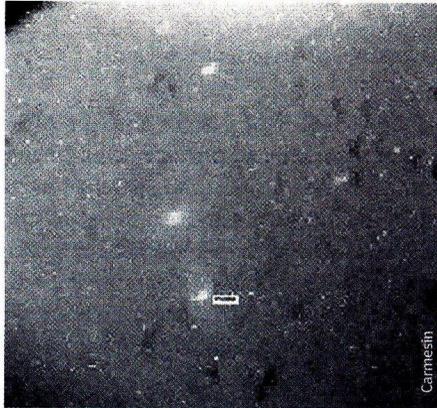


# Jugendliche bestimmen das Alter unseres Universums

In der vorletzten Ausgabe hatte Dr. Hans-Otto Carmesin mit seinen Schülern von der Astronomie-AG am Athenaeum Stade dargestellt, wie man die Entfernung von Galaxien misst. In dieser Ausgabe zeigen sie, wie sie daraus das Alter unserer Welt berechnet und die Geometrie des Alls erschlossen haben.



Unser Foto der Galaxie NGC3227: Diese Galaxie ist im Foto neben dem Rechteck, während sie mit der Nachbargalaxie NGC3226 (im Foto darüber) heftig wechselwirkt. Mit diesem Foto haben wir die Entfernung 570 Zm bestimmt.

Zur Bestimmung der Bewegungsdauer der Galaxien haben wir zunächst die Galaxie M66 beobachtet. Wir überlegten uns, dass wir die Geschwindigkeit  $v$  der Galaxie berechnen können, wenn wir ihre Rotverschiebung  $z$  kennen. Dazu haben wir für die  $H_\alpha$ -Linie die Wellenlänge 657,3 nm gemessen. Im Physikraum dagegen ergab unsere Messung der  $H_\alpha$ -Linie die Wellenlänge 656,3 nm. Daraus haben wir die Rotverschiebung  $z = (657,3 - 656,3 \text{ nm}) / 656,3 \text{ nm} = 0,0015$  berechnet. Die Galaxie bewegt sich also mit einer Geschwindigkeit von  $v = z \cdot c = 450 \text{ km/s}$  von uns weg. Um einfache Zahlenwerte zu erhalten, rechnen wir die Einheit km/s in Zm/GJ, also Zettameter pro Gigajahr um:  $1 \text{ Zm/GJ} = 10^{18} \text{ km} / (60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365,25 \cdot 10^9 \text{ s}) = 31,7 \text{ km/s}$ . Also beträgt die Geschwindigkeit  $v = 450 / 31,7 \text{ Zm/GJ} = 14,2 \text{ Zm/GJ}$ . Die Galaxie M66 hat eine Entfernung von  $d = 25 \text{ Zm}$ . Um die Entfernung zu erreichen:  $t = d/v = 25 \text{ Zm} / (14,2 \text{ Zm/GJ}) = 1,76 \text{ GJ}$ . Das ist das Alter der Galaxie M66.

Entfernung zu erreichen:  $t = d/v = 570 \text{ Zm} / (38 \text{ Zm/GJ}) = 15 \text{ GJ}$ .

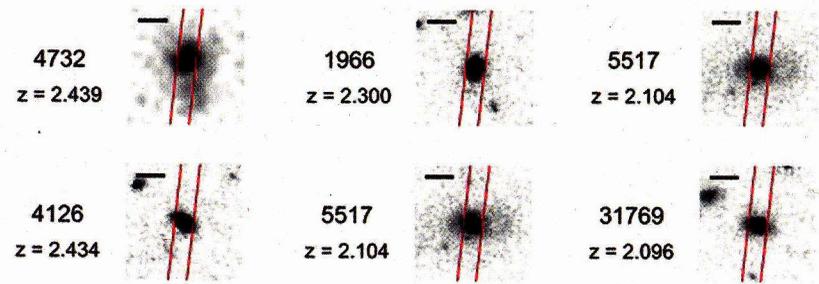
Als Drittes haben wir die Galaxie NGC3516 beobachtet. Hier stellten wir fest, dass auch diese Galaxie sich von uns weg bewegt, und zwar mit der Geschwindigkeit  $v = 1830 \text{ km/s} = 58 \text{ Zm/GJ}$ . Wir haben auch gemessen, dass NGC3516 eine Entfernung von  $d = 1020 \text{ Zm}$  hat. Daraus errechneten wir wieder, wie lange die Galaxie unterwegs war, um diese Entfernung zu erreichen:  $t = d/v = 1020 \text{ Zm} / (58 \text{ Zm/GJ}) = 17,7 \text{ GJ}$ .

## Vergleich der Bewegungsdauern der Galaxien

Da wir die Galaxien mit einem relativ kleinen Teleskop von 11 Zoll Durchmesser beobachtet haben, sind unsere Messungen nicht besonders genau. Deshalb betrachten wir die drei gemessenen Bewegungsdauern als ungefähr gleich. Demnach waren die drei Galaxien zur gleichen Zeit hier gestartet. Anscheinend hat sich unser Universum seit diesem Startzeitpunkt entwickelt. Daher stellen diese Bewegungsdauern das Weltalter dar. Um dieses möglichst genau angeben zu können, bestimmen wir den Mittelwert unserer drei Bewegungsdauern:  $t = (10,6 + 15 + 17,7) / 3 \text{ GJ} = 14,4 \text{ GJ}$ . Wir haben also ein Weltalter von 14,4 Milliarden Jahren gemessen. Der Literaturwert  $t$  des Weltalters beträgt 13,8 Milliarden Jahre. Der von uns berechnete Wert stimmt bis auf 4 Prozent mit dem Literaturwert überein.

## Deutung der Bewegungsdauern der Galaxien

Vor 14,4 Milliarden Jahren waren alle Galaxien am selben Ort. Seitdem bewegen sie sich von uns weg. Alle Galaxien haben also die gleiche Bewegungsdauer von 14,4 Milliarden Jahren. Die schnellen Galaxien sind inzwischen schon sehr weit weg, die langsameren sind noch nicht ganz so weit. Dieses Bewegungsmuster der Galaxien ist in der



Für die Galaxie 31719 wurde eine Rotverschiebung von ungefähr  $z = 2$  nachgewiesen. Belli et al. (2014): Mofire Absorption Line Spectroscopy of  $z > 2$  quiescent Galaxies. URL: [xxx.tau.ac.il/pdf/1404.4872.pdf](http://xxx.tau.ac.il/pdf/1404.4872.pdf)

nicht im einzigartigen Mittelpunkt unseres Universums leben.

## Rotverschiebungen über eins

Inzwischen wurden Galaxien mit einer Rotverschiebung über eins gefunden. Beispielsweise wurde für die Galaxie 31769 die Rotverschiebung  $z = 2$  gemessen (s. Abb. oben). Nach dieser Verschiebung müsste sich diese Galaxie mit der zweifachen Lichtgeschwindigkeit  $v = 600.000 \text{ km/s}$  durch den Raum bewegen. Das ist aber nicht möglich. Die Erklärung: Der Raum dehnt sich bei großen Entfernungen mit einer Geschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit aus. Man kann sich das Universum also wiederum mit Hilfe des Rosinenhefekuchens veranschaulichen. Der aufgehende Hefeteig entspricht dem Raum, der sich ausdehnt. Die im Hefeteig ruhenden Rosinen entsprechen den Galaxien, deren Geschwindigkeit im Raum vernachlässigbar ist.

Nun analysieren wir rechnerisch, ob die von uns gemessenen Bewegungsdauern wirklich als konstant aufgefasst werden dürfen. Dazu vergleichen wir erstens unsere Messwerte im Einzelnen mit den Literaturwerten (s. Tabelle). Es treten prozentuale Abweichungen bis 47 Prozent auf; der Mittelwert unserer Messfehler beträgt 22 Prozent. Zweitens bestimmen wir die prozentualen Abweichungen der von uns gemessenen

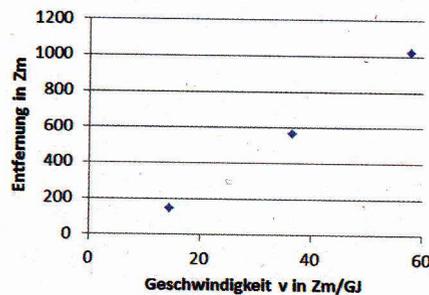
achtet: Entfernte Galaxien bewegen sich von uns weg, und zwar umso schneller, je weiter sie weg sind. Also waren die Galaxien früher näher und irgendwann am selben Ort. Unsere Messungen haben gezeigt, dass alle Galaxien zur gleichen Zeit hier waren, und zwar vor ungefähr 14 Milliarden Jahren. Also entwickelt sich unsere Welt seit 14 Milliarden Jahren, damit haben wir das Weltalter bestimmt. Von jeder Galaxie aus gesehen beobachtet man das gleiche Bewegungsmuster. Das bedeutet nicht, dass sich die Galaxien durch einen unveränderlichen Raum bewegen. Vielmehr dehnt sich der Raum aus und dabei werden die Abstände zwischen den Galaxien größer.

Im nächsten Aufsatz zeigen wir, wie wir berechnet haben, welche Rolle die Schwerkraft bei dieser Ausdehnung des Raums spielt und warum der Raum sich relativ gleichmäßig ausdehnt, ohne große Beulen zu bekommen.



Galaxien haben wir zunächst die Galaxie M66 beobachtet. Wir überlegten uns, dass wir die Geschwindigkeit  $v$  der Galaxie berechnen können, wenn wir ihre Rotverschiebung  $z$  kennen. Dazu haben wir für die  $H_\alpha$ -Linie die Wellenlänge 657,3 nm gemessen. Im Physikraum dagegen ergab unsere Messung der  $H_\alpha$ -Linie die Wellenlänge 656,3 nm. Daraus haben wir die Rotverschiebung  $z = (657,3 - 656,3 \text{ nm}) / 656,3 \text{ nm} = 0,0015$  berechnet. Die Galaxie bewegt sich also mit einer Geschwindigkeit von  $v = z \cdot c = 450 \text{ km/s}$  von uns weg. Um einfache Zahlenwerte zu erhalten, rechnen wir die Einheit km/s in Zm/GJ, also Zettameter pro Gigajahr um:  $1 \text{ Zm/GJ} = 10^{18} \text{ km} / (60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365,25 \cdot 10^9 \text{ s}) = 31,7 \text{ km/s}$ . Also beträgt die Geschwindigkeit  $v = 450 / 31,7 \text{ Zm/GJ} = 14,2 \text{ Zm/GJ}$ . Die Galaxie M66 haben wir auch fotografiert. Aus dem Foto konnten wir die Helligkeit der Galaxie am Sternenhimmel bestimmen. Hieraus berechneten wir die Entfernung 151 Zm. Die Zeit  $t$ , die die Galaxie gebraucht hat, bis sie von hier bis zu ihrer heutigen Position kam, kann man ermitteln, indem man den Weg  $d$  durch Geschwindigkeit  $v$  dividiert, kurz  $t = d/v$ . Also ist diese Zeit  $t = 151 \text{ Zm} / (14,2 \text{ Zm/GJ}) = 10,6 \text{ GJ}$ .

Danach haben wir die Galaxie NGC3227 beobachtet. Dabei stellten wir fest, dass auch diese Galaxie sich von uns weg bewegt, und zwar mit der Geschwindigkeit  $v = 1200 \text{ km/s} = 38 \text{ Zm/GJ}$ . Unsere Messung ergab, dass NGC3516 eine Entfernung von  $d = 570 \text{ Zm}$  hat. Hieraus haben wir wieder errechnet, wie lange die Galaxie unterwegs war, um diese



Bewegungsmuster der Galaxien: Besonders schnelle Galaxien sind schon besonders weit entfernt.

angesehen zu kommen, bestimmen wir den Mittelwert unserer drei Bewegungsdauern:  $t = (10,6 + 15 + 17,7) / 3 \text{ GJ} = 14,4 \text{ GJ}$ . Wir haben also ein Weltalter von 14,4 Milliarden Jahren gemessen. Der Literaturwert  $t$  des Weltalters beträgt 13,8 Milliarden Jahre. Der von uns berechnete Wert stimmt bis auf 4 Prozent mit dem Literaturwert überein.

### Deutung der Bewegungsdauern der Galaxien

Vor 14,4 Milliarden Jahren waren alle Galaxien am selben Ort. Seitdem bewegen sie sich von uns weg. Alle Galaxien haben also die gleiche Bewegungsdauer von 14,4 Milliarden Jahren. Die schnellen Galaxien sind inzwischen schon sehr weit weg, die langsameren sind noch nicht ganz so weit. Dieses Bewegungsmuster der Galaxien ist in der Abbildung links unten dargestellt. Aber bedeutet das etwa, dass die Erde im Mittelpunkt unseres Universums ist?

Man kann sich das Universum als einen Hefekuchen veranschaulichen: Wenn dieser mit Rosinen bestückt ist und sich ausdehnt, dann kann man die Rosinen als Galaxien ansehen. Da sich der Teig ausdehnt, vergrößert sich der Abstand zwischen den Rosinen. Von jeder Rosine aus gesehen scheint es so, als würden alle anderen Rosinen sich von ihr weg bewegen. Also scheint es von jeder Rosine aus gesehen so, als ob sie der Mittelpunkt des Kuchens wäre. Dabei denken wir uns den Kuchen ohne Rand, denn auch im Universum hat man keinen Rand gefunden. Für unser Universum bedeutet das, dass es von jeder Galaxie aus gesehen so scheint, als ob die Galaxie der Mittelpunkt des Universums wäre. Wir erkennen also, dass wir

Galaxie	d in Zm (eigene Messung)	d in Zm (Literaturwert)	Abweichung	v in Zm/GJ (eigene Messung)	v in Zm/GJ (Literaturwert)	Abweichung
M66	151	284	47 %	14	23	38 %
NGC3227	570	568	0,4 %	38	36	4 %
NGC3516	1020	1136	10 %	58	83	30 %

Vergleich unserer Messwerte mit Literaturwerten.

Entfernungen zu kommen, bestimmen wir den Mittelwert unserer drei Bewegungsdauern:  $t = (10,6 + 15 + 17,7) / 3 \text{ GJ} = 14,4 \text{ GJ}$ . Wir haben also ein Weltalter von 14,4 Milliarden Jahren gemessen. Der Literaturwert  $t$  des Weltalters beträgt 13,8 Milliarden Jahre. Der von uns berechnete Wert stimmt bis auf 4 Prozent mit dem Literaturwert überein.

Nun analysieren wir rechnerisch, ob die von uns gemessenen Bewegungsdauern wirklich als konstant aufgefasst werden dürfen. Dazu vergleichen wir erstens unsere Messwerte im Einzelnen mit den Literaturwerten (s. Tabelle). Es treten prozentuale Abweichungen bis 47 Prozent auf; der Mittelwert unserer Messfehler beträgt 22 Prozent. Zweitens bestimmen wir die prozentualen Abweichungen der von uns gemessenen drei Bewegungsdauern vom Literaturwert 13,8 GJ: Bei M66 erhalten wir eine Abweichung von  $3,2 / 13,8 = 23$  Prozent. Bei NGC3227 berechnen wir einen Unterschied von  $1,2 / 13,8 = 9$  Prozent. Bei NGC3516 bestimmen wir eine Differenz von  $3,9 / 13,8 = 28$  Prozent. Der Mittelwert dieser drei Prozentsätze beträgt 20 Prozent. Da die Messfehler von bis zu 47 Prozent größer sind als die Abweichungen der Bewegungsdauern von bis zu 28 Prozent, können wir die Bewegungsdauern im Rahmen der Messungenauigkeiten als vergleichsweise konstant ansehen. Dafür spricht auch, dass der Mittelwert der Messfehler mit 22 Prozent größer ist als der Mittelwert der Abweichungen der Bewegungsdauern von 20 Prozent.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe unseres Teleskops haben wir das Bewegungsmuster entfernter Galaxien beob-

achtet. Dabei werden die Abstände zwischen den Galaxien größer.

Im nächsten Aufsatz zeigen wir, wie wir berechnet haben, welche Rolle die Schwerkraft bei dieser Ausdehnung des Raums spielt und warum der Raum sich relativ gleichmäßig ausdehnt, ohne große Beulen zu bekommen.



Rosinenhefekuchen als Modell: Wenn der Hefeteig aufgeht, werden die Abstände zwischen den Rosinen größer.



**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.



**Paul Brüning** ist 12 Jahre alt und besucht die 7. Klasse des Athenaeums. Er interessiert sich für Naturwissenschaften und arbeitet in den AGs Mathe, Informatik, Astronomie und Jugend forscht.



**Thorben Bollbach** ist 12 Jahre alt und Schüler an der IGS Stade. Da er sich sehr für Astronomie interessiert, besucht er seit 2013 die Astronomie AG des Gymnasiums Athenaeum.