

# 80 Jahre expandierendes Weltall

2. Teil

von David Walker

Veröffentlicht in POLARIS Nr. 80 (3/2010)

## 7 Das expandierende Weltall aus der Sicht des Beobachters

Nachdem ich in dem ersten Teil beschrieben habe, wie wir uns ein expandierendes Weltall vorzustellen haben, möchte ich nun erläutern, wie sich diese Expansion durch Beobachtungen bestätigen läßt (was dann ja auch geschehen ist).

*Grundlegend ist, daß, wenn es im Universum keinen bevorzugten Punkt gibt (kosmologisches Prinzip [→ Teil 1]), die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie proportional mit deren Entfernung zunehmen muß.*

Die Aufgabe des Beobachters besteht also darin, (1) die Entfernungen und die Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien zu messen, (2) zu prüfen, ob die entsprechende graphische Darstellung eine Gerade ergibt, entsprechend der Abb. 3 im ersten Teil. Diese Art der Darstellung heißt „HUBBLE-Diagramm“, die Geradensteigung ist die HUBBLE-Konstante.

Der schwierige Teil ist hier die genaue Ermittlung der Entfernungen. Man muß sehr weit entfernte Galaxien beobachten, da bei den näher gelegenen die Fluchtgeschwindigkeiten vergleichbar sind mit den Geschwindigkeiten der *Eigenbewegung*. Die aber hat mit der Expansion des Weltalls nichts zu tun und verfälscht die Messung (vgl. Teil 1, Abschn. 6, und weiter unten). Es hat bis in die 1990er Jahre gedauert, bis geeignete Entfernungsmarkierungen für derart weit entfernte Galaxien zur Verfügung standen. Zu diesen zählen Supernovae vom Typ Ia. Bis dahin machte die Unsicherheit bei der Bestimmung der HUBBLE-Konstanten einen Faktor 2 aus  $(50 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}} - 100 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}})$ .

## 8 Die Fluchtgeschwindigkeit und die Rotverschiebung

Weitaus einfacher als die Bestimmung der Entfernung ist die Messung der Fluchtgeschwindigkeit. Diese macht sich dadurch bemerkbar, daß alle Linien in dem Spektrum einer sich von uns entfernenden Galaxie zum roten Ende hin verschoben sind. Das geht so weit, daß Linien, die normalerweise im Ultravioletten sind,

nun im sichtbaren Bereich auftauchen. Man nennt dieses Phänomen die „kosmologische Rotverschiebung“. „Kosmologisch“ deswegen, weil sie mit einer anderen Art von Rotverschiebung, dem *Doppler-Effekt*, nichts zu tun hat.

## 8.1 Die kosmologische Rotverschiebung gegenüber dem Doppler-Effekt

Der DOPPLER-Effekt tritt auf, wenn man es mit einer bewegten Quelle und einem ruhenden Beobachter zu tun hat (oder anders herum). Ob Schall- oder Lichtquelle: setzt sich diese Quelle in Bewegung, so stellt der ruhende Beobachter fest, daß der Ton plötzlich tiefer, das Licht plötzlich röter geworden ist, wenn die Bewegung der Quelle von dem Beobachter fort erfolgt. Übertragen auf die Galaxien heißt das, daß das Licht einer sich von uns entfernenden Galaxie „rotverschoben“ ist: betrachtet man ihr Spektrum, stellt man fest, daß sich alle Linien darin zu dem roten Ende hin verschoben haben.

„In einem expandierenden Universum bewegen sich alle Galaxien von uns fort, also unterliegt ihr Licht dem DOPPLER-Effekt, und wir sehen, logischerweise, eine Rotverschiebung“, mag der Leser jetzt schließen. Interessanterweise „verkauft“ der eine oder andere populärwissenschaftliche Text dem Leser genau diese Sichtweise.—Die ist aber verkehrt. Sie ist es deshalb, weil *der Raum selbst* expandiert und wir es daher mit *zwei* Arten von Bewegung zu tun haben: (1) mit Bewegungen *durch den Raum*, (2) mit Bewegungen *mit dem Raum*. Im ersten Fall tritt der DOPPLER-Effekt auf, im zweiten jedoch nicht. Der zweite Fall ist aber der für uns wichtige.

**Bewegung mit dem Raum.**—Stellen wir uns vor, wir könnten einen Hebel umlegen, der die Expansion des Weltalls spontan anhält. Alle Galaxien, die dann stillstehen, haben sich vorher nur deshalb voneinander fort bewegt, weil sie der Expansion des Raumes folgten: sie haben sich *mit dem Raum mitbewegt*,—nicht *durch den Raum hindurch fortbewegt*. **Eine solche Bewegung verursacht keinen Doppler-Effekt.** Gerade diese Bewegungsform ist es aber, die uns interessiert, denn diese Mitbewegung der Galaxien *mit dem Raum* spiegelt genau dessen Expansion wider und macht sie überhaupt erst beobachtbar (da wir in einem *leeren* Raum ja gar keine Anhaltspunkte für dessen Expansion hätten).

Tatsächlich würden die Galaxien nach dem Umlegen unseres imaginären Hebels nicht völlig stillstehen. Die Restbewegung, die sie noch hätten, entspräche deren *Eigenbewegungen*, welche die Expansionsbewegungen überlagern. Die Eigenbewegung ist eine Bewegung *durch den Raum hindurch*, sie verursacht einen *Doppler-Effekt* im Spektrum, also eine *zusätzliche* Rotverschiebung, wenn die Eigenbewegung von uns fort weist, oder eine Blauverschiebung, wodurch eine kleinere kosmologische Rotverschiebung vorgetäuscht wird, wenn sie auf uns zu erfolgt. Der Beobachter kann die Auswirkungen der kosmologischen Rotverschiebung einerseits und des DOPPLER-Effektes andererseits nicht trennen. Die Eigenbewegung verfälscht mit ihrem DOPPLER-Effekt also alle Messungen der Ausdeh-

nungsgeschwindigkeit des Weltalls. Extrem ist das bei dem Andromedanebel, dessen Eigenbewegung so groß ist, daß er sich nicht von uns entfernt, sondern sich uns sogar nähert.

Wir wissen nun aber, daß die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie auf Grund der Expansion des Alls mit deren Entfernung zunimmt. Daher muß man weit entfernte Galaxien beobachten, bei denen die Fluchtgeschwindigkeiten die Geschwindigkeiten ihrer Eigenbewegungen weit übertreffen, damit die Verfälschung der Messungen auf Grund der Eigenbewegung vernachlässigbar wird. Damit handelt man sich natürlich das Problem der genauen Entfernungsbestimmung ein, das lange nicht gelöst werden konnte.

Wenn wir in diesem Sinne die Eigenbewegungen der Galaxien vernachlässigen, dann ständen tatsächlich alle Galaxien still, wenn wir unseren Hebel umlegen könnten, der die Expansion des Universums anhält. In diesem (idealisierten) Fall sind alle beobachteten Rotverschiebungen kosmologisch, gehen nicht auf den DOPPLER-Effekt zurück. Wenn es aber nicht der DOPPLER-Effekt ist, der die *kosmologische* Rotverschiebung verursacht, was ist es dann? Die Ursache dieser Rotverschiebung liegt darin, daß sich das Licht, das von einer Galaxie zu einer anderen läuft, *durch einen expandierenden Raum hindurch* ausbreitet. Die Lichtwelle wird dabei in dem gleichen Maße, in dem der Weltraum sich ausdehnt, auseinandergezogen, so daß die Wellenlänge zunimmt, das Licht also röter wird. Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto länger ist der Weg, den ihr Licht durch das expandierende Weltall hindurch zurückgelegt hat, und desto größer ist folglich die Rotverschiebung. Der hier geschilderte Sachverhalt ist in einem älteren Artikel in SuW von H. Schulz sehr gut dargestellt [3].

Interessant ist, daß die Fluchtgeschwindigkeiten, welche die Galaxien infolge ihrer Mitbewegung mit dem sich ausdehnenden All haben, ab einer bestimmten Entfernung größer werden als die Lichtgeschwindigkeit. Dies ist kein Widerspruch zu der Relativitätstheorie, da es sich nicht um eine Bewegung durch den Raum hindurch, sondern um eine solche *mit dem Raum* handelt. Im Gegenteil: alles, was ich hier berichte, folgt aus der allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Grundlage der Kosmologie ist. Die *Eigenbewegungen* der Galaxien können jedoch, da sie Bewegungen durch den Raum hindurch sind, die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten.

**Die kosmologische Rotverschiebung als Maß für die Fluchtgeschwindigkeit.**—Die kosmologische Rotverschiebung ist mit der Fluchtgeschwindigkeit, welche die betreffende Galaxie auf Grund der Ausdehnung des Weltalls hat, proportional. Da sie leicht zu messen ist, werden wir von hier an—wie es auch die Beobachter tun—nicht mehr von der Fluchtgeschwindigkeit sprechen, sondern, stellvertretend, nur noch von der (kosmologischen) Rotverschiebung.

## 9 Carl Wirtz

Nachdem wir nun wissen, daß die Rotverschiebung in dem Spektrum einer Galaxie ein Maß für deren Fluchtgeschwindigkeit ist, können wir unser Kriterium dafür, daß wir in einem expandierenden Weltall leben, so formulieren:

- In einem expandierenden Universum nimmt die Rotverschiebung proportional mit der Entfernung zu.

Vorausgesetzt ist die Gültigkeit des kosmologischen Prinzips, das besagt, daß alle Orte im Weltall gleichberechtigt sind, was ich im ersten Teil näher erläutert habe.

Der erste, der nachweisen konnte, daß die Rotverschiebung tatsächlich mit der Entfernung der Galaxien zunimmt, war der deutsche Astronom Carl WIRTZ, der zu jener Zeit in Kiel tätig war [4]. Als Entfernungsindikatoren für die Galaxien verwendete er in seiner ersten Arbeit zu diesem Thema, die 1922 erschien, deren scheinbaren Helligkeiten, in einer zweiten, 1924 erschienenen [5], deren Winkeldurchmesser. Der interessierte Leser findet die Literaturangaben in [4]. WIRTZ stand kein großes Teleskop zur Verfügung, er verwendete daher hauptsächlich Rotverschiebungen, die von SLIPHER an der Lowell-Sternwarte gewonnen worden waren.

Die scheinbaren Helligkeiten der untersuchten Galaxien zeigten eindeutig den Trend, mit zunehmender Rotverschiebung abzunehmen. Unter der Annahme, daß —im Mittel—eine schwächere Galaxie weiter entfernt ist als eine hellere, konnte WIRTZ schließen, daß die Rotverschiebungen der Galaxien mit deren Entfernungen zunehmen.

Was die Winkeldurchmesser der Galaxien angeht, die er in der folgenden Arbeit als Entfernungsindikatoren heranzog, so verdient seine Argumentation eine ausführlichere Schilderung. Wiederum hatte er nicht die Möglichkeit, die Durchmesser selbst zu bestimmen, sondern zog bereits publizierte Messungen aus Lick und Mt Wilson heran. Er fand: bei den scheinbar kleinen Galaxien kamen kleinste und größte Rotverschiebungen vor, die scheinbar großen Galaxien hatten kleinste Rotverschiebungen, unter den Galaxien mit kleinen Rotverschiebungen traf man kleine und große Objekte, große Galaxien mit großen Rotverschiebungen gab es nicht. Mit „groß“ und „klein“ ist stets der Winkeldurchmesser gemeint.

Dies ist aber genau das, was man erwartet, wenn die Rotverschiebungen der Galaxien um so größer sind, je weiter diese Objekte entfernt sind. Im *nahen* Weltall nämlich sieht man solche, die tatsächlich groß, und andere, die tatsächlich klein sind,—ganz so, wie WIRTZ es bei kleinen Rotverschiebungen vorfand. Im *fernen* Weltall sieht man aber nur noch die Galaxien, die *tatsächlich groß* sind, ihrer Entfernungen wegen aber ausschließlich *unter kleinen Winkeldurchmessern* erscheinen. Es gibt also keine scheinbar großen Galaxien in großen Entfernungen. Da WIRTZ keine Galaxien mit großen Winkeldurchmessern *und* hohen Rotverschiebungen fand, schloß er folglich, daß eine hohe Rotverschiebung eine große Entfernung anzeigt [5].

Damit hatte WIRTZ—fünf Jahre vor HUBBLE—die „Nebelflucht“, die man in einem expandierenden Universum vorfinden muß, erstmalig beobachtet. HUBBLES

Verdienst war es später, nachgewiesen zu haben, daß die Rotverschiebung mit der Entfernung nicht nur irgendwie zunimmt, sondern *proportional* mit der Entfernung. Davon wird im dritten Teil die Rede sein.

WIRTZ hätte zum Entdecker des expandierenden Universums werden können,— aber nein, von der Möglichkeit einer Expansion des Weltalls wußte er vermutlich gar nicht. Jedenfalls interpretierte er seine Ergebnisse in eine völlig falsche Richtung. Das spricht insofern nicht gegen ihn, als HUBBLE, einige Jahre später, in genau der gleichen Weise falsch argumentierte.

## 10 Der Holzweg

Nur ungern löst sich anscheinend der Mensch von ihm lieb gewordenen Vorstellungen, hier von der eines *statischen* Universums. Der große EINSTEIN bekämpfte gegenteilige Ansichten regelrecht, was wohl der Grund dafür war, daß FRIEDMANN'S Arbeit von 1922, welche die Möglichkeit eines expandierenden Universums—und die Unmöglichkeit eines statischen—aufzeigte, bis 1929 in wissenschaftlichen Publikationen überhaupt nicht zur Kenntnis genommen wurde [1] (→ Teil 1, § 1). WIRTZ' Publikationen von 1922 und 1924 sind da keine Ausnahmen. Möglicherweise war ihm die FRIEDMANN'Sche Arbeit unbekannt.

Der Niederländer Willem DE SITTER hatte im Jahre 1917 ein *statisches* Weltmodell publiziert, und *diese* Arbeit war der Fachwelt sehr wohl bekannt (→ [1] und die entsprechende Literaturangabe dort). Der Leser muß sich das so vorstellen, daß man, da es in der Zeit um 1917 noch keine Möglichkeit gab, tief genug in das Weltall zu blicken, auf rein mathematischem Wege, mit verschiedenen Lösungen der EINSTEIN'Schen Gleichungen „spielte“: die Weltmodelle waren gleichsam Teil einer mathematischen „Spielwiese“. DE SITTER'S Weltmodell war statisch, also akzeptabel,—und WIRTZ hielt seine Beobachtungen für eine Bestätigung dieses Modells, da es ebenfalls eine Rotverschiebung vorhersagt.

Das DE SITTER'Sche Weltmodell war aber ein Holzweg. Es war es schon deshalb, weil es *ein Weltall, in dem keine Materie vorhanden ist*, beschrieb. Das konnten die damaligen Astronomen aber hinnehmen, wenn sie annahmen, daß die Galaxien sehr dünn im Raum verteilt waren. Dieses Modell läßt, im Gegensatz zu denen, die Masse enthalten, eine enorme Freiheit zu, was die Wahl der Koordinaten zur Beschreibung des Abstandes zwischen zwei Punkten *A* und *B* angeht. Expandiert das Weltall, dann wird dieser Abstand mit der Zeit größer, wie in dem, wie wir heute wissen, wirklichen Weltall. Auch im DE SITTER-Kosmos kann man solche Koordinaten finden, in denen gemessen er expandiert [6].—Aber es gibt ein ganz spezielles Koordinatensystem, in dem dieses Weltmodell *statisch erscheint*, und diese Koordinaten hielt man für die einzig richtigen, denn die Idee eines nichtstatischen Universums war unwillkommen.

Bei dieser speziellen mathematischen Beschreibung des DE SITTER-Weltalls wird die Expansion sozusagen in sich mitdehnenden Koordinatenachsen „versteckt“. Das All erscheint dann zwar statisch, aber man erkaufte sich dies mit zwei

Seltsamkeiten:—(1) Es gibt keine universelle Zeit, sondern sie läuft um so langsamer, je weiter ein Objekt von dem Beobachter entfernt ist; (2) Galaxien, *auf die keine Kräfte wirken*, werden von dem Beobachter fort beschleunigt. Entfernte Galaxien zeigen, diesem Modell zufolge, ebenfalls eine Rotverschiebung, so, wie es in einem expandierenden Weltall ist. Aber der Grund dafür ist ein ganz anderer. Die DE SITTERSche Rotverschiebung kommt zustande, weil (1) die Atome an entfernten Orten wegen der dortigen Zeitverlangsamung langsamer schwingen und das von ihnen ausgesandte Licht daher rötter erscheint. (2) kommt es aufgrund der Beschleunigung aller Galaxien von dem Beobachter fort zusätzlich zu einer DOPPLERSchen Rotverschiebung [6]. Auch die DE SITTERSche Rotverschiebung nimmt mit der Entfernung zu. WIRTZ glaubte, genau dieses Weltmodell bestätigt zu haben. Seine Arbeit von 1924 trägt nämlich den Titel *De Sitters Kosmologie und die Radialbewegung der Spiralnebel* [5]. Es sollten noch vier Jahre vergehen, bis die Idee der Expansion der Welt Eingang in das Denken der Astronomen fand. Es war der belgische Physiker und Priester Georges LEMÂÎTRE, der für Klarheit sorgte und zeigte, daß das DE SITTER-Universum nur eine mathematische Fiktion war. Mehr dazu im nächsten Teil.

## Literatur

- [1] H. Nussbaumer: SuW 6/2007, S. 37 ff.
- [2] P. Schneider: *Extragalaktische Astronomie und Kosmologie*, Springer, 2006.
- [3] H. Schulz: SuW 2/1997, S. 124 ff.
- [4] I. Appenzeller: SuW 11/2009, S. 44 ff.
- [5] C. Wirtz: Astr. Nachr. **222**, 22 (1924).
- [6] P. J. E. Peebles: *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993, S. 77 f, S. 307 ff.