

# Astrophysikalisches Praktikum

---

## Versuch 3 Die Hubble-Konstante

---

Gruppe 2: Jan Röder, Julia Lienert

Protokollant: Julia Lienert

Durchgeführt am: 04.09.2018

Assistent: Benjamin Brückner

---

---

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>2</b> |
| <b>2</b> | <b>Methoden zur Entfernungsbestimmung</b>                | <b>2</b> |
| 2.1      | Cepheidenmethode . . . . .                               | 2        |
| 2.2      | Parallaxenmethode . . . . .                              | 2        |
| 2.3      | Supernova Typ 1a . . . . .                               | 3        |
| 2.4      | Kugelsternhaufen . . . . .                               | 3        |
| 2.5      | Tully-Fisher-Beziehung . . . . .                         | 4        |
| <b>3</b> | <b>Messung der Hubble-Konstanten</b>                     | <b>4</b> |
| 3.1      | Aufgabe 1 . . . . .                                      | 4        |
| 3.2      | Aufgabe 2 . . . . .                                      | 4        |
| 3.3      | Aufgabe 3 . . . . .                                      | 5        |
| <b>4</b> | <b>Der Virgo-Galaxienhaufen und die Hubble-Konstante</b> | <b>5</b> |
| 4.1      | Aufgabe 1 . . . . .                                      | 5        |
| 4.2      | Aufgabe 2 . . . . .                                      | 6        |
| 4.3      | Aufgabe 3 . . . . .                                      | 6        |
| 4.4      | Aufgabe 4 . . . . .                                      | 6        |
| 4.5      | Aufgabe 5 . . . . .                                      | 6        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b>  | <b>7</b> |
| <b>6</b> | <b>Quellen</b>   | <b>7</b> |

## 1 Einleitung

Von Edwin Hubble wurde 1929 festgestellt, dass sich das Universum ausdehnt und sich deshalb Galaxien von uns wegbewegen. Die Radialgeschwindigkeit dieser Bewegung ist proportional zum Abstand der Galaxie, wobei der Proportionalitätsfaktor über die sogenannte Hubble-Konstante gegeben ist.

$$v_{rad} = H_0 \cdot r \quad (1)$$

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der Hubble-Konstanten. Die genaue Kenntnis ihres Werts ist wichtig für die Kosmologie, da sie als Maß für Größe und Alter des Universums dient.

Um ihren Wert bestimmen zu können, werden die Messdaten von Perioden und Helligkeiten von Cepheiden verwendet, da aus diesen auf ihren Abstand geschlossen werden kann. Durch zusätzliche Messung der Radialgeschwindigkeit erhält man dann einen Wert für die Hubble-Konstante.

## 2 Methoden zur Entfernungsbestimmung

### 2.1 Cepheidenmethode

Cepheiden sind Sterne, die ihre Helligkeit periodisch ändern. Durch Beobachtung der Periode kann über die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung

$$M = -2.81 \log \left( \frac{P}{\text{Tage}} \right) - 1.43 \quad (2)$$

auf die absolute Helligkeit geschlossen werden. Zusammen mit der scheinbaren (beobachteten) Helligkeit lässt sich der Abstand über das Entfernungsmodul berechnen.

$$m - M = 5 \log \left( \frac{r}{10 \text{ pc}} \right) \quad (3)$$

Diese Methode ist bis zu einigen Megaparsec anwendbar. Mit dem Hubble-Space-Telescope können sogar Sterne in bis zu 20 Mpc Entfernung beobachtet und vermessen werden, was eine Beobachtung auch in benachbarten Galaxien möglich macht.

### 2.2 Parallaxenmethode

Bei dieser Methode wird die scheinbare Bewegung naher Sterne vor einem Fixsternhintergrund weit entfernter Sterne gemessen. Sie kommt dadurch zustande, dass sich die Erde im Lauf eines Jahres um die Sonne bewegt.

Gemessen wird - wie in Abbildung 1 zu sehen ist - der sogenannte Parallaxenwinkel. Über einfache Geometrie kann dann der Abstand des Sterns berechnet werden. Dazu muss der Abstand von der Erde zur Sonne bekannt sein (verwendet wird hierfür der mittlere Kreisbahnradius von 1 AE).

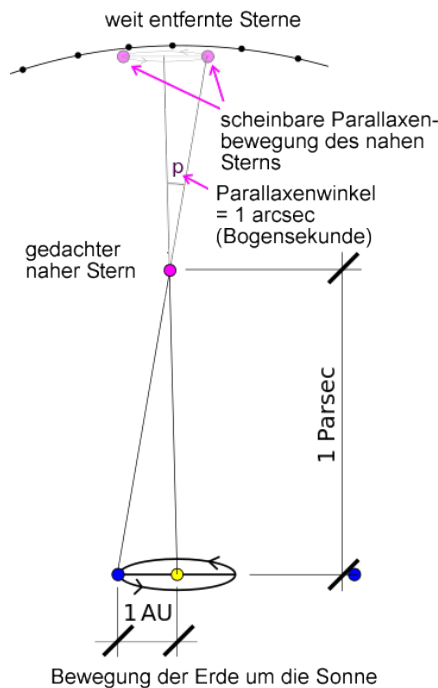


Abbildung 1: Skizze zur Erklärung der Parallaxe (entnommen aus [1])

Entspricht der Parallaxenwinkel genau einer Bogensekunde, so wird die damit verknüpfte Entfernung als 1 pc bezeichnet.

Die Parallaxenmethode kann bis etwa 5000 pc verwendet werden, wenn der Winkel mit dem Hubble-Space-Teleskop gemessen wird.

### 2.3 Supernova Typ 1a

Da Supernovae vom Typ 1a immer gleiche Verläufe ihrer Lichtkurven haben, können sie - wie die Cepheiden - als Standardkerzen verwendet werden. Durch Aufnahme der Lichtkurve und Eichung auf eine Lichtkurve bekannten Abstands lässt sich die Entfernung bestimmen. Diese Methode hat eine Reichweite von über 1000 Mpc, da Supernovae diesen Typs sehr leuchtkräftig sind.

### 2.4 Kugelsternhaufen

Alle Sterne in Kugelsternhaufen haben in etwa die gleiche Entfernung zu uns, deshalb ist auch die Differenz zwischen scheinbarer und absoluter Helligkeit (das Entfernungsmodul, siehe Gleichung (3)) gleich.

Unter der Annahme, dass die Hauptreihensterne in Kugelsternhaufen im Hertzsprung-Russell-Diagramm die gleiche Kurve bilden wie die Sterne in Sonnennähe, kann folgendermaßen der Abstand zu diesen Haufen bestimmt werden: Da die Kurven übereinstimmen sollen, kann hieraus die absolute Helligkeit ermittelt werden. Durch Messen der scheinbaren Helligkeit kann aus dem Entfernungsmodul der Abstand des Haufens berechnet werden.

Es gibt auch noch eine zweite Methode, mit der man mithilfe von Kugelsternhaufen Abstände bestimmen kann: Die Helligkeitsverteilung eines solchen Haufens folgt einer Gaußkurve,

wobei die Position des Maximums bei konstanter absoluter Helligkeit liegt. Mithilfe der scheinbaren Helligkeit kann so wieder die Entfernung bestimmt werden. Hierfür muss allerdings angenommen werden, dass sich der beobachtete Kugelsternhaufen genauso verhält wie diejenigen in der Milchstraße.

Die Reichweite dieser Methode liegt bei 50 Mpc.

## 2.5 Tully-Fisher-Beziehung

Die Tully-Fisher-Relation für Spiralgalaxien lautet:

$$L \propto (v_{max})^\beta \quad (4)$$

Die Leuchtkraft einer Spiralgalaxie ist somit proportional zur Potenz der maximalen Rotationsgeschwindigkeit dieser Galaxie. Die Potenz hängt vom betrachteten Spektralbereich ab.

Die Rotationsgeschwindigkeit erhält man aus der Verbreiterung der Spektrallinien: Diese sind verbreitert, da das Licht aus den sich auf uns zubewegenden Armen blauverschoben und das Licht aus den sich von uns wegbewegenden Armen rotverschoben ist. Je schneller sich die Galaxie dreht, umso stärker wird dieser Effekt.

Andererseits hängt die Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie von deren Masse ab. Unter der Annahme, dass Galaxien mit gleicher Masse gleiche Leuchtkräfte haben und die Leuchtkraft proportional zur Masse zunimmt, kann die absolute Helligkeit der Galaxie berechnet werden. Durch Messen der scheinbaren Helligkeit erhält man über das Entfernungsmodul wieder den Abstand der Galaxie.

Angewendet werden kann diese Methode für Entfernungen größer als 100 Mpc.

## 3 Messung der Hubble-Konstanten

### 3.1 Aufgabe 1

Die Radialgeschwindigkeit ist diejenige Geschwindigkeitskomponente, die entlang der Sichtlinie des Beobachters zeigt. Gemessen werden kann sie durch Aufnahme eines Spektrums des auszumessenden Objekts. Vergleicht man die dort sichtbaren Spektrallinien mit bekannten, kann die Rotverschiebung ermittelt werden. Aus dieser erhält man direkt die Geschwindigkeit in radialer Richtung.

### 3.2 Aufgabe 2

Bei einer Lichtkurve wird die Leuchtkraft gegen die Zeit aufgetragen. Um diese experimentell bestimmen zu können, muss das beobachtete Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten spektroskopisch aufgenommen werden. Die auf dem Detektor sichtbare Helligkeitsänderung kann dann graphisch dargestellt werden.

Bei Cepheiden ändert sich die Leuchtkraft streng periodisch und folgt dabei der Beziehung:

$$M_v = -1.67 \text{ mag} - 2.54 \text{ mag} \cdot \log(P) \quad (5)$$

Die Entfernung eines Cepheiden lässt sich damit folgendermaßen berechnen: Aus der aufgenommenen Lichtkurve kann die Periode ermittelt werden, mit Gleichung (5) erhält man die absolute Helligkeit. Durch Messen der scheinbaren Helligkeit kann dann der Abstand über das Entfernungsmodul (3) berechnet werden.

### 3.3 Aufgabe 3

Zur Aufnahme von Lichtkurven sind Teleskope nötig, deren Auflösungsvermögen über das Rayleigh-Kriterium berechnet werden kann:

$$\Theta_{\min} = 1.22 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right) \quad (6)$$

$\lambda$  entspricht dabei dem beobachteten Wellenlängen-Bereich und  $d$  dem Durchmesser des Objektivs. Der Vorfaktor ist ein Korrekturfaktor, der Beugungseffekte der Optik berücksichtigt.

Die maximal erreichbare Auflösung eines 2.4 m-Teleskops im Bereich des sichtbaren Lichts (500 nm) ist dann  $\Theta_{\min} = 2.542 \cdot 10^{-7} \text{ rad} = (1.456 \cdot 10^{-5})^\circ = 52.426 \text{ mas}$ .

Das Auflösungsvermögen auf der Erde verringert sich dadurch, dass die Atmosphäre bestimmte Wellenlängenbereiche (wie beispielsweise Gamma- und Röntgenstrahlung) absorbiert, sodass diese gar nicht erst beobachtet werden können. Außerdem wird der Nachthimmel aufgehellt durch Airglow, Polarlichter, Zodiakallicht, Sterne, Mond und künstliche Lichtquellen (Siedlungsgebiete), was eine Beobachtung erschwert. Zusätzlich schwächen Staub und Wasserdampf in der Luft das Licht der Sterne, die man beobachten will, ab. Das Auflösungsvermögen verringert sich auch dadurch, dass verschiedene Teile der Atmosphäre unterschiedliche Temperaturen haben, wodurch sich das Sternlicht unterschiedlich stark bricht und nicht geradlinig auf der Erde ankommt.

## 4 Der Virgo-Galaxienhaufen und die Hubble-Konstante

### 4.1 Aufgabe 1

Aus den in der Anleitung gegebenen Lichtkurven für die Cepheiden in der Galaxie M100 kann die Periode und die mittlere scheinbare Helligkeit direkt abgelesen werden. Mithilfe der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung (5) und dem Entfernungsmodul (3) können aus diesen Daten die absolute Helligkeiten und die Entfernungen berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zu sehen.

| Cepheiden | Periode P [Tagen] | abs. Helligk. M [mag] | scheinb. Helligk. m [mag] | Abstand [Mpc] |
|-----------|-------------------|-----------------------|---------------------------|---------------|
| C1        | 53.1              | -6.052                | 24.95                     | 15.864        |
| C2        | 50.0              | -5.985                | 25.35                     | 18.493        |
| C3        | 43.2              | -5.824                | 25.75                     | 20.644        |
| C4        | 39.5              | -5.725                | 25.45                     | 17.179        |
| C5        | 30.4              | -5.436                | 26.40                     | 23.292        |
| C6        | 50.1              | -5.988                | 26.45                     | 30.733        |
| C7        | 29.5              | -5.403                | 26.50                     | 24.021        |
| C8        | 26.2              | -5.272                | 25.80                     | 16.383        |
| C9        | 28.0              | -5.346                | 26.50                     | 23.399        |
| C1        | 24.4              | -5.194                | 25.50                     | 13.766        |
| C11       | 24.0              | -5.176                | 26.15                     | 18.416        |
| C12       | 22.0              | -5.080                | 26.30                     | 18.880        |

Tabelle 1: Abgelesene und berechnete Daten der Cepheiden der Galaxie M100

Um die Entfernung der Galaxie M100 zu erhalten, wird der Mittelwert der Entfernungen der in ihr enthaltenen Cepheiden gebildet. Man erhält  $r = 20.082 \text{ Mpc}$ .

## 4.2 Aufgabe 2

Die leuchtkräftigsten Cepheiden haben absolute Helligkeiten von etwa  $-5$  mag. Da das Hubble-Space-Telescope Sterne mit bis zu 30 mag scheinbarer Helligkeit noch auflösen kann, beträgt die maximale Entfernung, die über die Cepheiden-Methode bestimmt werden kann, 100 Mpc (berechnet über das Entfernungsmodul).

## 4.3 Aufgabe 3

Unter der Annahme, dass die Galaxie M100 im Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens liegt, kann mithilfe von Formel (1) die Hubble-Konstante für gegebene Radialgeschwindigkeiten berechnet werden. Der Abstand  $r$  zum Galaxienhaufen ist hierbei durch die Entfernung zu M100 gegeben.

Es ergeben sich folgende Werte:

1.  $v_{rad} = 1179 \text{ km/s}$ :  $H_0 = 58.709 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

2.  $v_{rad} = 1404 \text{ km/s}$ :  $H_0 = 69.913 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Zur Bestimmung der Hubble-Konstanten ist es in diesem Fall sinnvoll, die Radialgeschwindigkeit des Virgo-Haufens anstatt derjenigen von M100 zu benutzen, da sich vermutlich M100 innerhalb des Haufens auch noch bewegt. Deshalb ist es besser, für die Radialgeschwindigkeit ein größeres Gebiet zu betrachten.

## 4.4 Aufgabe 4

Da M100 einen viel größeren scheinbaren Durchmesser als die restlichen Spiralgalaxien im Virgo-Galaxienhaufen hat, wird davon ausgegangen, dass sie am vorderen Rand des Haufens liegt (und nicht - wie ursprünglich angenommen - im Zentrum). Damit entspricht unsere Entfernung zum Virgo-Haufen nicht der Entfernung zu M100, sondern der Summe aus der Entfernung zu M100 und dem Radius des Haufens, wenn dieser als kugelförmig angenommen wird.

Zur Bestimmung des Radius wird folgendermaßen vorgegangen: Die scheinbare Größe des Virgo-Haufens beträgt  $15^\circ \times 40^\circ$ . Der Mittelwert dieser beiden Zahlenwerte liegt bei  $\alpha = 27.5^\circ$ , was dem Durchmesser des als Kugel gedachten Haufens entspricht. Der Radius wird dann über  $x = d \tan(\alpha)$  ( $d = 20.082 \text{ Mpc}$  ist die Entfernung zu M100) zu  $x = 4.729 \text{ Mpc}$  bestimmt. Damit beträgt der neue Abstand zum Virgo-Haufen  $r = d + x = 24.811 \text{ Mpc}$ .

Für die Hubble-Konstante ergeben sich damit folgende Werte:

1.  $v_{rad} = 1179 \text{ km/s}$ :  $H_0 = 47.519 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

2.  $v_{rad} = 1404 \text{ km/s}$ :  $H_0 = 56.588 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

## 4.5 Aufgabe 5

Der in den obigen Aufgaben bestimmte Wert ist ein lokaler Wert der Hubble-Konstanten, da zu seiner Bestimmung lediglich die Radialgeschwindigkeit des Virgo-Galaxienhaufens verwendet wurde. Dieser kann deshalb von einem globalen Wert der Hubble-Konstanten abweichen, weil der Haufen sich nicht nur aufgrund der kosmischen Expansion bewegt sondern auch eine Eigenbewegung haben kann. Um eine globale Hubble-Konstante bestimmen zu können, müssen viele Galaxien(haufen) in genügend großer Entfernung bezüglich ihrer Radialgeschwindigkeit untersucht werden. So ist es möglich, die beiden Bewegungen (kosmische Expansion und Eigenbewegung zu trennen).

## 5 Diskussion

Im ersten Teil des Versuchs wurden Informationen dazu gesammelt, wie Entfernungen und Radialgeschwindigkeiten im Universum gemessen werden können, wobei vor allem auf die Cepheidenmethode näher eingegangen wurde. Im zweiten Teil des Versuchs ging es dann um die Auswertung gegebener Cepheidendaten, aus denen schlussendlich die Hubble-Konstante bestimmt werden konnte.

Der Wert der Hubble-Konstanten lässt sich zwar über Gleichung (1) relativ leicht bestimmen, jedoch gibt es einige Unsicherheitsfaktoren bei der Messung und Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten und der Abstände. Eine möglichst genaue Berechnung wird limitiert durch das Auflösungsvermögen der Teleskope, mit denen die Lichtkurven der Cepheiden aufgenommen werden. Außerdem entspricht die gemessene Radialgeschwindigkeit eines Objekts nicht zwangsläufig nur der kosmischen Expansion, sondern enthält Anteile einer Eigenbewegung.

Um folglich einen möglichst genauen, globalen Wert der Hubble-Konstanten zu erhalten, sollten viele Objekte in großer Entfernung vermessen werden.

## 6 Quellen

1. <https://de.wikipedia.org/wiki/Parallaxe>