

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 68 (2010)  
**Heft:** 357

**Artikel:** Woher wissen wir, wie weit die Objekte von uns entfernt sind? (Teil 2) :  
Entfernungsmessung im Weltall  
**Autor:** Roth, Hans  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-897974>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Woher wissen wir, wie weit die Objekte von uns entfernt sind? (Teil 2)

# Entfernungsmessung im Weltall

■ Von Hans Roth

*In der letzten Nummer wurde beschrieben, dass wir dank des Hipparcos-Satelliten die Distanz von etwa 50'000 Fixsternen mit höchstens 20% Fehler kennen. Aus der statistischen Analyse dieser Grunddaten kann man die Distanzen innerhalb der Milchstrasse einigermaßen erschliessen. Für den Schritt «aus der Milchstrasse heraus» brauchte es etwas ganz anderes: die Cepheiden.*

Diese Klasse von veränderlichen Sternen hat ihren Namen von  $\delta$  Cephei. Das ist ein veränderlicher Riesenstern in 892 Lichtjahren Entfernung. Er pulsiert regelmässig, mit einer Periode von 5,37 Tagen. Dabei bläst er sich auf und fällt wieder zusammen, er wird tatsächlich grösser und wieder kleiner, und auch sein Spektraltyp pendelt während einer Periode (zwischen F5 und G2). Die Änderung einiger Grössen während einer Periode zeigt die Abbildung 1.

Das Besondere ist nun, dass bei diesen Sternen eine direkte Beziehung zwischen Periodendauer und absoluter Helligkeit besteht. Wenn man also in einer anderen Galaxie einen solchen Stern findet und seine Periodendauer bestimmen kann, weiss man, welche (physikalische) Leuchtkraft er hat. Die Distanz zu ihm (und damit zur Galaxie) ergibt sich dann aus dem Vergleich der scheinbaren und der absoluten Helligkeit. Natürlich braucht es auch bei dieser Methode wieder Annahmen über die Lichtabschwächung durch Gas- und Staubwolken – nicht nur in der Milchstrasse, auch in der Zielgalaxie und im Raum dazwischen. Die Methode lässt sich bis etwa 10 Millionen Lichtjahre anwenden.

## Galaxien-Statistik

Wie bei den Fixsternen kann man nun auch bei den Galaxien durch

statistische Untersuchungen weiterkommen. Dann hilft hier auch das bereits beschriebene Maximum-Prinzip weiter: man nimmt an, dass die hellsten Galaxien in allen Galaxienhaufen jeweils etwa gleiche Gesamtleuchtkraft haben. So ergibt sich auch hier wieder die Distanz durch Vergleich von scheinbarer und absoluter Helligkeit. Mit zunehmender Distanz bekommt man aber neue Probleme. Wir sehen die Galaxien im Zustand, den sie beim Aussenden des Lichts hatten. Weit entfernte Galaxien sehen also jünger aus als näher stehende, und damit sind sie nicht direkt vergleichbar.

## Die Rotverschiebung

Wenn man die Spektren von Galaxien aufzeichnet, zeigt sich eine Verschiebung der Spektrallinien gegen das rote Ende des Spektrums. Diese Verschiebung ist umso grösser, je weiter die Galaxie entfernt ist.

Man kann sie als Dopplereffekt auffassen: die Galaxien entfernen sich, und zwar mit Geschwindigkeiten, die proportional zur Entfernung sind (Hubble-Gesetz). Die Bestimmung des Proportionalitätsfaktors war umstritten – mehrere Male wurde das Weltall «über Nacht» grösser, weil der Faktor (der Hubble-Parameter) auf Grund neuer Messungen einen anderen Wert erhielt. Heute wird ein Wert um die 71 km/s pro Megaparsec allgemein akzeptiert. Wenn also die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie 10'000 km/s beträgt, schreibt man ihr eine Distanz von 140 Mpc = 460 Millionen Lichtjahre zu. Bei grösseren Distanzen darf man übrigens nicht mehr so einfach rechnen, man muss die Relativitätstheorie berücksichtigen – wie auch das «Wegfliegen» der Galaxien als Ausdehnung des Raumes aufgefasst werden muss.

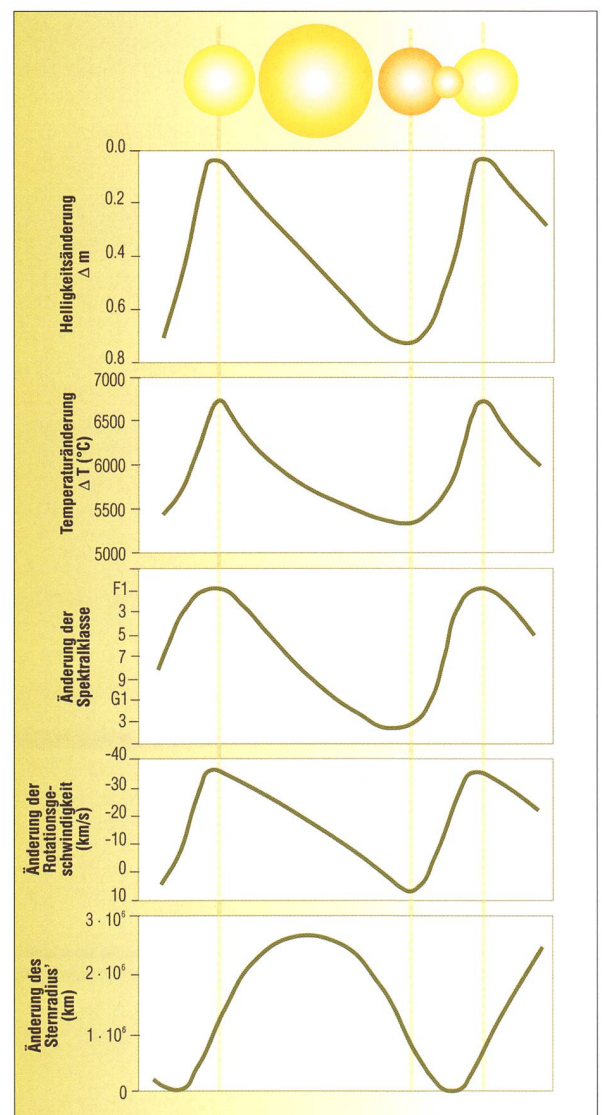


Abb. 1: Das Diagramm zeigt, wie sich Helligkeit, Temperatur, Spektralklasse, Rotationsgeschwindigkeit (an der Oberfläche) und der Sternradius in 5,37 Tagen ändern.



Abb. 2: Abell 1689 ist ein von der Erde 2,2 Milliarden Lichtjahre (674,8 Mpc) entfernter Galaxienhaufen, der eines der massivsten bekannten Objekte des Universums ist. Abell 1689 wird ob seiner großen Gravitationswirkung von Forschern als Gravitationslinse genutzt und ermöglichte so zum Beispiel die Entdeckung von A1689-zD1?, einer über 13 Milliarden Lichtjahre (3987,7 Mpc) entfernten Galaxie. Die sichtbare Masse von Abell 1689 macht jedoch offenbar nur ein Prozent der beobachteten Gravitationswirkung aus, wodurch die zur Zeit viel diskutierte Fragen über die dunkle Materie weiteren Stoff erhalten. (Bild NASA)

## Gravitationslinsen

Keine generelle Messmethode, aber einen unabhängigen Test über die Größenordnungen der Distanzen

bilden die Galaxien, die von uns aus gesehen direkt vor entfernteren hellen Objekten (z.B. Quasaren) stehen. Diese «Vordergrundgalaxien» lenken das Quasarlicht ab, und in ei-

nigen Fällen kommt es dann auf zwei oder mehreren verschiedenen Wegen zu uns oder wird teilweise gebündelt oder zu Ringen verformt (Abbildung 2). Nun können Änderungen im Spektrum des Quasars auftreten, die dann in den verschiedenen Teilstrahlen zu unterschiedlichen Zeiten bei uns eintreffen. Daraus kann man die Distanz zum Quasar bestimmen. Auch hier braucht es Annahmen, z.B. über die Masse der Vordergrundgalaxie, diese sind aber unabhängig von den Annahmen bei andern Methoden.

## Supernovae

Verblüffende Folgerungen musste man aus der Beobachtung von Supernovae ziehen. Eine Supernova kann das Endstadium eines massereichen Sternes sein. Die Elementsynthese von Wasserstoff über Helium usw. bis Eisen liefert Energie und läuft deshalb von selbst ab, aber der Aufbau von schwereren Elementen nicht mehr. Es wird dann keine Energie mehr frei, die der Gravitation entgegenwirken kann. Der Stern fällt in sich zusammen und explodiert wieder mit einem gewaltigen Energieausbruch, der auch in weit entfernten Galaxien zu sehen ist. Für den Beobachter scheint ein neuer Stern entstanden zu sein (deshalb der Name "Nova"). Die Helligkeit steigt innert Stunden sehr rasch an und fällt dann während einigen Monaten wieder ab. Dabei gibt es nun immer wieder einmal einen Helligkeitsverlauf, der einem bestimmten Muster entspricht (Abbildung 3). Solche Supernovae nennt man vom Typ Ia, man geht davon aus, dass sie direkt miteinander vergleichbar sind und also die gleiche absolute Maximalhelligkeit haben, womit die Entfernung der Muttergalaxie bestimmt werden kann. Damit konnte man auch Distanzen von Galaxien bestimmen, die sich fast an der Grenze des von uns beobachtbaren Raums befinden und sich uns im Zustand kurz nach ihrer Entstehung zeigen. Die Kombination solcher Ergebnisse mit den entsprechenden Rotverschiebungen zeigte nun, dass die Expansion des Weltalls sich offenbar beschleunigt, im Gegensatz zur Überlegung, dass die gegenseitige Gravitation der Galaxien zu einer mehr oder weniger starken Abbremsung der Expansion führen muss.

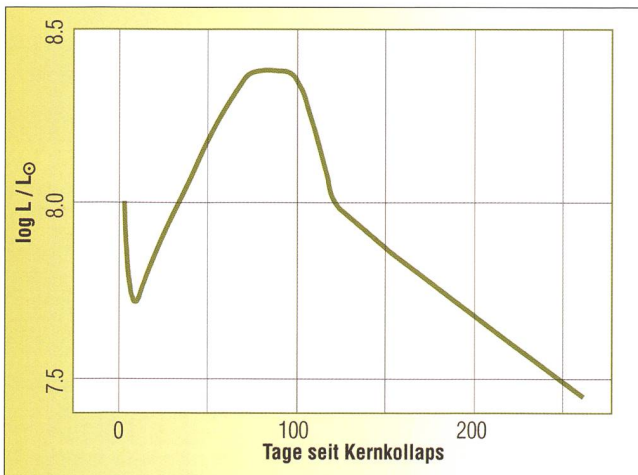


Abb. 3: Lichtkurve der Supernova SN 1987 A für die ersten 257 Tage. Dargestellt ist der Logarithmus der bolometrischen Leuchtkraft  $L$  in Einheiten der Sonnenleuchtkraft. (Nach Messungen des South African Astronomical Observatory von Catchpole und Mitarbeitern)

Zur Erklärung einer solchen Beschleunigung mussten die Theoretiker die «dunkle Energie» postulieren – und dies nicht zu knapp: damit die Berechnungen aufgehen, muss das Weltall zu 72% aus dieser noch völlig rätselhaften Energie bestehen. Das ist nicht zu verwechseln mit der "dunklen Materie", die man schon früher postulieren musste, um das Rotationsverhalten der Galaxien zu erklären. Sie macht weitere 23% des Weltalls aus, und nur 5% sind «normale» Materie (von der wir einen Teil als Sterne und Gasnebel usw. sehen können).

### Ausblick

Die Entfernungsmessung im Weltall beruht auf ganz verschiedenen Me-

thoden, die aufeinander aufbauen. Bei jedem Schritt müssen Annahmen getroffen und Abschätzungen einbezogen werden. Weil aber so viele Objekte gleicher Art vorhanden sind (in der Milchstrasse etwa 200 Milliarden Fixsterne, im überblickbaren Teil des Universums etwa 100 Milliarden Galaxien) lassen sich diese Annahmen mit statistischen Untersuchungen recht gut begründen. Sicher sind wir aber nach wie vor nur bei den Distanzen zu den Sternen in der Sonnenumgebung.

Die Versuche zur Distanzmessung der entferntesten Objekte führen direkt zu den zentralen Fragen der heutigen Astronomie über die Entstehung und Entwicklung des Weltalls. Es wäre so keine allzu grosse

Überraschung, wenn die nächsten Erkenntnisse zur Entfernungsbestimmung aus den Elementarteilchenexperimenten am CERN gewonnen würden.

### Hans Roth

Marktgasse 10a  
CH-4310 Rheinfelden

sternenhimmel.info

## Erläuterungen zu den Veränderlichen

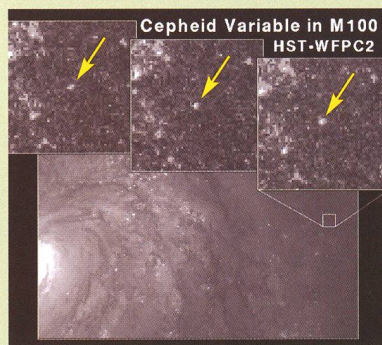
### Bedeckungsveränderliche

Zwei der bekanntesten bedeckungsveränderlichen Sterne sind Algol ( $\beta$  Persei) und  $\beta$  Lyrae. Bei Algol kann die Lichtkurve durch rein geometrische gegenseitige Bedeckung der beiden Komponenten erklärt werden. Interessanter ist  $\beta$  Lyrae: Die Untersuchung des Spektrums, in dem drei verschiedene Komponenten unterschieden werden können, führt zum Modell eines heissen Riesensterns und eines kleinen kühlen Begleiters, die sich sehr nahe sind. Heisse Gase strömen vom Riesen auf den Begleiter über, ein kühler Gasstrom zieht in der umgekehrten Richtung Wegen der Erhaltung des Drehimpulses werden beide Ströme abgelenkt und bilden einen expandierenden Ring um das System.

### Cepheiden

Die Cepheiden sind eine Gruppe der veränderlichen Sterne mit sehr regelmässiger Pulsation (vgl. auch Abbildung 1). Sie haben besondere Bedeutung für die Astrophysik, weil sie als Indikator für die Leuchtkraft und damit für die Sternentfernungen dienen. Sie sind Riesensterne und teilen sich in mehrere verwandte Gruppen. Die klassischen oder Delta-Cepheiden sind die bedeutendste Unterklasse der pulsationsveränderlichen Sterne. Ihren Namen erhielten sie nach dem Stern  $\delta$  Cephei im Sternbild Cepheus. Sie verändern ihre Leuchtkraft streng periodisch, dabei verändert sich auch

ihre Oberflächentemperatur und somit ihre Spektralklasse. Typische Cepheiden pulsieren mit einer Periodendauer von einigen Tagen,  $\delta$  Cephei beispielsweise mit ca. 5,37 Tagen, in denen sich seine Ausdehnung um ca. 2,7 Millionen Kilometer ändert.



### Mira-Veränderliche:

Die Mira-Veränderlichen sind langperiodisch, sie haben ihren Namen vom Stern Mira («der Wunderbare») im Walfisch, dessen Helligkeit sich über einen Bereich von 6 Grössenklassen verändert! Mira selbst ist ein Überriese, der mit einer Periode von etwa 330 Tagen pulsiert. Zu ihm gehört aber noch ein Weisser Zwerg, der ebenfalls veränderlich ist (Periode etwa 14 Jahre). Die Umlaufzeit ist sehr gross (Jahrzehnte bis Jahrhunderte), das System wird durch sich bewegende Gas- und Staubwolken unregelmässig abgeschwächt. (tba/har)

Profittieren Sie von unserer langjährigen Erfahrung in der visuellen und photographischen Astronomie.

**Astro-Optik**  
GmbH  
von Bergen

In unserem Sortiment finden Sie Artikel von:  
ROK - ASTRONOMIK - BACH YARD - BRESSER  
BW-OPTIK - CANON - CORONADO - FREEMEDIA  
GSO - HOFHEIM INSTRUMENTS - INTES MICRO  
HOSMOS - LUMICON - MEADE - MIVAUCHI  
NIKON - PWO - SHV PUB - SLIK - STF - TELE VUE  
TELRAD - VIXEN - ZEISS

[www.fernrohr.ch](http://www.fernrohr.ch)

Eduard von Bergen Dipl. Ing. PH  
CH-6060 Sarnen / Tel. ++41 (0)41 661 12 34

Wir beraten vom Einsteiger bis zum Profi - Ihr Partner in der Schweiz!