

Schülerinnen und Schüler präsentieren ihr neuartiges spektrales Planetarium - mit Begleitschauspiel: Wie alt ist das Universum?

Hans-Otto Carmesin*

*Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade sowie Studienseminar Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade sowie Fachbereich 1, Institut für Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen
Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

Kurzfassung

Lernende entwickelten und bauten einen Spektralprojektor fürs Planetarium, der Objekte spektral richtig zeigt. Bei Vorstellungen im Planetarium erkannten die Zuschauer das Alter des Universums durch Spektralbrillen.

1. Einleitung

Der Regenbogen zeigt die Farbenpracht des Sonnenlichts. Die genaue Untersuchung des Sonnenspektrums begann Fraunhofer vor 200 Jahren. Das Sonnenspektrum zeigt die chemische Zusammensetzung der Sonne, ebenso wie ihre Drehung um die eigene Achse. Entsprechend wurden seit 200 Jahren viele astronomische Entdeckungen mithilfe von Spektren gemacht. Bisher konnten die Besucher eines Planetariums diese Entdeckungen nicht mit eigenen Augen sehen. Das änderten die Schülerinnen und Schüler der Arbeitsgemeinschaft für Astronomie sowie der Arbeitsgemeinschaft für Jugend forscht am Gymnasium Athenaeum. Sie haben einen Spektralprojektor fürs Planetarium erfunden und gebaut. Die Besucher schauen durch eine Spektralbrille (s. Abb. 1) und sehen mit eigenen Augen die Farbenpracht und spektrale Vielfalt astronomischer Objekte (s. Abb. 2). Die Gäste erkennen hierbei die in den Spektren enthaltenen Informationen. Die Planetariumsfreunde erblicken so selbst die Zusammensetzung und Bewegung von Sternen sowie Galaxien.



Abb.1: Das Team im Planetarium mit Spektralbrillen.

Nachdem die Lernenden den Projektor gebaut und zum Patent angemeldet hatten [1], nutzten sie ihn für

sechs ausgebuchte Präsentationen im Planetarium in Grünendeich. Dabei bestimmten die Gäste selbst das Alter des Universums.

In diesem Bericht wird die Leistungsfähigkeit des Spektralprojektors geschildert, der Text des Begleitschauspiels präsentiert, über Erfahrungen mit dem Projektor und dem Publikum berichtet und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2. Spektralprojektor fürs Planetarium

Der Projektor stellt astronomische Objekte nacheinander mit der richtigen Form, der richtigen Farbe und dem richtigen Spektrum am richtigen Ort an der Kuppel eines Planetariums dar. Für jedes astronomische Objekt werden dazu ein Spektraldia und ein Formdia mit zwei Diahaltern zugleich in den Projektor eingeführt und der Spiegel passend orientiert (s. Abb. 3). Kurz gesagt kann man den Spektralprojektor als Lichtsynthesizer auffassen, der zugleich die Strahlrichtung und die Strahlform korrekt erzeugt.

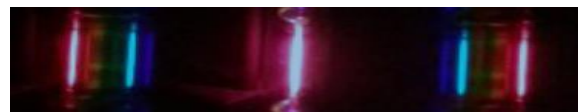


Abb.2: Das Aussehen einer Wasserstofflampe durch eine Spektralbrille.

3. Präsentation mit Begleitschauspiel

Die Lernenden präsentierten ihren Spektralprojektor im Rahmen eines eigens erstellten Begleitschauspiels mit folgendem Thema: Wie alt ist das Universum? Die Geschichte beruht auf einer wahren Begebenheit, die einem meiner Schüler zugestoßen ist. Für die bei dem Schauspiel dargestellten Galaxien wurden die richtigen Rotverschiebungen und Entfernungen zugrunde gelegt. Im Sinne einer didaktischen Reduktion wurde so gerundet, dass einfaches Zahlenmaterial entsteht. Auch wurden die Spektren im Sinne eines deutlichen Demonstrationsexperiments besonders kontrastreich präsentiert.

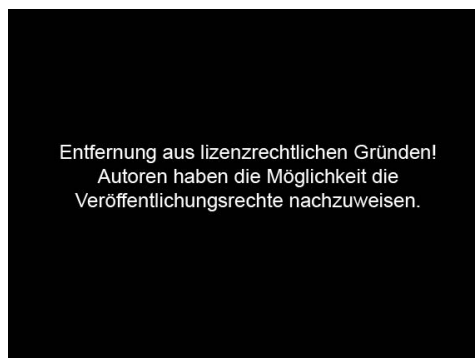


Abb.3: Schülerinnen und Schüler mit dem Zeiss-Projektor und dem Spektralprojektor mit stehendem Holzgehäuse und um zwei Achsen drehbarem Spiegel.

Rollen:

Thorben: Geburtstagskind und Gastgeber

Dennis: Fuhr mit dem Fahrrad über die Köhlbrandbrücke und erhielt Kursfahrtsverbot

Hendric: Reist gerne, beispielsweise nach Chile

Laura: Hält das Kursfahrtsverbot für übertrieben und gibt Ideen

Jannik: Hat Spaß am Bezweifeln

Ve: Modellierungsfreak

Paul: Junger Freund der Astronomie

Helge: Begeisterter Beobachter

Marvin: Kombiniert gerne

Deike: Souveräne Zusammenfasserin

Andreas: Bringt gerne solide Fakten ein



Abb.4: Spielzeugente zum Aufziehen.

Material:

Projektoren: Zeiss-Projektor, Spektralprojektor, Beamer mit Präsentation zur großen Magellanschen Wolke

Geschenke: Spektralbrillen (s. Abb. 1) im Paket, Spielzeugente (Abb. 4) mit Wasserbecken

Lampen: Glühlampe, Energiesparlampe, Wasserstofflampe (s. Abb. 2)

Laser: Laserpointer für Rot, Grün und Violett; Linienlaser zur Projektion des Maßstabs

Teleskop, Lineal

Dauer:

50in bis zur Pause, 15 min nach der Pause

3.1. Empfang

Es klopft an der Tür, Thorben macht auf, alle treffen bei ihm ein und gratulieren ihm zum Geburtstag.

Thorben: Hier, Leute, es gibt ein Problem!

Ve: Was denn?

Thorben: Dennis ist mit dem Fahrrad über die Köhlbrandbrücke gefahren.

Hendric: Na und?

Thorben: Die Polizei hat ihn angehalten und seine Eltern informiert. Die haben ihm verboten an der Kursfahrt teilzunehmen.

Laura: Da muss man noch mal mit den Eltern reden.

Dennis: Ja, habe ich schon probiert. Mein Vater sagt, ich sei doch früher so ein netter Junge gewesen und hätte immer so interessante gemeinsame Aktionen mit meinen Freunden gemacht. Aber jetzt sei ich viel alleine und würde viel Unsinn machen.

Hendric: Klar, dann machen wir wieder mal eine interessante gemeinsame Aktion. Dann kriegen wir deinen Vater schon rum.

Ve: Wir könnten ja bei euch den Rasen mähen, oder so.

Dennis: Quatsch, das haben wir doch früher auch nie gemacht. Das würde ihn nicht überzeugen.

Laura: Dein Vater ist auch viel zu streng.

Dennis: Kannst du das ändern?

Ve: Hendric, du warst doch in Chile im Urlaub.

Vielleicht können wir damit ja etwas anfangen.

3.2. Wir sehen, aus was eine Galaxie besteht.

Hendric: Ich habe da die große Magellansche Wolke gesehen.

Jannik: Ach, bist du sicher?

Hendric: Ja klar.

Jannik: Gut, dann zeig uns mal, was du gesehen hast.

Andreas hilft beim Beamer.

Hendric: Ja, ich habe ein Foto aufgenommen und daraus eine Präsentation gemacht.

Das zeige ich euch mal.

Ve: Ja, zeig mal bitte.

Hendric erklärt die Zoompräsentation und hebt die überwiegende pinke Farbe durch Wasserstoff sowie die grüne Farbe durch Sauerstoff (zweifach ionisiert) der Sternentstehungsgebiete hervor.

Deike: Also, da haben wir doch schön gesehen, dass eine Galaxie viele Sterne und sogar ganze Sternhaufen enthält.

Dennis: Ja, Galaxien sind riesig, aber das haben wir ja nicht gemeinsam gemacht.

3.3. Wir sehen Regenbogenfarben.

Helge: Also, Thorben, mein Geschenk für dich könnte uns vielleicht weiterhelfen.

Helge hält Thorben das Paket hin.

Thorben: Danke!

Thorben öffnet es.

Ve: Oh, lauter Brillen!

Alle: Die probieren wir gleich einmal aus!

Jeder setzt eine Brille auf, auch die Zuschauer erhalten je eine Spektralbrille.

Helge macht die Glühlampe an, alle blicken hin.

Helge: Und, was seht ihr?

Laura: Ich sehe neben der Lampe die Regenbogenfarben.

Paul: Das ist das Spektrum der Glühlampe.

Deike: Wir haben also Spektralbrillen, die das weiße Licht der Lampe in die Spektralfarben zerlegen.

Dennis: Na ja, die Regenbogenfarben sind bunt, aber das wirkt bei meinem Vater nicht.

3.4. Wir sehen Spektren wie Fingerabdrücke von Stoffen.

Laura: Man muss sich ja nicht die Glühlampe ansehen.

Jannik lacht: Was denn?

Helge zeigt die Energiesparlampe: Ich sehe bei der Energiesparlampe einzelne Lampen.

Marvin: Ja, Helge, das ist bei Lampen, die mit Gas gefüllt sind, offensichtlich so.

Jannik lacht: Und welches Gas ist da drin?

Andreas: Ich habe in der Zeitung gelesen, dass in Energiesparlampen Quecksilber steckt.

Jannik: Aber Quecksilber ist flüssig.

Andreas: Na ja, aber Quecksilber bildet auch Dampf, deswegen ist es auch gefährlich.

Thorben: Und Dampf ist gasförmig.

Deike: Wir sehen also mit der Spektralbrille, dass Quecksilber einzelne bestimmte Farben hat. Das ist wie ein Fingerabdruck von Quecksilber.

Jannik: Gut, aber Marvin sagt, das sei bei allen Gaslampen so, das hat er aber nicht gezeigt.

Ve: Da steht ja eine Wasserstofflampe. Thorben, darf ich die einschalten?

Thorben: Ja, mach mal.

Ve schaltet die Wasserstofflampe ein.

Ve: Oh, schönes pinkes Licht, wie bei den Sternentstehungsgebieten in der Magellanschen Wolke.

Hendric: Tja, da ist eben auch viel Wasserstoff drin, in so einer Galaxie.

Helge: Na ja, bei der Wasserstofflampe sind auch einzelne Lampen, aber sie sind bei ganz anderen Farben. Außerdem sind es hier Linien, hm, das liegt wohl an der Linien-förmigen Lampe.

Andreas: Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem roten Laserpointer auf die Wasserstofflampe.

Marvin leuchtet.

Andreas zeigt: Das rote Licht der Wasserstofflampe und des Laserpointers sind an den gleichen Stellen. Sie haben also den gleichen spektralen Fingerabdruck.

Helge: Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem violetten Laserpointer auf die Wasserstofflampe.

Marvin leuchtet.

Helge zeigt: Das violette Licht der Wasserstofflampe und des Laserpointers sind auch an den gleichen Stellen. Sie haben also auch den gleichen spektralen Fingerabdruck.

Ve: Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer auf die Wasserstofflampe.

Marvin leuchtet.

Ve zeigt: Das türkise Licht der Wasserstofflampe ist neben dem grünen Licht des Laserpointers. Den grünen spektralen Fingerabdruck des Laserpointers sehe ich 5 % weiter von der Mitte entfernt als den türkisen spektralen Fingerabdruck des Wasserstoffs. Sie haben also spektrale Fingerabdrücke, die sich um 5 % unterscheiden.

Deike: Nun, das Licht, das von einem Stoff ausgeht, ist wie ein Fingerabdruck. Und mit der Spektralbrille können wir den Fingerabdruck eines Stoffes sehen.

Beim Wasserstoff entspricht das rote Licht dem Licht des roten Laserpointers, das violette Licht entspricht dem violetten Laserpointer und das türkise Licht der Wasserstofflampe unterscheidet sich um 5 % von dem Licht des grünen Laserpointers.

Dennis: Na ja, die Farben sind immerhin schön bunt.

3.5. Wir sehen Spektren von Planeten.

Jannik lacht: Ja, das Licht ist auf der Erde wie ein Fingerabdruck. Aber wie ist das auf anderen Planeten?

Thorben: Gut, gehen wir doch in den Garten und sehen uns die Planeten an.

Helge blickt durch ein Teleskop.

Helge: Ich sehe Jupiter. Und ich sehe seine Streifen.

Jannik: Ich sehe keine Streifen.

Paul: Na klar, dazu musst du durch das Teleskop schauen.

Jupiter wird mit dem Pointer gezeigt.

Alle: Aaah, jetzt sehen wir die Streifen durch das Teleskop.

Marvin: Oh, aaah, mit der Spektralbrille sehe ich auch das Spektrum. Es sieht aus wie beim Regenbogen.

Paul: Klar, bei beiden kommt das Licht ja von der Sonne.

Jannik lacht: Aaaber, ich sehe Mars, da sehe ich überwiegend rötliche Anteile im Spektrum. Obwohl das Licht von der Sonne kommt.

Andreas: Die Marsoberfläche enthält viel Eisen und reflektiert daher wie Rost besonders gut rotes Licht.

Deike: Also, auch bei Planeten ist das Spektrum wie ein Fingerabdruck für das Material.

Dennis: Gut, mit Spektralbrillen werden wir zu Durchblickern.

3.6. Wir sehen Spektren im Jahreslauf.

Jannik lacht: Ja, das Licht ist jetzt im Winter wie ein Fingerabdruck. Aber wie ist es bei den anderen Jahreszeiten?

Marvin: Oh, aaah, seht ihr den großen Wagen?

Ve: Klar, der große Wagen ist heute Abend da im Norden.

Man projiziert mit dem Spektralprojektor die Galaxie.

Marvin zeigt: Jaaa, da müsste die Galaxie NGC 3516 sein. Helge, kannst du das Teleskop mal auf diese Galaxie richten? Von der können wir uns dann ja mal das Spektrum ansehen.

Helge arbeitet am Teleskop, bis der Spektralprojektor gut eingestellt ist.

Helge: Oh, jetzt sehe ich die Galaxie. Seht ihr sie auch?

Alle: Ja, die ist schön pink.

Helge: Die leuchtet ja wie die Wasserstofflampe.

Hendric: Klar, auf der Magellanschen Wolke ist ja auch viel pink leuchtender Wasserstoff.

Andreas: In Galaxien gibt es viel leuchtendes Wasserstoffgas.

Helge und Ve: Wir überprüfen das mal mit den Laserpointern.

Ve: Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem roten Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Ve zeigt: Die roten Fingerabdrücke von Laser und Galaxie sind an den gleichen Stellen. Also zeigt die Galaxie rotes Licht von Wasserstoffgas.

Helge: Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Helge zeigt: Der grüne spektrale Fingerabdruck des Lasers und der türkise spektrale Fingerabdruck der Galaxie haben 5 % unterschiedliche Abstände zur Mitte. Entsprechend war es bei der Wasserstofflampe. Also zeigt die Galaxie türkises Licht von Wasserstoffgas.

Jannik: Na und, das ist jetzt im Winter so. Und was ist mit den anderen Jahreszeiten?

Helge zeigt: Der große Wagen war im Herbst abends da im Westen und ich habe mit der Spektralbrille das gleiche Spektrum gesehen.

Helge zeigt: Analog war der große Wagen im Sommer abends da südlich und ich habe auch das gleiche Spektrum gesehen.

Helge zeigt: Entsprechend war der große Wagen im Frühling abends da im Osten und ich habe ebenfalls das gleiche Spektrum der Galaxie gesehen.

Paul: Diese Bewegung des großen Wagens am sichtbaren Nachthimmel entsteht natürlich durch die Drehung der Erde um die Sonne, also durch den Jahreslauf.

Deike: Also, auch im Jahreslauf ist das Spektrum wie ein Fingerabdruck für das Material.

Dennis: Gut, Spektralbrillen sind auch praktisch, weil das Licht und die Spektralbrillen zu jeder Zeit und an jedem Ort gleich funktionieren.

3.7. Wir sehen eine Rotverschiebung.

Jannik lacht: Ja, das ist in der Milchstraße und bei Nachbargalaxien wie ein Fingerabdruck. Aber, Leute, was ist bei entfernten Galaxien?

Laura: Jannik, du hast aber auch immer etwas auszusetzen.

Ve: Probieren wir es doch aus.

Marvin: Tjaaah, da, nördlich des Sternbilds Zwillinge müsste die Galaxie SDSS J0817+4014 sein. Helge richte das Teleskop doch mal auf die Galaxie.

Man projiziert mit dem Spektralprojektor die „große Galaxie“ (s. Sternkarte).

Helge arbeitet am Teleskop, bis der Spektralprojektor gut eingestellt ist.

Helge: Oh, jetzt sehe ich die Galaxie. Seht ihr sie auch?

Alle: Ja, aber, die ist gar nicht pink.

Ve: Das sehe ich mir mit der Spektralbrille genauer an. Ich sehe einen **dunkelroten** Fingerabdruck der Galaxie. Der scheint 5 % weiter von der Mitte entfernt zu sein als der rote Fingerabdruck von Wasser-

stoff. Das vergleiche ich mal mit dem Laserpointer. Marvin, leuchte doch mal bitte wieder mit dem Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Ve zeigt: Da, der spektrale Fingerabdruck der Galaxie leuchtet nur ganz schwach dunkelrot. Außerdem sind die roten Fingerabdrücke von Laser und Galaxie nicht an den gleichen Stellen. Also, das passt wirklich nicht.

Helge: Ich sehe mit der Spektralbrille einen **grünen** Fingerabdruck der Galaxie. Das passt auch nicht zum Wasserstofflicht. Das will ich jetzt noch einmal ganz genau mit dem Laserpointer vergleichen. Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Helge zeigt: Da, die grünen Fingerabdrücke von Laser und Galaxie sind an den gleichen Stellen. Aber der türkise Fingerabdruck der Wasserstofflampe lag 5 % näher an der Mitte als der grüne Fingerabdruck des Laserpointers. Also, das passt wirklich nicht zur Wasserstofflampe.

Jannik lacht: Na also, seht ihr, das passt offensichtlich doch nicht immer. Na, was sagt ihr nun?

Dennis: Ja, was sagen wir nun? Passt das etwa zusammen?

Hendric: Ja, und wie können wir das jetzt verstehen?

Laura: Na ja, also, erstmal langsam! Wir sehen Unterschiede. Aaaber, die Unterschiede der spektralen Fingerabdrücke der Galaxie und der Wasserstofflampe, die wir sehen, die haben ein System! Die spektralen Fingerabdrücke der Galaxie sind nur weiter weg von der Mitte, als die der Wasserstofflampe. Seht doch noch einmal genau mit der Spektralbrille hin!

Helge: Jaaa, du hast Recht, Türkis wurde zu Grün.

Ve: Ja, ich sehe es jetzt auch, Rot wurde zu Dunkelrot.

Paul: Ah, davon habe ich schon gehört, das Spektrum ist zum Roten hin verschoben. Dazu kommt es immer, wenn sich die Galaxie von uns wegbewegt. Andreas: Ja, und wir sehen sogar, wie schnell die Galaxie ist. Wir haben gesehen, dass die einzelnen Farben 5 % weiter von der Mitte weg sind als beim Wasserstoff.

Helge: Ja, beim Vergleich mit den Laserpointern haben wir ja die Veränderung um 5 % selbst gesehen.

Andreas: Ja, damit haben wir mit eigenen Augen gesehen, dass sich die Galaxie mit 5 % der Lichtgeschwindigkeit von uns wegbewegt.

Marvin: Licht hat eine Geschwindigkeit von 300 000 km/s oder 10Ym/GJ^1 . Dabei steht ein Gigajahr für eine Milliarde Jahre und ein Yottameter für 1000 Trilliarden Meter.

¹ Die Verwendung des metrischen Systems mit einfachem Zahlenmaterial hat sich bei jüngeren Lernenden ab Klassenstufe vier stets bewährt [4].

Paul: Dann bewegt sich die Galaxie mit 0,5 Ym/GJ von uns weg.

Deike: Wenn sich eine Lichtquelle von uns weg bewegt, dann wird unser spektraler Fingerabdruck gedehnt. Man sagt vereinfachend, er wird verschoben. Die Geschwindigkeit ist dann gleich der Lichtgeschwindigkeit mal der Prozentsatz dieser Dehnung.

Dennis: Das ist ja praktisch. Dann können wir mit der Spektralbrille die Dehnung des spektralen Fingerabdrucks sehen und daraus die Geschwindigkeit der Galaxie mit unseren eigenen Augen ersehen.

3.8. Wir erschauen eine Bewegungsdauer.

Jannik lacht: Ja, und wann soll denn dann die Galaxie hier losgefliegen sein?

Helge: Dazu müssten wir die Entfernung sehen.

Marvin: Klar, je kleiner die Galaxie aussieht, desto weiter ist sie weg.

Andreas: Ich habe gelesen, dass zumindest Spiralgalaxien alle ungefähr gleich groß sind.

Andreas projiziert die Skala: An dieser Skala sehe ich die Entfernung einer Galaxie. Es sind vier Striche. Nach meiner Kalibrierung ist die Galaxie 7 Ym entfernt.

Laura: Die Geschwindigkeit war 0,5 Ym/GJ.

Paul: Ja, dann war die Galaxie vor 14 GJ hier.

Jannik: Sicher?

Hendric: Ja, in 1 GJ hat sich die Galaxie 0,5 Ym weit bewegt,

in 2 GJ hat sie sich 1 Ym weit bewegt,

in 3 GJ hat sie sich 1,5 Ym weit bewegt,

und so weiter, also hat sie sich in 14 GJ um 7 Ym weit bewegt.

Deike: Die Galaxie war vor 14 GJ, also vor 14 Milliarden Jahren hier.

Dennis: Cool, mit der Spektralbrille können wir Zeiträume von 14 Milliarden Jahren überblicken.

3.9. Wir erschauen eine zweite Bewegungsdauer.

Jannik lacht: Ja, und was ist mit anderen Galaxien?

Ve: Probieren wir es aus.

Marvin: Tjaaah, da links des Sternbilds Andromeda im Sternbild Fische müsste die Galaxie SDSS J0135+1455 sein. Helge richte das Teleskop doch mal auf die Galaxie.

Man projiziert mit dem Spektralprojektor die „mittelgroße Galaxie“ (siehe Sternkarte).

Helge arbeitet am Teleskop, bis der Spektralprojektor gut eingestellt ist.

Helge: Oh, jetzt sehe ich die Galaxie. Seht ihr sie auch?

Alle: Ja, die ist gut erkennbar.

Thorben: Und die Galaxie sieht auch nicht pink aus?

Ve: Ich sehe mir das mal mit der Spektralbrille genauer an. Ich sehe einen **gelborangen** Fingerabdruck der Galaxie. Das vergleiche ich noch genauer mit dem Laserpointer.

Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Ve: Ich sehe den gelborangen Fingerabdruck der Galaxie ungefähr 15 % vom grünen spektralen Fingerabdruck des Laserpointers entfernt, relativ zur Mitte. Also ist der gelborange spektrale Fingerabdruck der Galaxie 20 % vom türkisen spektralen Fingerabdruck der Wasserstofflampe entfernt.

Helge: Ich sehe mit der Spektralbrille noch einen **grünen** spektralen Fingerabdruck der Galaxie. Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Helge zeigt: Da, die grünen spektralen Fingerabdrücke des Lasers und der Galaxie sind an der gleichen Stelle. Da ist wohl der violette spektrale Fingerabdruck des Wasserstoffgases zum grünen spektralen Fingerabdruck der Galaxie geworden. Die beiden schätze ich 20 % voneinander entfernt, relativ zur Mitte.

Andreas: Dann bewegt sich die Galaxie mit 20 % der Lichtgeschwindigkeit von uns weg.

Paul: 20 % von 10 Ym/GJ sind 2 Ym/GJ.

Andreas projiziert den Längenmaßstab an die Kuppel unter die Galaxie.

Andreas: Ich leuchte mit meinem Maßstab in Richtung der Galaxie. Diese Galaxie sieht nur ein Viertel so groß aus wie die nördlich der Zwillinge. Daher ist sie viermal so weit entfernt, also 4 mal 7 Ym. Sie ist demnach 28 Ym entfernt.

Deike: Aha, wir erkennen hier ein Bewegungsmuster der Galaxien: Galaxien, die sich besonders schnell von uns weg bewegen sind auch besonders weit entfernt.

Paul: Ja, und die Galaxie war auch vor 14 GJ hier.

Jannik: Sicher?

Hendric: Ja, in 1 GJ hat sich die Galaxie 2 Ym weit bewegt,

in 2 GJ hat sie sich 4 Ym weit bewegt,

und so weiter, also hat sie sich in 14 GJ um 28 Ym weit bewegt.

Deike: Die Galaxie war also auch vor 14 Milliarden Jahren hier.

Dennis: Das ist ja interessant, dass beide Galaxien gleichzeitig hier waren, aber mein Vater sagt bestimmt, das ist purer Zufall.

Laura: Dann sag doch, es war Zufall, dass du mit dem Fahrrad auf der Köhlbrandbrücke warst.

Alle lachen.

3.10. Wir erschauen eine dritte Bewegungsdauer.

Jannik lacht: Na, zwei Beispiele sind schon etwas wenig.

Ve: Probieren wir es aus mit einer weiteren Galaxie.

Marvin: Tjaaah, da im Sternbild Zwillinge müsste die Galaxie SDSS J0808+2814 sein. Helge richte das Teleskop doch mal auf die Galaxie.

Man projiziert mit dem Spektralprojektor die „kleine Galaxie“ (s. Sternkarte).

Helge arbeitet am Teleskop, bis der Spektralprojektor gut eingestellt ist.

Helge: Oh, jetzt sehe ich die Galaxie. Seht ihr sie auch?

Alle: Ja, die ist gut erkennbar.

Thorben: Ich sehe die Galaxie, die sieht ein wenig rötlich aus.

Ve: Ich sehe mir das mal mit der Spektralbrille genauer an. Ich sehe einen roten Fingerabdruck der Galaxie. Das vergleiche ich noch genauer mit dem Laserpointer.

Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem roten Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Ve zeigt: Ich sehe da den **roten** Fingerabdruck der Galaxie beim roten spektralen Fingerabdruck des Laserpointers. Da ist wohl der türkise spektrale Fingerabdruck des Wasserstoffgases zum roten spektralen Fingerabdruck der Galaxie geworden. Die beiden schätze ich 30 % voneinander entfernt, relativ zur Mitte.

Helge: Ich sehe mit der Spektralbrille noch einen **gelbgrünen** spektralen Fingerabdruck der Galaxie. Marvin, leuchte doch mal bitte mit dem grünen Laserpointer in Richtung Galaxie.

Marvin leuchtet.

Helge zeigt: Da, der grüne spektrale Fingerabdruck des Lasers ist etwa 10 % von dem der Galaxie entfernt, relativ zur Mitte. Da ist wohl der violette spektrale Fingerabdruck des Wasserstoffgases zum gelbgrünen spektralen Fingerabdruck der Galaxie geworden. Die beiden sind dann 30 % voneinander entfernt, relativ zur Mitte.

Deike: Aus dem türkisen Licht des Wasserstoffgases wurde hier rotes Licht der Galaxie. Und aus dem violetten Licht des Wasserstoffgases wurde hier grüngelbes Licht der Galaxie. Beides passt zu einer Dehnung des Fingerabdrucks von 30 %.

Andreas: Dann bewegt sich die Galaxie mit 30 % der Lichtgeschwindigkeit von uns weg.

Paul: 30 % von 10 Ym/GJ sind 3 Ym/GJ.

Andreas projiziert den Längenmaßstab an die Kuppel unter die Galaxie.

Andreas: Ich leuchte mit meinem Maßstab in Richtung der Galaxie. Diese Galaxie sieht nur ein Sechstel so groß aus wie die nördlich der Zwillinge. Daher ist sie sechsmal so weit entfernt, also 6 mal 7 Ym. Sie ist demnach 42 Ym entfernt.

Paul: Ja, dann war auch diese Galaxie vor 14 GJ hier.

Jannik: Sicher?

Hendric: Ja, in 1 GJ hat sich die Galaxie 3 Ym weit bewegt,

in 2 GJ hat sie sich 6 Ym weit bewegt, und so weiter, also hat sie sich in 14 GJ um 3 mal 14 gleich 42 Ym weit bewegt.

Deike: Die Galaxie war also auch vor 14 Milliarden Jahren da. Wir haben also mit eigenen Augen gesehen, dass alle Galaxien vor 14 GJ hier waren.

Dennis: Na ja, vielleicht ist das ja doch kein Zufall, ich war ja auch nicht aus Zufall auf der Köhlbrandbrücke.

Helge: Warum denn sonst?

Dennis: Wegen der schönen Aussicht natürlich!

3.11. Wir erkennen das Weltalter.

Laura: Also, dann waren alle Galaxien zur gleichen Zeit hier.

Dann war damals alles zusammengepresst und fliegt seitdem auseinander.

Das gab bestimmt einen dollen Knall.

Hendric: Den ersten Knall überhaupt:

Laura: Sozusagen den Urknall.

Ve: Also, wenn vor 14 Milliarden Jahren plötzlich alles auseinandergeflogen ist, dann gibt es das Universum auch erst seit 14 Milliarden Jahren. Also, dann ist das Universum 14 Milliarden Jahre alt.

Deike: Gerade haben wir mit eigenen Augen mit Hilfe der Spektralbrille das Bewegungsmuster der Galaxien gesehen und damit das Weltalter von 14 Milliarden Jahren erkannt. Wir können also mit der Spektralbrille die gesamte Zeit bis zum Urknall überschauen, die gesamte vierte Dimension.

Marvin: Tjaaah, dann können wir auch umgekehrt mit der Spektralbrille die Tiefe des Alls sehen:

Wenn der spektrale Fingerabdruck stark gedehnt ist, dann ist die Galaxie weit entfernt.

Deike: Also sehen wir mit der Spektralbrille am Sternenhimmel auch die dritte Dimension.

Laura: Also, Dennis, das passt doch gut zusammen. Das muss auch dein Vater zugeben.

Dennis: Darüber muss ich erst mal nachdenken, ich brauche eine Pause.

--- PAUSE ---

Laura: Na, Dennis, was meinst du, könnte das deinen Vater beeindrucken?

Dennis: Nein, der würde nur fragen, ob wir überhaupt verstehen, wie die Spektralbrille funktioniert.

Laura: Ja, Dennis, das wüsste ich auch gerne.



Abb.5: Wasserwellen hinter einer Hafeneinfahrt [2].

3.12. Wir sehen, dass Licht Welleneigenschaften hat.

Marvin: Aaah, jaaah, das kann ich euch zeigen. In der Spektralbrille sind viele kleine Öffnungen.

Dennis: Na und?

Marvin: Tjaaah, ich habe hier ein Bild von Wasserwellen, die auf eine Hafeneinfahrt zulaufen.

Marvin zeigt Wasserwellen mit dem Beamer (s. Abb. 5).

Paul: Oh, ich verstehe. Die Wasserwellen laufen hinter der Öffnung auseinander.
 Jannik: Ja, das sind Wasserwellen, wir haben aber Licht.
 Paul: Hm, dann ist eben Licht wie eine Welle.
 Laura: Gut, Licht ist wie eine Welle. Aber warum wird das Licht hinter der Öffnung in seine Spektralfarben zerlegt?
 Marvin: Tjaaah, aaah, das kann ich euch auch zeigen. Hier habe ich einen grünen Laserpointer. Marvin erzeugt Beugung mit dem grünen und mit dem roten Laserpointer, indem er die Spektralbrille durchstrahlt. Dann sehen die Zuschauer die gleichen Beugungsmuster, indem sie durch die Spektralbrille schauen.

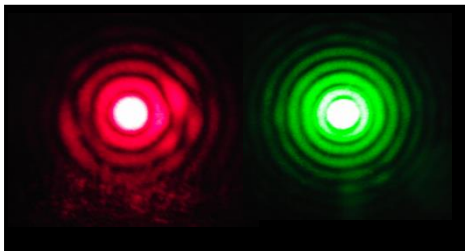


Abb.6: Beugungsmuster hinter kreisförmigen Öffnungen.

Ve: Prima, also hat wohl rotes Licht eine längere Wellenlänge als grünes Licht.
 Jannik lacht: Wieso das denn?
 Marvin: Oooh, jaaah, ich habe im Physikunterricht das Licht der beiden Laserpointer hinter einer einfachen Öffnung fotografiert.
 Marvin zeigt Fotos mit dem Beamer (s. Abb. 6).
 Ve: Hier sieht man ja die Wellenlängen.
 Marvin: Nein, nicht ganz. Aber diese Muster veranschaulichen, dass rotes Licht eine größere Wellenlänge hat als grünes Licht.
 Jannik: Na gut, das hast du zumindest schön veranschaulicht.
 Deike: Licht ist wie eine Welle. Rotes Licht hat eine große Wellenlänge, grünes Licht hat eine kleine Wellenlänge.
 Dennis: Na ja, aber warum ändert sich die Wellenlänge bei Bewegung? Das will mein Vater bestimmt auch noch wissen.
 Ve: Dein Vater ist nicht nur zu streng, sondern auch zu anspruchsvoll.
 Laura: Hm, aber ich wüsste es trotzdem auch ganz gerne. Bin ich etwa auch zu anspruchsvoll?
3.13. Wir sehen, wie sich die Wellenlänge vergrößert, wenn sich die Quelle entfernt.
 Ve: Thorben, pack doch mal mein Geschenk aus, das macht jedenfalls auch Wellen.
 Thorben packt es aus: Danke, eine CD und eine Ente, witzig, drollig, hihhi. Die Ente kann man auch aufziehen.
 Thorben lässt die Ente im Wasserbecken plantschen und beschreibt kreisförmige Wellen (s. Abb. 4). Paul zeigt das Wasserbecken den Gästen.

Helge: Die Ente strampelt im Wasserbecken und sendet dabei kreisförmige Wasserwellen aus. Wenn sich die Ente fortbewegt, dann ist hinter der Ente die Wellenlänge, also der Abstand benachbarter Wellentäler, verlängert. Andreas projiziert das Entenfoto (s. Abb. 7).
 Helge: Das sehen wir auch im Foto, auch hier ist die Wellenlänge hinter der Ente verlängert.



Abb.7: Schwimmende Ente [3].

Ve projiziert ihre Berechnung und erklärt: Damit kann man sogar die Geschwindigkeit v der Ente bestimmen. Das geht so: die grüne Ente paddelt auf der Stelle. Das erste Wellental ist nach einer Periodendauer T um eine Wellenlänge λ nach hinten gewandert. Daran erkennen wir, dass die Wellenlänge λ gleich dem Produkt aus Periodendauer T und Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist. Die rote Ente macht es genauso, aber zusätzlich bewegt sie sich dabei während einer Periodendauer T mit einer Geschwindigkeit v um die Strecke $v \cdot T$ nach vorne. Nach einer Periodendauer T ist der Abstand zweier Wellentäler also um diese Strecke $v \cdot T$ verlängert. Also hat sich auch die Wellenlänge um diese Strecke verlängert, kurz gesagt ist die Wellenlängenverlängerung $\Delta\lambda = v \cdot T$. In unserem Beispiel ist die Wellenlängenverlängerung gleich 40 % der Wellenlänge, also $\Delta\lambda = 40\% \cdot \lambda$. Wir setzen für die Wellenlängenverlängerung und die Wellenlänge die beiden Produkte ein und erhalten so $v \cdot T = 40\% \cdot c \cdot T$. Wir teilen auf beiden Seiten durch die Periodendauer und erhalten $v = 40\% \cdot c$ oder allgemein $v = p\% \cdot c$.

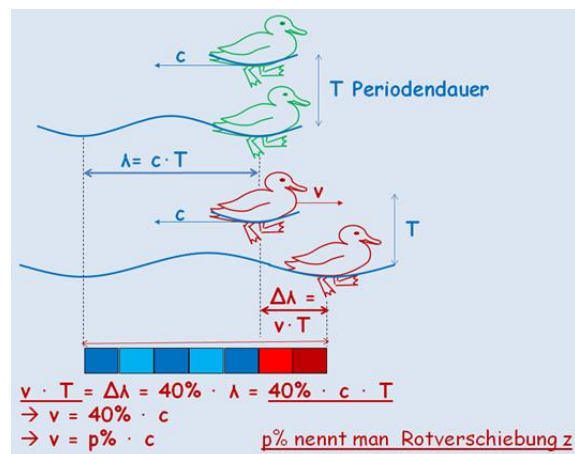


Abb.8: Berechnung der Rotverschiebung.

Dieser Prozentsatz $p\%$ der Wellenlängenverlängerung entspricht dem Prozentsatz der Dehnung des spektralen Fingerabdrucks, den wir mit Hilfe der Spektralbrille und mit eigenen Augen gesehen haben².

Deike: Jetzt ist klar, warum die Geschwindigkeit der Galaxie gleich dem Produkt aus Lichtgeschwindigkeit und der prozentualen Dehnung des spektralen Fingerabdrucks ist.

Dennis bewegt den Laserpointer und versucht eine Rotverschiebung hinzubekommen: Nein, also das passt gar nicht, das grüne Licht bleibt grün, obwohl ich den Laserpointer bewege. Das klappt bei Licht doch nicht.

Ve: Na ja, nach meiner Formel müsstest du den Laserpointer mit 30 000 km/s bewegen, um nur 10% Rotverschiebung zu erreichen, denn die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300 000 km/s.

Alle lachen.

Thorben: Dennis, du bist einfach zu langsam.

Laura: Jetzt soll Dennis sich auch noch mit 30 000 km/s bewegen, ihr seid doch verrückt. Soll das doch sein Vater einmal vormachen.

3.14. Der Urknall überall.

Jannik lacht: Ja, aber, wenn vor 14 Milliarden Jahren alle Galaxien von hier gestartet sind, dann war der Urknall ja hier. Aber, warum soll er gerade hier gewesen sein?

Laura: Also, langsam. Was haben wir eigentlich gesehen? Vor 14 Milliarden Jahren waren alle Galaxien hier. Dann war beispielsweise auch die Galaxie hier, die wir beim Sternbild Andromeda gesehen haben. Dann ist auch von der Galaxie aus gesehen alles weggefliegen. Anscheinend sieht es von jeder Galaxie so aus, dass alles seit 14 Milliarden Jahren auseinander fliegt.

Ve: Dann war der Urknall nicht nur hier, sondern auch an jedem anderen Ort.

Laura: Also, Dennis, mit der Spektralbrille können wir nicht nur das Weltalter und die Tiefe des Raums sehen. Wir können sogar erklären, wie das funktioniert.

Dennis: Na ja, wir können meinen Eltern ja mal zeigen, was wir hier so gemacht haben. Aber ob die mich deshalb auf die Kursfahrt lassen ...?

4. Erfahrungen

Wir haben den Projektor im Planetarium in Grünendeich mit Kuppeldurchmesser 6 m und im kleineren Planetarium in Jena mit dem Durchmesser 8 m erprobt, ohne Schwierigkeiten mit der Helligkeit zu bekommen. Der Projektor funktionierte robust und störungsfrei in sechs ausgebuchten Vorstellungen im Planetarium in Grünendeich.

Unsere Gäste kamen hauptsächlich aus der Region, eine Minderheit hatte mit der Schule zu tun, einige kamen aus entfernten Städten in Deutschland. Wir

befragten einige zufällig ausgewählte Gäste danach, ob sie die Spektren, Farben und Formen gut erkennen konnten. Alle Befragten bejahten das. Wir befragten einige zufällig ausgewählte Gäste danach, ob sie die Bestimmung des Weltalters anhand ihrer eigenen Beobachtungen bestimmen konnten. Alle Befragten bejahten das; viele ergänzten, dass dazu die drei Beispiele wirklich notwendig waren, weil sie es nach einem oder zwei Beispielen noch nicht richtig verstanden hätten. Zudem waren unsere Gäste von den Präsentationen stets begeistert.

5. Diskussion

Mit unserem Spektralprojektor können die Gäste des Planetariums nun wissenschaftliche Entdeckungen selbst aktiv beobachtend, auswertend und berechnend nachvollziehen. Das eröffnet der breiten Öffentlichkeit eine neue Sicht auf spektroskopische Ergebnisse aus der Astronomie, aber auch aus anderen Naturwissenschaften und Wissensgebieten.

6. Ausblick

Wir entwickeln aktuell einen Projektor für Planetarien mit Kuppeldurchmessern bis 23 m, um auch in großen Planetarien Vorstellungen geben zu können. Wir entwickeln zudem Automatisierungen, beispielsweise das Ersetzen der Dias durch Mikrospiegel, wie sie in DLP-Beamern eingesetzt werden. Das Patent enthält einen Entwurf eines Spektralprojektors, der die astronomischen Objekte nicht nacheinander, sondern zugleich projiziert.

Wir erarbeiten als zweites Präsentationsthema die Erkundung extraterrestrischer Planeten und die Suche nach extraterrestrischem Leben mit Hilfe von Spektren und planen die Behandlung weiterer Themen mit dem Spektralprojektor.

7. Danksagung

Wir bedanken uns beim Haus der Maritimen Landschaft Unterelbe dafür, dass wir das Planetarium für unsere Vorstellungen nutzen durften und bei der Vorbereitung kooperieren konnten. Wir bedanken uns für anregende Diskussionen zur Weiterentwicklung des Projektors mit dem Team des Zeiss-Planetariums und mit Christian Rempel.

8. Literatur

- [1] Brüning, Paul; Carmesin, Hans-Otto und Helge, Steffens (2014): Vorrichtung zur Präsentation astronomischer Objekte mit realistischen Formen und Spektren einschließlich Rotverschiebung, Größe, chemischer Zusammensetzung, Entfernung und Bewegungsablauf insbesondere fürs Planetarium. Deutsches Patentamt, Anmeldung
- [2] Balck, Friedrich (2009): Wasserwellen.
<http://www.biosensor-physik.de/biosensor/wellen-le-g-005.jpg>
(Stand: 5/2014)
- [3] Carmesin, Hans-Otto (2013): Jugendliche beobachten Urknall in der Schulsternwarte. MINT Zirkel, September/Oktober, S. 18

² In der Kleinwinkelnäherung ist der beobachtete Abstand zur Mitte proportional zur Wellenlänge.

- [4] Carmesin, Hans-Otto (2012): Schüler beobachten den Urknall mit einem C-11-Teleskop. Jugendliche beobachten Urknall in der

Schulsternwarte. In: Physik Didaktik B (2012)
S. 1-13. <http://www.phydid.de>