Einfluss der variablen Lichtgeschwindigkeit auf die kosmische Zeitskala.

von Dr. Peter Steffen (AVL)

Fassung vom 01. 3. 2021

Im ersten Beitrag dieser Rubrik *Astrophysik Spezial* [7] wurde gezeigt, dass sich unter der Annahme einer zeitlich veränderlichen Lichtgeschwindigkeit für ein modifiziertes Einstein-de Sitter (E.d.S.)-Modell des Universums die Existenz einer Dunklen Energie erübrigt. Dies hat zur Folge, dass eine zeitlich variable Lichtgeschwindigkeit entsprechend der Abhängigkeit $c \sim t^{-1/3}$ auch Konsequenzen auf die Zeitskala, insbesondere des frühen Universums hat, die ich im Folgenden näher betrachten möchte.

Mit dem Standardmodell der Kosmologie (*ΛCDM* oder *Konkordanz-Modell*) [3, 4, 6] stellt sich kosmologisch die zeitliche Entwicklung des Universums wie folgt dar:

Die Auswertung der Daten der ´*Planck*´-Sonde in Verbindung mit dem derzeitigen Standard-modell der Kosmologie hat ergeben, dass das Universum vor rund 13,8 Milliarden Jahren mit dem Urknall entstand. Da die physikalischen Gesetze für die extremen Bedingungen während der ersten etwa 10^{-43} Sekunden (Planck-Zeit) nach dem Urknall nicht bekannt sind, können die Abläufe im gerade geborenen Universum erst nach der Planck-Zeit physikalisch nachvollzogen werden.
Danach, etwa 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall, fand ein Symmetriebruch statt, der das Universum in größenordnungsmäßig 10^{-32} Sekunden inflationär um etwa den Faktor 10^{50} aufblähte. Dadurch wurde das ganz frühe Universum sozusagen “glatt gebügelt“, sodass es sich de facto flach und auf großen Skalen so gut wie perfekt homogen darstellt. Nach dieser inflationären Phase [2] expandierte das Universum nur noch vergleichsweise langsam weiter, wobei es durch die Gravitation seines Energie- und Materie-Inhalts mit der Dichte ρ zunächst abgebremst wurde und seit etwa 5 bis 6 Milliarden Jahren sogar wieder zunehmend beschleunigt zu expandieren scheint. Dabei wird aus Sicht der Gegenwart in die Vergangenheit eine lineare Zeitskala und selbstverständlich ein konstantes *c* vorausgesetzt.
Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt die Energie-/Materiedichte ρ die Geometrie des Universums. Entspricht ρ einer kritischen Dichte ρ_{kr}, so erscheint das Universum geometrisch flach (euklidisch). Genau diese “Flachheit“ des Universums wird heute aus einer Reihe beobachteter kosmischen Parameter abgeleitet und als gegeben angesehen. Nach den bisherigen Abschätzungen des Materieinhalts des Universums ergibt sich allerdings, dass die Materiedichte ρ_m weit unter der krischen Dichte ρ_{kr} liegt. Es fehlt also Masse, um das Universum flach zu machen. Dieser Fehlbetrag wird nach dem Konkordanzmodell rein theoretisch durch die sogenannte *Dunkle Energie* gedeckt, die etwa 70 % des gesamten Inhalts des Universums ausmachen soll. Die hypothetische Existenz der *Dunklen Energie* basiert auf der Interpretation von Entfernungsbestimmungen Mitte der 1990-ger Jahre mittels Ia-Supernovae. Diese leuchten nämlich gemittelt lichtschwächer auf, als man nach dem Hubble-Gesetz damals erwartete. Daraus schloss man, dass das Universum, getrieben durch die rein hypothetisch geforderte Dunkle Energie, seit geraumer Zeit beschleunigt expandiert. Dies wäre jedoch nach meiner Hypothese im Beitrag [7] ein Trugschluss.

Eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der Dynamik des Universums spielt der Hubble-Parameter $H(t) = \dot{a}(t)/a(t)$, (a = Skalenfaktor, $\dot{a} = da/dt$). $H_o = H(t_o)$ ist die Hubble-Konstante.

Sie beschreibt die heutige Expansionsrate des Universums als Steigung im 0-Punkt des sogenannten Hubble-Diagramms. Das folgende Bild 1 zeigt dieses Diagramm, das den Entfernungsmodul als Funktion der Rotverschiebung für das absolut leere, gleichförmig expandierende Weltall (Milne-Modell) im Vergleich zum E.d.S.- und *Konkordanz*-Modell darstellt [8]. Eingetragen sind die realen, gemittelten Messwerte als dicke Punkte, sowie die Rauten, zur Markierung des Konkordanz-Modells. Die durchgezogene Linie zeigt den Graphen des Milne-Modells unter Berücksichtigung der Raumkrümmung und als gestrichelte Kurve ohne räumliche Krümmung. Ferner folgt die gepunktete Linie dem Modell des E.d.S.-Universums.

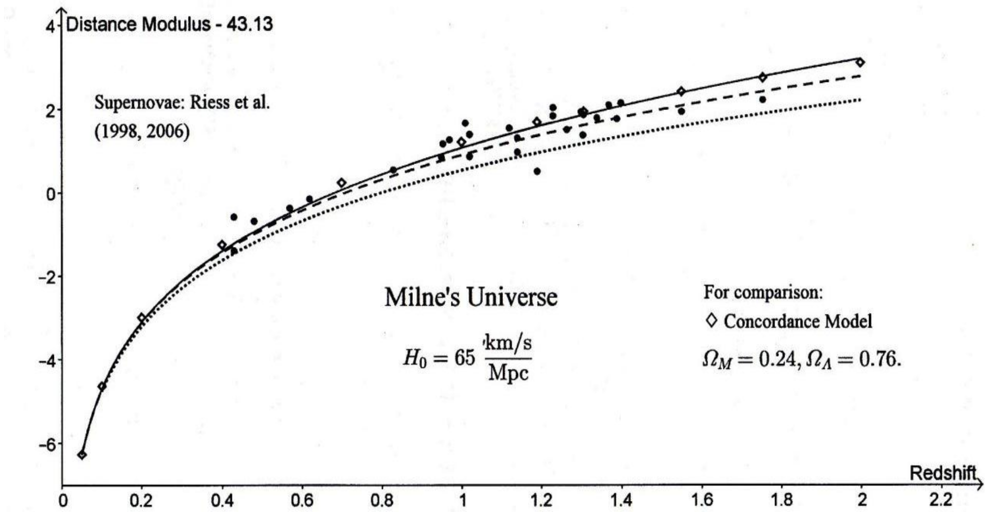


Bild 1:
••••••• Punkte verarbeiteter Messwerte
- - - - Milne-Universum unter Berücksichtigung der Raumkrümmung
- - - - Milne-Universum ohne Berücksichtigung der Raumkrümmung
········ E.d.S.-Universum
◊◊◊◊◊ Konkordanzmodell

Auffällig an Bild 1 ist zunächst einmal, dass bei einem H_o = 65 km/(s.·Mpc)* das Konkordanzmodell mit dem Milne-Modell unter Berücksichtigung der Raumkrümmung (durchgezogene Kurve) fast perfekt übereinstimmt. Ferner scheinen die “Messpunkte“ das Milne-Modell ohne Berücksichtigung der Krümmung (gestrichelte Kurve) recht gut widerzuspiegeln.

Das Milne-Modell ohne Berücksichtigung der negativen Krümmung (k = -1) ist allerdings unter der alleinigen Zugrundelegung des Hubble-Gesetzes nicht zulässig. Wenn wir jedoch davon ausgehen, dass uns das leere Universum nur vorgetäuscht wird (vergl. [7]), kann der Graph des Milne-Modells durchaus dem eines flachen Universums ohne Krümmung entsprechen. Der Grund dafür ist, dass die Auswertung der Messungen der Rotverschiebung z_{mess} entsprechend dem Hubble-Gesetz uns zwar zu große Entfernungen vortäuschen kann, nicht aber veränderte Winkel**. Das heißt: Folgt unser Universum dynamisch in Wirklichkeit dem E.d.S.- Modell,

* Ungeachtet der derzeitigen Diskussion um die Hubble-Konstante H_o sind dies in etwa die Daten der ´*Planck*´-Sonde.

** Die Krümmung des Universums lässt sich durch den Lagewinkel des beobachteten höchsten Resonanzmaximums akustischer Schwingungen im Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrundes (CMB) bestimmen. Dieses Maximum wird bei 1° (Winkelgrad) beobachtet, was bedeutet, dass das reale Universum näherungsweise flach ist, also die Krümmung null hat.

wie ich behaupte, so wird dessen Metrik nicht verändert, wenn man z_{mess} fälschlicherweise als z_{exp} interpretiert, und somit das Hubble-Diagramm eines leeren Weltalls erhält. Anders ausgedrückt: Wenn man z_{mess} als z_{exp} interpretiert, – wie es bislang geschieht –, so erhält man eine Chimäre aus einem flachen und einem leeren Universum, das dem Graphen des Milne-Modells ohne Raumkrümmung folgt. Dies wird durch die Messwerte der Rotverschiebung in Bild 1 gestützt, die recht gut mit dem Verlauf des gestrichelt gezeichneten Graphen übereinstimmen. Damit wird uns ein leeres Universum ohne Raumkrümmung vorgetäuscht. Daraus kann man schließen, dass z_{mess} nicht allein dem Hubble-Gesetz folgt (vergl. [7]). Unter der Annahme einer, auf kosmischen Skalen zeitlich veränderlichen Lichtgeschwindigkeit folgt daraus der in [7] abgeleitete Zusammenhang:

$$\boldsymbol{z_{mess} + 1 = (z_{exp} + 1)\cdot(z_{ret} + 1)} \quad \text{mit} \quad \mathbf{z_{mess} + 1 = t_o/t_e}\,. \qquad (1)$$

Dabei bedeuten: $\boldsymbol{z_{mess}}$ = Gemessene Rotverschiebung, $\boldsymbol{z_{exp}}$ = Rotverschiebung gemäß Hubble-Gesetz, $\boldsymbol{z_{ret}}$ = retardierungsbedingte Rotverschiebung. Die Indices o und e kennzeichnen die jeweiligen Größen am Empfänger in der Gegenwart und am Emitter in der Vergangenheit.

Die Annahme $z_{mess} + 1 = t_o/t_e$ bedeutet zunächst nur, dass die gemessene Rotverschiebung nicht allgemein die wahren Zeitverhältnisse im Universum darstellt. Nur im speziellen Fall des leeren, gleichförmig expandierenden Weltalls (Milne-Modell) entspricht die Beziehung $z_{mess} + 1 = t_o/t_e$ dem zugrunde gelegten Modell. Wenn man aber den Zusammenhang zwischen dem realen und dem leeren Universum kennen würde, so könnte man aus der Beziehung $z_{mess} + 1 = t_o/t_e$ die wahren Zeitverhältnisse ermitteln. Dies ist jedoch nur für spezielle Abhängigkeiten ohne weiteres möglich. Dazu gehört auch das E.d.S.-Modell. Für dieses Modell erhalten wir dann folgende Beziehungen:

Radialkoordinate eines Volumenelements

$$R(t) = R_o \cdot (t/t_o)^{2/3} \quad \text{(vergl. [4, S. 187])}$$

Der Index o bezieht sich immer auf die Gegenwart.

Hubble-Parameter $\quad H(t) = \dot{a}/a$ mit $a = R(t)/R_o$ = Skalenfaktor, $(\dot{a} = da/dt)$ $\rightarrow$

$$H(t) = (1/a)\cdot da/dt\,; \quad da/dt \sim (dR/dt)/R_o = (\tfrac{2}{3}\cdot t^{-1/3})/(t_o^{2/3})$$

Mit der Definition $H(t) = 1/t_H$ erhält man dann:

E.d.S.-Modell: $\quad H(t) = \tfrac{2}{3} \cdot 1/t = 1/t_H \quad \rightarrow \quad \boxed{\mathbf{t = \tfrac{2}{3} \cdot t_H}} \qquad (2)$

Dabei ist t_H die sogenannte Hubble-Zeit. Diese bezieht sich immer auf ein leeres, gleichförmig expandierendes Universum, also auf das Milne-Modell. Dementsprechend gilt für das

Milne-Modell: $\quad H(t) = 1/t = 1/t_H \quad \rightarrow \quad \boxed{\mathbf{t = t_H}} \qquad (3)$

Wenn man die Beziehung (2) für das E.d.S.-Universum verallgemeinert (vergl. [7]), dann erhält man für ein Modell der Form $R(t) = R_o \cdot (t/t_o)^b$ unmittelbar die Relation:

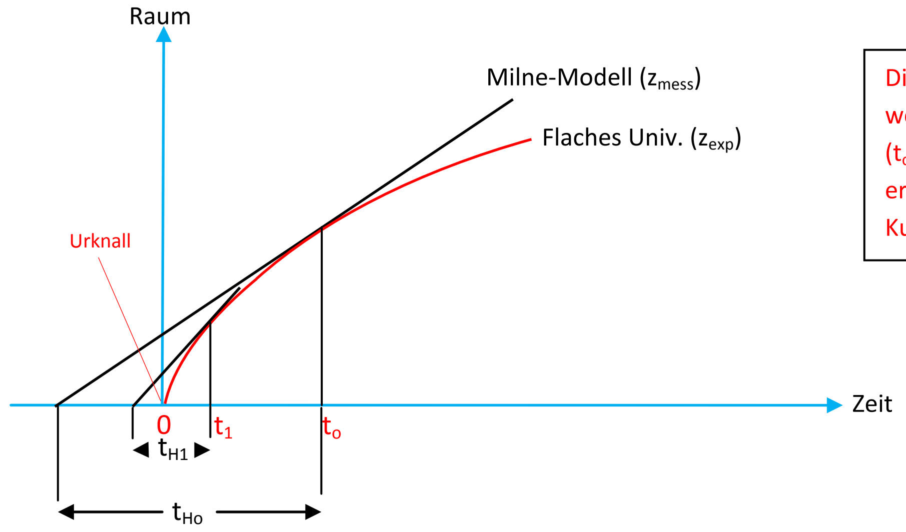
$$\boxed{\mathbf{t = b \cdot t_H}} \qquad (4)$$

Das heißt: Für alle $R(t)/R_o = (t/t_o)^b$ erhält man die lineare Beziehung (4).

Allgemein gilt: $H(t) = 1/t_H$; also $H_o = 1/t_{Ho}$. Dabei ist die Zeit t_{Ho} das Alter eines völlig gleichförmig expandierenden, also absolut leeren Universums (Milne-Modell). Gehen wir nun davon aus, dass das E.d.S.- Modell die wahren Verhältnisse im Universum widerspiegelt, wir aber messtechnisch nur gemäß Formel (1) das Verhältnis t_o/t_e erfassen können, uns also ein leeres Weltall vorgetäuscht wird, so erhalten wir:

$$\boxed{\mathbf{z_{mess} + 1 = t_o/t_e = t_{Ho}/t_{He}}} \qquad (5)$$

Der lineare Zusammenhang von Gleichung (5) erklärt auch die merkwürdige und höchst unwahrscheinliche Tatsache, dass ausgerechnet zum heutigen Zeitpunkt t_o das Verhältnis von realem Alter des Universums zu dessen Hubble-Alter recht genau gleich zu sein scheint. Nach der obigen Beziehung (5) müsste dies nämlich für jedes beliebige Zeitalter der Fall sein und wäre somit nicht unwahrscheinlich, sondern selbstverständlich. Die nachfolgende Skizze (Bild 2) zeigt am Beispiel eines flachen Universums die Verhältnisse für die diskreten Zeiten t_o und t_1.



Die Skizze ist nur qualitativ zu werten.
($t_o/t_1 = t_{Ho}/t_{H1}$ ist im Bild nicht erfüllt, da die rot ausgezogene Kurve nicht modellkonform ist.)

Bild 2: Expansionsverlauf des Milne-Modells und eines flachen Universums.

Mit der Rotverschiebung $z_{mess} + 1$ messen wir also nicht nur das Verhältnis der Hubble-Zeiten zu verschiedenen Zeitpunkten t der universellen Entwicklung, sondern auch das reale Verhältnis t_o/t_e. Da auch die gravitationsbedingte Rotverschiebung z_{ret} zu einer Dehnung der Wellen führt, ist der Wert von z_{mess} insgesamt für die Wellenlängenvergrößerung verantwortlich. Damit ändert sich auch die Zeitskala für das flache Universum gegenüber der bisherigen Theorie. Das bedeutet z. B. konkret für die Datierung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes (CMB) an der *Last Scattering Surface* (LSS) des flachen Universums:

Bisherige Datierung: $z + 1 = (t_o/t_{LSS})^{2/3}$ (vergl. [4, S. 187])

CMB: $z + 1 \cong 1100$ ($z + 1 \approx 3000$ K / 2,73 K)

$t_o = 13{,}8 \cdot 10^9$ Jahre →

$\mathbf{t_{LSS} = 378\,258}$ **Jahre**

Neue Datierung: $z_{mess} + 1 = \mathbf{(z_{exp} + 1) \cdot (z_{ret} + 1)} = t_o/t_{LSS}$

$z_{mess} + 1 \cong 1100$ ($z_{mess} + 1 \approx 3000$ K / 2,73 K)

$t_o = 13{,}8 \cdot 10^9$ Jahre →

$\mathbf{t_{LSS} = 12{,}55\ 10^6}$ **Jahre**

Das bedeutet: Nach der neuen Datierung wäre das Universum erst etwa 12.6 Mio. Jahre nach dem Urknall durchsichtig geworden, also rund 12,2 Mio. Jahre später als bisher angenommen wird.

Damit hätte sich die Zeitspanne, in der sich die Quantenfluktuationen 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall zu den Dichtfluktuationen im CMB entwickelt haben, um etwa den Faktor 33 vergrößert.

Die weitere Entwicklung der winzigen Dichtefluktuationen in der Größenordnung von 10^{-5} des CMB an der *Last Sattering Surface* führt nach bisheriger Annahme durch rasche gravitative Klumpung in nur wenigen hundert Millionen Jahren zur Bildung massiver Strukturen wie Sterne und Galaxien. Beispielsweise, hätten Sterne mit einer Rotverschiebung von $z = 10$ nach der neuen Zeitskala rund $1250 \cdot 10^6 - 12{,}5 \cdot 10^6 = 1237{,}5$ Mio. Jahre Zeit, sich von der LSS aus zu entwickeln. Nach der bisher üblichen Zeitskala beträgt hingegen die Entwicklungszeit lediglich etwa $400 \cdot 10^6 - 0{,}38 \cdot 10^6 \approx 400$ Mio. Jahre. Auch unter Berücksichtigung, dass Dunkle Materie ohne nennenswerte Störungen durch die elektromagnetische Wechselwirkung sich zusammenballen konnte, erscheint mir diese Zeitspanne extrem kurz. Insbesondere die Entdeckung immer größerer Rotverschiebungen *z* von Spektren nahe der allerersten Sternpopulation III und möglicherweise demnächst darüber hinaus, deutet darauf hin, dass die bisherige Zeitskala des frühen Universums durchaus als kritisch angesehen werden kann. Die dargestellte Änderung der Zeitskala durch den Einfluss einer variablen Lichtgeschwindigkeit würde diese Problematik deutlich entschärfen.

Ein weiterer Aspekt der durch ein zeitvariables *c* verursachten neuen Zeitskala ist die Bestimmung der Hubble-Konstanten H_o. Aus den Beziehungen (2) und (3) erhält man für das E.d.S.-Universum: ${}^{E}H_o = \frac{2}{3} \cdot 1/t_o$, (${}^{E}H_o = H_o$ des E.d.S.-Universums) und für das leere Milne-Universum: ${}^{M}H_o = 1/t_o$, (${}^{M}H_o = H_o$ des Milne-Modells). Daraus folgt:

$$\mathbf{{}^{E}H_o = \tfrac{2}{3} \cdot {}^{M}H_o} \qquad (6)$$

Das heißt, der Wert der Hubble-Konstanten H_o des E.d.S.-Universums beträgt nur zwei Drittel des Wertes, der sich für das Milne-Modell ergibt. Da uns aber bei unseren Messungen immer ein absolut leeres Universum vorgetäuscht wird, messen wir zwangsläufig auch nur H_o des Milne-Modells. Demnach müsste das jüngst aus dem CMB ermittelte $H_{o,}$ von 67,4 km/(s·Mpc) [5] nicht der reale Wert der Hubble-Konstanten für ein flaches Universum sein, sondern:

$$\mathbf{{}^{E}H_o = 44{,}9\ km/(s \cdot Mpc)} \qquad (7)$$

betragen.

Eine interessante Folge von (7) könnte sich für den Wert der kritischen Dichte ρ_{kr} ergeben, der die Flachheit des Universums bestimmt. Die kritische Dichte ρ_{kr} ist gegeben durch die Beziehung $\rho_{kr} = 3H_o^2/(8\pi G)$***. Wenn diese Relation auch für ein variables *c* Bestand hätte, ergäbe sich daraus eine um den Faktor $({}^{3}/_{2})^2 = 2{,}25$ geringere kritische Dichte des Universums, als bisher angenommen. Dies würde das Massedefizit, das ohne die Dunkle Energie für das E.d-S.-Universum besteht, auf etwa 15% verringern.

*** ρ_{kr} wird aus der Friedmanngleichung abgeleitet. Nach [1] gilt: $k/(H^2 \cdot R^2) = (8\pi \cdot G.\rho)/(3H^2) - 1$. Für das flache Universum ist $k = 0$. Daraus folgt: $\rho_{kr} = 3H^2/(8\pi G)$. Ferner gilt für das Materie-dominierte Universum allgemein: $\rho = m/R^3$. Daraus folgt für $\rho = \rho_{kr}$: $m/R^3 = 3H^2/(8\pi G)$. Danach gilt: $m \cdot G \sim H^2 \cdot R^3$

Anmerkung zum heutigen Stand der Kosmologie:

Es ist bemerkenswert, dass die heutige Datierung des CMB, bzw. der LSS von rund 380 000 Jahren nach dem Urknall offenbar mit der eines E.d.S.-Universums übereinstimmt, die kosmische Entwicklung jedoch mit dem Konkordanz-Modell beschrieben wird!

Literaturhinweise

[1] Brand, Bastian
Das Standardmodell der Kosmologie, Die Friedmann-Gleichung
Seminar der Teilchen und Felder, Universität Münster

[2] Guth, Alan H.
Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems,
Physical Review D, volume 23 number 2, 1/1981

[3] Kroupa, Pavel; Pawslowski, Marcel
Das kosmologische Standardmodell auf dem Prüfstand
Spektrum der Wissenschaft, August 2010

[4] Layzer, David
Das Universum
Spektrum-Verlag, 1984

[5] Lorenzen, Dirk
Was stimmt nicht mit der Expansion des Universums?
www.deutschlandfunk.de/hubble-konstante-was-stimmt-nicht , 23. 8. 2020

[6] Page, Lyman
The Little Book of Cosmology
Princeton University Press, 2020

[7] Steffen, Peter
Warum die Dunkle Energie eine Fata Morgana sein könnte
www.avl-lilienthal.de. 8/2014

[8] Walker, David
Milnes Universum: Entfernungsmodul als Funktion von der Rotverschiebung,
Sternwarte Lübeck / AVL-Lilienthal, unveröffentlicht. 7/2014,

Peter Steffen