Astronomie

Jugendliche messen Entfernungen von Galaxien

In der Oktoberausgabe des MINT *Zirkel* hatten wir die Beobachtung des Urknalls von unserer Schulsternwarte aus vorgestellt. In der Dezemberausgabe hatten wir gezeigt, wie wir die Geschwindigkeiten gemessen haben, mit denen sich Galaxien von uns weg bewegen. In dieser Ausgabe berichten wir darüber, wie wir die Entfernungen von Galaxien gemessen haben.

Vorbereitend haben wir uns überlegt, dass wir von einer Galaxie nur das Licht erhalten und dass das von einer Lichtquelle ausgesandte Licht mit zunehmender Entfernung immer schwächer wird. Wir wollten also die Helligkeit des Lichts messen, das von einer Galaxie kommend auf die Erde trifft. Aus dieser gemessenen Helligkeit und der gesamten von der Galaxie abgestrahlten Lichtleistung wollten wir die Entfernung der Galaxie berechnen.

Lichtleistung von Galaxien

Als erstes haben wir untersucht, welche typische Lichtleistung P eine Galaxie hat. Dazu haben wir eine 66 Galaxien umfassende Beobachtung eines Astronomenteams verwendet. Unten zeigen wir, dass die Entfernung proportional zur Wurzel der Lichtleistung $\sqrt{P}$ ist. Daher haben wir für jede der 66 Galaxien $\sqrt{P}$ bestimmt und den Mittelwert $\sqrt{P}$ berechnet. Das Ergebnis ist

$\sqrt{P} = 4{,}3 \cdot \text{Exa}\sqrt{W}$ oder $4{,}3 \cdot \cdot \cdot 10^{18} \cdot \sqrt{W}$

Dann haben wir berechnet, wie stark die Wurzeln der Lichtleistungen der 66 Galaxien streuen. Dazu haben wir die empirische

hen, warum das Entfernungsgesetz gilt. Dazu haben wir uns überlegt, dass sich das Licht einer Lichtquelle mit einer Lichtleistung P in einer Entfernung D gleichmäßig auf eine Kugelfläche mit dem Flächeninhalt $A = 4\pi D^2$ verteilt. Wie die Einheit W/m^2 nahelegt, gibt die Leistungsdichte S die Strahlungsleistung P pro Fläche A an. Also beträgt die Leistungsdichte in der Entfernung D von der Lichtquelle

$S = P/A = P/(4\pi D^2)$.

Mit dieser Gleichung können wir nun Entfernungen bestimmen. Das zeigen wir am Beispiel der Sonne. Zunächst fangen wir das Sonnenlicht mit unserem Teleskop auf und messen mit der eingebauten Kamera die Leistungsdichte, das ergäbe im Idealfall ohne Atmosphäre $S = 1367\ W/m^2$. Wir wissen, dass die Sonne eine Strahlungsleistung von $P = 385\ YW = 385 \cdot 10^{24}\ W$ abgibt. Wir lösen die Gleichung nach D auf und erhalten

$$D = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{4\pi \cdot S}} = 149{,}7 \text{ Millionen km}$$

Diese Formel bestätigt auch, dass die Entfernung D proportional zur Wurzel der gesamten abgestrahlten Lichtleistung ist. Mit dieser Formel haben wir für jede der 66 Galaxien aus der bekannten Leistungsdichte S mit $\sqrt{P} = 4{,}3 \cdot \text{Exa}\sqrt{W}$ die Entfernung

$$D_{\text{Verfahren}} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{4\pi \cdot S}}$$

berechnet und den Betrag der prozentualen Abweichung p% zur gemessenen Entfernung D_{gemessen} bestimmt (siehe Tabelle unten). Der Mittelwert der prozentualen Abweichungen aller 66 Galaxien der Beob-

Abb. 2: Galaxie M66 (Teleskop C11, Kamera ST-402)

bei einem Referenzstern 20 Counts. Aus der Sternkarte wissen wir, dass der Referenzstern die scheinbare Helligkeit m = 11,15 hat. Diese scheinbare Helligkeit rechneten wir in die Leistungsdichte um, indem wir die Formel $S = 1367\ W/m^2 \cdot 10^{(-0.4 \cdot (26{,}83+m))}$ benutzen. Im Fall des Referenzsterns beträgt die Leistungsdichte also $S = 0{,}879\ pW/m^2$. Da die Leistungsdichte proportional zur Zahl der Counts ist, beträgt sie für die Galaxie $S = 0{,}879\ pW/m^2 \cdot 32/20 = 1{,}41\ pW/m^2$. Aus dieser Leistungsdichte errechneten wir die Entfernung D der Galaxie. Dazu benutzten wir unsere Formel

$$D = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{4\pi \cdot S}} = \frac{4{,}3 \cdot 10^{18}}{\sqrt{4\pi \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-12}}}\ m$$

und erhielten $D = 1{,}02 \cdot 10^{24}\ m = 1020\ Zm$ oder 108 Millionen Lichtjahre. Der Literaturwert beträgt 120 Millionen Lichtjahre. Die Abweichung vom Literaturwert beträgt

des Lichts einer Galaxie mithilfe unseres Teleskops gemessen und daraus die Entfernung bestimmt. Für das Verfahren haben wir eine Genauigkeit von 37 % ermittelt. So haben wir Entfernungen bis zu 120 Millionen Lichtjahren gemessen.

In unserem nächsten Aufsatz werden wir unsere Messwerte mit einfachen Modellen deuten, dabei den Urknall entdecken und das Alter des Universums aus unseren Messungen bestimmen. In weiteren Aufsätzen möchten wir zeigen, wie wir die Irrtumswahrscheinlichkeit für unsere Messungen berechnet haben, welche Rollen die Gravitation und die dunkle Energie beim Urknall spielen und wie wir alles so präsentiert haben, so dass unsere Gäste den Urknall mit eigenen Augen sehen konnten.

wert $\sqrt{P}$ berechnet. Das Ergebnis ist
$\sqrt{P} = 4{,}3 \cdot \text{Exa}\sqrt{W}$ oder $4{,}3 \cdot \cdot \cdot 10^{18} \cdot \sqrt{W}$
Dann haben wir berechnet, wie stark die Wurzeln der Lichtleistungen der 66 Galaxien streuen. Dazu haben wir die empirische Standardabweichung mit der Formel

$$\sigma = \sqrt{P - (\sqrt{P})^2}$$

berechnet. Das Ergebnis ist $\sigma = 1{,}6 \cdot \text{Exa}\sqrt{W}$. Daher erwarten wir bei unserem Verfahren eine mittlere prozentuale Abweichung von
$p\% = \sqrt{P} \cdot \sigma = 1{,}6/4{,}3 = 37\%$
Wir zeigen an geeigneten Stellen unseres Berichts, wie sich diese Erwartung zweifach bestätigt hat.

Erklärung des Entfernungsgesetzes

Nachdem wir unseren Modellversuch durchgeführt hatten, wollten wir verstehen, warum die Helligkeit mit der Entfernung abnimmt. Wir haben uns vorgestellt, dass die Lichtleistung P einer Lichtquelle sich gleichmäßig auf die Oberfläche einer Kugel mit dem Radius D verteilt. Die Oberfläche einer Kugel mit dem Radius D ist $4\pi \cdot D^2$. Daher ist die Leistungsdichte S, die auf einen Quadratmeter dieser Kugeloberfläche trifft, $S = P/(4\pi \cdot D^2)$. Umgekehrt ist $D = \sqrt{P/(4\pi \cdot S)}$.

Wir haben die Leistungsdichte S mit dem Modellversuch gemessen und die Lichtleistung P mit der Software berechnet. Damit können wir die Entfernung D berechnen:

$$D = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{4\pi \cdot S}} = \frac{4{,}3 \cdot 10^{18}}{\sqrt{4\pi \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-12}}}\ \text{m}$$

und erhielten $D = 1{,}02 \cdot 10^{24}$ m = 1020 Zm oder 108 Millionen Lichtjahre. Der Literaturwert beträgt 120 Millionen Lichtjahre. Die Abweichung vom Literaturwert beträgt also 10 Prozent.

Bei der Galaxie M66 (s. Abb. 2) erhielten wir entsprechend eine Leistungsdichte von 64,9 pW/m² und daher eine Entfernung von 151 Zm = 15,9 Millionen Lichtjahre (Literaturwert: 32,6 Millionen Lichtjahre, Abweichung 51 %), während wir bei der Galaxie NGC3227 analog eine Leistungsdichte von 9,5 pW/m² und eine Entfernung von 42 Millionen Lichtjahren (Literaturwert: 77 Millionen Lichtjahre, Abweichung 45 %) ermittelten. Insgesamt ergibt der Mittelwert der drei prozentualen Abweichungen (10 % + 51 % + 45 %)/3 = 35 %; das ist im Einklang mit den erwarteten 37 Prozent an mittlerer prozentualer Abweichung.

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben mit unserer Schulsternwarte die Entfernungen zu Galaxien bestimmt. Unser Messeprinzip beruht auf der Abnahme der Helligkeit mit der Entfernung zur Lichtquelle. Für Galaxien als Lichtquellen haben wir zunächst mithilfe einer Beobachtung eines Astronomenteams Lichtleistungen ermittelt. Für die Abnahme dieser Lichtleistung mit der Entfernung haben wir ein Entfernungsgesetz experimentell und davon unabhängig analytisch entwickelt. Schließlich haben wir die Leistungsdichte berechnet und den Betrag der prozentualen Abweichung p% zur gemessenen Entfernung $D_{gemessen}$ bestimmt (siehe Tabelle unten). Der Mittelwert der prozentualen Abweichungen aller 66 Galaxien der Beobachtung des Astronomenteams beträgt 37 Prozent, das bestätigt unsere anfängliche Bestimmung der Genauigkeit des Verfahrens.

Bestimmung von Entfernungen

Nun zeigen wir, wie wir die Entfernung der Galaxie NGC3516 bestimmt haben. Zunächst haben wir mit unserem Teleskop die Galaxie fotografiert (s. Abb. 1). Die im Foto aufgezeichnete Helligkeit gibt die Software in Zähleinheiten oder Counts an. Wir haben bei jeder Helligkeitsbestimmung die Counts des Hintergrunds abgezogen. So erhielten wir bei der Galaxie 32 Counts und

S in fW/m²	$D_{gemessen}$ in Zm	$D_{Verfahren}$ in Zm	Abweichung p%
3,79	19490	19429	0,3 %
2,61	31037	23433	24,5 %
1,64	32756	29534	9,8 %

Verfahren der Abstandsbestimmung am Beispiel von drei der 66 Galaxien.

tation und die dunkle Energie beim Urknall spielen und wie wir alles so präsentiert haben, so dass unsere Gäste den Urknall mit eigenen Augen sehen konnten.

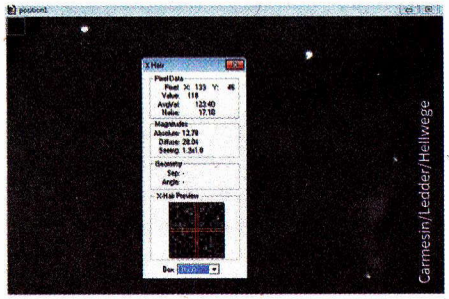
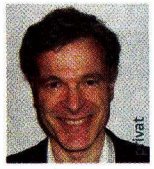


Abb. 1: Bestimmung der Leistungsdichten: Bei dem Stern GSC 4391 701, oben links, zählt die Software 20 Counts. Bei der Galaxie, oben rechts, zählt die Software 32 Counts (Foto mit Teleskop C11 und Kamera der Firma SBIG vom Typ ST-402).



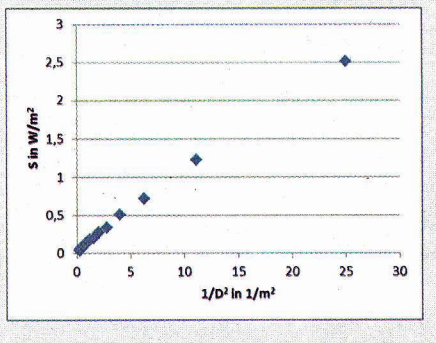
Hans-Otto Carmesin studierte in Mainz und unterrichtet seit 1999 am Gymnasium Athenaeum in Stade Mathematik und Physik. Er ist Fachleiter am Studienseminar in Stade. Er engagiert sich für die Fachdidaktik, Jugend forscht-Projekte, eine Herbstakademie, eine Schüler-Ingenieur-Akademie sowie für eine fachliche Koordinierung mit Hochschulen zur Prophylaxe von Studienabbrüchen.

Laura Leddin ist 15 Jahre alt und besucht die 9. Klasse am Athenaeum. Sie ist seit 2010 ein Mitglied der Astronomie-AG und ist außerdem ein Mitglied der Jugend forscht AG.

Ve Hellwege besucht auf dem Gymnasium Athenaeum in Stade die achte Klasse. Sie ist seit Sommer 2011 Teilnehmerin der AG für Astronomie.

Modellversuch zum Entfernungsgesetz

Ein Modellversuch zeigt den Zusammenhang zwischen der Helligkeit und der Entfernung. Mit der Anwendung „Andro-Sensor“ wird an einer Lampe mit einem Smartphone in verschiedenen Entfernungen D die Helligkeit in Lux gemessen. Um in SI-Einheiten arbeiten zu können, haben wir die Helligkeit mit der Einheit Lux in die Leistungsdichte S mit der Einheit W/m² umgerechnet mithilfe der Vorschrift 1 Lux entspricht 0,0079 W/m². Stellt man die gemessenen Leistungsdichten S abhängig von $1/D^2$ dar (Abb. rechts), liegen die Datenpunkte auf einer Ursprungsgeraden.



Trägt man die Leistungsdichte S in Abhängigkeit von der inversen quadratischen Entfernung zur Lichtquelle ($1/D^2$) auf, dann liegen die Datenpunkte auf einer Ursprungsgeraden. Die Leistungsdichte ist proportional.