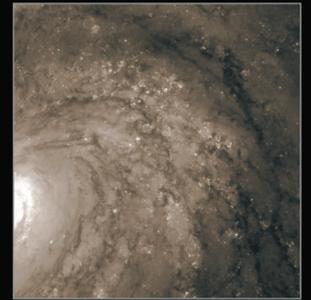


ASTRONOMISCHE ÜBUNGSREIHE DER ESA/ESO

Astronomische Schülerübungen basierend auf
Beobachtungsdaten des NASA/ESA
Hubble Weltraumteleskops
und der ESO Teleskope.



Übung ②



Bestimmung der Entfernung zu M100 mit Cepheiden
Basierend auf Beobachtungen mit dem NASA/ESA Hubble Space Teleskop



Inhaltsverzeichnis

Astronomische Übungsreihe der ESA/ESO Teil 2

Vorwort

- Vorwort..... Seite 2

Einleitung

- Kosmologie und Entfernungsbestimmungen Seite 3
- Cepheiden zur Entfernungsabschätzung Seite 5
- M100-eine große Spirale Seite 7

Aufgaben

- Messungen und Berechnungen Seite 8
- Aufgabe 1 Seite 8
- Aufgabe 2 Seite 9
- Aufgabe 3 Seite 10
- Aufgabe 4 Seite 10
- Aufgabe 5 Seite 11
- Aufgabe 6 Seite 11
- Aufgabe 7 Seite 11
- Aufgabe 8 Seite 11

Weiterführende Literatur

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen Seite 12

Für den Lehrer

- Für den Lehrer Seite 14

Vorwort

Astronomische Übungsreihe der ESA/ESO Teil 2

Bestimmung der Entfernung zu M100 mit Cepheiden

Astronomie ist eine leicht zugängliche und anschauliche Wissenschaft, welche ideal für die Verwendung im Schulunterricht ist. In den letzten Jahren haben das NASA/ESA Hubble Weltraumteleskop und die ESO Teleskope auf den Beobachtungsstationen La Silla und Paranal in Chile immer spektakulärere und tiefere Einblicke in das Universum geliefert. Hubble und die ESO Teleskope haben nicht nur faszinierende neue Bilder geliefert, sie sind gleichzeitig auch als Werkzeuge für Astronomen von unschätzbarem Wert. Die Teleskope haben hervorragende räumliche Auflösung/Winkelauflösung (Bildschärfe) und erlauben den Astronomen tiefer als je zuvor ins Universum zu blicken und dabei seit langem anstehende Fragen zu beantworten.

Obwohl die Analyse von solchen Beobachtungen im Detail oft wissenschaftlich sehr anspruchsvoll ist, können sie manchmal einfach genug sein, dass auch Oberstufenschüler die Möglichkeit haben, die Auswertung selbständig nachzuvollziehen.

Diese Übungsreihe wurde gemeinsam von der ESA (European Space Agency), dem europäischen Partner des Hubble Projekts, welche 15% der Beobachtungszeit am Hubble besitzen, und der ESO (European Southern Observatory, Europäische Südsternwarte) erstellt.



Abbildung 1 : Das NASA / ESA Hubble Weltraum Teleskop
The NASA/ESA Hubble Weltraum Teleskop hat spektakuläre Erkenntnisse über das Universum von seiner Umlaufbahn um die Erde geliefert.



Einleitung

Kosmologie und Entfernungsbestimmungen

Wie alt ist das Universum? Wie schnell expandiert es? Wird es sich eines Tages wieder zusammenziehen? Dies sind fundamentale Fragen in der Kosmologie, die schon lange auf zufriedenstellende Antworten warten.

Das Schicksal des Universums ist eng verknüpft mit dem zukünftigen Verhalten der zukünftigen Entwicklung seiner Expansionsrate. Wenn die Expansion genügend abbrems, dann fängt das Universum vielleicht eines Tages an, sich wieder

zusammenzuziehen. Gegenwärtig schließt man aus Beobachtungen, dass es wahrscheinlicher ist, dass das Universum sich immer weiter ausdehnen wird.

Die Ausdehnung verursacht, dass sich alle Galaxien von einem Beobachter (zum Beispiel auf der Erde) entfernen, und je weiter weg sie sind, desto schneller bewegen sie sich weg. Der Ausdruck, der als Hubble-Gesetz bekannt ist (formuliert von Edwin Hubble im Jahr 1929), beschreibt die Beziehung zwischen der Entfernung eines Objekts und seiner Fluchtgeschwindigkeit. Das Hubble-Gesetz lautet:
$$v = H_0 D$$

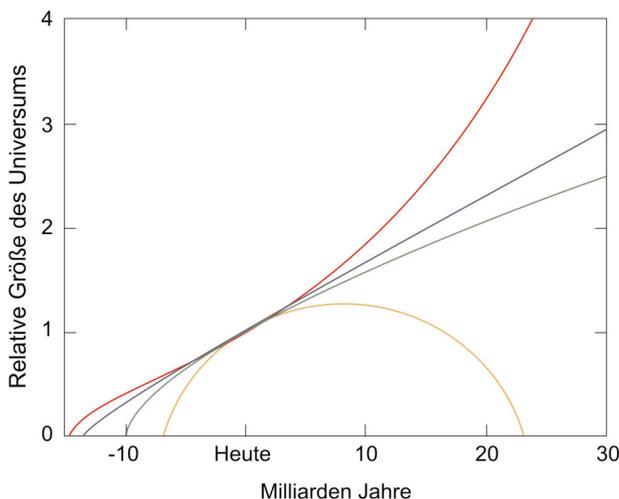


Abbildung 2: Das Schicksal des Universums
Diese Graphik bringt die Größe des Universums mit der Zeit in Beziehung — in anderen Worten, sie zeigt, wie es mit der Zeit expandiert und/oder sich zusammenzieht. Die unterschiedlichen Linien 'in der Zukunft' (rechts im Diagramm) zeigen verschiedene Modelle für das Schicksal des Universums—ein Universum, das sich ewig ausdehnt, oder ein Universum, das sich zusammenzieht.

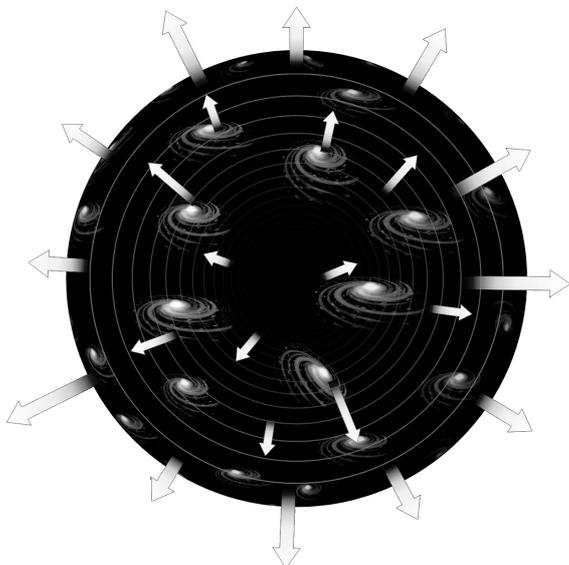


Abbildung 3: Zurückweichende Galaxien
Dieses Diagramm illustriert, wie sich die Galaxien wegen der Ausdehnung des Universums voneinander entfernen.



Einleitung

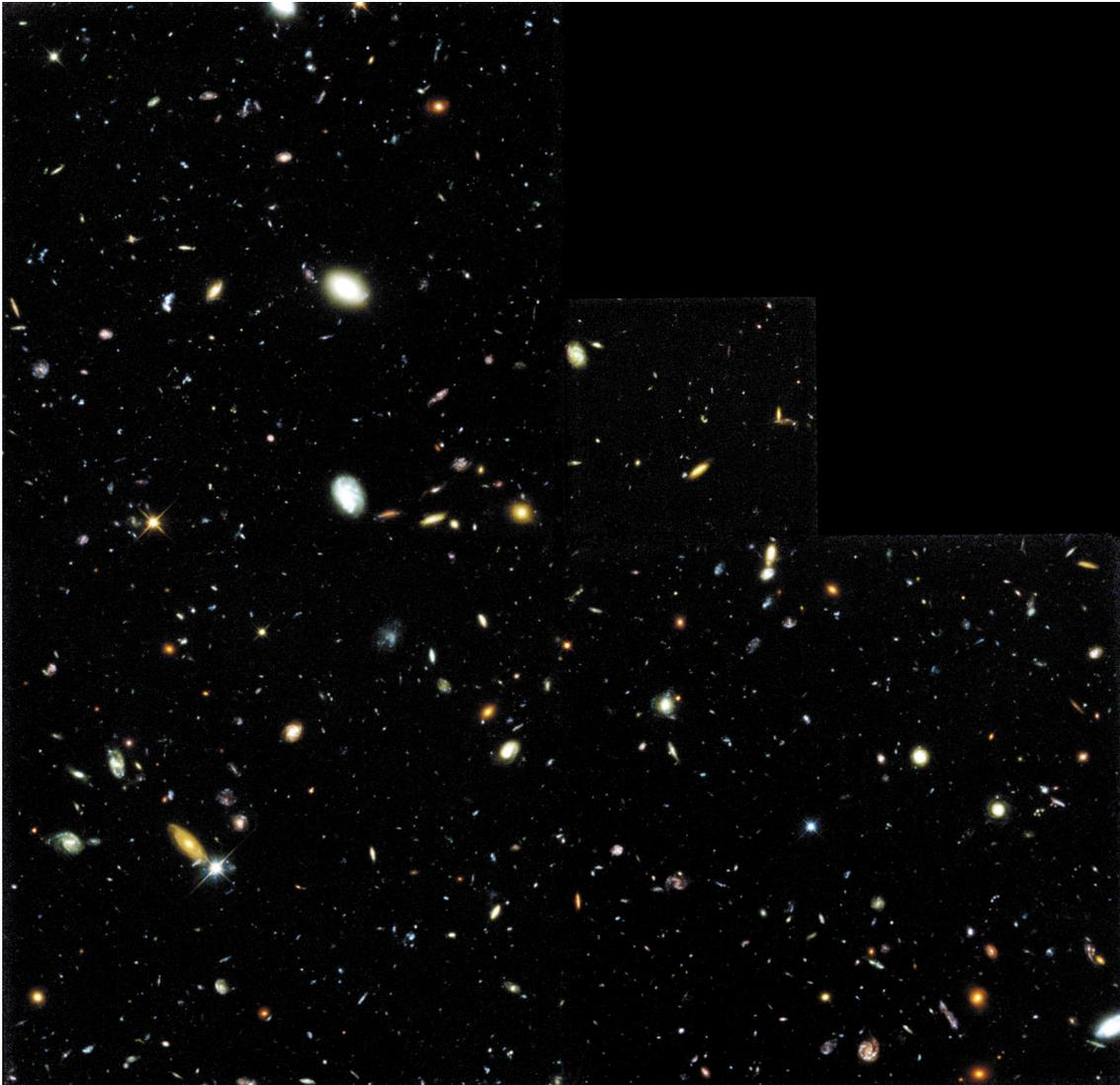


Abbildung 4: Entfernte Galaxien mit hoher Rotverschiebung

Dieses Bild, aufgenommen mit der Wide Field and Planetary Camera (WFPC2) des Hubble Space Teleskopes, zeigt viele Galaxien, Milliarden von Lichtjahren entfernt. Die meisten der unscharfen Flecken sind Galaxien, die Milliarden von Sternen enthalten. Die Galaxien in diesem Bild entfernen sich von uns mit großen Geschwindigkeiten.

Es besagt, dass sich die Galaxien in unserem Universum voneinander mit einer Geschwindigkeit v entfernen, proportional zur Entfernung D zwischen ihnen. H_0 —die Hubblekonstante— ist eine fundamentale Eigenschaft des Universums, wichtig für viele kosmologische Fragen, und sie ist ein Maß dafür, wie schnell das Universum heute expandiert.

Das Alter der Universums, t , kann durch die Inverse (oder den Kehrwert) der Hubblekonstanten H_0 angenähert werden:

$$t=1/H_0$$

Der Wert von H_0 hat eine sehr große Bedeutung für Schätzungen des Alters des Universums. Aber wie messen wir ihn? Um H_0 zu bestimmen, müssen wir "einfach" die Fluchtgeschwindigkeit v und die Distanz D für ein Objekt messen, üblicherweise für eine Galaxie, oder besser für viele Galaxien, und einen mittleren Messwert finden.

Die Fluchtgeschwindigkeit ist relativ einfach zu bestimmen: Wir können die sogenannte Rotverschiebung des Lichtes der Galaxie messen. Die Rotverschiebung ist eine direkte Folge der Bewegung eines Objekts, das sich von uns ent-



Einleitung



Abbildung 5:
Henrietta Leavitt
Das Verständnis der relativen Helligkeit und Variabilität von Sternen wurde durch die Arbeit von Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) revolutioniert. Am Harvard College Observatory kalibrierte Leavitt die photographischen Helligkeiten von 47

Sternen, die als Standardbezugspunkt oder "Standardkerzen" für die Helligkeiten aller anderen Sterne dienen sollten. Leavitt entdeckte und katalogisierte über 1500 variable Sterne in den nahen Magellanschen Wolken. Mithilfe dieses Kataloges entdeckte sie, dass hellere Cepheiden eine längere Zeit brauchen, um ihre Helligkeit zu ändern, eine Tatsache, die heute dazu verwendet wird, den Entfernungsmaßstab unseres Universums zu kalibrieren (zur Verfügung gestellt von AAVSO).

fernt. Es ist eine Dopplerverschiebung des Lichts von den einzelnen Galaxien, die zu einer Verschiebung der Wellenlänge des Lichts der Galaxien zum roten Ende des Spektrums führt. Da die Wellenlänge des roten Lichts länger als die des blauen Lichts ist, wurde die Wellenlänge des Lichts der Galaxien während der Reise zur Erde größer. Die Änderung der Wellenlänge aufgrund der Dopplerverschiebung wird Rotverschiebung genannt, und Galaxien mit einer großen Rotverschiebung haben große Fluchtgeschwindigkeiten.

Cepheiden zur Entfernungsabschätzung

Die Entfernung zu einem astronomischen Objekt zu messen ist viel schwieriger, und es ist eine der größten Herausforderungen, die den Astronomen begegnet. Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl verschiedener Entfernungsbestimmungsmethoden gefunden. Eine von diesen Methoden verwendet eine Klasse von Sternen, die als Cepheiden-Variable bekannt sind.

Cepheiden sind seltene und sehr leuchtkräftige Sterne, deren Leuchtkraft sich sehr regelmäßig verändert. Sie sind nach dem Stern δ Cephei in der Konstellation Kepheus benannt, der das erste bekannte Beispiel für diesen speziellen Typ von variablen Sternen war und ein leicht zu beobachtendes Objekt für das bloße Auge ist.

Im Jahr 1912 beobachtete die Astronomin Henrietta Leavitt (siehe Abbildung 5) 20 Cepheiden-Veränderliche in der Kleinen Magellanschen Wolke (SMC- Small Magellanic Cloud). Die geringfügigen Änderungen in der Entfernung zu den einzelnen variablen Sternen in der Wolke sind vernachlässigbar im Vergleich zu der viel größeren Entfernung zur SMC. Die helleren Sterne in dieser Gruppe sind in der Tat absolut heller und nicht nur scheinbar, weil sie näher sind. Henrietta Leavitt entdeckte eine Beziehung zwischen der intrinsischen Helligkeit und der Pulsationsperiode von Cepheiden-Veränderlichen, und sie zeigte, dass hellere Cepheiden längere Perioden besitzen.

Daher kann man durch Beobachten der Periode eines Cepheiden seine intrinsische Helligkeit und somit durch Beobachten seiner scheinbaren

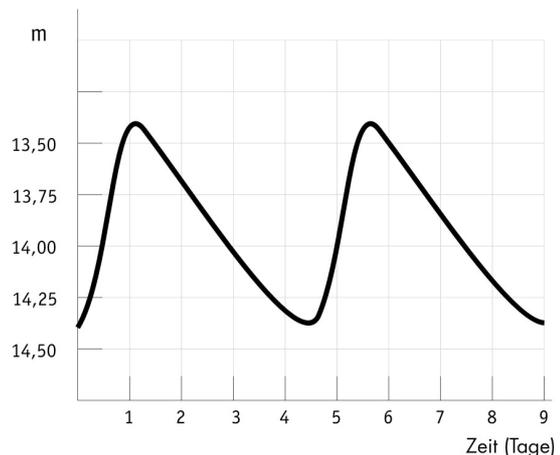


Abbildung 6: Typische Cepheiden-Lichtkurve
Die Lichtkurve eines Cepheiden hat ein typisches Profil: die Helligkeit steigt steil an und fällt flacher ab. Die Amplitude der Schwankung beträgt typischerweise 1-2 Magnituden.

Helligkeit seine Entfernung berechnen. So können Cepheiden-Veränderliche als eine der "Standardkerzen" im Universum verwendet werden, die entweder selbst als Entfernungskennzeichen dienen oder verwendet werden können, um andere Entfernungskennzeichen zu kalibrieren (oder den Nullpunkt zu setzen). Cepheiden-Veränderliche können von anderen Veränderlichen durch ihre charakteristischen Lichtkurven unterschieden werden (siehe Abbildung 6).



Einleitung

Die genauesten Messungen für Geschwindigkeit und Entfernung kann man verständlicherweise für Objekte erhalten, die relativ nahe zur Milchstraße liegen. Bevor das NASA/ESA Hubble Weltraum Teleskop zur Verfügung stand, hatten erdgebundene Observatorien Cepheiden-Veränderliche in Galaxien mit bis zu 3.5 Megaparsec (siehe Mathematische Werkzeuge für die Definition von Megaparsec) Entfernung von unserer Sonne entdeckt.

Dennoch spielt bei diesen Distanzen noch ein Geschwindigkeitseffekt eine Rolle. Galaxien ziehen einander durch ihre Gravitation an, und dies führt zu einer ungleichmäßigen Komponente der Bewegung, die unsere Messungen des

uniformen Teils der Geschwindigkeit der Expansion des Universums beeinflusst. Diese ungleichmäßige Komponente der Geschwindigkeit ist als Eigengeschwindigkeit bekannt, und der Effekt ist vergleichbar mit der Expansionsgeschwindigkeit in unserem lokalen Teil des Universums. Um die Gesamtexpansion des Universums zu untersuchen, braucht man verlässliche Entfernungsmessungen von weiter entfernten Galaxien, wo die Expansionsgeschwindigkeit deutlich höher als die Eigengeschwindigkeit ist. Das Hubble-Teleskop hat Cepheiden in Galaxien gemessen, die bis zu ca. 20 Megaparsec entfernt sind.

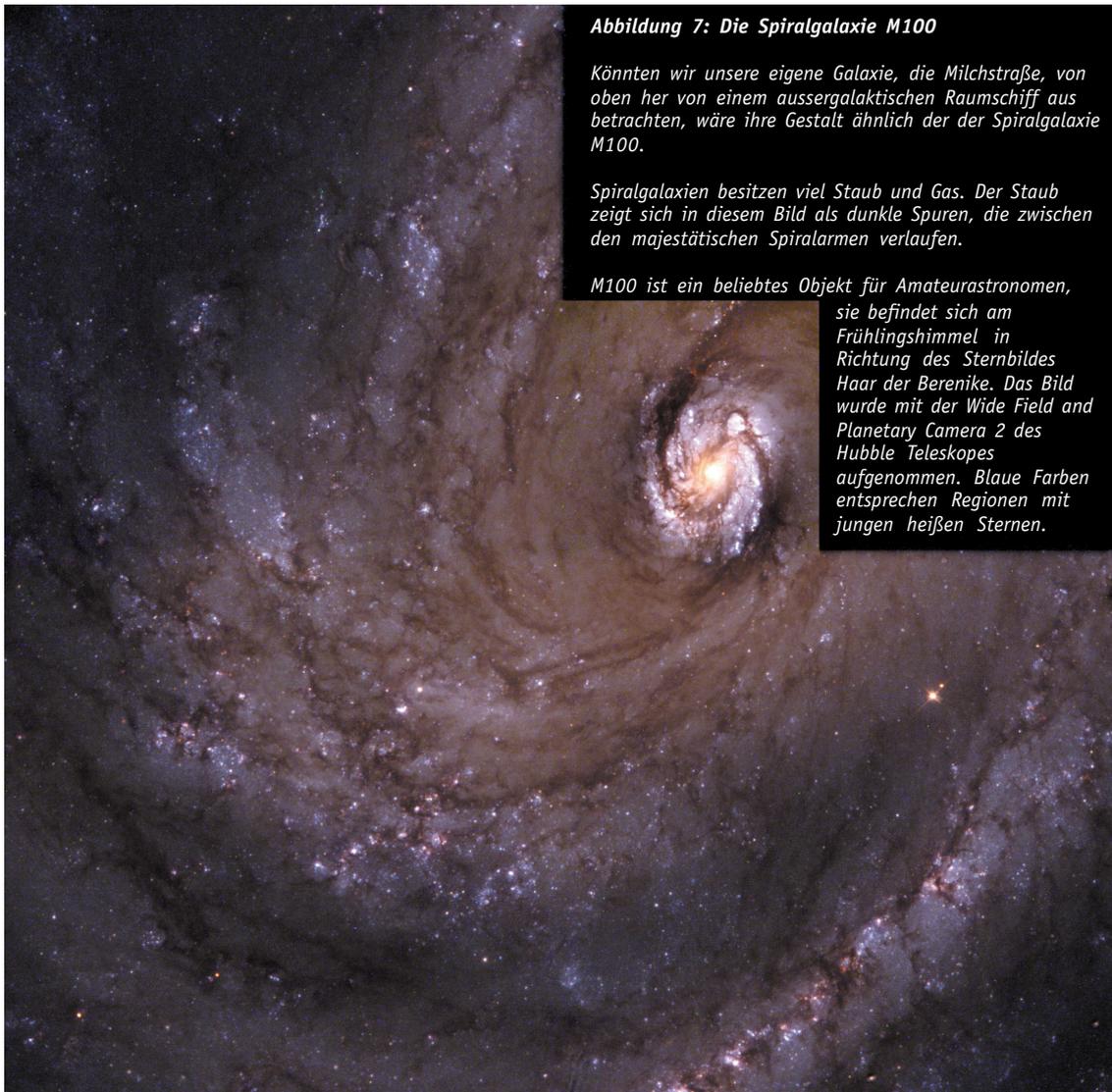


Abbildung 7: Die Spiralgalaxie M100

Könnten wir unsere eigene Galaxie, die Milchstraße, von oben her von einem aussergalaktischen Raumschiff aus betrachten, wäre ihre Gestalt ähnlich der der Spiralgalaxie M100.

Spiralgalaxien besitzen viel Staub und Gas. Der Staub zeigt sich in diesem Bild als dunkle Spuren, die zwischen den majestätischen Spiralarmen verlaufen.

M100 ist ein beliebtes Objekt für Amateurastronomen, sie befindet sich am Frühlingshimmel in Richtung des Sternbildes Haar der Berenike. Das Bild wurde mit der Wide Field and Planetary Camera 2 des Hubble Teleskopes aufgenommen. Blaue Farben entsprechen Regionen mit jungen heißen Sternen.



Einleitung

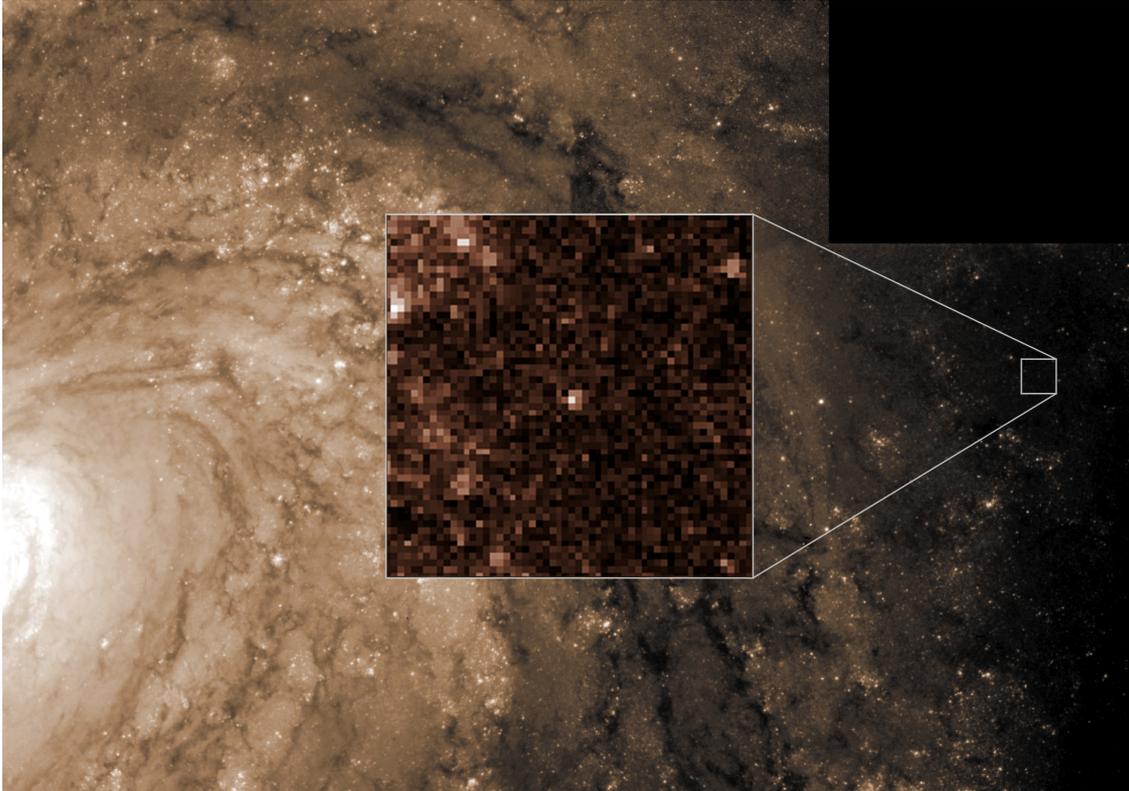


Abbildung 8: Hubble stößt Cepheiden-Veränderliche in M100 auf

Hubbles Kamera mit hoher Auflösung entdeckte und wählte einen der Cepheiden aus, die in dieser Übung verwendet werden. Der Stern befindet sich in einem Sternentstehungsgebiet in einem der Spiralarme der Galaxie (der Stern liegt im Zentrum der Box).

Bevor Hubble diese Messungen durchgeführt hatte, waren sich die Astronomen nicht darüber einig, ob das Universum 10 oder 20 Milliarden Jahre alt ist. Nun ist die Übereinstimmung im allgemeinen viel besser – das Alter des Universums wird auf 12 bis 14 Milliarden Jahre geschätzt.

Eines von Hubbles Schlüsselprojekten hatte als langfristiges Ziel, einen genaueren Wert für die Hubblekonstante und das Alter des Universums zu finden. Achtzehn Galaxien in verschiedenen Entfernungen wurden beobachtet, um darin Cepheiden-Veränderliche zu finden. Eine dieser Galaxien ist M100.

M100 — Eine große Spirale

Die Galaxie M100 ist eine herrliche Spiralgalaxie im großen Virgo-Galaxienhaufen. Der Virgohaufen besteht aus 2500 Galaxien. M100 ist ein rotierendes System aus Gas, Staub und Sternen

ähnlich der Milchstraße, und wir sehen es von oben her. Der Name M100 kommt von der Tatsache, dass es die Nummer 100 im Messier-Katalog der nichtstellaren Objekte bekam.

M100 ist eine der weiter entfernten Galaxien, in der genaue Messungen von Cepheiden-Veränderlichen gemacht wurden. Diese Übung beruht auf Bildern des Hubble Weltraum Teleskops und Daten von dieser Galaxie.



Aufgaben

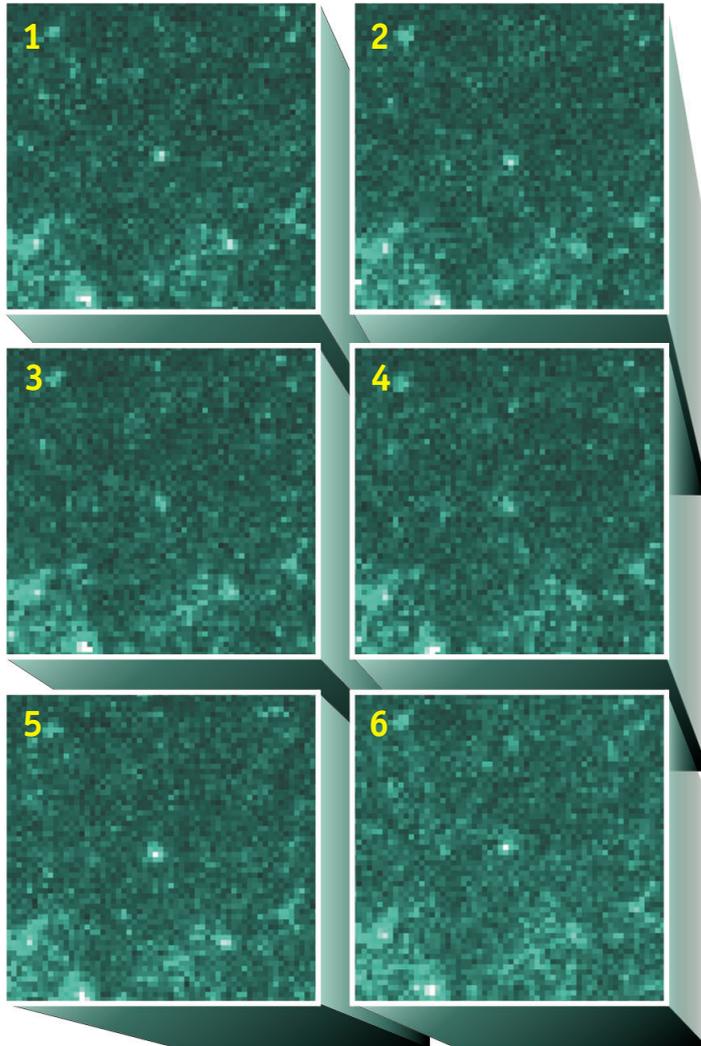


Abbildung 9: Ein Cepheiden-Veränderlicher in M100

Sechs Bilder, zu verschiedenen Zeiten aufgenommen, beschreiben einen der Cepheiden in der Galaxie M100. Der Cepheid befindet sich im Zentrum eines jeden Bildes. Es ist deutlich, dass der Cepheid seine Helligkeit mit der Zeit ändert.

Messungen und Berechnungen

Die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für Cepheiden-Veränderliche wurde seit Henrietta Leavitts ersten Messungen oft überarbeitet. Heute ist die beste Abschätzung der Beziehung die folgende:

$$M = -2.78 \log (P) - 1.35$$

Hier ist M die absolute Helligkeit des Sterns, und P ist die Periode gemessen in Tagen.

Die Lichtkurven der 12 Cepheiden, die von Hubble in M100 gemessen wurden, sind auf Seite 9 und 10 abgebildet.

Aufgabe 1

- ?
- Berechne die absolute Helligkeit M für diese 12 Sterne, indem du die Information aus diesen Lichtkurven verwendest. Unser Ziel ist es, die Entfernung zu M100 zu bestimmen. Wenn du dich an die Distanzgleichung erinnerst, wirst du wissen, dass die absolute Helligkeit allein nicht genug ist, um die Entfernung zu berechnen — man braucht auch die scheinbare Helligkeit.



Aufgaben

Abgesehen von Problemen, die Menge des empfangenen Lichts genau zu messen und die gemessenen Magnituden zu kalibrieren, haben Astronomen hundert Jahre lang diskutiert, welche scheinbare Helligkeit m in der Entfernungsgleichung für einen Cepheiden zu verwenden ist, der seine Helligkeit ändert.

Aufgabe 2

- Überlege dir eine Methode, die scheinbare Helligkeit abzuschätzen, indem du die Lichtkurven verwendest.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts maßen die Astronomen die minimale scheinbare Helligkeit (m_{\min}) und die maximale scheinbare Helligkeit (m_{\max}) und bildeten dann den Mittelwert ($\langle m \rangle$) von beiden.

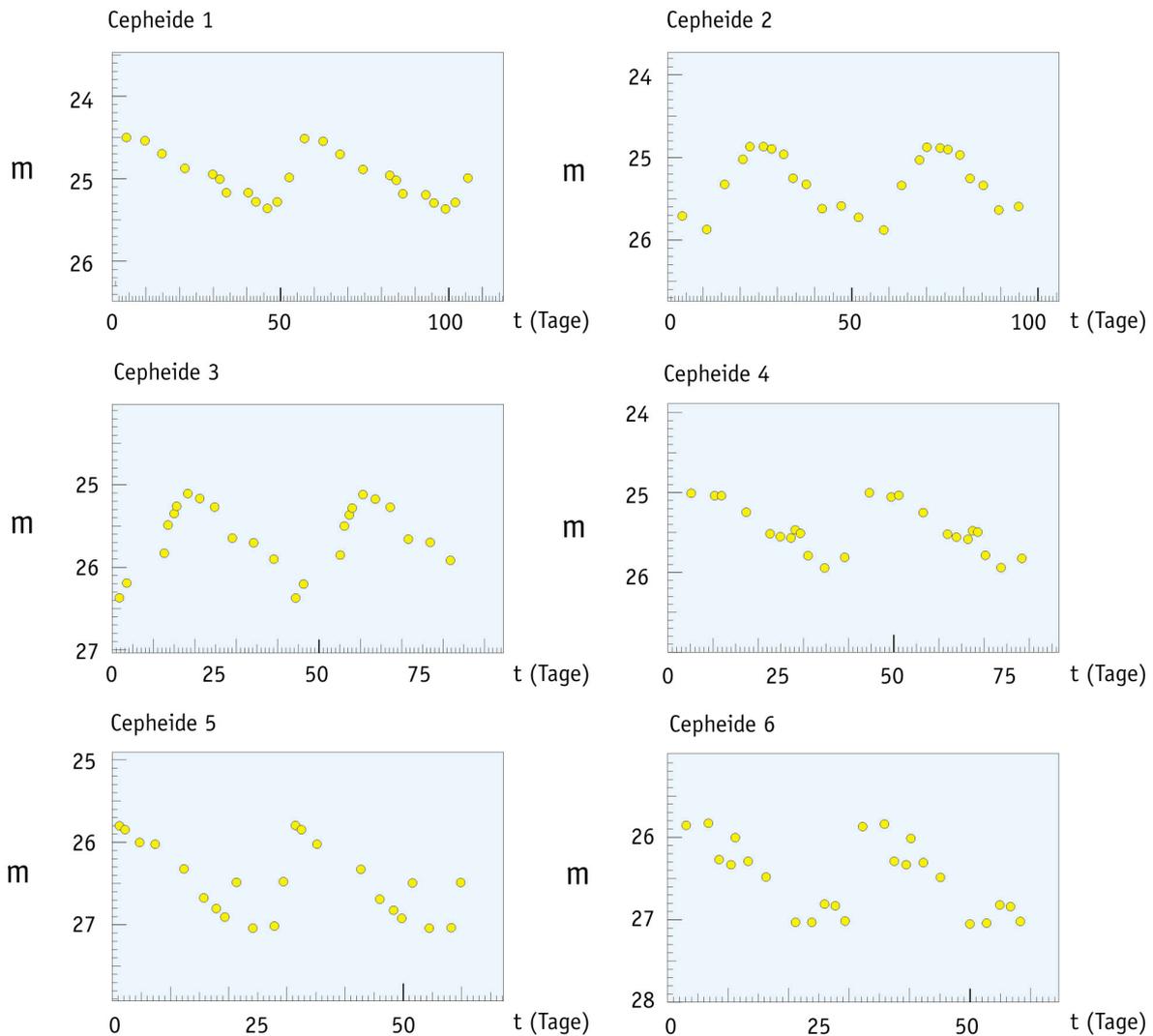


Abbildung 10: Cepheiden-Lichtkurven

Lichtkurven für die 12 Cepheiden-Veränderlichen in M100, die mit Hubble beobachtet wurden. Die absolute Helligkeit, M , wird durch die Periode der Cepheiden bestimmt. Adaptiert von Freedman et al. (1994).



Aufgaben

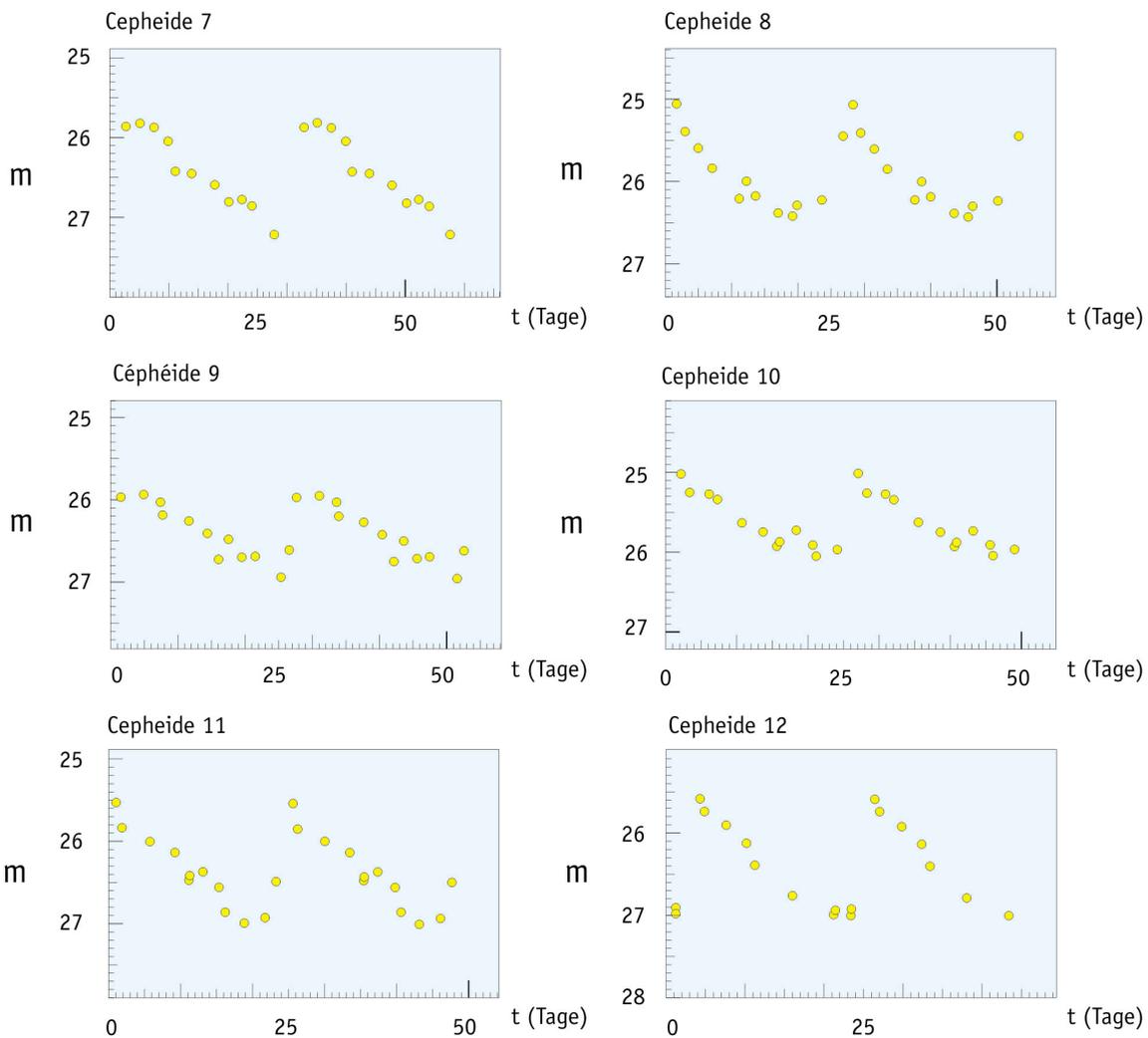


Abbildung 10 (Fortsetzung): Cepheiden-Lichtkurven

Wenn du das anwendest — oder deine eigene Methode verwendest, hast du nun alle Information, die du brauchst, um die Entfernung zu M100 zu berechnen.

Aufgabe 3

- Berechne $\langle m \rangle$ und d (in Mpc) für jeden der Cepheiden.

Du kannst diese Rechnung natürlich zwölfmal ausführen, aber du kannst den Arbeits-

aufwand verringern, indem du zum Beispiel ein kleines Programm für den Taschenrechner schreibst oder eine Tabellenkalkulation verwendest.

Aufgabe 4

- Überlege dir mögliche Gründe, warum du nicht genau die gleichen Entfernungen für die verschiedenen Cepheiden findest.



Aufgaben

Aufgabe 5

- ? Du hast nun die Entfernungen zu den 12 verschiedenen Cepheiden in M100 berechnet. Bekommst du daraus die Entfernung zu M100?
- ? Könnte die Tatsache, dass die 12 Sterne verschiedene Positionen in M100 haben, der Grund für die Abweichung der Entfernungen der 12 Sterne sein?
- ? Finde heraus, wie groß die Milchstraße ist (du kannst zum Beispiel in einem Astronomiebuch oder im Internet nachschauen). Nimm an, dass M100 ungefähr gleich groß ist. Nun überlege dir noch einmal die vorhergehende Frage.

Aufgabe 6

- ? Berechne den Mittelwert der Entfernungen zu den 12 Cepheiden und nimm an, dass dies die Entfernung zu M100 ist.
- ? In der Originalarbeit, die die Hubble-Messungen verwendet haben, wurde die Entfernung zu M100 als 17.1 ± 1.8 Mpc berechnet. Bei dieser Berechnung wurde das Vorhandensein von interstellarem Staub mit in Betracht gezogen. Vergleiche deine Ergebnisse mit dieser Entfernung

Aufgabe 7

Wie du dich vielleicht von der Einleitung her erinnerst (Seite 4), kann die Fluchtgeschwindigkeit v einer Galaxie wie M100 zusammen mit Information über deren Entfernung einen Wert für die allgemeine Expansionsgeschwindigkeit des Universums geben, die durch die Hubblekonstante H_0 beschrieben wird. H_0 wird in Einheiten von km/s/Mpc ausgedrückt. Die Fluchtgeschwindigkeit des Virgoaufens, zu dem M100 gehört, wurde schon früher mit 1400 km/s gemessen (Freedman et al., 1994).

Berechne die Hubblekonstante und verwende dazu dieses v und den Mittelwert deiner Entfernungsmessungen als D .

Aufgabe 8

- ? Berechne einen Wert für das Alter des Universums, wenn du annimmst, dass das Alter des Universums, t , durch $t = 1/H_0$ gegeben ist. Denk daran, die Werte in die korrekten Einheiten umzurechnen. Wieviel größer ist dieser Wert als das Alter der Erde?



Weiterführende Literatur

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., and Illingworth, G.D., 1994, *Nature*, 371, 757-762.: *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

Siehe auch Weblinks auf:
<http://www.astroex.org/>



Colophon



ESA/ESO Astronomische Übungsreihe
Übung 2: Bestimmung der Entfernung zu M100 mit
Cepheiden
1. Auflage (Übersetzung der 2. englischen Auflage
vom 23.05.2002)

Produziert von:
the Hubble European Space Agency Information
Centre und der Europäischen Südsternwarte:
<http://www.astroex.org/>
(Pdf-Versionen dieses Materials und verwandte
Weblinks finden sich unter dieser WWW-Adresse)

Postanschrift:
Europäische Südsternwarte
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Deutschland

Telefon: +49 89 3200 6306 (oder 3200 60)
Fax: +49 89 3200 64 80 (oder 320 32 62)
E-mail: info@astroex.org

Ursprüngliche Idee und Text:
Emma Fosbury and Robert A.E. Fosbury

Text :
Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,
Jean-Marc Brauer, and Arntraud Bacher

Grafik und Layout:
Martin Kornmesser

Übersetzung:
Birgit Armsdorfer,
Paul Scheier und Arntraud Bacher

Korrekturlesen:
Paul Schleier und Arntraud Bacher

Koordination:
Lars Lindberg Christensen and Richard West

Dank an das Tycho Brahe Planetarium, Dänemark,
für die Inspiration, an Wendy Freedmann, die die
Daten zur Verfügung gestellt hat, und an Nina
Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, für
Kommentare.



Für den Lehrer

Kurze Übersicht

In dieser Übung messen wir die Periode und scheinbare Helligkeit von Cepheiden-Veränderlichen in der Galaxie M100. Die absolute Helligkeit erhält man aus der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung, und die Entfernung zu M100 kann dann mithilfe der Entfernungsbeziehung bestimmt werden. Schließlich berechnen wir einen Wert für die Hubblekonstante (indem wir einen Wert für die Fluchtgeschwindigkeit von M100 verwenden, den andere Wissenschaftler bestimmt haben) und schätzen das Alter des Universums ab.

Diese Erläuterungen für den Lehrer enthalten die Lösungen der Aufgaben sowie eine Diskussion der Näherungen und Vereinfachungen, die in der Übung gemacht wurden.

Die Hypothese, dass sich das Universum seit dem Urknall mit einer konstanten Geschwindigkeit ausdehnt, ist genau genommen nur in bestimmten kosmologischen Modellen richtig. Eine solche Expansion ist nur möglich, wenn das Universum sehr wenig Materie enthält, da jede Art von Materie, ob sichtbar oder unsichtbar, durch ihre Gravitation die Expansionsrate verlangsamt. Neue Ergebnisse führten zu keinen bestimmten Schlussfolgerungen, die die Expansionsrate des Universums betreffen, und so können wir den Ausdruck, der in diesen Aufgaben verwendet wird, als eine einfache, aber sinnvolle Näherung betrachten.

Zu bemerken ist, dass das Universum nach neuen kosmologischen Modellen eine Phase verlangsamer Ausdehnung durchmachte (verursacht durch die Auswirkungen der Gravitation von dunkler und normaler Materie), die bis ungefähr fünf Milliarden Jahre nach dem Urknall andauerte. Es scheint, dass das Universum seitdem in eine Periode mit beschleunigter Expansionsrate eintrat, in der eine geheimnisvolle "abstoßende Gravitation" wirkt. Diese Kraft ist auch unter den Namen "Dunkle Energie" oder "Quintessenz" (das fünfte Element) bekannt.

Cepheiden Nummer	t2	t1	Periode = t2-t1	M	m max	m min	m mittel	D Mpc	D mittel Mpc
1	100,0	46,5	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,25	19,85
2	58,5	11,0	47,5	-6,01	24,90	25,90	25,40	19,15	
3	61,0	18,5	42,5	-5,88	25,10	26,40	25,75	21,15	
4	74,0	35,0	39,0	-5,77	25,00	25,95	25,48	17,77	
5	50,0	19,0	31,0	-5,50	25,80	27,05	26,43	24,22	
6	50,0	21,0	29,0	-5,42	25,80	27,10	26,45	23,61	
7	35,0	4,5	30,5	-5,48	25,80	27,20	26,50	24,85	
8	46,0	19,0	27,0	-5,33	25,05	26,40	25,73	16,25	
9	31,0	5,0	26,0	-5,28	25,90	27,00	26,45	22,22	
10	27,0	2,5	24,5	-5,21	25,00	26,10	25,55	14,20	
11	43,0	19,0	24,0	-5,19	25,55	27,00	26,28	19,61	
12	38,0	16,0	22,0	-5,08	25,60	27,00	26,30	18,90	



Für den Lehrer

Aufgabe 1, 2 und 3

Mit der Methode aus Aufgabe 2 und einfachen Messungen mit einem Lineal auf der Kopie erhalten wir folgende Ergebnisse:

Da M100 sehr weit entfernt ist, funktionieren andere Methoden (zum Beispiel ein Plot $m(P)$) nicht sehr gut. Wir haben entschieden, die Periode-Leuchtkraft-Beziehung zur Verfügung zu stellen, anstatt den Schülern zu erlauben, die zwei Koeffizienten in dieser Gleichung selbst zu erhalten. Daher ist die Übung für eine größere Gruppe von Studenten geeignet — was wir als Vorteil empfinden (innerhalb vernünftiger Grenzen natürlich :-)).

Aufgabe 4

Der Grund, der einem als erstes für eine Abweichung der Ergebnisse einfällt, ist einfach die normale Unsicherheit in den Messungen. Messungen dieser Art, von Hand gemacht, sind nicht sehr genau. Die Genauigkeit kann durch verfeinerte Messmethoden verbessert werden.

Noch dazu können zwei verschiedene Klassen von Cepheiden vorhanden sein, die etwas andere Charakteristika besitzen.

Aufgabe 5

Ja, aufgrund des (relativ) großen Samples von Cepheiden haben wir nun eine vernünftige Abschätzung der Entfernung zu M100.

Nein, die Größe einer Galaxie ist klein verglichen mit der Entfernung zu M100.

Der Durchmesser der Milchstraße beträgt ungefähr 25 kpc. Die Antwort auf die vorherige Frage ist immer noch nein.

Aufgabe 6

Mit den einfachen Methoden, die hier verwendet werden, ist ein Wert von 19.8 Mpc vernünftig. Die Frage wurde gestellt, um den Schülern klarzumachen, dass Unsicherheiten ein Bestandteil vieler Naturwissenschaften sind, und ganz besonders in der Astronomie.

Aufgabe 7

$$H_0 = v/D = 1400/19,85 = \mathbf{70,53 \text{ km/s/Mpc}}$$

Dieser Wert liegt innerhalb der akzeptierten Werte. Allgemein wird angenommen, dass H_0 zwischen 60 und 80 km/s/Mpc liegt.

Aufgabe 8

Mit dem Umrechnungsfaktor für Mpc nach km bekommen wir für $H_0 = 2,286 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

$$t = 1/H_0 = 4,375 \times 10^{17} \text{ s} = \mathbf{13,87 \times 10^9 \text{ Jahre.}}$$

Dies entspricht ungefähr dreimal dem Alter der Erde (ungefähr 4,6 Milliarden Jahre). Diese Frage wurde gestellt, um die Schüler dazu zu bringen, das Alter des Universums mit etwas zu verbinden, das sie vielleicht schon von früher wissen.

www.astroex.org

