Astronomie

Jugendliche beobachten Geschwindigkeiten von Galaxien

Im letzten MINT *Zirkel* hatten wir die Beobachtung des Urknalls von unserer Schulsternwarte aus vorgestellt. In dieser Ausgabe berichten wir darüber, wie wir die Geschwindigkeit, mit der sich eine Galaxie von uns wegbewegt, die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit, gemessen haben.

Die Geschwindigkeit einer Galaxie kann man nur an ihrem Licht erkennen, etwas anderes hat man nicht. Aber wie soll das gehen? Dazu machten wir uns zunächst klar, dass Licht nicht nur hell ist, sondern auch Welleneigenschaften hat. Wir leuchteten mit einem Laserpointer auf eine kleine Öffnung und sahen, dass sich das Licht dahinter auch seitlich ausbreitet, ebenso wie Wasserwellen hinter einer Öffnung (s. Abb. 1).

Am Beispiel einer schwimmenden Ente, kann man sehen, wie sich die Geschwindigkeit bestimmen lässt: Wenn eine Ente schwimmt, dann sendet sie Wasserwellen aus. Deren Wellenlänge ist hinter der Ente vergrößert (s. Abb. 2). Dieses Phänomen bezeichnet man als Doppler-Effekt. Wir mussten also nur die Vergrößerung der Wellenlänge messen und auswerten.

Zusammenhänge bei der Wellenlängenvergrößerung

Die grüne Ente in Abb. 2 macht Wellen, ohne sich vorwärts zu bewegen. Sie sendet ein Wellental aus (ganz oben) und nach einer Periodendauer T ein zweites (zweites Bild von oben). Inzwischen hat das erste Wellental eine Wellenlänge λ zurückgelegt. Also breitet sich die Welle mit der Geschwindigkeit $c = \lambda/T$ aus. Da wir uns für die Wellenlänge interessieren, lösen wir auf: $\lambda = c \cdot T$.

dass wir die Geschwindigkeit v der Galaxie erhalten, indem wir die gemessene (prozentuale) Rotverschiebung z mit der Lichtgeschwindigkeit c multiplizieren.

Messung der Rotverschiebung

Wir haben an unser Teleskop einen Spektrografen mit einer Kamera angeschraubt. Dann haben wir das Teleskop auf die Galaxie NGC3516 gerichtet und das Spektrum fotografiert (s. Abb. 3). Dort erkennt man eine dünne, helle, horizontale Linie sowie weitere vertikale Balken verschiedener Breite. Die vertikalen Balken entstehen durch den in unserer Stadt Stade vorhandenen Lichtsmog, der nichts mit der Galaxie zu tun hat. Das Spektrum der Galaxie selbst sieht man in der horizontalen Linie. Jedoch mussten wir zunächst herausfinden, welche Wellenlänge λ das Licht der Galaxie hat, bevor es mit der Verlängerung Δλ auf der Erde ankommt.

Um λ zu ermitteln, haben wir das Spektrum des Sterns Vega aufgenommen. Denn Galaxien bestehen aus Milliarden von Sternen und senden im Wesentlichen das gleiche Licht aus. Da Sterne glühende Gaskugeln sind, haben wir das Spektrum von Vega mit Spektren verschiedener Gaslampen verglichen. Uns fiel zunächst auf, dass Gase Licht ganz bestimmter Wellenlänge abstrahlen, wenn sie energetisch angeregt werden. Auch stellten wir fest, dass das Spektrum von Vega die gleichen Wellenlängen aufweist wie eine Wasserstofflampe. So wurde uns klar, dass Sterne und Galaxien hauptsächlich aus Wasserstoff bestehen. Für unsere Geschwindigkeitsmessung wählten wir eine Wellenlänge des Wasserstoffs aus, bei der es in Stade praktisch keinen Lichtsmog

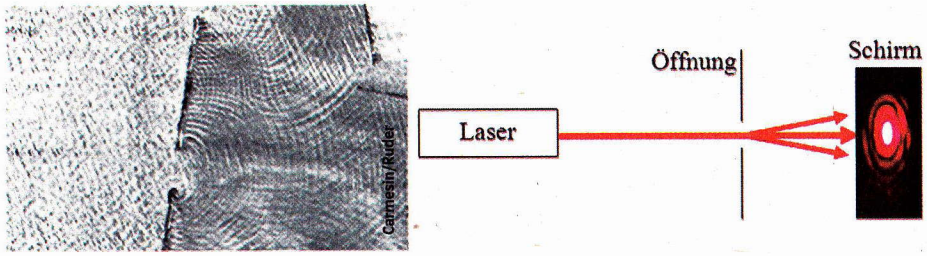


Abb. 1: Seitliche Ausbreitung von Wasserwellen (links) und Licht (rechts) hinter einer Öffnung.

Abb. 3: Unsere Aufnahme des Spektrums der Galaxie NGC3516. Der waagerechte helle Strich stellt das Licht der Galaxie dar.

sen und die Rotverschiebung sowie die Fluchtgeschwindigkeit berechnet. Schließlich wollten wir wissen, wie genau und wie gesichert unsere Messwerte sind und haben unsere Messwerte mit den Literaturwerten verglichen:

Die Literaturwerte für die Wellenlängen der H_α-Linien betragen für die Galaxie NGC3516 λ = 662,0 nm und für M66 λ = 657,9 nm. Unsere Messung bei der Galaxie M66 liegt im Rahmen der Messgenauigkeit von 0,6 nm unseres Spektrografen. Unsere gemessenen Wellenlängen zur Galaxie NGC3516 streuen und weichen um bis zu 2,4 nm vom Literaturwert ab. Das erklären wir dadurch, dass die H_α-Linie von NGC3516 eine relativ große Halbwertsbreite von 2,5 nm aufweist und dass das elektronische Rauschen unserer Kamera Maxima im Bereich der Halbwertsbreite erzeugt. Das haben wir zusätzlich durch eine Computersimulation nachgewiesen.

Linien sowie einen Wellenlängenbereich ohne Lichtsmog ausgewählt, unsere Aufnahme möglichst lange belichtet, die Kamera gekühlt, systematische Kamerafehler subtrahiert und das Spektrum mit einer hellen Neonlampe kalibriert.

Die Maxima in Abb. 4 deuten wir als H_α-Linie. Mit dieser Deutung könnten wir uns irren, denn die Maxima könnten lediglich Rauschen sein. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Irrtum, die sogenannte Irrtumswahrscheinlichkeit p, haben wir mit den Mitteln der Statistik berechnet. Sie beträgt für NGC3516 $p = 0{,}13\%$, für M66 ist $p = 0{,}29\%$. Die Berechnung und Minimierung dieser Irrtumswahrscheinlichkeiten erklären wir in einem späteren Artikel dieser Reihe.

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in unserer Schulsternwarte die Geschwindigkeit von Galaxien gemessen, indem wir die Wellennatur von Licht, den Doppler-Effekt und die Rotverschiebung

ohne sich vorwärts zu bewegen. Sie sendet ein Wellental aus (ganz oben) und nach einer Periodendauer T ein zweites (zweites Bild von oben). Inzwischen hat das erste Wellental eine Wellenlänge λ zurückgelegt. Also breitet sich die Welle mit der Geschwindigkeit $c = \lambda/T$ aus. Da wir uns für die Wellenlänge interessieren, lösen wir auf: $\lambda = c \cdot T$.

Die rote Ente in Abb. 2 bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v. Dabei vergrößert sich die Wellenlänge hinter der Ente um einen Betrag Δλ. An der Abb. 2 erkennen wir, dass Δλ gleich der Strecke $v \cdot T$ ist, welche die Ente während einer Periodendauer zurücklegt. Kurz: $\Delta\lambda = v \cdot T$.

Mit unserem Teleskop messen wir die prozentuale Vergrößerung der Wellenlänge, die sogenannte Rotverschiebung $z = \Delta\lambda/\lambda$. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit setzen wir hier die beiden obigen Formeln ein, erhalten $z = v \cdot T/c \cdot T = v/c$ und lösen nach v auf: $v = z \cdot c$.

So haben wir am Beispiel der schwimmenden Enten in Abb. 2 herausgefunden, len, wenn sie energetisch angeregt werden. Auch stellten wir fest, dass das Spektrum von Vega die gleichen Wellenlängen aufweist wie eine Wasserstofflampe. So wurde uns klar, dass Sterne und Galaxien hauptsächlich aus Wasserstoff bestehen. Für unsere Geschwindigkeitsmessung wählten wir eine Wellenlänge des Wasserstoffs aus, bei der es in Stade praktisch keinen Lichtsmog gibt. Das ist die Wellenlänge λ = 656,3 nm, die sogenannte H_α-Linie des Wasserstoffs.

Die H_α-Linie der Galaxie NGC3516 zeigt sich bei unserer Aufnahme durch zwei signifikante Maxima bei 659,6 nm und 660,0 nm (s. Abb. 4). Bei einer weiteren Aufnahme erhielten wir die Wellenlänge 662,0 nm. Wir berechneten den Mittelwert 660,3 nm. Daraus berechneten wir die Wellenlängendifferenz Δλ = 4,0 nm. Hieraus ermittelten wir die Rotverschiebung z = 4,0/656,3 = 0,0061 = 0,61 %. Hiermit bestimmten wir die Geschwindigkeit v = 0,0061·300 000 km/s = 1830 km/s. Entsprechend haben wir für die H_α-Linie der Galaxie M66 die Wellenlänge 657,3 nm gemes-

2,4 nm vom Literaturwert ab. Das erklären wir dadurch, dass die H_α-Linie von NGC3516 eine relativ große Halbwertsbreite von 2,5 nm aufweist und dass das elektronische Rauschen unserer Kamera Maxima im Bereich der Halbwertsbreite erzeugt. Das haben wir zusätzlich durch eine Computersimulation nachgewiesen.

Fehlerwahrscheinlichkeit ermitteln

In Abb. 4 erkennen wir viele kleine Maxima. Diese entstehen wie folgt: Die Aufnahme in Abb. 3 enthält sowohl das Signal durch das Licht als auch zufälliges Rauschen durch den Auslesevorgang aus der Kamera und durch thermische Anregungen in der Kamera. Wir haben das Rauschen in Abb. 4 als empirische Standardabweichung berechnet und den Wert 96 erhalten sowie das Signal 309 abgelesen. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, signal-to-noiseratio) beträgt somit 309/96 = 3,2. Unsere Aufnahmeverfahren haben wir so optimiert, dass das SNR möglichst groß wird. Dazu haben wir Galaxien mit deutlichen H_α-

Die Berechnung und Minimierung dieser Irrtumswahrscheinlichkeiten erklären wir in einem späteren Artikel dieser Reihe.

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in unserer Schulsternwarte die Geschwindigkeit von Galaxien gemessen, indem wir die Wellennatur von Licht, den Doppler-Effekt und die Rotverschiebung verwendet haben. Auch konnten wir zeigen, welche Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei unserer Beobachtung mit einem kleinen Teleskop mitten in einer beleuchteten Stadt auftreten und wie wir diese minimieren konnten. Weiter haben wir alle Ungenauigkeiten und Unsicherheiten physikalisch erklärt und mathematisch quantifiziert. Zur Bestimmung des Alters des Universums benötigt man neben der Geschwindigkeit einer Galaxie auch deren Entfernung zur Erde. Wie wir diese gemessen haben, erklären wir in der nächsten Ausgabe des MINT *Zirkels*.

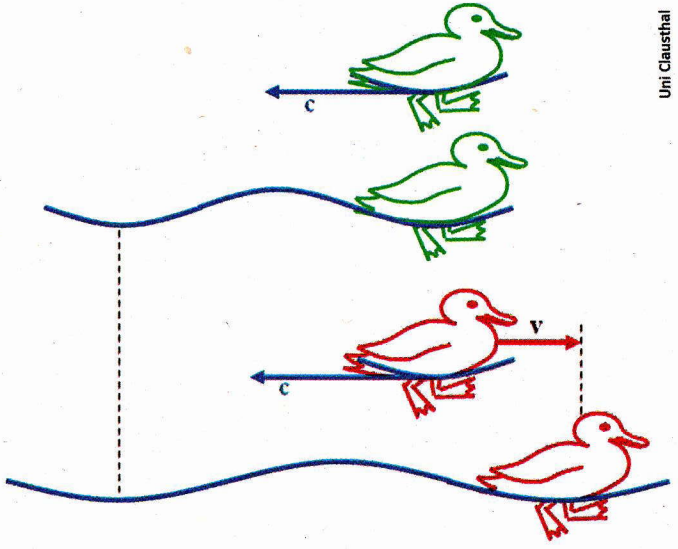


Abb. 2: Die grüne Ente paddelt auf der Stelle, die rote schwimmt voran.

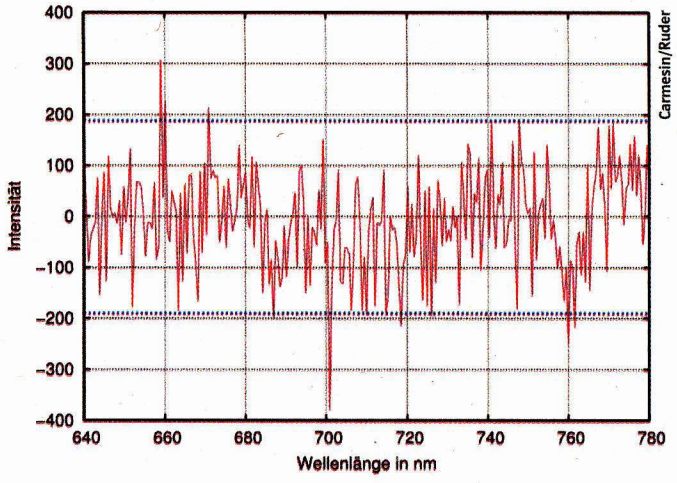
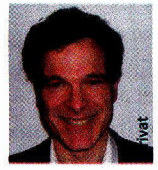
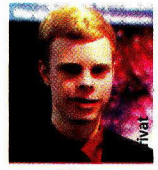


Abb. 4: Analyse des aufgenommenen Spektrums für Wellenlängen über 640 nm.



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.



Marvin Ruder ist 15 Jahre alt. Seine Lieblingsfächer sind Physik, Mathematik und Informatik. Sein Traum ist es, Physik zu studieren und später als Forscher zu arbeiten.