

# 80 Jahre expandierendes Weltall

3. Teil

von David Walker

Veröffentlicht in POLARIS Nr. 81 (1/2011)

## 11 Unbeachtete Theorien und falsch interpretierte Beobachtungen

Der erste, der nachwies, daß die Rotverschiebung der Galaxien mit ihrer Entfernung zunimmt, war Carl WIRTZ, dem ich im 2. Teil ein Kapitel gewidmet habe. Seine Arbeiten erschienen 1922 und 1924. Auf die Idee, diese Rotverschiebung mit einer Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien zu verbinden, weil sie der Expansion des Weltalls folgen, kam er nicht. Statt dessen hielt er seine Entdeckung für die Bestätigung des—statischen—Weltmodelles DE SITTERS (siehe 2. Teil und Quellenangaben dort). Die 1922—sogar auf deutsch—erschienene Arbeit FRIEDMANNs, in der eine Expansion des Weltalls vorhergesagt wurde, war von der Fachwelt nicht beachtet worden. Und vermutlich wußte auch WIRTZ nichts von ihr.

### 11.1 Georges Lemaître

Die Geschichte wiederholte sich. 1927 publizierte der belgische Physiker und Priester, der Abbé Georges LEMAÎTRE, eine bahnbrechende Arbeit, in der er zeigte, daß das Weltall expandieren muß und die beobachtete Rotverschiebung eine Folge dieser Expansion ist [1]. Diese Rotverschiebung ist, wie ich im 2. Teil erläuterte, kein DOPPLER-Effekt, sondern kommt dadurch zustande, daß die Lichtwellen, die durch ein expandierendes Weltall hindurchlaufen, zusammen mit diesem in die Länge gezogen werden. Dadurch kommen sie bei einem weit entfernten Beobachter mit einer Wellenlänge an, die viel größer ist als die, mit der sie ausgesandt wurden. Ferner wies er nach, daß das, bis dahin für richtig gehaltene, statisch *erscheinende* DE SITTER-Universum gar nicht statisch ist, sondern dies durch eine sehr spezielle Wahl der Koordinaten nur vorgetäuscht wurde. Verwendet man normale Koordinaten zur Beschreibung von DE SITTERS Weltmodell, dann findet man, daß auch DE SITTERS Theorie ein expandierendes Weltall zur Folge hat [6]. (Mehr zu dem DE SITTER-Universum findet der Leser im Kapitel 10 im 2. Teil.)

Wenn LEMAÎTRES expandierendes Weltall Realität ist, dann muß die von der Erde aus beobachtete Rotverschiebung im Spektrum einer Galaxie proportional mit

deren Entfernung zunehmen. LEMÂTRE selbst überprüfte dies, indem er die Entfernungen von Galaxien mit deren Rotverschiebungen, die von SLIPHER gemessen und publiziert worden waren, verglich. Wenn auch die Unsicherheiten damals noch sehr groß waren, so glaubte er doch seine Theorie bestätigt. Für die Entfernungsbestimmung verwendete er HUBBLES Abschätzung, daß Feldgalaxien im Mittel eine absolute photographische Helligkeit von  $-15^M2$  besitzen. Diese Annahme ist auch heute noch gültig. Es gibt bei Feldgalaxien eine bevorzugte Helligkeit, der moderne Wert ist allerdings  $M_B = -20^M4$  [2]. Er bestimmte sogar die HUBBLE-Konstante (die damals natürlich noch nicht so hieß) und fand einen Wert von  $627 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ . Hierin kam er HUBBLE um zwei Jahre zuvor [1], [7].

HUBBLE entdeckte all dieses *erneut* und publizierte seine Resultate im Jahre 1929.—Aber er brachte es nicht in einen Zusammenhang mit der Expansion des Kosmos, *denn er kannte LEMÂTRES Arbeit überhaupt noch nicht*. LEMÂTRE hatte sie in einem belgischen Magazin auf französisch publiziert, und das führte dazu, daß sie ebenso unbeachtet blieb wie FRIEDMANN'S Arbeit fünf Jahre zuvor [1]. HUBBLE äußerte vielmehr in seiner Publikation, daß die von ihm gefundene proportionale Zunahme der Rotverschiebung mit der Entfernung eventuell eine Bestätigung des DE SITTERSchen Weltmodelles sein könnte [7]. Damit war er auf demselben „Holzweg“ wie zuvor WIRTZ.

LEMÂTRES expandierende Welt wurde in Fachkreisen erst bekannt, nachdem EDDINGTON, einer der größten Astronomen seiner Zeit, von LEMÂTRES Arbeit erfahren und eine englische Übersetzung in den *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* hatte drucken lassen. 1931 war das.

Über den Weg, auf dem EDDINGTON davon erfuhr, habe ich zwei sich widersprechende Quellen. SANDAGE [7] schreibt, daß einer von EDDINGTONS Forschungsstudenten ihn auf LEMÂTRES Arbeit aufmerksam gemacht habe. Nach NUSSBAUMER [1] war es aber LEMÂTRE selbst, der sich im Jahre 1930 an Eddington wandte. Der Grund dafür war demnach, daß DE SITTER (dessen statisch scheinendes Weltmodell man damals für richtig hielt) in der Royal Astronomical Society einen Vortrag über die von HUBBLE gefundene proportionale Beziehung zwischen der Rotverschiebung und der Entfernung gehalten und in der anschließenden Diskussion keine Erklärung dafür hatte anbieten können. EDDINGTON hatte daraufhin Zweifel an der Richtigkeit der Sichtweise geäußert, das Universum befinde sich in Ruhe (was man zu jenem Zeitpunkt ja noch allgemein annahm). LEMÂTRE, der bei jener Veranstaltung nicht anwesend gewesen war, las das Protokoll dieser Sitzung in einer Fachzeitschrift und sandte daraufhin EDDINGTON eine Kopie seiner Arbeit von 1927, mit der Bitte, eine Kopie an DE SITTER weiterzugeben. Beide Empfänger wurden von LEMÂTRES Ausführungen überzeugt [1]. Und nun begannen die Astronomen ernsthaft, sich mit der Möglichkeit eines expandierenden Weltalls zu befassen. Eine Arbeit, die von zwei derartigen Autoritäten befördert wurde, konnte nicht falsch sein.

## 12 Edwin Hubble

Entgegen einer weit verbreiteten Ansicht war HUBBLE also nicht der Entdecker des expandierenden Weltalls. Sein großes Verdienst besteht darin, die Fehlergrenzen der Beobachtungen so weit heruntergedrückt zu haben, daß er die Proportionalität der Rotverschiebung mit der Entfernung der entsprechenden Galaxie überzeugend nachweisen konnte. Und er war es, der am 100''-Teleskop auf dem Mt Wilson immer tiefer in das Weltall vorstieß. Interessant ist, daß die Entfernungen seiner Galaxien in Wirklichkeit allesamt deutlich größer waren, als er glaubte. Wie kam das?

HUBBLE nutzte die Cepheiden-Sterne benachbarter Galaxien, deren absoluten Helligkeiten sich aus deren Pulsationsperioden ableiten lassen, um daraus wiederum die absoluten Helligkeiten der, wie er glaubte, *hellsten Einzelsterne* einer Galaxie zu ermitteln. Er fand, daß diese im Mittel stets  $-6^M3$  (photographisch) betrug. Tatsächlich waren dies keine Einzelsterne, sondern H II-Gebiete. Aus der absoluten Helligkeit dieser „Sterne“ schloß er dann weiter, daß eine Galaxie im Mittel eine gesamte absolute photographische Helligkeit von  $-15^M2$  besaß [7], [8]. Dann erschloß er sich die jeweilige Entfernung aus dem Entfernungsmodul: der Differenz zwischen der scheinbaren Helligkeit  $m$  und der absoluten Helligkeit  $M$ .

Die absoluten Helligkeiten, die er verwandte, waren jedoch zu klein. Das lag daran, daß die Perioden-Leuchtkraft-Relation der Cepheiden-Sterne verkehrt war. Diesen Irrtum klärte erst Walter BAADE nach dem 2. Weltkrieg auf: alle Entfernungen verdoppelten sich plötzlich. Dieser Fehler wirkte sich jedoch nicht auf die Art der Abhängigkeit der Rotverschiebung von der Entfernung aus: Daß sie proportional miteinander sind, heißt nur, daß sich bei einer Verdoppelung, Verdreifachung usw. der Entfernung auch die Rotverschiebung verdoppelt, verdreifacht usw. Es kommt hier also lediglich auf die *Verhältnisse* von Entfernungen zueinander an, nicht auf die tatsächlichen Werte. Das *Verhältnis* der Entfernungen zweier Objekte ist aber bestimmt durch die *Differenzen* (1) ihrer scheinbaren, (2) ihrer absoluten Helligkeiten. Ein falsch festgelegter Nullpunkt wirkt sich nicht aus, da *alle Helligkeiten* um den gleichen Betrag falsch sind, was bei der Bildung ihrer Differenzen herausfällt.

Mit den von ihm abgeleiteten absoluten Helligkeiten für die hellsten Einzel-„Sterne“ und für die durchschnittliche Feldgalaxie hatte HUBBLE sich zwei sehr weittragende Entfernungsindikatoren verschafft. In den auf 1929 folgenden fast zweieinhalb Jahrzehnten, bis zu seinem unerwarteten Tod 1953, drangen er und seine Mitarbeiter in immer größere Tiefen des Weltalls vor und verglichen schließlich die Entfernungen von *Galaxienhaufen* mit ihren Rotverschiebungen. Als Entfernungsindikator diente dabei die Helligkeit der fünft hellsten Galaxie eines Haufens. HUBBLE hatte nämlich herausgefunden, daß die großen Galaxienhaufen allesamt einander bemerkenswert ähnlich waren. Bildete man, bei bekannter Entfernung, den Durchschnitt der absoluten Helligkeiten der zehn hellsten Galaxien eines Haufens, kam stets in etwa das gleiche heraus. Die Helligkeit der fünft hellsten Galaxie nun entsprach fast genau diesem Mittelwert ([8], Fußnote S. 166).

1936 erreichten sie die Leistungsgrenze des 100''-Teleskops auf dem Mt Wilson. Erst mit der Verfügbarkeit des 200''-Teleskops auf dem Mt Palomar,\* 1949, konnten sie ihre Arbeit fortführen. Sie wiesen nach, daß bis zu einer Rotverschiebung von  $z = \Delta\lambda/\lambda \approx 0.2$ , das entspricht einer Entfernung (nach heutigem Maßstab) von ca. 2.5 Mrd. Lichtjahren, die Rotverschiebung und die Entfernung miteinander proportional sind [7].

Genau dieses erwartet man für ein expandierendes Universum. Trotzdem hatte HUBBLE bis zum Schluß Zweifel an dieser Deutung, war eventuell sogar vom Gegenteil überzeugt. Es gab nämlich einen zweiten, gut versteckten, Fehler (neben dem falschen Nullpunkt der absoluten Helligkeiten) in seinen Auswertungen. Dieser Fehler aber wirkte sich aus und verschleierte die Realität [7].

## 12.1 Expandiert das Weltall wirklich?

### 12.1.1 Hubble findet das Gegenteil

Das politische Geschehen unserer Zeit hat uns gelehrt, daß man beim Zitieren besser daran tut, sehr sorgfältig vorzugehen.† Im folgenden beziehe ich mich also auf SANDAGE [7], ohne das jedesmal gesondert anzugeben.

HUBBLES Beobachtungen ließen darauf schließen, daß das Weltall *statisch* sei. Um zu erklären, wie er ausgerechnet auf diesen Schluß kam, müssen wir uns etwas genauer anschauen, wie er die Entfernungen ermittelte. Er tat das auf dem photometrischen Wege: über die Helligkeiten. HUBBLE verwendete zur Entfernungsmessung H II-Gebiete, die er für Einzelsterne hielt, einzelne Galaxien oder die fünthellste Galaxie eines Galaxienhaufens, Objekte also, die alle jeweils etwa die gleiche absolute Helligkeit  $M$  haben. Daher konnte er ihre jeweilige scheinbare Helligkeit  $m$  als Entfernungsmaß nehmen. Aber die Rotverschiebung bringt ein Problem mit sich, das ich dem Leser bisher verschwiegen habe.

Bei *nahen* Objekten nimmt der auf der Erde ankommende Strahlungsstrom  $\pi f$  proportional mit dem Quadrat der Entfernung  $D$  ab:  $\pi f \sim 1/D^2$ . Manche nennen dies das „Grundgesetz der Photometrie“. Der Strahlungsstrom  $\pi f$  entspricht genau der scheinbaren Helligkeit, wird aber, statt in Größenklassen, in  $W/m^2$  gemessen (ob es sinnvoll ist oder nicht, den Faktor  $\pi$  mit anzuschreiben, ist ein Thema für den astronomischen Stammtisch). So kann man aus dem Strahlungsstrom bzw. der scheinbaren Helligkeit  $m$  auf die Entfernung des zugehörigen Himmelskörpers schließen, wenn dessen absolute Helligkeit  $M$  bekannt ist. Deshalb heißt die Differenz  $m - M$  „Entfernungsmodul“.

Wenn eine Rotverschiebung vorhanden ist, die Photonen also unterwegs Energie verlieren, dann gibt es eine *zusätzliche* Abschwächung des Lichtes und zwar ist

---

\*Bei erneuter Durchsicht (Apr. 2013) eingefügte Note: Wie der Verfasser bei einem zwischenzeitlichen Besuch der Palomar-Sternwarte erfuhr, heißt der Berg *Palomar Mountain*, nicht *Mount Palomar*, obwohl man das oft liest.

†Bei erneuter Durchsicht (Apr. 2013) eingefügte Note: Anspielung auf die Plagiate in der Dissertation des damaligen (Feb. 2011) Bundesverteidigungsministers zu Guttenberg.

dann

$$\pi f = \frac{L}{(1+z) \cdot 4\pi D^2} \quad \text{oder} \quad \pi f = \frac{L}{(1+z)^2 \cdot 4\pi D^2} \quad ,$$

$z = \Delta\lambda/\lambda$  ist die Rotverschiebung,  $L$  die Leuchtkraft. Die linke Gleichung gilt, wenn das Universum nicht expandiert,<sup>‡</sup> die rechte, wenn es expandiert.

In der rechten Gleichung (mit Expansion) tritt im Nenner der Faktor  $(1+z)$  zweimal auf. Das können wir im Photonenbild so verstehen, daß durch die Expansion des Weltalls (1) jedes Photon, als „Wellenpaket“, mit auseinandergezogen, also langwelliger und somit energieärmer wird. Das schwächt den Strahlungsstrom bzw. die Helligkeit zusätzlich zur Entfernung. (2) nimmt der Abstand zweier hintereinander herfliegenden Photonen zu, da sich der Raum dehnt, so daß wir pro Sekunde weniger Photonen registrieren als ausgesandt wurden. Das bedeutet eine noch weitere Schwächung des Strahlungsstromes bzw. der Helligkeit. Das erste nennen wir den „Energieeffekt“, das zweite den „Anzahleffekt“.

Hat die Rotverschiebung aber einen anderen Grund als eine Expansion des Weltalls, diskutiert wurde z. B. „ermüdendes Licht“, dann gibt es zwar den Energieeffekt, nicht aber den Anzahleffekt (denn der Raum dehnt sich ja nicht), und es tritt im Nenner nur ein Faktor  $(1+z)$  auf, wie in der linken Gleichung oben. *Bevor man den beobachteten Strahlungsstrom als Entfernungsmaß heranziehen kann, muß man ihn entweder mit  $(1+z)$  oder mit  $(1+z)^2$  malnehmen* (oder, wenn man mit Größenklassen  $m$  arbeitet, diese entsprechend korrigieren), um die Entfernung ausrechnen zu können. Denn nicht  $\pi f$  selbst, sondern  $(1+z) \cdot \pi f$  bzw.  $(1+z)^2 \cdot \pi f$  sind mit dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional.

HUBBLE fand, daß er die Helligkeiten zwar immer um den Energieeffekt korrigieren mußte, *nicht aber um den Anzahleffekt*, um daraus Entfernungen abzuleiten, *die sich als mit der Rotverschiebung proportional erwiesen*. Nahm er auch noch den Anzahleffekt hinzu, stimmte es nicht mehr mit der Proportionalität. Dies ist jedoch genau das, was man von einem *nicht* expandierenden, also statischen Universum erwarten würde, in dem das Licht unterwegs irgendwie „ermüdet“. Dies blieb so, bis zu seiner letzten Veröffentlichung vor seinem Tod. Textpassagen lassen darauf schließen, daß er, folglich, bis zuletzt die Ausdehnung des Weltalls hinterfragte und einen anderen Grund für die Rotverschiebung für möglich hielt. Wo steckte der Fehler?

### 12.1.2 Der Fehler im Helligkeitssystem

Sternhelligkeiten ermittelt man durch eine Vergleichsmessung an Standardsternen, deren Helligkeiten genau bekannt und festgelegt sind. Auf dem Mt Wilson verwendete man dazu 139 sogenannte “Selected Areas”: Eichfelder, die solche Standardsterne enthielten und über den ganzen Himmel verteilt waren. Diese Selected Areas

---

<sup>‡</sup>Bei erneuter Durchsicht (Apr. 2013) eingefügte Note: Wenn also der Energieverlust und die damit einhergehende Rotverschiebung des auf der Erde ankommenden Lichtes einen anderen Grund hätte als die Expansion des Weltalls, etwa die damals diskutierte „Ermüdung“ des Lichtes.

legten also den Helligkeitsmaßstab fest, der dort für photometrische Arbeiten verwendet wurde. Die sogenannte SEARESSche Helligkeitsskala der Selected Areas war auch die Basis für HUBBLES Helligkeitsmessungen an den Galaxien. In den 40er Jahren stellte sich aber heraus, daß die SEARESSchen Helligkeiten der Standardsterne schwächer als  $m_{pg} \approx 16^m$  ungenau waren. Dieser in allen Selected Areas gefundene Fehler ging immer in die gleiche Richtung: nach SEARES waren die Sterne zu hell. Dieser Fehler wurde immer größer, je schwächer die Sterne waren.

HUBBLES Galaxien höchster Rotverschiebung hatten photographische Helligkeiten von—nach seiner Angabe—ca.  $18^m$ . In diesem Bereich wies die SEARESSche Skala aber Fehler von bis zu  $1^m.5$  auf. HUBBLES angenommenen Helligkeiten waren also systematisch zu groß. Wenn sie auch nicht unbedingt um diesen Maximalbetrag verkehrt waren, so waren seine Galaxien in Wirklichkeit doch eher  $18^m.5$  als  $18^m$  hell.

Hierin liegt also der Grund, aus dem HUBBLE von der Expansion des Universums nicht überzeugt war: Das SEARESSche System lieferte ihm zu große Galaxienhelligkeiten, die glich er dadurch aus, daß er—ohne den wahren Grund zu kennen—den Anzahleffekt, die Lichtschwächung infolge der Expansion des Universums, fortließ.

Erst seine Nachfolger haben es dann richtig gemacht und konnten zeigen, daß die Rotverschiebung tatsächlich keine „Lichtermüdung“ ist, sondern die Ausdehnung des Weltalls widerspiegelt.

**Ende.**

## 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.
- [7] A. Sandage: *Practical Cosmology: Inventing the Past in The Deep Universe*: Saas-Fee Advanced Course 23 (1993), Springer, 1995.
- [8] E. Hubble: *The Realm of the Nebulae*, Yale University Press, 1936, 1982.