Warum Entfernungsbestimmungen im Weltall so schwierig sind (Teil 2 von 2)

3. Entfernungen im All sind Definitionssache

Da sich das Universum ständig ausdehnt, ist der Entfernungsbegriff nicht mehr von vornherein eindeutig, sondern eine Frage der Definition. Wenn ein entferntes Himmelsobjekt zu einem bestimmten Zeitpunkt Licht aussendet und dieses Licht dann den Beobachter erreicht, so ist zwischen Aussendung und Empfang viel Zeit vergangen, in der sich das Universum weiter ausgedehnt hat. Das ankommende Licht stammt also aus der Vergangenheit von einem Ort, an dem sich die Quelle dann nicht mehr befindet. Unter diesen Voraussetzungen werden in der Astronomie verschiedene Definitionen von Entfernung benutzt[11, 12]:

- Die **Laufzeitentfernung** D_T (oder Lichtlaufdistanz) ist die Zeitdauer, die das Licht von der Quelle zum Beobachter zurückgelegt hat, d.h., bei dieser Größe handelt es sich eigentlich nicht um eine echte Entfernung, sondern um eine Zeitangabe. In Publikationen wird dieser Unterschied allerdings oft vernachlässigt. Die oben gemachte Aussage zu einem 12,9 Mrd. Lj entfernten Stern betrifft übrigens eine solche Laufzeitentfernung. Aufgrund der Abhängigkeit der Rotverschiebung von der Laufzeitentfernung kann die Laufzeitentfernung anhand der beobachteten Rotverschiebung eines Objektes ermittelt werden. Das Bindeglied ist die sogenannte Hubble-Konstante oder besser der Hubble-Parameter H_0 (benannt nach dem amerikanischen Astronomen Edwin Hubble). Nach dem Hubble-Gesetz[14] (heute meist als Hubble-Lemaitre-Gesetz bezeichnet) ergibt sich bis zu einer Rotverschiebung z von ca. 0,1 unter Einbeziehung der Lichtgeschwindigkeit c die Entfernung in Megaparsec wie folgt:

$$D = z * \frac{c}{H_0}$$

- Die **mitbewegte Entfernung** D_C basiert auf einer Entfernungsskala, die sich mit dem Universum ausdehnt, oder anders gesagt: Bei dieser Betrachtung wird der aktuelle Stand der Raumexpansion in die Entfernungsangabe eingerechnet. Die mitbewegte Entfernung trifft also eine Aussage darüber, wie weit das betrachtete Objekt heute entfernt ist. In diesem Zustand kann das Objekt allerdings nicht beobachtet werden, da das Licht gerade eben ausgesandt wurde.
- Bei bekannter Größe eines Objektes kann man aus seinem Winkeldurchmesser auf seine Entfernung, in diesem Fall seine **Winkeldurchmesserentfernung** D_A (oder Winkeldistanz) schließen[13]. Diese hat etwas mit dem Erscheinungsbild des beobachteten Objektes zu tun. Weit entfernte Objekte haben ihr Licht zu einem Zeitpunkt ausgesandt, als das Universum noch viel kleiner als heute war. Dadurch erscheinen sie heute größer, als sie es aktuell sind.
- Durch die Dehnung der Lichtwellen infolge der Expansion des Universums (verbunden mit relativistischen Einflüssen) sehen wir Objekte schwächer leuchten, als sie es tatsächlich tun. Aus der beobachteten Helligkeit kann man die **Leuchtkraftentfernung** D_T ableiten.

Alle vorgenannten Entfernungen sind Funktionen von z und können ineinander umgerechnet werden. Winkeldurchmesser- und Leuchtkraft-entfernung spielen vor allem bei kosmologischen Untersuchungen eine Rolle. Ein Vergleich der aufgeführten vier Entfernungsangaben zeigt bei kleiner Rotverschiebung (bis ca. z=0,1) etwa gleiche Werte. Mit steigendem z werden die Unterschiede immer größer, wie **Bild 2** zeigt. Für eine unendlich große Rotverschiebung nähert sich die Laufzeit-Entfernung asymptotisch einem konstanten Wert an, der dem Zahlenwert des Universumalters in Lj entspricht. Die Winkeldurchmesserentfernung hat bei z=1,65 ein Maximum und fällt danach wieder ab. Die Leuchtkraftentfernung strebt mit zunehmendem z gegen unendlich. Laufzeitentfernung und

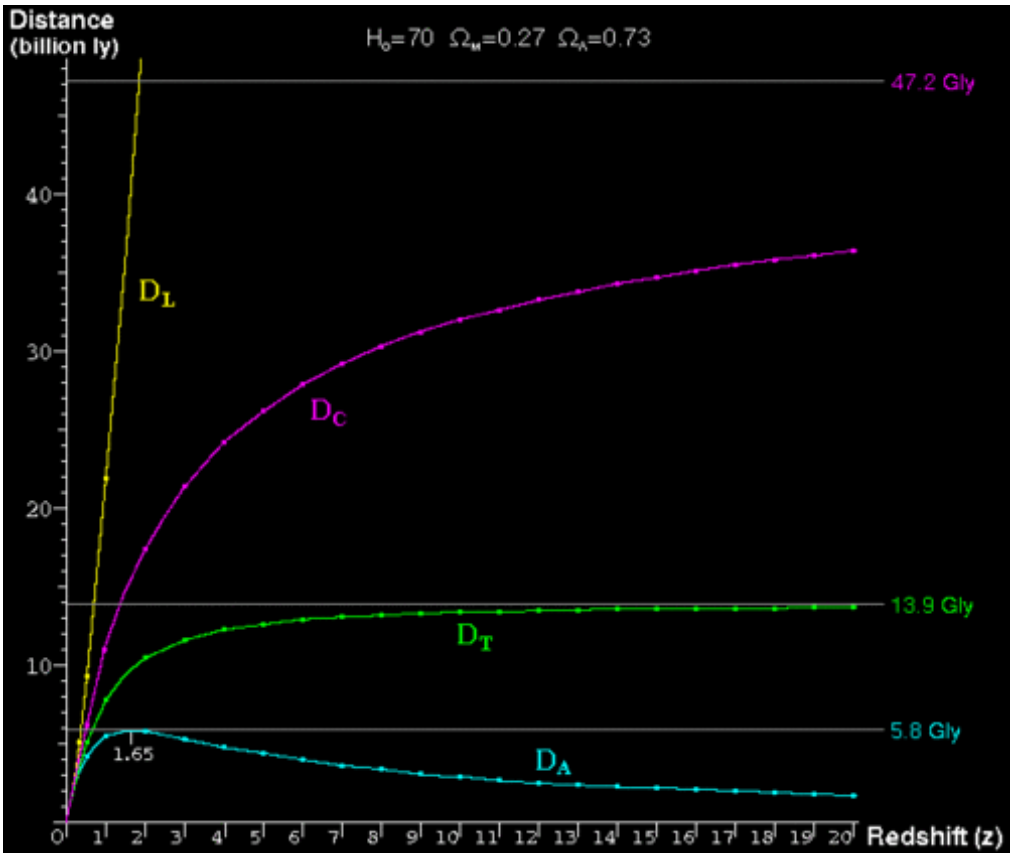

Bild 2 Entfernungen in Lj über der Rotverschiebung[15]

mitbewegte Entfernung verhalten sich additiv, während das für die Winkeldurchmesserentfernung und die Leuchtkraftentfernung nicht zutrifft, d.h. z.B., dass hier bei 3 Objekten in der Reihenfolge 1-2-3 die Entfernung 1-3 nicht gleich der Summe von 1-2 und 2-3 ist.

Das folgende Beispiel kann den Unterschied zwischen Laufzeitentfernung und mitbewegter Entfernung noch einmal veranschaulichen: Das Alter des Universums beträgt 13,7 Mrd. Jahre, d.h. das Licht der fernsten Objekte hat ca. 13 Mrd. Jahre bis zu uns gebraucht, woraus sich die entsprechende Laufzeitentfernung ergibt. Da sich das Universum aber inzwischen enorm ausgedehnt hat, beträgt der Objektabstand in mitbewegter Entfernung derzeit geschätzt 45 Mrd. Lj. Hieraus lässt sich der Schluss ziehen, dass das (beobachtbare) Universum unter der Voraussetzung, dass es kugelförmig wäre, heute einen Durchmesser von etwa 90 Mrd. Lj hätte.

Quellen

11	https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2012/01/03/die-rotverschiebung-und-die-vielen-entfernungen-der-kosmologie/
12	https://de.wikipedia.org/wiki/Entfernungsma%C3%9F
13	https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2014/neue-methode-zur-entfernungsbestimmung/
14	https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-gesetz/187
15	Richard Powel, http://www.atlasoftheuniverse.com/redshift.html