

Warum die *Dunkle Energie* eine *Fata Morgana* sein könnte.

von Dr. Peter Steffen

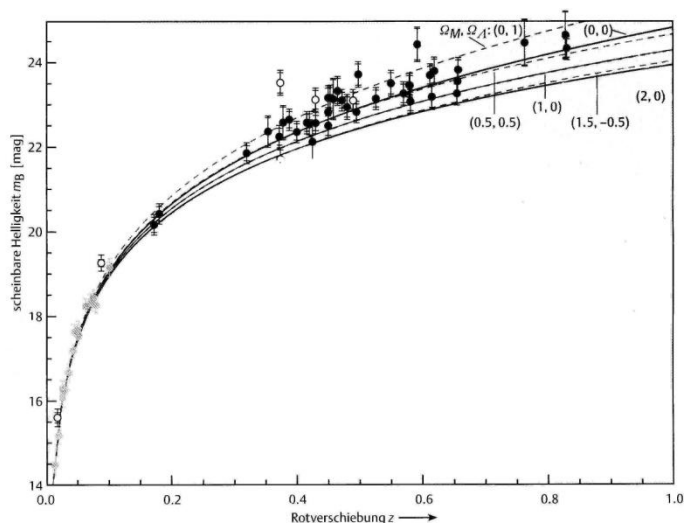
Überarbeitete Fassung vom 1. 8. 2014

Im Wesentlichen basiert die hypothetische Existenz der *Dunklen Energie* auf der Interpretation von Entfernungsbestimmungen an Supernovae des Typs Ia. Mitte der 90-er Jahre des vorigen Jahrhunderts stellte man aufgrund derartiger Messungen fest, dass weit entfernte Ia-Supernovae im Mittel lichtschwächer aufleuchten als man nach dem Hubble-Gesetz erwarten sollte. Die Astrophysiker schlossen daraus, dass die Objekte weiter entfernt sein mussten, als bis zu diesem Zeitpunkt aufgrund der kosmischen Rotverschiebung angenommen wurde und dass deshalb das Universum anscheinend seit geraumer Zeit beschleunigt expandiert [1]. Diese Erkenntnis traf die Kosmologen wie ein Schlag, da man dafür zunächst keinerlei Erklärung hatte. Es dauerte jedoch nur wenige Jahre, bis die Astrophysiker die Vorstellung entwickelten, dass die Beschleunigung der universellen Expansion auf eine bis dahin unbekannte Energie im Universum zurückgeführt werden könnte, die man dann als *Dunkle Energie* bezeichnete [2,3]. Aufgrund weiterer, vertiefender Untersuchungen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes fanden die Wissenschaftler heraus, dass das Universum flach sein muss und dass der Anteil der *Dunklen Energie* am Gesamtbudget des universellen Energie-/Massehaushalts etwa 73 % ausmacht [4]. Mit anderen Worten: Etwa dreiviertel des Inhalts des Weltalls besteht aus einer völlig unbekanntem Energie, die bisher, abgesehen von der angenommenen Beschleunigung der Expansion des Universums, noch immer keine physikalisch erfassbaren Spuren hinterlässt. Theoretisch kann man zwar die Existenz dieser Energie aus dem Quantenvakuum ableiten, jedoch ergibt sich dabei ein um den exorbitanten Faktor 10^{120} (!!!) zu hoher theoretischer Wert gegenüber der durch das Maß der universellen Beschleunigung bestimmten Größenordnung [5]. Einen Ausweg aus dieser Misere versuchte man dadurch zu finden, dass man der Dunklen Energie ein zeitlich veränderliches Feld zuordnete, das sich im Laufe der kosmischen Entwicklung abschwächte. Diese veränderliche Dunkle Energie wurde fortan "Quintessenz" genannt. Das Ganze ist aber bisher rein hypothetisch und nicht unbedingt überzeugend. Unter anderem deshalb denken mittlerweile einige Astrophysiker über mögliche Alternativen zur *Dunklen Energie* nach [6,7, 8].

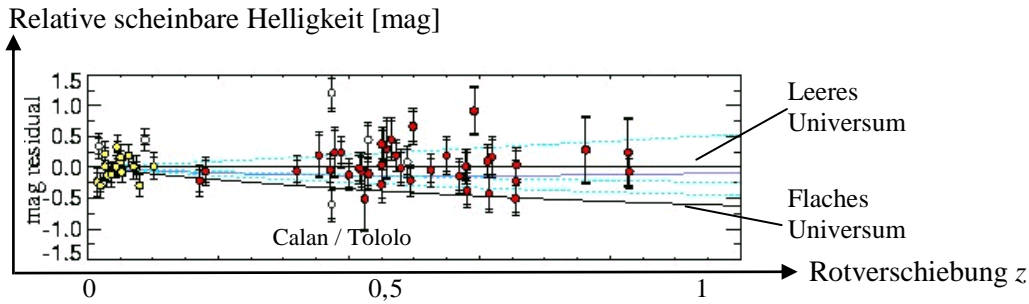
Fakt ist, dass bisher die Kosmologen aus den nachfolgenden Diagrammen (Fig.1, Fig. 2, 2a) geschlossen haben, das Hubble-Gesetz werde nur dann durch die Messdaten in etwa bestätigt, wenn man eine beschleunigte Expansion des Universums annimmt. Allerdings ist diese

Figur 1:

Die gemessenen Helligkeiten m der Supernovae, Typ Ia, als Funktion der Rotverschiebung z . Die eingezeichneten Kurven sind für Weltmodelle mit unterschiedlichen Dichteanteilen gravitierender Materie (Ω_M) und einem beschleunigend wirkenden Anteil (Ω_Λ) berechnet.
Quelle:
Calan / Tololo, (Hamuy et al., A. J. , 1996

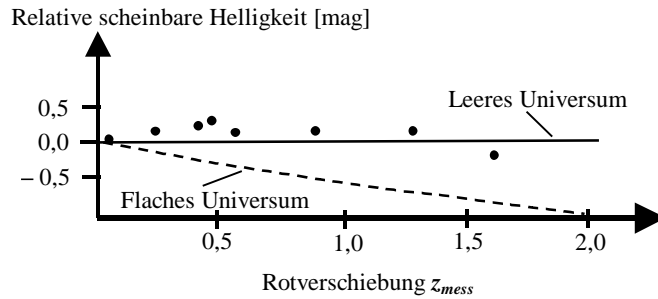


Interpretation wegen der erheblichen Fehlerbalken und der relativ großen Streuung der Messwerte nicht ganz unzweifelhaft. Ziemlich sicher scheint jedoch zu sein, dass die Messwerte im Bereich der Kurve für das leere, also Energie- / Materie-freie Universum liegen.



Figur 2:
Abweichungen der Messergebnisse nach Figur 1 relativ zum leeren Universum ($\Omega_M = 0, \Omega_\Lambda = 0$).
Die untere Kurve zeigt den theoretischen Verlauf für das flache Universum. Quelle: Calan / Tololo.

Figur 2a:
Gemittelte Abweichungen der Messergebnisse von Figur 2 (erweiterter Bereich bis $z = 2$) relativ zum leeren Universum nach Figur 2 (Calan / Tololo).



Wie Figur 2 bzw. 2a zeigen, weichen die Messwerte jedenfalls deutlich von der Kurve des flachen Universums ab, wenn man die klassischen Friedmann-Modelle zugrunde legt. Die Frage ist nun: Ist der aus Figur 1 und 2 gezogene Schluss, dass das Universum bis zu einer Rotverschiebung von $z \approx 1,3$, d. h. seit geraumer Zeit, beschleunigt expandiert, wirklich die einzig mögliche Interpretation oder kann man auch eine ganz andere Vorstellung daraus entwickeln ? Eine solche könnte sich durch folgende Zusammenhänge ergeben:

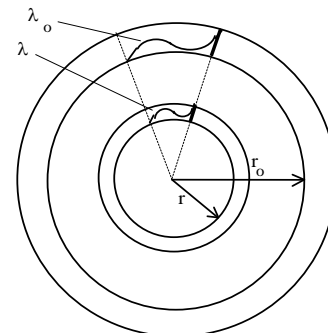
Allgemein gilt für elektromagnetische Wellen : $\lambda \cdot \nu = c$ (1)

(λ = Wellenlänge, ν = Frequenz, c = Phasengeschwindigkeit des Lichts).

Damit ist wegen der geforderten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$(\lambda_o/\lambda_e) \cdot (\nu_o/\nu_e) = 1. \quad (2)$$

Dabei kennzeichnen die Indices o und e die jeweiligen Größen am Empfänger heute und am Emittor in der Vergangenheit. Wie bekannt, wird die kosmische Rotverschiebung durch die Änderung der Ausmaße des Weltalls verursacht. Sie folgt damit rein geometrisch dem Hubble-Gesetz (vergl. Fig. 3).



Figur 3 : Dehnung einer Welle durch Expansion des Raumes.
(Vergrößerung der Wellenlänge)

Aus (2) folgt mit der Definition der Rotverschiebung $z = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$:

$$\underline{z + 1 = \tau_o / \tau_e} \quad (3)$$

wobei $\tau = 1/v$ die Periodendauer einer Welle bedeutet. Die kosmische Rotverschiebung ist danach ein Maß für die räumliche Expansion des Universums. Sie wird durch den Skalenfaktor $a(t) = r(t)/r_o(t)$ beschrieben, wobei $r(t)$ die Radialkoordinate eines dreidimensionalen Volumenelements im 4-dim. Raum und $a(t)$ das zeitlich variable Verhältnis des Abstands zwischen zwei derartigen Elementen ist.

Nach dem Hubble-Gesetz gilt nun für die Verknüpfung der Rotverschiebung mit Raum und Zeit für das absolut leere, also gravitationsfreie Weltall [9, S. 187], folgende Beziehung:

$$a(t_e) = r(t_e)/r(t_o) = t_e/t_o \quad \rightarrow$$

Milne-Modell:

$$z + 1 = 1/a(t_e) = \lambda_o/\lambda_e = r_o/r_e = t_o/t_e$$

Daraus folgt, dass man im irrealen Sonderfall eines leeren Universums (*Milne-Modell*) folgende Gleichung erhält:

$$\tau_o/\tau_e = t_o/t_e \quad (4)$$

In diesem exzeptionellen Fall gilt also $\underline{z + 1 = t_o/t_e}$. (4a)

Betrachtet man hingegen ein anderes Modell-Universum, z. B. das Einstein-de Sitter-Modell (E.d.S.), so gilt [9, S. 185ff]:

$$a(t_e) = r(t_e)/r(t_o) = (t_e/t_o)^{2/3}$$

Daraus folgt mit:

$$z + 1 = \lambda_o/\lambda_e = \tau_o/\tau_e = 1/a(t_e)$$

für das E.d.S.-Modell:

$$\tau_o/\tau_e = (t_o/t_e)^{2/3} \quad (5)$$

also

$$\underline{z + 1 = (t_o/t_e)^{2/3}} \quad (5a)$$

In diesem Fall und in allen anderen außer dem leeren Weltall gilt Gleichung (4) **nicht**. Dabei wird stets die Lichtgeschwindigkeit c , wie bisher, selbstverständlich als absolut konstant vorausgesetzt.

Andererseits zeigen die Figuren 1 und 2, dass die Entwicklung des realen Universums etwa konform zum Milne-Modell verläuft, was zur Annahme berechtigt, dass Gl. (4) und nicht (5) erfüllt wird. Dies widerspricht aber unter den bisherigen Voraussetzungen der Lemaitre-Gleichung: $z + 1 = 1/a(t)$ für ein realistisches Modell. Dieser Widerspruch lässt sich jedoch wie folgt aufheben:

Wenn man nämlich in der Grundgleichung (1): $\lambda \cdot v = c$ die Lichtgeschwindigkeit als kosmisch veränderlichen Parameter zulässt, dann kann man Gl. (2) verallgemeinert in der Form schreiben:

$$\underline{(\lambda_o/\lambda_e) \cdot (v_o/v_e) = (c_o/c_e)} \quad (6)$$

Daraus folgt für das leere Universum: $z + 1 = t_o/t_e = \tau_o/\tau_e \quad (c_o/c_e = 1)$

Ferner folgt für das E.d.S.-Universum: $z + 1 = (t_o/t_e)^{2/3} = (\tau_o/\tau_e) \cdot (c_o/c_e) \quad (7)$

Nehmen wir nun an, dass das E.d.S.-Universum Realität wäre, dann müssten bei konstantem c die Messungen ein Diagramm ergeben, das den Verlauf der Expansion eines flachen Universums nach dem Hubble-Gesetz zeigt. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie am Messdiagramm in Figur 1 u. 2 abzulesen ist, das im Wesentlichen ein leeres Weltall widerspiegelt. Diese Diskrepanz kann nun wie folgt aufgehoben werden:

Nach Gleichung (7) gilt: $\tau_o/\tau_e = (c_e/c_o) \cdot (t_o/t_e)^{2/3}$

Nach dem Milne-Modell (\approx Messdiagramm) müsste aber die Bedingung $\tau_o/\tau_e = t_o/t_e$ erfüllt sein. Dies ist nur dann möglich, wenn in (7) $c_e = c_o \cdot (t_o/t_e)^{1/3}$ gesetzt wird.

Daraus folgt:
$$\underline{c \sim t^{-1/3}} \tag{8}$$

Das heißt: Das Messdiagramm der Figuren 1 u. 2 kann ohne weiteres ein E.d.S. - Universum widerspiegeln, wenn man die bisher als unumstößlich konstant angesehene Lichtgeschwindigkeit auf kosmischen Skalen gemäß der Proportionalität $\underline{c \sim t^{-1/3}}$ als veränderlich annimmt.

Da das z in Gl. (4a) u. (5a) allein auf die geometrisch bedingte Expansion des Weltalls zurückzuführen ist, wird es im Folgenden als z_{exp} bezeichnet. Dieses z_{exp} kann dann aber nicht die gemessene Rotverschiebung z_{mess} des realen Weltalls sein, weil es allein auf dem Hubble-Gesetz basiert, das ja ein konstantes c voraussetzt und somit Gl. (8) nicht genügt. z_{mess} kann also nicht allein dem Hubble-Gesetz folgen. Vielmehr muss im Fall des flachen Universums Gleichung (2) durch die Beziehung (6): $(\lambda_o/\lambda_e) \cdot (v_o/v_e) = c_o/c_e$ ersetzt werden. Die Verringerung der Lichtgeschwindigkeit mit zunehmendem Alter des Universums müsste sich dann entsprechend Formel (8) durch eine zusätzliche Rotverschiebung z_{ret}^* bemerkbar machen, welche nur durch die gravitativ bedingte Abbremsung der universellen Expansion verursacht werden kann. Unter der, nach Figur 1 und 2 begründeten Annahme, dass das Helligkeits- / Rotverschiebungsdiagramm des realen Weltalls dem Hubble-Diagramm für das leere Universum entspricht, erhält man damit folgende Beziehungen für das modifizierte E.d.S.-Universum:

$$\begin{aligned} t_o/t &= v/v_o = z_{mess} + 1, \\ (t_o/t)^{2/3} &= \lambda_o/\lambda_e = z_{exp} + 1, \\ (t_o/t)^{1/3} &= c/c_o \stackrel{Def}{=} z_{ret} + 1 \end{aligned}$$

Wenn man also c als kosmisch veränderlich zulässt, erhält man verallgemeinert die wichtige Beziehung:

$$\underline{z_{mess} + 1 = (z_{exp} + 1) \cdot (z_{ret} + 1)} \tag{9},$$

wobei allgemein gilt : $z_{mess} + 1 = t_o/t, \quad z_{exp} + 1 = (t_o/t)^x, \quad z_{ret} + 1 = (t_o/t)^{1-x}$

Das bedeutet, dass die kosmische Rotverschiebung z_{mess} , die wir messen, auf jeden Fall aus zwei Anteilen zusammengesetzt sein muss, und zwar aus der rein geometrisch expansionsbedingten Rotverschiebung z_{exp} und einem gravitationsbedingten Anteil z_{ret} . Dabei überlagern sich $z_{exp} + 1$ und $z_{ret} + 1$ multiplikativ, sodass sie zusammen immer $z_{mess} + 1$ ergeben.

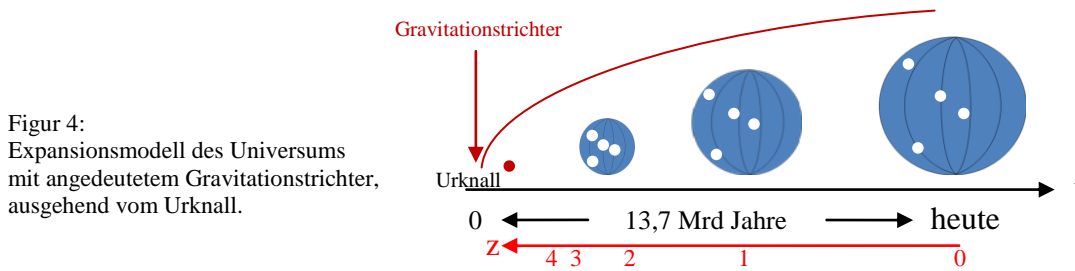
Dieses Ergebnis ist nun physikalisch folgendermaßen zu interpretieren:

Wie bekannt, gibt es außer der expansionsbedingten Rotverschiebung auch noch eine gravitative Rotverschiebung, die auf den Energieverlust der elektromagnetischen Strahlung beim Verlassen eines Gravitationsfeldes zurückzuführen ist. Das heißt, salopp gesprochen, die Photonen müssen aus dem ‘Potentialtopf’ der Gravitation ‘herausklettern’, und das kostet sie Energie. Dies macht sich in einer entsprechenden Rotverschiebung des Spektrums bemerkbar. Da die mittlere Materie- / Energiedichte im Universum durch die Expansion des Weltalls im Laufe kosmischer Zeiten abgenommen hat, muss das Licht, das uns heute aus der tiefen Vergangenheit erreicht, ein immer schwächer werdendes Gravitationsfeld durchlaufen haben (vergl. Fig. 4). Da nach dem kosmologischen Prinzip das Weltall aber räumlich homogen ist, kann ein solches Gravitationsfeld nur auf raumzeitlicher Basis existieren. Durch dieses, sich raumzeitlich abschwächende Gravitationsfeld müsste das Licht dann auf seinem Weg vom frühen Universum zur Gegenwart zusätzlich zur rein

* Der Index ‘ret’ steht für retardiert, d. h. verzögert

expansionsbedingten Rotverschiebung z_{exp} einen weiteren, gravitativ bedingten Energieverlust erlitten haben. Diese zusätzliche Rotverschiebung, im Beitrag z_{ret} genannt, wird aber im Hubble-Gesetz nicht erfasst.

Zweidimensionales Expansionsmodell



Figur 4:
Expansionsmodell des Universums
mit angedeutetem Gravitationstrichter,
ausgehend vom Urknall.

Da nun bisher allgemein angenommen wurde und immer noch wird, dass die gemessene Rotverschiebung allein dem klassischen Hubble-Gesetz folgt, muss nach bisheriger Auffassung $z_{mess} \equiv z_{exp}$ sein. Dies kann aber nach Gleichung (6), also bei veränderlicher Lichtgeschwindigkeit nur für das absolut leere Universum gelten. Da sich aber, wie in Figur 1 und 2 nahegelegt, das Helligkeits-/ Rotverschiebungsdiagramm des realen Weltalls mit dem entsprechenden Diagramm für das absolut leere, gleichförmig expandierende Universum deckt, sollte auch für das flache Universum die Beziehung $z_{mess} \equiv {}^{leer}z_{exp}$ * gelten. Demnach müsste die gemessene kosmische Rotverschiebung z_{mess} immer und unter allen Umständen (!) das Hubble-Diagramm für das leere Weltall liefern. Das führt zu dem Schluss, dass Gleichung (9) die realen Verhältnisse im gesamten beobachtbaren Universum beschreibt. Das Universum würde demnach bezüglich seiner Dynamik ein E.d.S.-Universum sein.

Auf der Grundlage dieses Ergebnisses würde sich dann aber die Notwendigkeit einer *Dunklen Energie* erübrigen, da die Messwerte in Figur 1 immer dem Verlauf der Kurve nach Formel (4a) für das leere Universum folgen müssen und dies auch im Wesentlichen tun. Somit ist es nicht notwendig eine derzeitige Beschleunigung der Expansion des Weltalls anzunehmen, um die Messergebnisse von Figur 1 und 2 zu bestätigen. Die vergleichsweise geringen Abweichungen der Messwertschwerpunkte in Figur 2a vom leeren Weltall lassen sich, sofern es sich nicht ohnehin um Messungenauigkeiten handelt, leicht z. B. durch zusätzliche gravitative Inhomogenitäten in unserer weiteren kosmischen Umgebung erklären. Das bedeutet allerdings auch, dass die gemessene Rotverschiebung z_{mess} allein keine unmittelbare Aussage über die Dynamik des Universums liefert.

Fazit:

Aus den beschriebenen Rechnungen geht hervor, dass die gemessene kosmische Rotverschiebung z_{mess} nicht allein dem Hubble-Gesetz folgen kann. Dabei zeigt sich, dass die bisher als absolut zeitinvariant erachtete Lichtgeschwindigkeit auf kosmischen Skalen veränderlich sein müsste! Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass die Werte der gemessenen Rotverschiebung z_{mess} zwangsläufig immer dem Hubble-Diagramm des leeren Universums folgen sollten. Die Messwerte im Hubble-Diagramm liefern dann aber keine direkten Aussagen über die Dynamik des Weltalls. Genau dies scheint sich im Entfernungs-Rotverschiebungsdiagramm von weit entfernten Ia-Supernovae abzuzeichnen. Geht man davon aus, dass z_{mess} nicht nur rein geometrisch, sondern auch zusätzlich durch die mit fortschreitender Zeit auf kosmischen Skalen abnehmende Gravitation bedingt ist, würde das Weltall keineswegs beschleunigt expandieren, sondern abgebremst, wie es bis zur Mitte der

* ${}^{leer}z_{exp} = z_{exp}$ des leeren Weltalls

1990-er Jahre angenommen wurde. Somit würde die Notwendigkeit einer *Dunklen Energie* zur Erklärung der Dynamik des Universums entfallen. Die Beschleunigung der Expansion des Weltalls wäre demnach eine Fata Morgana und damit dann wohl auch die *Dunkle Energie*.

Anmerkung des Verfassers:

In meinem Buch "*Zeit, die vierte Dimension des Universums*", habe ich die gezeigten Zusammenhänge aus einer anderen Sicht in größerem Rahmen als Hypothese beschrieben [10].

Literatur:

- [1] Schulz, Hartmut
Dunkle Energie
Zeitschrift "Sterne und Weltraum", Nr. 10, S. 854ff, 2001
- [2] Wetterich, Christof
Dunkle Mächte
C:\Astrophysik\Dunkle Mächte - Universität Heidelberg.htm 2003
- [3] *Supernovae, Dark Energy and the Accelerating Universe*
Perlmutter, Saul
www.physicstoday.org 2003
- [4] Matthias Bartelmann
Cosmic Background Radiation and its Interpretation
www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/gradTueb.pdf 2003
- [5] Davies, Paul
Der kosmische Volltreffer
CampusVerlag, Frankfurt / New York, S. 189ff, 2008
- [6] Clifto, Timothy u. Ferreira, Pedro G.
Wozu Dunkle Energie ?
Spektrum der Wissenschaft, Nr. 8, S. 26ff 2009
- [7] Stefanie Phleps
Schallwellen in der Ursuppe, Der Schlüssel zur Dunklen Energie?
Zeitschrift "Sterne und Weltraum", Nr. 10, S. 39 2009
- [8] Leith Ben, Ng Cindy, Wiltshire David
Gravitanional Energie as Dark Energie: Concordance of Cosmological Tests
Astrophysical Journal 672, L91 – L94, Januar 10 2008
- [9] Layzer, David
Das Universum
Spektrum Verlag, Heidelberg / Berlin 1984

[10] Steffen, Peter
Zeit, die vierte Dimension des Universums
Tectum Verlag, Marburg

2009

Peter Steffen

Dank.

Ich möchte Herrn Dr. David Walker, Leiter der Sternwarte Lübeck, dafür danken, dass er mich auf einige Fehler in der ersten Fassung dieses Artikels aufmerksam gemacht hat. Dies hat mich veranlasst, den Beitrag entsprechend zu überarbeiten und erneut zur Diskussion zu stellen.

Peter Steffen