtjahre) und außerdem unsere Sonne nicht in deren Zentrum stehe; *Heber Curtis* ging von einem wesentlich kleineren Modell der Milchstraße als Galaxie unter vielen anderen aus. Dieses Modell der „Welteninseln“ war u.a. schon

von *Immanuel Kant* in seiner „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ (1755) vertreten worden.

Ungeachtet der Auseinandersetzungen zwischen den Anhängern beider Theorien begann 1912 am Lowell-Observatorium in Arizona ein begnadeter Beobachter namens *Vesto Slipher* mit der systematischen Untersuchung der nicht-planetarischen Nebel. Als erstem gelang es ihm, die „Radialgeschwindigkeiten“¹ solcher Objekte zu bestimmen. Bis 1915 stellte er eine Liste von 15 Galaxien zusammen, die sich überraschenderweise in ihrer Mehrzahl mit damals kaum vorstellbaren Geschwindigkeiten von bis zu 1100 km/s von uns wegzubewegen schienen. Lediglich NGC 221 (heute besser bekannt unter dem Namen „Andromeda-Galaxie“ oder M31) bewegt sich nach Sliphers Messungen des Jahres 1912 mit etwa 300 km/s auf uns zu. Die (für damalige Verhältnisse) extrem genauen Messungen der Fluchtgeschwindigkeiten geschahen durch die genaue Untersuchung der Rotverschiebung von Absorptionslinien im Emissionsspektrum der beobachteten Galaxien. Physikalisch zugrunde liegt der Untersuchung der uns allen aus der Akustik her bekannte Doppler-Effekt (hier der optische Doppler-Effekt).

Eine Angabe der Entfernung, in die die Nebel in die Tiefen des Alls zu entschwinden schienen, war zu dieser Zeit noch nicht möglich. Zwar hatte 1912 *Henrietta Leavitt* den Zusammenhang zwischen Periodendauer und absoluter Helligkeit (Entfernung) von Cepheiden (in ihrer Helligkeit sich regelmäßig verändernde Sterne) entdeckt, aber erst 1925 berichtete *Edwin Hubble* auf der 33. Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft von seiner bereits zwei Jahre zurückliegenden Entdeckung von Cepheiden in M31 und M33.

Die dann daraus berechnete Entfernung von knapp 900.000 Lichtjahren (aktueller Wert: 2,5 Mill. Lj) konnte nur durch die Erklärung des Andromeda-“Nebels“ als eigenständige Galaxie gedeutet werden. Weitere Messungen durch Hubble in den beiden folgenden Jahren entschieden dann die 1920 noch „Remis“ ausgegangene Debatte.

1918 griff dann der beobachtende Astronom *Carl Wirtz*, dem auch die theoretische Physik nicht fremd war, ins Geschehen ein. Auf den Beobachtungen von Slipher aufbauend fand er eine mathematische Theorie, die einen Zusammenhang von Radialgeschwindigkeit (= Fluchtgeschwindigkeit) und Entfernung offenbarte. Einer ersten, noch sehr ungenauen Veröffentlichung im Jahre 1918 folgte eine Notiz 1922 in den „Astronomischen Nachrichten“ und dann endlich 1924 die Publikation der Ergebnisse seiner Messungen wiederum in den „Astronomischen Nachrichten“, wobei er auf einen (logarithmischen!) Zusammenhang der Magnitude bzw. Entfernung und der Radialgeschwindigkeit extragalaktischer Nebel verwies. Er schreibt:

„Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich auch von uns weg!“

Die unglückliche Wahl der logarithmischen anstelle der linearen Entfernung verhinderte weitgehend die Akzeptanz seiner Resultate, da hierfür von Wirtz keine theoretische Erklärung gegeben wurde bzw. erkennbar war.

Fazit: *Das Universum war also in den ersten 25 Jahren des 20. Jahrhunderts nicht nur „größer geworden“, sondern es schien auch mit einer eigenartigen Dynamik erfüllt zu sein: Alle Galaxien hatten es eilig, von unserer Milchstraße wegzukommen (von wenigen Ausnahmen wie M 31 abgesehen).*

Etwa zur gleichen Zeit (also im ersten Quartal des 20. Jahrhunderts) machten sich **theoretische Physiker** daran, „Modelle“ für das Universums zu entwickeln. Dazu gehörte natürlich insbesondere *Albert Einstein*, der 1905 sowohl eine Arbeit zur Erklärung des Photoeffekts als auch seine „Spezielle Relativitätstheorie“ veröffentlichte, in der es um die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c und den Folgerungen daraus ging.

Seit 1907 arbeitete Einstein an der Verallgemeinerung seiner Relativitätstheorie. Das Ergebnis

seiner Arbeit, die „**Allgemeine Relativitätstheorie**“, die man auch als „Theorie der Gravitation“ bezeichnen könnte, stellte er dann im Juni 1915 auf der Göttinger Naturforscherversammlung (im Beisein von Hilbert) und schließlich im November 1915 auf der Jahresversammlung der Preußischen Akademie der Wissenschaften vor.

Die Kraft auf ein Objekt im Gravitationsfeld wird in seiner neuen Betrachtung ersetzt durch die Bewegung des Objekts in einer gekrümmten Raumzeit anstelle des euklidischen Raumes.

Als seine „Mitstreiter“ bzw. „Konkurrenten“ bei diesem Thema sollte man zumindest *Hermann Minkowski*, *Marcel Grossmann* und *David Hilbert* nennen, mit denen er in regem wissenschaftlichem Austausch stand. Seine eigenen Probleme mit der Tensorrechnung „beseitigte“ er mit Hilfe eines befreundeten Mathematik-Kollegen („*Grossmann*, *Du musst mir helfen, sonst werd' ich verrückt!*“).

Im Anschluss an die Jahresversammlung der Preussischen Akademie motivierte Max Planck Einstein, die „ART“, die bis dahin nur in mehreren Einzelaufsätzen von 1907 bis 1915 fragmentiert veröffentlicht worden war, in einem Werk zusammenzufassen. Diese erschien dann 1916 in den „*Annalen der Physik*“ mit dem Titel „*Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*“ als sehr knappe Zusammenfassung. Im Vorwort verwies Einstein auf die ausführlichere Ausarbeitung und Darstellung seines Freundes *Erwin Freundlich*.

1917 erweiterte *Albert Einstein* die ART um die Darstellung kosmologischer Zusammenhänge. Im Mittelpunkt dieser neuen Arbeit („*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*“) steht ein – in einer Zeile formuliertes – **Gleichungssystem** (deshalb die vielen Indizes), das den Zusammenhang zwischen der Geometrie des Raumes und der Anwesenheit von Energie und Masse beschreibt. Ebenso in dieser Arbeit erweiterte Einstein sein

System der Feldgleichungen durch „ein an den Feldgleichungen der Gravitation anzubringendes Zusatzglied“, um ein statisches Universum zu erhalten. Dabei handelte es sich um das berühmte „kosmologische Glied“ mit dem Kennbuchstaben Λ (Lambda), ohne das, so nahm Einstein jedenfalls an, das Universum irgendwann in sich zusammenstürzen würde.

Drei Monate später veröffentlichte *Willem de Sitter* eine andere der möglichen Lösungen: Sein Universum war im Prinzip leer; erst durch Einfügen einer Masse und eines Beobachters (zweite Masse) begann dieses theoretische Universum sich auszudehnen (die sich dann rein mathematisch ergebenden Gleichungen zeigten das). Eine prinzipiell messbare (!) Rotverschiebung wäre die Konsequenz dieser Expansion.

1922 veröffentlichte in St. Petersburg ein junger russischer Physiker, *Alexander Friedmann*, seine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen. Noch im gleichen Jahr erschien in der „Zeitschrift für Physik“ die deutsche Übersetzung: „Über die Krümmung des Raumes“. Nach seiner Lösung war das Universum nicht statisch. Er konnte zwei grundsätzliche Lösungen unterscheiden: Entweder expandiert die Welt immer weiter oder aber: Die Expansion kehrt sich irgendwann um (Friedmann schätzte die Periode bis zur Umkehrung auf 10 Milliarden Jahre). Die Welt-Modelle von de Sitter (1917) und Einstein (1917) sind in seiner Arbeit als Sonderfall enthalten.

Einstein lehnte diese Arbeit zunächst als „verdächtig“ ab, weil sie mit seinen Feldgleichungen nicht verträglich waren und wohl einen Rechenfehler enthielten. 1923 musste sich Einstein revidieren; er erklärte, dass er die Resultate von Friedmann für richtig und aufklärend halte.

Leider wurden diese und die folgenden Arbeiten² von Friedmann sowohl bei ihrem Erscheinen als auch danach kaum beachtet. Es wurden ausschließlich die Lösungen von Einstein und de Sitter von 1917 diskutiert. Auch Einstein kam nach seiner 1923er Notiz nicht mehr auf Friedmann zurück.

Anders als Friedmann, der sich auf druckfreie Materie beschränkt hatte, führte Lemaître erstmalig den Druckterm in seine Arbeit ein.

1927 veröffentlichte der junge belgische Priester und Physiker *Georges Lemaître* seine Promotionsarbeit über Studien zur Expansion des Weltalls. Er kam zu den gleichen Ergebnissen wie Alexander Friedmann fünf Jahre zuvor – anscheinend ohne die Arbeiten von Friedmann zu kennen. Sein Werk „*Un univers homogène de Masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactique*“³ veröffentlichte er in einer der Fachwelt recht unbekanntem Zeitschrift: „*Annales de la Société scientifique de Bruxelles*“. Vor diesem Hintergrund blieb seine Arbeit (die die Lösungen für den expandierenden Kosmos – ähnlich wie bei Friedmann geschehen – neu ableitete und zusätzlich den Zusammenhang zwischen der Expansion des Raumes und den zu erwartenden Rotverschiebungen in den Spektren der Galaxien darstellte) weitgehend unbekannt.

Im Herbst desselben Jahres traf Lemaître anlässlich einer Konferenz in Brüssel mit Einstein zusammen und trug ihm den Inhalt seiner Promotionsarbeit vor. Einstein (wegen der nicht-statischen Lösung bestimmt nicht hellaufliegend begeistert) machte Lemaître auf die beiden Arbeiten von Friedmann aufmerksam.

Es erging Lemaître allerdings zunächst auch nicht viel besser als Friedmann (der bereits 1925 gestorben war): Seine Arbeit blieb weitgehend unbeachtet.

Lemaîtres Veröffentlichung enthielt zwei entscheidend wichtige Punkte: Im theoretischen Teil seiner Arbeit kommt er (rein mathematisch!) zu der Aussage, dass sich das Universum ausdehnt. Eine beliebige (große) Entfernung R im Weltall⁴ ist also von der Zeit abhängig; man schreibt das als $R(t)$; die Änderung von R mit der Zeit wird geschrieben als $\dot{R}(t)$, die Expansionsrate $\dot{R}(t)/R(t)$ stellt sich dabei als Konstante heraus.

$$\frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \text{const}$$

Im empirischen Teil der Arbeit, in dem Lemaître auf Messwerte (von Slipher) zurückgreifen konnte, hat er einen Wert für diese Konstante angegeben. Leider liegt diese Zahl wegen extrem ungenauer Entfernungswerte (die er wohl von Edwin Hubble übernommen hatte) ziemlich „daneben“: 680 km/s/Mpc (heutiger Zahlenwert etwa 70) ist aus heutiger Sicht kein wirklich schöner Wert.

Anfang 1930 hatte de Sitter den von Hubble 1929 veröffentlichten beobachteten Zusammenhang zwischen den Radialgeschwindigkeiten der entfernten Galaxien und deren Entfernungen auf einem Treffen der Royal Astronomical Society referiert. Arthur Eddington nahm an der Diskussion teil, eine theoretische Lösung dazu fanden sie nicht. Als Lemaître diese 1930 veröffentlichte Notiz las, wandte er sich in einem Brief an Eddington und wies auf seine Promotionsarbeit hin. In dieser 1927er-Arbeit hatte er ja gezeigt, dass Rotverschiebungen die Signatur eines expandierenden Universums sind und dass solche Rotverschiebungen linear von den Nebelabständen abhängen. Die nun von Eddington initiierte Übersetzung ins Englische erhielt auch de Sitter.

Beide akzeptierten sofort Lemaitres Theorie eines dynamischen Universums, ihre Stellungnahmen zu dieser „brillianten Lösung“ (Eddington) wurden noch im März (Eddington) und Mai (de Sitter) des gleichen Jahres veröffentlicht.

Nachdem auch Eddington 1930 festgestellt hatte, dass Einsteins „Welt“ von 1917 trotz des kosmologischen Gliedes Λ instabil ist, gab auch Albert Einstein das Modell des statischen Universums auf und erarbeitete mit Willem de Sitter 1931 in einer gemeinsamen Publikation die einfachste denkbare Lösung der Feldgleichungen: „On the relation between the expansion and the mean density of the universe“. Diese Arbeit bezog sich auf einen euklidisch „flachen“ Raum ($k=0$). Das kosmologische Glied Λ wurde auf null gesetzt, und der Druck zwischen den Galaxien und Sternen wurde von ihnen, anders als von Lemaître 1927, nicht berücksichtigt. Dieses überarbei-

tete Modell ging in die Kosmologie als das „Einstein - de Sitter-Modell“ ein und war bis in die 1990er Jahre das Standard-Modell der Kosmologie. Das „Auf-Null-Setzen“ von Λ wurde zum „Null-Dogma“ für die kosmologische Konstante. Es war eine bedauerliche und verhängnisvolle Weichenstellung, denn beim Aufstellen der Einsteinschen Feldgleichungen in ihrer allgemeinsten Form aus Prinzipien, wie z.B. aus dem Hamiltonsche Variationsprinzip, ergibt sich der Λ - Term mathematisch zwingend. Nur sein Zahlenwert muss aus astronomischen Beobachtungen abgeleitet werden. Das „Null-Dogma“ wurde in den 1990er Jahren überwunden. Dass das sinnvoll war, zeigte sich auch in den Astronomischen Beobachtungen (Stichwort „Dunkle Energie“).

Fassen wir zusammen:

Aufgrund der „Vorarbeit“ durch *Albert Einstein* gelangten *Alexander Friedmann* 1922 und *George Lemaître* 1927, ohne voneinander zu wissen, zu demselben Schluss, dass das Universum expandiert, wobei die Ausdehnungsrate einen festen, bestimmbaren Wert hat.

Die beobachtenden **Astronomen** hingegen hatten inzwischen das Phänomen der sich voneinander entfernenden Galaxien über die Rotverschiebung genauer untersucht.

Da passt doch was zusammen!

Blieben wir noch einen Augenblick bei den mathematisch arbeitenden Kosmologen: Sie hatten theoretische Weltmodelle aufgestellt, die sich aus den Gleichungen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ergaben. Auch wenn damals das Modell von de Sitter akzeptierter war (es war primär leer und statisch und expandierte erst durch Einbringen von Masse), so ist aus heutiger Sicht das Modell von Friedmann und Lemaître tragfähiger. Dieses Universum expandierte (zu Einsteins Ärger – da half auch kein eingefügter Λ -Term). Zusätzlich hatte *George Lemaître* Messungen von *Slipher* (Geschwindigkeit v) und *Hubble* (Entfernungen r) zusammengetragen und den Zusammenhang zwischen r und v als Proportionalität mit der Konstanten H_0 (spätere Bezeichnung!) erkannt. Der von

ihm angegebene Wert war allerdings (wegen der ungenauen Entfernungsmessungen) recht „gewagt“. Das alles stellte er in einer Arbeit zusammen, die 1927 auf Französisch und dann 1931 (nach ausführlichem Kontakt mit Arthur Eddington) auf Englisch erschien. Im gleichen Jahr veröffentlichte er auch mit „*The Expanding Universe*“ seine Vorstellung von einem zeitlichen „Anfang“ des Universums als quantenmechanisch zu verstehendes „Uratom“.

Es war damals nicht selbstverständlich, den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Expansion des Universums zu akzeptieren. **Knut Lundmark**, ein schwedischer Astronom war wohl einer der Ersten der 1925 einen möglichen Zusammenhang formulierte: „... *the opinion that the measured Doppler-shifts of the lines are due either to motions in the non-relativistic sense or to motions and certain effects consequent to the general theory of relativity*“ (Angespielt wird hier natürlich auf das de-Sitter-Universum).

Im Rahmen einer 1928 in Leiden (Holland) stattfindenden Tagung der IAO trafen sich Kosmologen und Astronomen, um die Ergebnisse von *Slipher, Lundmark, de Sitter* und *Lemaître* zu diskutieren. Auch *Albert Einstein*, der immer noch an seinem statischen Universum festhielt, sowie *Arthur Eddington* waren anwesend. Ein weiterer Teilnehmer war ein Astronom aus den USA, der am Mount-Wilson-Observatorium arbeitete und der für seine Entfernungsmessungen von Spiralnebeln bekannt geworden war. Sein Name ist *Edwin Hubble*, der seines Mitarbeiters *Milton Humason*.

Im Jahr nach dieser Tagung, also 1929, veröffentlichte Hubble sein Ergebnis⁵ für den Zusammenhang zwischen r und v : Er stellte den Zusammenhang graphisch durch eine Gerade dar, zu der die mathematische Beziehung $v \sim r$ und somit $v = H_0 * R$ gehört.

Es war sicherlich das Verdienst von Edwin Hubble, uns den Zusammenhang zwischen v und r ganz deutlich als Gerade vor Augen zu führen. Inhaltlich kann man nicht sagen, dass man hier

wesentlich mehr erfährt als zwei Jahre zuvor von Lemaître.

Dieser schrieb:

$$\frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = const$$

Und bei Hubble hieß es nun: $v/r = H_0$ – beide meinen das Gleiche: $\dot{R}(t)$ ist nämlich (als Ableitung des Weges nach der Zeit) die Geschwindigkeit v . Hier steht also (in leicht unterschiedlicher Schreibweise) bei beiden Autoren das gleiche! Hubble hat einen schönen Graphen (die Gerade) hinzugefügt, während Lemaître sogar eine für Hubble nie nachvollziehbare Schlussfolgerung zog: Die Galaxien fliehen nicht von uns, nein – das gesamte Universum expandiert!

Selbst Einstein mit seiner Vorstellung vom statischen Universum musste sich (wohl mit Eddington als Vermittler) "bekehren" lassen; er soll sein Λ als "größte Eselei seines Lebens" bezeichnet haben. Hubble hingegen ging nie von der Vorstellung des optischen Doppler-Effekts (also der **Fluchtbewegung der Galaxien im Raum**) ab.

Das Gesetz, das in seiner einfachsten Form $v = H_0 * R$ lautet, soll nach einem Beschluss der IAU von Ende 2018 deshalb nicht mehr einfach „*Hubble-Gesetz*“ sondern „*Hubble-Lemaître-Gesetz*“ heißen. Die Konstante – oder wie wir heute wissen, der Parameter, der die Expansion beschreibt, heißt aber weiterhin (aus historischen Gründen) „*Hubble-Konstante*“. Ihr Wert lässt sich heute erheblich genauer bestimmen als damals.

Hier gibt es aber ein unverhofftes Problem: Obwohl es verschiedene Methoden gibt, den Parameter zu bestimmen, sollte man erwarten, dass sich die Ergebnisse bei einem bestimmten Wert „einpendeln“. Stimmt aber nicht – es sind zwei! Misst man „konventionell“ (d.h. mit der Methode der SN-Ia-“Standardkerzen“), so erhält man einen Wert von 74 km/s/Mpc; selbst die Gravitationslinsen (für extrem weit entfernte Objekte) liefern einen Zahlenwert von 72 innerhalb der Standardabweichung. Durch die extrem genauen GAIA-Messungen erhält man $73,52 \pm 1,62$. Messungen über den Mikrowellenhintergrund

hingegen sowie die großräumige Galaxienverteilung liefern ein Ergebnis von $66,88 \pm 0,91$. Eine Ursache für diesen Unterschied dafür kennt man noch nicht⁶.

Nun fehlt hier zur vollständigen Erklärung des Titelbildes der ANDROMEDA 3/2018 mit der Formel:

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$
 nur noch die Information darüber, warum dort $H(t)$ und nicht H_0 steht: Inhaltlich bedeutet $H(t)$, dass die Hubble-Konstante zeitabhängig ist (man spricht also besser vom „Hubble-Parameter“).

Ein solcher Einfluss der Zeit auf H ⁷ wird allerdings erst bei größeren Entfernungen wichtig; ab etwa $z = 0,1$ (das bedeutet 420 Mpc oder etwa 1,3 Milliarden Lichtjahre) versagt die Linearität der Hubble-Beziehung⁸. $H(t)$ wird jetzt aus der Theorie berechnet.

Inzwischen ist das von **George Lemaître 1927** entwickelte Modell (natürlich mit Erweiterungen) zum **Standardmodell** der Kosmologie geworden. Seinen Erkenntnissen verdanken wir das Wissen um ein im Urknall entstandenes und seitdem expandierendes Weltall. Nicht selbstverständlich, aber umso wichtiger, ist die Aussage, dass sich dabei der Raum selbst ausdehnt. Die zu beobachtende Entfernung⁹ der Galaxien voneinander wird umso ausgeprägter, je weiter die Objekte entfernt sind.

Nachdem schon Lemaître diesen Zusammenhang mathematisch aus der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins hergeleitet und auch (mit **Sliphers** Daten) anschaulich gemacht hatte, stellte **Edwin Hubble 1929** diesen Zusammenhang graphisch in einem Koordinatensystem dar. Dabei übernahm auch er **Sliphers** Geschwindigkeitswerte; die Entfernungsmessungen sind wohl ihm selbst und seinem Mitarbeiter **Humason** zu verdanken. Ob ihm Lemaîtres Arbeit bekannt war, können wir nicht sagen; sein in „Öffentlichkeitsarbeit“ recht versierter Mitarbeiter sorgte jedenfalls dafür, dass das Gesetz die Bezeichnung **Hubble-Gesetz** bekam. Erst Ende 2018 erhielt dieses Gesetz zusätzlich Lemaîtres Namen.

Referenzen

- ¹ gemeint sind die Geschwindigkeitskomponenten radial auf uns zu oder von uns weg
- ² „Die Welt als Zeit und Raum“ (1923) sowie „Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung“ (1924)
- ³ „Ein homogenes Universum mit konstanter Masse und zunehmendem Radius, dass die Radialgeschwindigkeit der außergalaktischen Nebel widerspiegelt“ (Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A47, p. 49-59, 1927)
- ⁴ Stellen Sie sich unter R einfach den Radius eines kugelförmigen Universums vor, wenn Sie im Hinterkopf behalten, dass die Verhältnisse durchaus etwas komplizierter sind.
- ⁵ E. Hubble, 1929, „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae,“ PNAS 15, 172
- ⁶ siehe auch: Spektrum der Wissenschaft 7/18
- ⁷ Dabei ist $H_0 = H(t_0)$ – also die Hubble-„Konstante“ zum heutigen Zeitpunkt.
- ⁸ Hubbles Messungen geschahen bei $z < 0,0003$
- ⁹ Natürlich kann die Entfernung nicht direkt beobachtet werden, sie wird z.B. mit Hilfe von Periodenmessungen bestimmter variabler Sterne (den sogenannten Cepheiden) gemessen. Mit Hilfe einer von Henrietta Leavitt 1912 aufgestellten Beziehung, lässt sich aus der Periodendauer die absolute Helligkeit des Sterns bestimmen. Setzt man den sich ergebenden Wert für M in die „Distanzgleichung“ ein, so erhält man einen recht genauen Wert für die Entfernung. Voraussetzung ist natürlich, dass sich solche Cepheiden auffinden lassen. Außerdem musste diese Vorgehensweise natürlich zunächst z.B. mit der schon länger bekannten Parallaxenmethode kalibriert werden.

Literatur

Wegen des erheblichen Umfangs der verwendeten Literatur, insbesondere an primären Quellen, verzichten wir hier auf eine Auflistung. Bei Interesse finden Sie die Literaturliste hier: <http://www.mawick.org/literaturliste-expansion-des-u/literaturliste-entdeckung-der-expansion-des-universums.pdf>