

Warum Entfernungsbestimmungen im Weltall so schwierig sind (Teil 1 von 2)

1. Vermessung der näheren Umgebung des Weltalls

In unserem Alltag haben wir es ständig mit Entfernungsangaben und -bestimmungen zu tun. International anerkanntes Referenzmuster für die Basiseinheit „Meter“ war bis 1960 das (oder der) Urmeter. Mittlerweile wird der Meter mit einer extrem hohen Reproduzierbarkeit über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum definiert^{1,2}. Da man es in der Astronomie mit sehr großen Entfernungen zu tun hat, führt die Verwendung des Meters auch mit entsprechenden Vorsätzen (wie Kilo, Mega, Giga, Tera usw.) zu unübersichtlich großen Zahlen. Deshalb haben die Astronomen eigene Maßeinheiten für die Darstellung der Entfernungen eingeführt. Im Sonnensystem wird die Astronomische Einheit (Abkürzung: AE) genutzt. Eine AE beträgt ca. 150 Millionen km und entspricht der mittleren Entfernung der Erde von der Sonne. Für die Abmessungen in der Galaxie und darüber hinaus für das gesamte Weltall wurden solche riesigen Entfernungseinheiten wie Lichtjahr (Lj) und Parallaxensekunde, kurz Parsec (pc), eingeführt. Ein Lichtjahr entspricht der Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, also ca. 9,46 Billionen km. Ein Parsec wird definiert als Entfernung, aus der der mittlere Abstand Erde–Sonne als eine Bogensekunde (eine Bogensekunde ist der 3600te Teil eines Grades, 360 Grad ergeben einen Vollkreis) wahrgenommen wird. Ein Parsec entspricht etwa 3,26 Lichtjahren oder 30,9 Billionen km.

Für „kurze“ Entfernungen können Parallaxenmessungen angewendet werden. Sie beruhen auf der Erfassung der scheinbaren Bewegung von Sternen, deren Entfernung man messen will, vor dem Hintergrund sehr weit entfernter Sterne im Laufe eines Jahres durch den Umlauf der Erde um die Sonne³. Mittels Parallaxenmessungen von der Erde aus kann man Entfernungen bis zu 300 Lj sehr gut ermitteln. Entsprechende Messungen des Astrometrie-Satelliten „Gaia“ drangen bereits bis in Entfernungen von bis zu 10.000 Lj vor. Dabei handelt es sich aber immer noch um unsere kosmische Nachbarschaft innerhalb der Milchstraße.

Um noch größere Entfernungen zu bestimmen, muss man sich anderer Methoden bedienen. Dazu gehört die Anwendung der „Perioden-Leuchtkraft-Beziehung“^{4,5}. Die Intensität der von einer Quelle ausgehenden Strahlung nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab. Wie schon vor über 100 Jahren festgestellt wurde, gibt es bei bestimmten radial pulsierenden Sternen, den sogenannten Cepheiden, einen physikalisch begründeten mathematischen Zusammenhang zwischen der absoluten Helligkeit und der Pulsperiode. Alle Cepheiden mit der gleichen Periodendauer besitzen die gleiche absolute Helligkeit. Wenn man die Periodendauer eines Cepheiden-Sternes und die scheinbare, also gemessene Helligkeit, kennt, kann man auf die Entfernung dieses Sternes schließen. Z.B. bedeutet eine Verringerung der gemessenen Helligkeit gegenüber einem Vergleichssterne um ein Viertel eine Verdopplung der Entfernung gegenüber dem Vergleichssterne. Hat man die Entfernung eines Cepheiden mittels Parallaxenmessung ermittelt, kann man die Entfernung gleicher Cepheiden mittels der Messung der scheinbaren Helligkeit bestimmen. Andere Sterne und Objekte in der Nähe dieses Cepheiden haben dann in etwa die gleiche Entfernung. Zur „Eichung“ der gefundenen Formel wurde die absolute Helligkeit als die Helligkeit definiert, die man aus einer einheitlichen Entfernung von 10 pc messen würde. Anhand der Cepheiden, deren Entfernung und absolute Helligkeit aus anderen Messungen bereits bekannt waren, wurde dann die nächste Etappe der Vermessung eingeleitet. Auf diese Weise kann aus der gemessenen Helligkeit beliebiger Cepheiden ihre Entfernung berechnet werden. Neben den Cepheiden wurden weitere Sternklassen mit ähnlichem Verhalten entdeckt, die als sogenannte „Standardkerzen“ zur Bestimmung von Entfernungen bis etwa 100 Mio. Lj genutzt werden. Wie man herausfand, verlaufen spezielle Supernovae (Typ Ia), die aus Doppelsternsystemen hervorgehen, immer nach dem gleichen Mechanismus, wodurch sie in allen Fällen die gleiche absolute

Helligkeit aufweisen und ebenfalls als Standardkerzen nutzbar sind. Sie können noch in Entfernungen von mehreren Mrd. Lj wahrgenommen werden⁶.

2. Kosmologische Weiten

In letzter Zeit gibt es in den Medien immer wieder Schlagzeilen über die Beobachtung extrem weit entfernter Objekte. So ist da z.B. von der Entdeckung eines 12,9 Milliarden Lichtjahre entfernten Sterns die Rede⁷. Ohne den entsprechenden Bezug ist eine solche Aussage allerdings problematisch und sagt wenig über die tatsächlichen Verhältnisse aus. Insbesondere sind bei solch riesigen Entfernungsangaben zwei Tatsachen von Bedeutung:

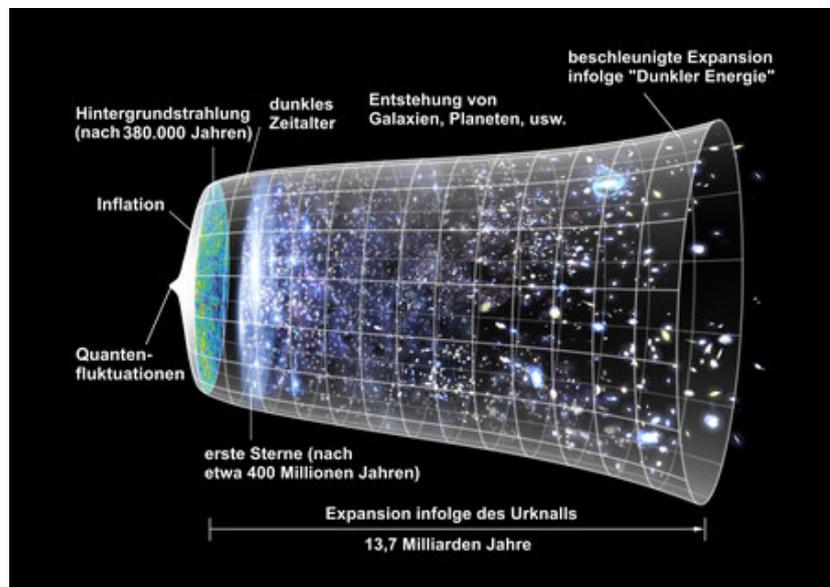


Bild 1 Entwicklungsstadien des Universums (schematisch)⁸

1. Das Licht breitet sich mit **endlicher** Geschwindigkeit aus.
2. Das Universum **dehnt sich aus**, in der Vergangenheit unterschiedlich schnell und seit einiger Zeit mit zunehmender Geschwindigkeit (**Bild 1**).

Bei Entfernungsangaben spielt die Bewegung eines Objektes relativ zu einem Beobachter eine wesentliche Rolle. Die Bewegung ist an der Änderung der Wellenlänge der empfangenen elektromagnetischen Wellen erkennbar. Bei Objekten, die sich entfernen, werden die Wellen in die Länge gezogen, d.h. die Wellenlänge vergrößert sich und das Licht verändert seine Farbe hin zum Rötlichen, weshalb man von Rotverschiebung spricht⁹. In selteneren Fällen kommt es zu einer Blauverschiebung durch Objektannäherung. Die Farbverschiebung kann auf unterschiedliche Art zustande kommen. Den weitaus wichtigsten Beitrag zur Farbverschiebung liefert der Dopplereffekt, den man auch im akustischen Bereich bei Annäherung bzw. Entfernung eines Einsatzfahrzeuges kennt. In der Astronomie kann man durch die Ausmessung der Verschiebung von Spektrallinien des ausgesendeten Lichtes im Vergleich zu einer unbewegten Strahlungsquelle auf Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit des beobachteten Objektes schließen.

Aufgrund der Ausdehnung des Weltalls entsteht die sogenannte kosmologische Rotverschiebung. Dabei gibt es den Effekt, dass die Objekte zwar im gleichen Raumpunkt bleiben, aber die Raumpunkte sich entfernen. Ein einfaches Modellbeispiel dazu: Sie markieren zwei Punkte auf einem Gummiband und ziehen dieses auseinander. Die Punkte auf dem Gummiband verschieben sich nicht, aber der Abstand zwischen den beiden Punkten nimmt trotzdem zu. Bei der Rotverschiebung spielt deshalb nicht die Bewegung von Objekten im Raum eine Rolle, sondern die Expansion des Raumes selber (s.o.). Die Objekte werden sozusagen durch den auseinanderstrebenden Raum „mitgenommen“. Die Ausdehnung des Raumes tritt allerdings nur in sehr großräumigen Strukturen, z.B. zwischen Galaxienhaufen, auf.

Neben den beiden erwähnten Formen der Rotverschiebung gibt es darüber hinaus auch solche durch relativistische Effekte (Gravitations-Rotverschiebung und Einfluss der Zeitdilatation – nähere Informationen s.h.¹⁰). Sie spielen aber bei der Entfernungsbestimmung eine untergeordnete Rolle.

Die kosmologische Rotverschiebung wird in der Astronomie mit dem Parameter z angegeben:

$$z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}}}{\lambda_0} - 1$$

$\lambda_{\text{beobachtet}}$ ist die gemessene und λ_0 die tatsächliche Wellenlänge der Spektrallinien (ohne Relativbewegung von Quelle und Beobachter). Hieraus folgt z.B., dass bei einem Objekt mit $z = 2$ die gemessene Wellenlänge dreimal so groß ist wie der tatsächliche Wert oder bei $z = 5$ sechsmal so groß, d.h. ein Objekt mit $z = 5$ bewegt sich schneller von uns weg als eines mit $z = 2$. Aus der Rotverschiebung kann man die Entfernung berechnen, die Frage ist nur, welche?

Fortsetzung folgt

Quellen

1	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2020_11.pdf
2	https://de.wikipedia.org/wiki/Urmeter#cite_note-CGPM-1-1-3
3	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2020_10.pdf
4	https://www.spektrum.de/frage/entfernungen-im-weltall/1676214
5	https://de.wikipedia.org/wiki/Perioden-Leuchtkraft-Beziehung
6	https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova_vom_Typ_Ia
7	https://futurezone.at/science/james-webb-stern-earendel-hubble-cosmic-spring-space-telescope-science-institute-in-maryland-nasa/402097536
8	https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html
9	https://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung
10	https://urknall-weltall-leben.de/images/downloads/tutorials/Rotverschiebung.pdf