

Supernovae und das expandierende Universum

Alexander Fritz*

Johannes Gutenberg Universität, Mainz

E-mail: afritz@students.uni-mainz.de

Mit Hilfe der Friedmann-Gleichungen, benannt nach dem russischen Physiker Alexander Friedmann, kann man die Dynamik des Universums als ganzes beschreiben. Es lassen sich statische und dynamische Lösungen finden. Die von Albert Einstein eingeführte kosmologische Konstante sollte ursprünglich den Kollaps des Universums unter der gravitativen Wirkung der Materie verhindern. Mit der Entdeckung der Expansion des Universums wurde das Konzept der kosmologischen Konstante fallen gelassen. Doch die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch das Vermessen von Supernovae Typ Ia legt nahe, dass diese Konstante einen von Null verschiedenen Wert aufweist. Die kosmologische Konstante repräsentiert hierbei das Prinzip der Dunklen Energie.

1. Die Entdeckungsgeschichte der Expansion des Universums

Vesto Slipher entdeckte im Jahr 1912 die Rotverschiebung des Spektrums weit entfernter kosmologischer Objekte. Im Jahr 1917 folgte die erste Beschreibung des Universums durch Albert Einstein und Wilhelm de Sitter. Sie beschrieben mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie ein statisches, immer gleichbleibendes Universum. Albert Einstein führte unter dieser Bedingung die kosmologische Konstante ein, welche den Gravitationskollaps durch die im Universum enthaltene Materie verhindern sollte. Georges Lemaître und Alexander Friedmann beschrieben unabhängig voneinander ein dynamisches Universum, welches statische und dynamische Lösungen in Abhängigkeit der kosmologischen Parameter aufweist. Lemaître verknüpft jedoch die Entdeckung von Vesto Slipher und Edwin Hubble und schlussfolgerte, dass das Universum expandiert. Edwin Hubble publizierte im Jahr 1926 Distanzen zu kosmologischen Objekten, welche deutlich außerhalb unserer Galaxie liegen. Im Jahre 1929 bestätigte Hubble Lemaîtres Schlussfolgerung mit dem von ihm entdeckten Hubble-Gesetz. Die Erkenntnis des expandierenden Universums veranlasste Einstein seine kosmologische Konstante gleich Null zu setzen.

2. Das Hubble-Gesetz

Vor der Beschreibung des Hubble-Gesetzes folgt zunächst eine kurze Erklärung des Skalenfaktors und der kosmologischen Rotverschiebung. Der zeitabhängige Skalenfaktor a beschreibt die relative Expansion des Universums, wobei zu beachten ist, dass die Expansion die Ausdehnung des Raums beschreibt, während die Galaxien fest in diesem Raum verankert sind. Der Zusammenhang zwischen Skalenfaktor und kosmologischer Rotverschiebung z lautet: $a = \frac{1}{z+1}$, wobei die kosmologische Rotverschiebung z die Verschiebung der Spektrallinien weit entfernter Objekte zum roten Ende des Spektrums beschreibt.

Hubble schloss auf das Hubble-Gesetz durch die Beobachtung verschiedener Galaxien. Es besagt, dass die kosmologische Rotverschiebung z mit der Entfernung D zunimmt. Das zentrale Gesetz der Kosmologie hat folgende Form:

$$c \cdot z = H_{(t)} \cdot D \quad , \quad (2.1)$$

wobei $H_{(t)}$ den Hubble-Parameter repräsentiert, welcher in folgender Form definiert ist: $H_{(t)} = \frac{\dot{a}}{a}$.

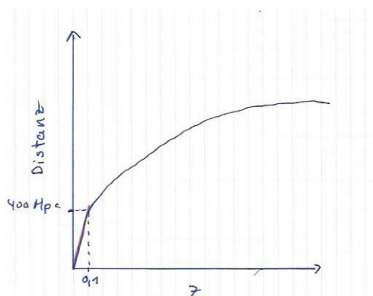


Abbildung 1: Handskizze des Hubble-Gesetzes angefertigt von Alexander Fritz. Hier ist die Distanz kosmologischer Objekte gegen ihre kosmologische Rotverschiebung aufgetragen.

In Abbildung 1 ist das Hubble-Gesetz aufgetragen. Bis zu einem $z \sim 0,1$ kann das Hubble-Gesetz linear approximiert werden, für größere Werte von z ist die Beschreibung komplizierter.

Für den linearen Teil des Hubble-Gesetzes bekommt man eine konstante Steigung $\frac{c}{H_0}$, wobei H_0 die Hubble-Konstante darstellt, welche heute einen Wert von $20,67 \frac{\text{km/s}}{\text{Lj}}$ hat.

3. Die Friedmann-Gleichungen

Die Friedmann-Gleichungen stellen die erste relativistische Beschreibung eines dynamischen Universums dar. Mit Hilfe geeigneter kosmologischer Parameter lassen sich verschiedene Szenarien für statische und dynamische Lösungen beschreiben. Man erhält die Gleichungen unter der Annahme einer konstanten Krümmung und durch Anwendung des kosmologischen Prinzips, welches besagt, dass das Universum homogen und isotrop ist. Die Friedmann-Gleichungen lauten

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad , \quad (3.1)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3P) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad . \quad (3.2)$$

Der Krümmungsparameter k kann drei verschiedene Werte annehmen. Für $k = 0$ erhalten wir ein flaches Universum, für $k > 0$ erhalten wir ein elliptisches Universum und für $k < 0$ erhalten wir ein hyperbolisches Universum. In Abhängigkeit von k erhalten wir verschiedene Lösungen eines materie-dominierten Universums mit einer verschwindenden kosmologischen Konstante Λ .

Vor dem Jahr 1998 haben Kosmologen ganz selbstverständlich die kosmologische Konstante $\Lambda = 0$ gesetzt, doch mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums liegt es nahe, dass diese Konstante einen von Null verschiedenen Wert besitzt. Die kosmologische Konstante entspricht einer Energiedichte des Vakuums, welche man als Dunkle Energie bezeichnet.

4. Die Entdeckung der beschleunigten Expansion

Im Jahre 2011 ging der Physiknobelpreis für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums an Saul Perlmutter den Leiter des *Supernova Cosmology Projects* und an Brian Schmidt und Adam Riess, beides Mitglieder des *High-Z Supernova Search Teams*. Beide Teams haben unabhängig voneinander Supernova Typ Ia Explosionen untersucht, um das Universum zu vermessen.

4.1 Supernova Typ Ia

Eine Supernova Typ Ia entsteht in einem Doppelsternsystem, bestehend aus einem Weißen Zwerg und einem massereichen Begleiter. Der Weiße Zwerg aggregiert im Laufe der Zeit Gas aus der äußeren Hülle des Begleiters, wodurch es zu Novaausbrüchen kommt, so dass der Wasserstoff des Gases fusioniert und die Fusionsprodukte zurückbleiben. Dies setzt sich solange fort, bis der Weiße Zwerg die Chandrasekhar-Grenze überschreitet und beginnt unter seiner Gravitation zu kollabieren. Durch den vorhandenen Kohlenstoff des Weißen Zwerges setzt abrupt eine Kohlenstoff-Kernfusion ein womit der Explosionsvorgang des Sterns beginnt. Bei der Explosion ist das Spektrum frei von Spektrallinien von Wasserstoff und Helium.

Supernovae Typ Ia sind deshalb interessant, weil sie sogenannte Standardkerzen darstellen. Eine Standardkerze ist ein astronomisches Objekt dessen absolute Helligkeit immer gleich ist und genau bekannt. Mit der Kenntnis der absoluten und der scheinbaren Helligkeit kann man die Entfernung mit Hilfe des Entfernungsmoduls bestimmen. Vergleicht man die Ergebnisse der vermessenen Supernovae, erkennt man, dass die scheinbare Helligkeit geringer und die Entfernung größer ist, als man es in materie-dominierten Universen mit verschwindender kosmologischen Konstante erwarten würde. Man kann dies nur dadurch erklären, dass das Universum beschleunigt expandiert. Eine große Schwierigkeit war das Auffinden solcher Explosionen, sodass eine effiziente Strategie entwickelt werden musste. Hierfür wurden zwei photometrische Aufnahmen eines Bereiches mit einem zeitlichen Abstand von drei Wochen gemacht. Wurde ein Helligkeitsanstieg verzeichnet, wurde die Quellen spektroskopiert um die Quelle als Supernova Typ Ia zu verifizieren. Bei einem positiven Ergebnis wurde die Quelle weiter intensiv photometriert, um die Lichtkurve der Supernova zu erhalten. Supernova Typ Ia werden anhand ihrer Lichtkurve analysiert. Bei der Analyse zeigte sich, dass hellere Supernovae eine breitere Lichtkurve aufweisen. Es musste folglich eine Methode gefunden werden die Lichtkurven zu normieren. Das Team um Saul Perlmutter führte hierfür einen Stretch-Faktor ein, welcher die Helligkeitsskala und die Zeitskala so skaliert, dass gut überdeckte Lichtkurven das Resultat sind und den Messungen idealer Standardkerzen entsprechen.

4.2 Analyse der Daten

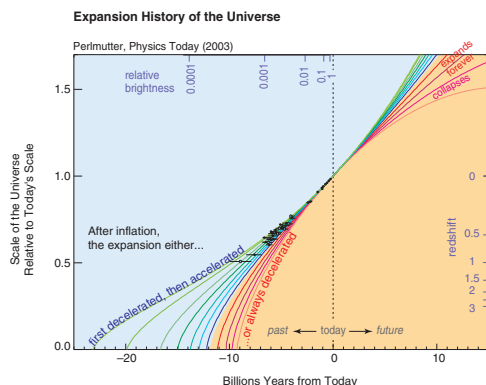


Abbildung 2: Expansionsgeschichte des Universums gemessen für stark rotverschobene Supernovae [1]

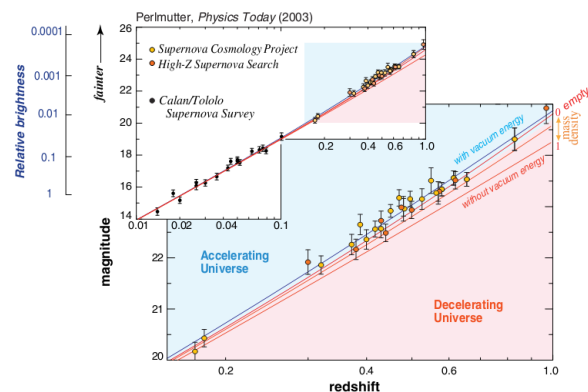


Abbildung 3: Hubble Diagramm: Beobachtete Helligkeit gegen Rotverschiebung für bekannte Distanzen [1].

In Abbildung 2 ist die Expansionsgeschichte des Universums für stark rotverschobene Supernovae ausgehend von einem flachen Universum aufgetragen. Die Kurven im blau hinterlegten Bereich repräsentieren eine Vakuumenergiedichte, welche den abbremsenden Effekt der Materiedichte kompensiert. Die Vakuumenergiedichte geht von 0,95 mal der kritischen Dichte (links) bis hin zu 0,4 mal der kritischen Dichte (rechts), wobei die kritische Dichte der mittleren Materiedichte entspricht, welche das Universum gerade so verlangsamt, dass es nicht unter der gravitativen Wechselwirkung der Materie rekollabiert. Die Kurven im orange hinterlegten Bereich repräsentieren ein materie-dominiertes Universum, in welchem die Materiedichte von 0,8 mal der kritischen Dichte (links) bis zu 1,4 mal der kritischen Dichte (rechts) verläuft. Die zwei äußersten Kurven

beschreiben ein Universum, welches in einem Big Crunch endet.

Trägt man nun die beobachtete Helligkeit gegen die Rotverschiebung auf, erhält man das in Abbildung 3 dargestellte Hubble Diagramm. Die roten Linien beschreiben ein Universum ohne Vakuumenergiedichte, dessen Materiedichte null ist (oberste rote Linie), bis zu einem Universum mit der kritischen Dichte. Den besten Fit stellt die blaue Linie dar. Die Linie verkörpert ein Universum, dessen Materiedichte ein Drittel und dessen Vakuumenergiedichte zwei Drittel der kritischen Dichte beträgt. Dies sind eindrucksvolle Hinweise auf eine beschleunigte Expansion des Universums.

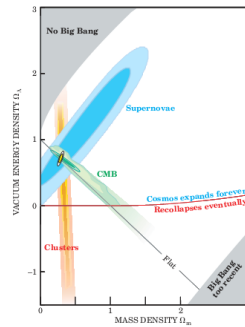


Abbildung 4: Messung der momentanen Verteilung der Vakuumenergiedichte und Massendichte.

Abbildung 4 stellt die Ergebnisse von drei unabhängigen Experimenten dar, welche die Verteilung der Vakuumenergiedichte und Materiedichte vermessen. Die drei Experimente überschneiden sich in einem Bereich. Die aktuellsten Werte betragen für $\Omega_\Lambda = 0,6911 \pm 0,0062$ und für $\Omega_M = 0,3089 \pm 0,0062$. Momentan wird mit dem *Large Synoptic Survey Telescope* im Norden von Chile gebaut ein neues Spiegelteleskop gebaut, welches weitere Supernovae aufspüren soll.

5. Fazit

Was genau die Dunkle Energie ist, kann mit dem aktuellen Stand der Physik nicht gesagt werden. Es gibt verschiedene Theorien welche die Dunkle Energie durch die Vakuumfluktuation beschreibt oder durch die sogenannte Quintessenz, welche möglicherweise durch das Higgs-Feld beschrieben werden kann. Abschließend kann gesagt werden, dass das Hubble Diagramm der vermessenen Supernovae nicht mit einem Universum verträglich ist, welches eine verschwindende kosmologische Konstante hat. Die Entdeckung der beschleunigten Expansion legt nahe, dass diese Konstante einen positiven Wert besitzt.

Literatur

- [1] Internetseite des Supernova Cosmology Projects ,<http://supernova.lbl.gov/>.
- [2] Internetseite des High-Z Supernova Search Teams,<http://www.cfa.harvard.edu/supernova/home.html>
- [3] Marek Kowalski, *Supernova Cosmology Today*,
http://physikseminar.desy.de/sites2009/site_physikseminar/content/e212/e91461/e101850/e103230/DESY_kowalski_feb2012.pdf
- [4] Wendy L. Freedman, *Das expandierende Universum*,
<http://www.spektrum.de/magazin/das-expandierende-universum/829888>