

Der himmlische Wald der Wasserstofflinien

Durch die Verknüpfung der Kenntnisse über die Spektrallinien des Wasserstoffs mit kosmologischen Betrachtungen kann die Physik relevant und interessant werden.

Das Linienspektrum des Wasserstoffatoms ist für den Astronomen eine wesentliche Informationsquelle, stellt doch der Wasserstoff in kosmischer Sichtweise das dominierende Element dar. In den Spektren der entferntesten noch sichtbaren kosmischen Objekte, der Quasare, können Spektrallinien des Wasserstoffs, die im irdischen Labor nur im Ultravioletten beobachtbar sind (im Besonderen die Lyman-Alpha-Linie), auf einmal im sichtbaren Spektralbereich erscheinen. Dazu kommt die zunächst verwirrende und doch eindrucksvolle Tatsache, dass die Lyman-Alpha-Linie gleich mehrfach, gleich einem Wald von Linien erscheint. Dieser Linienwald liefert Aussagen über die großräumige Verteilung des Wasserstoffs im Universum (siehe auch Abb. 1).

Das vorliegende didaktische Material beginnt mit der [elementaren Darstellung „Wie aus der Lyman-Alpha-Linie ein Lyman-Alpha-Wald wird“](#) (z. B. als eine Quelle für einen möglichen Schülervortrag). Das [Arbeitsblatt „Kosmischer Wasserstoff, expandierender Kosmos und Quasarspektren“](#) fordert in Gedankenexperimenten dazu auf, den Zusammenhang zwischen dem Umfeld der Strahlungsausbreitung und dem beobachtbaren Spektrum herzustellen. Mit dem abschließend in Erinnerung gebrachten [Gummibandmodell vom Universum](#) gesellt sich zur Anschaulichkeit noch eine aktive Komponente. Zum Begriff Quasar siehe SuW 7/2005, Infokasten auf S. 42. Im gleichen Beitrag findet sich auf S. 46 auch ein Infokasten zum Phänomen der Absorptionslinienwälder in den Quasarspektren.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Quantenphysik	Linienspektrum, Wasserstofflinien, Lyman-Alpha-Linie
Astronomie	Kosmos	Expansion des Kosmos , Hubble-Gesetz , Rotverschiebung , Quasare

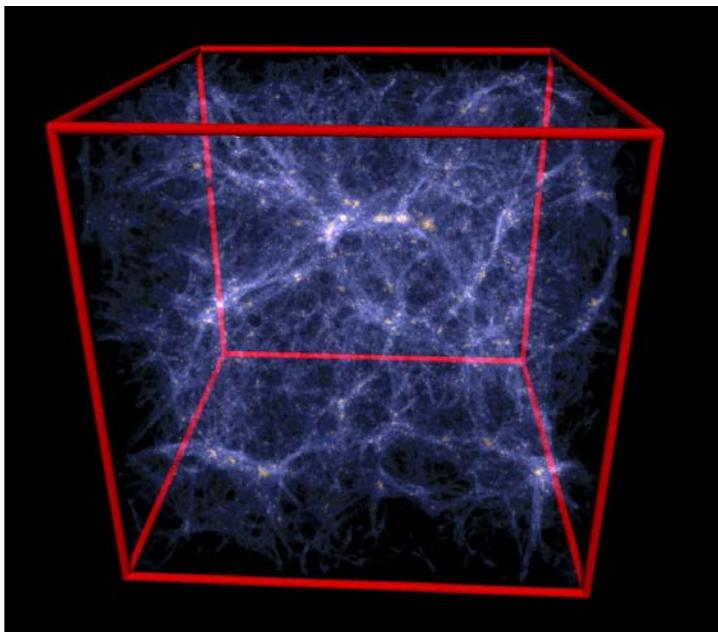


Abbildung 1: Großräumige Verteilung der dunklen Materie im heutigen „Computeruniversum“ (Bilddatei: [sim3d-2.bmp](#)) Das Simulationsergebnis stimmt erstaunlich gut mit der beobachteten Verteilung der Galaxien und des Wasserstoffs überein. Auffällig ist, dass die großräumige Struktur des Kosmos eine Zell- oder Blasenstruktur aufweist. Der Weg des Lichts eines fernen Quasars führt also durch Wände aus Wasserstoffgas und dann wieder durch eingeschlossene Gebiete. In einem Film ([millennium_sim_512x384.avi](#)) wird auf einen Galaxienhaufen in dieser Struktur gezoomt. Der Zoom reicht von mehreren Gpc bis hinunter zu gerade noch auflösbaren 10 kpc.

©: Springel V., Hernquist L., 2003, MNRAS, 339, 312, The history of star formation in a LCDM universe, <https://www.mpa.mpg.de/gadget/hydrosims/G4-a.png>.

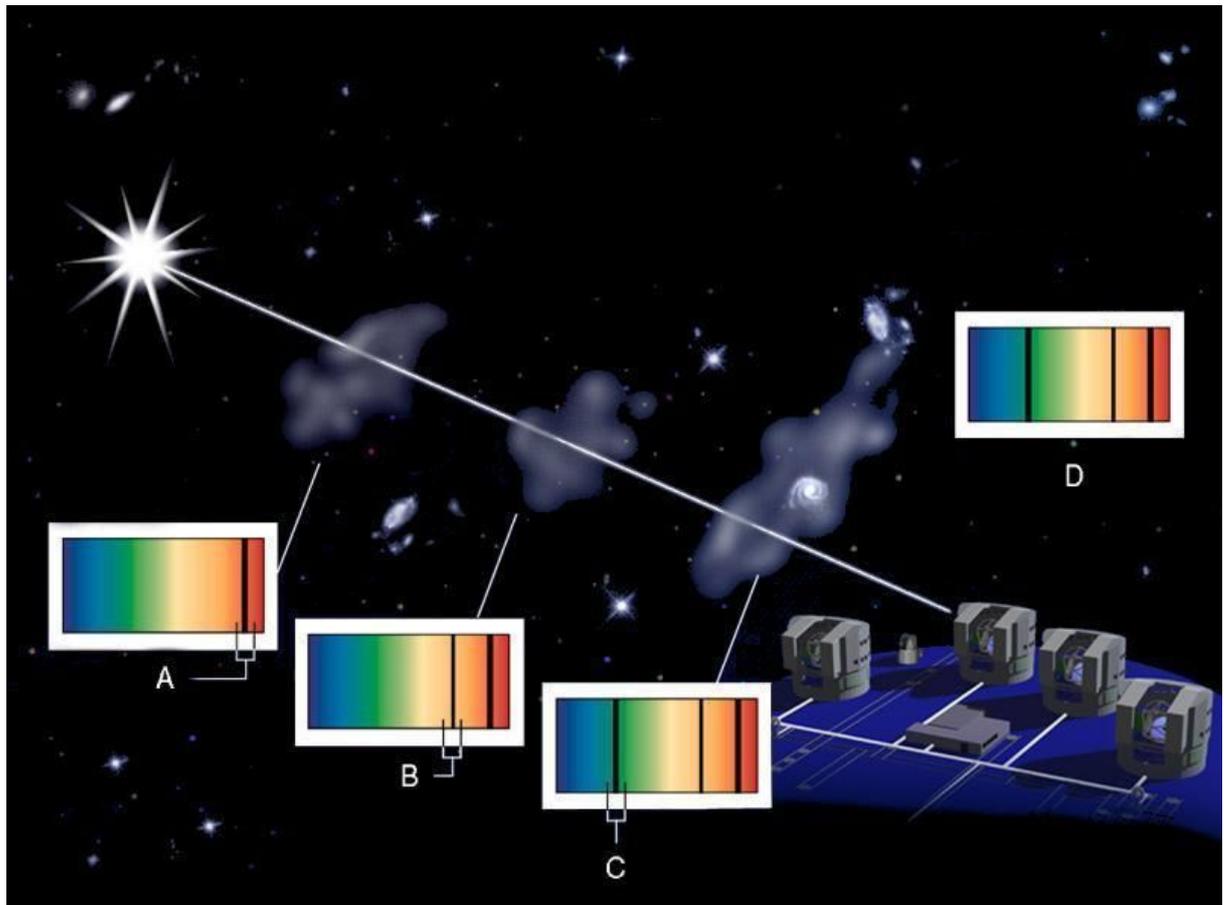


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Entstehung des „Lyman-Alpha-Waldes“.

©: ESO, <https://www.eso.org/public/ireland/images/eso0813a/?lang>.

Abb. 2 zeigt, wie die von fernen kosmischen Quellen (Quasaren) ausgesandte Kontinuumsstrahlung (siehe Abb. 3) auf ihrem Weg zum irdischen Beobachter (hier zum VLT-Observatorium) intergalaktische Wasserstoffwolken durchquert, wo es zur Linienabsorption vor allem bei 121,6 nm (die Lyman-Alpha-Linie für neutralen Wasserstoff im Grundzustand) kommt. Die Wasserstoffwolken werden eigentlich durch die Wände einer zellartigen Struktur der auskondensierten kosmischen Materie gebildet (siehe auch Abb. 1).

Entlang der Sichtlinie wird sukzessive gezeigt, wie die Zahl der Lyman-Alpha-Linien mit der Zahl der durchstrahlten Wasserstoffwolken zunimmt. Jedes Spektrum entspricht dem, was auf der Erde beobachtbar wäre, wenn keine weiteren Absorptionen stattfinden würden. Je länger das Licht im expandierenden Universum (Expansion im Bild nicht ersichtlich) unterwegs ist, desto stärker wird es rotverschoben. Bei entsprechender Rotverschiebung können Lyman-Alpha-Linien sogar im sichtbaren Spektralbereich erscheinen.

Zuerst erreicht die Quasarstrahlung die Wolke A. Durch die Rotverschiebung kommt es zur Absorption von Strahlung, die der Quasar bei einer Wellenlänge abgegeben hat, die kürzer als 121,6 nm ist. Die in Wolke A entstandene Lyman-Alpha-Linie wird auf dem weiteren Weg zur Erde bis in den roten Spektralbereich rotverschoben.

Wenn die Strahlung Wolke B erreicht, so ist sie stärker rotverschoben als bei Wolke A und ein anderer Bereich des Quasarspektrums ist für eine Lyman-Alpha-Absorption empfindlich. Auf dem weiteren Weg zur Erde wird die in Wolke B entstandene Lyman-Alpha-Linie nur noch bis in den gelben Spektralbereich verschoben. Wolke C ist der Erde am nächsten. Die dort entstandene Lyman-Alpha-Linie erscheint daher am wenigsten rotverschoben.

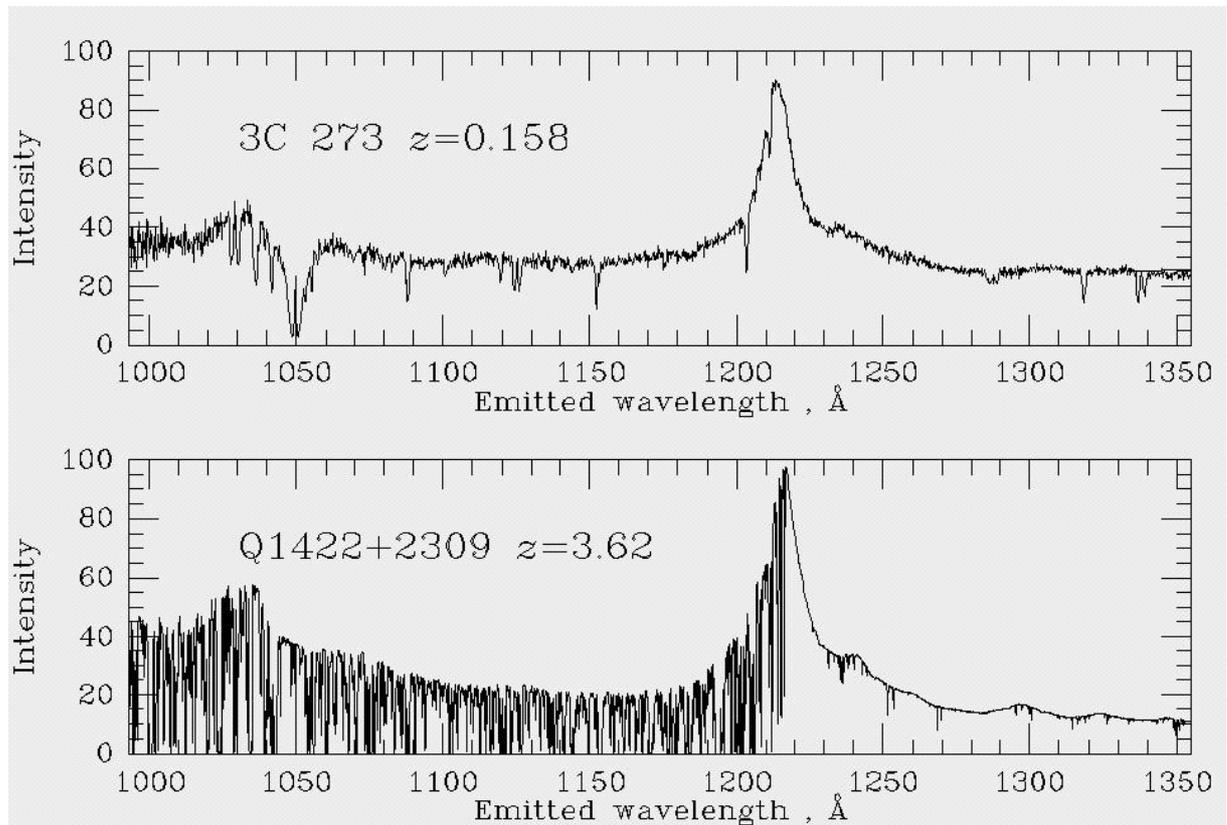


Abbildung 3: Quasarspektren mit Absorptionslinien, die meist von Lyman-Alpha-Absorptionen stammen.
 ©: keel@bildad.astr.ua.edu, <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/forest.gif>.

Die Einhüllenden der in Abb. 3 gezeigten Quasarspektren zeigen zunächst deren Kontinuumsverlauf. Bei einer Wellenlänge von 1216 Å (= 121,6 nm) zeigt sich eine markante Lyman-Alpha-Emissionslinie. Die Rotverschiebung z des Quasarlichts kann anhand dieser Linie ermittelt werden. Mit der Kenntnis von z kann dann aus dem beobachteten Quasarspektrum das dargestellte emittierte Quasarspektrum ermittelt werden. Die Teile des emittierten Quasarspektrums, die bei den durchstrahlten Wasserstoffwolken nach entsprechender Rotverschiebung Lyman-Alpha-Absorptionslinien erzeugen, erscheinen als Linien bei Wellenlängen kürzer als 1216 Å.

Während im Spektrum des Quasars Q1422+2309 mit $z = 3,62$ ein dichter Linienwald erscheint, der sich zur Emissionslinie hin, also zu großen Rotverschiebungen, noch verdichtet, werden im Spektrum des Quasars 3C 273 mit $z = 0,158$ nur einige Lyman-Alpha-Absorptionslinien mit großem Abstand zueinander sichtbar. Je kleiner die Rotverschiebung ist, desto kürzer reicht der Blick in die Vergangenheit. Die abnehmende Dichte der Linien ist eine Folge des expandierenden Universums. Der Abstand zwischen den absorbierenden Wasserstoffwolken wächst.

Die Stärke der Linien sagt etwas über die Anzahl der absorbierenden Wasserstoffatome, also über die Größe der Wolke aus. So ist die besonders ausgeprägte Linie bei 1050 Å im Spektrum von 3C 273 auf die dichtere Ansammlung von Wasserstoffgas im Randbereich einer Galaxie zurückzuführen.

„Kosmischer Wasserstoff, expandierender Kosmos und Quasarspektren“

Durch die Bearbeitung der **Gedankenexperimente** auf dem folgenden Arbeitsblatt sollen die Schüler schrittweise auf die verschiedenen Umstände bei der Entstehung eines Lyman-Alpha-Waldes aufmerksam gemacht werden.

In mehreren schematischen Darstellungen werden verschiedene, meist fiktive Bedingungen skizziert, unter denen die Strahlung eines Quasars zum irdischen Beobachter gelangen könnte (Gedankenexperimente). Es wird nur die Lyman-Alpha-Absorption des Wasserstoffs betrachtet. Zu jeder Darstellung gehört ein Diagramm, das das entsprechende auf der Erde beobachtbare Quasarspektrum andeutet.

Die Bilder 1, 2 und 4 sind bereits fertig und dienen zur Orientierung. Für die Bilder 3, 5, 6 und 7 werden die beobachtbaren Spektren (schematisch wie in den Bildern 1, 2 und 4) zu den gegebenen Bedingungen gesucht. Für Bild 8 ist das Spektrum gegeben und die Umstände sind gesucht.

Die Bilder entstanden in Erweiterung der von Edward L. Wright in Bild 4 gegebenen Darstellung (<http://www.astro.ucla.edu/~wright/Lyman-alpha-forest.html>).

Kommentare:

1 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und ohne absorbierende Wasserstoffwolken

Dieses Bild zeigt schematisch das kontinuierliche Spektrum eines Quasars, das ohne Absorption entlang der Sichtlinie keine Absorptionslinien aufweist (Absorption in Quasar-umgebung und in Erdatmosphäre sei vernachlässigt). Auffällig ist die Lyman-Alpha-Emissionslinie bei 121,6 nm, die in einem statischen Universum immer bei dieser Wellenlänge erscheinen würde, egal wie lange das Licht vom Quasar zur Erde unterwegs wäre.

2 Quasarspektrum bei expandierendem Kosmos und ohne absorbierende Wasserstoffwolken

Im Vergleich zu Bild 1 würde die Lyman-Alpha-Emissionslinie bedingt durch die Rotverschiebung nun bei einer größeren Wellenlänge (hier z. B. im sichtbaren Spektralbereich) erscheinen.

3 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und mit absorbierenden Wasserstoffwolken

Bedingt durch Absorption entlang der Sichtlinie könnte im Vergleich zu Bild 1 anstatt der Lyman-Alpha-Emissionslinie eine Lyman-Alpha-Absorptionslinie sichtbar sein. (Würde nur wenig Wasserstoff das Quasarlicht schwächen, so erschiene eine noch schwache Emissionslinie.) Wesentlich ist der Fakt, dass, unabhängig von Anzahl und Verteilung der Wolken auf der Sichtlinie nur eine Linie im Quasarspektrum erscheint (nämlich die bei 121,6 nm).

4 Quasarspektrum bei expandierendem Kosmos und mit absorbierenden Wasserstoffwolken

Im Vergleich zu Bild 3 führt die mit zunehmender Entfernung wachsende Rotverschiebung in einem expandierenden Universum dazu, dass ein Absorptionslinienwald entsteht.

5 *Quasarspektrum bei expandierendem Kosmos und stark wie auch schwach absorbierenden Wasserstoffwolken*

Im Vergleich zu Bild 4 absorbieren nun nicht alle Wolken gleich stark. Je stärker eine Wolke absorbiert, desto tiefer und breiter erscheint die Absorptionslinie.

6 *Quasarspektrum für Kosmos, der nach einer Expansionsphase nun statisch ist*

Es handelt sich um ein besonderes Gedankenexperiment, welches zeigt, dass die kosmologische Rotverschiebung nach Abschluss einer Expansionsphase (für die Zeitdauer der Lichtlaufzeit vom Quasar zum Beobachter) erhalten bliebe. Die Rotverschiebung durch den Dopplereffekt würde dagegen nicht erhalten bleiben, wenn die Relativgeschwindigkeit zwischen Quasar und Beobachter zu Null würde. Durch den Abbruch der Expansion erscheint der Linienwald mit kleineren Rotverschiebungen im Vergleich zu Bild 5.

7 *Quasarspektrum für expandierenden Kosmos und gleichmäßig mit Wasserstoff besetzte Sichtlinie*

Dieses Gedankenexperiment macht klar, dass erst die Inhomogenität in der Verteilung des kosmischen Wasserstoffs (die Zellstruktur, siehe Abb. 1) einen Absorptionslinienwald sichtbar werden lässt. Für eine gleichmäßig mit Wasserstoff besetzte Sichtlinie würde es durch die ebenso gleichmäßig rotverschobene Quasarstrahlung zu einer ständigen Absorption kommen. Das Quasarspektrum wäre zwischen 121,6 nm und der Lyman-Alpha-Emissionslinie gleichmäßig abgesenkt.

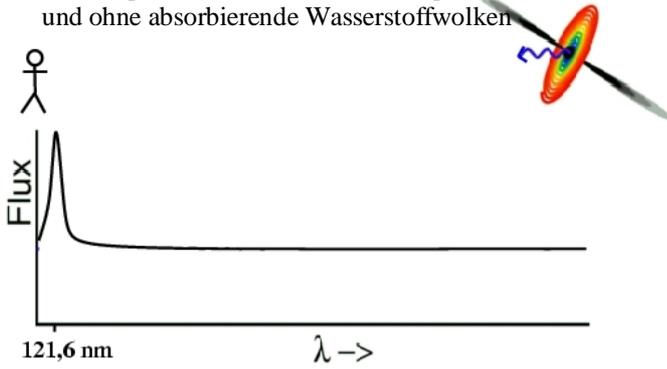
8 *Ort und Größe der absorbierenden Wasserstoffwolken für gegebenes Quasarspektrum bei Galaxienflucht*

Abschließend muss vom Spektrum auf die Umstände geschlossen werden - ein Problem, vor dem Astronomen in der Regel stehen. Zum einen kann aus der Rotverschiebung der Lyman-Alpha-Absorptionslinien die Entfernung der verantwortlichen Wasserstoffwolken abgeleitet werden. Zum anderen kann aus der Linienstärke die Anzahl der absorbierenden Wasserstoffatome in einer Wolke abgeschätzt werden. Im Ergebnis stehen eine Wolke mit wenig absorbierenden Wasserstoffatomen nahe beim Beobachter (ohne merkliche Rotverschiebung) und eine Wolke mit vielen absorbierenden Wasserstoffatomen nahe beim Quasar (Rotverschiebung nahe derjenigen der Lyman-Alpha-Emissionslinie).

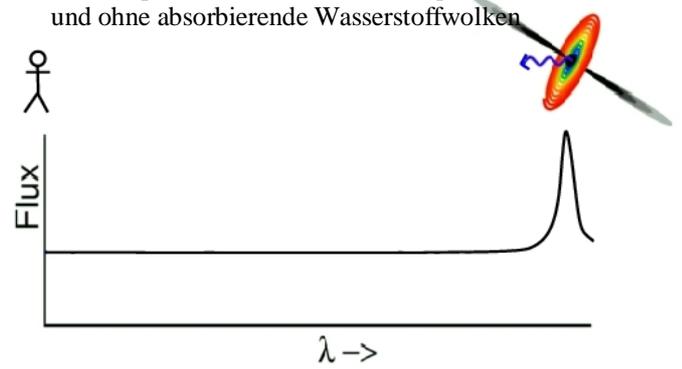
Arbeitsblatt „Kosmischer Wasserstoff, expandierender Kosmos und Quasarspektren“

GESUCHT SIND:

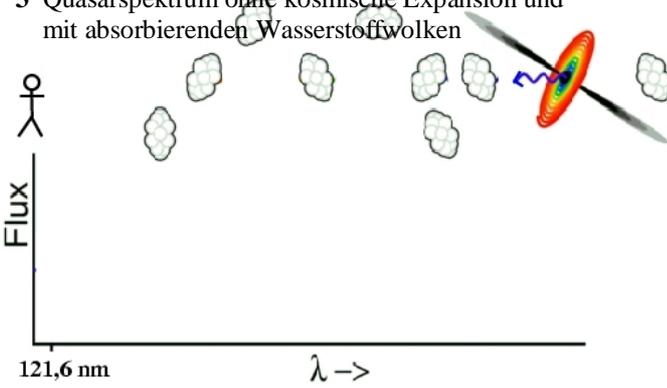
1 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und ohne absorbierende Wasserstoffwolken



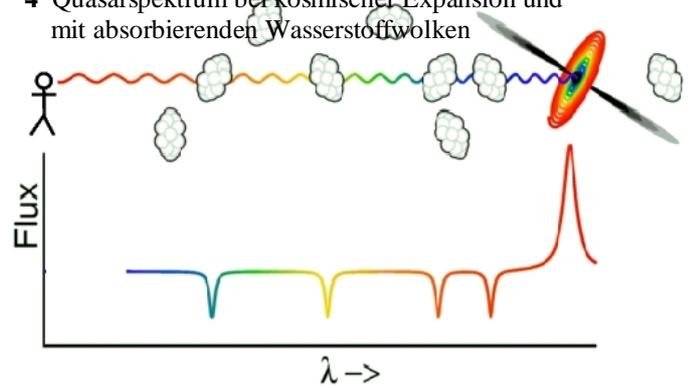
2 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und ohne absorbierende Wasserstoffwolken



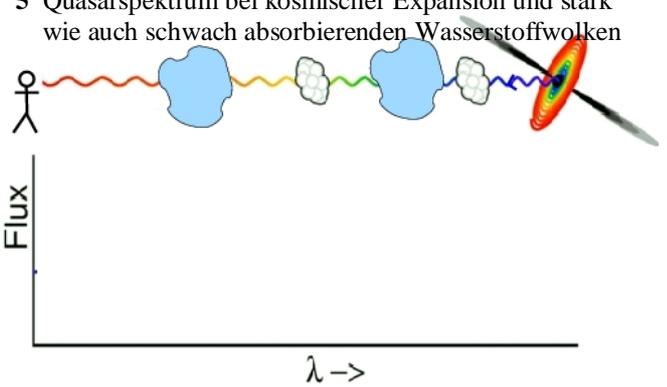
3 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und mit absorbierenden Wasserstoffwolken



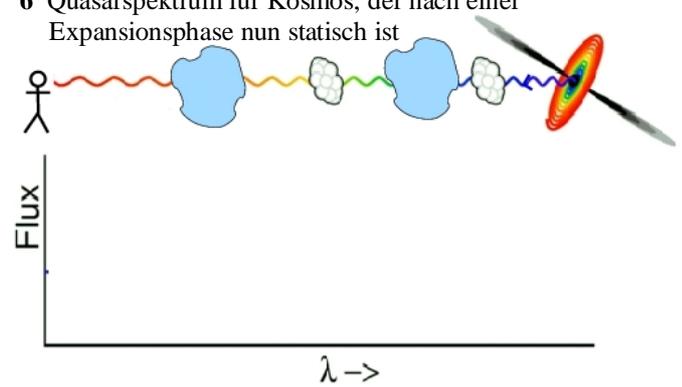
4 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und mit absorbierenden Wasserstoffwolken



5 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und stark wie auch schwach absorbierenden Wasserstoffwolken



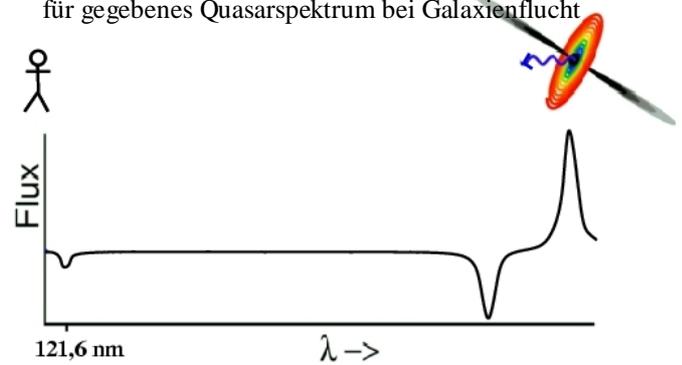
6 Quasarspektrum für Kosmos, der nach einer Expansionsphase nun statisch ist



7 Quasarspektrum für expandierenden Kosmos und gleichmäßig mit Wasserstoff besetzte Sichtlinie



8 Ort und Größe absorbierender Wasserstoffwolken für gegebenes Quasarspektrum bei Galaxienflucht



Arbeitsblatt „Kosmischer Wasserstoff, expandierender Kosmos und Quasarspektren“

ERGEBNISSE:

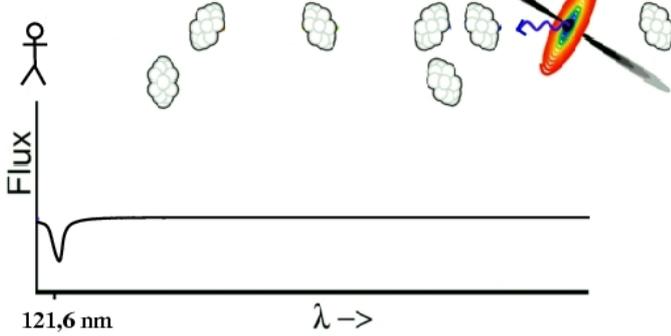
1 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und ohne absorbierende Wasserstoffwolken



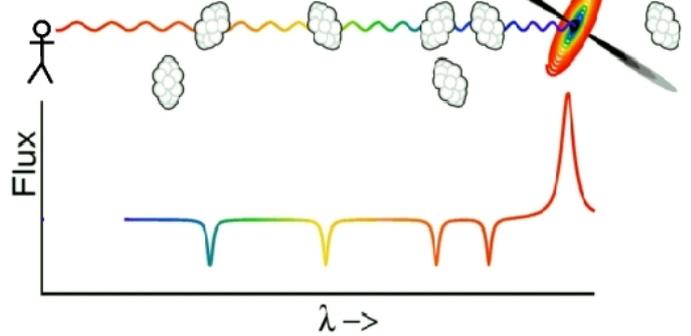
2 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und ohne absorbierende Wasserstoffwolken



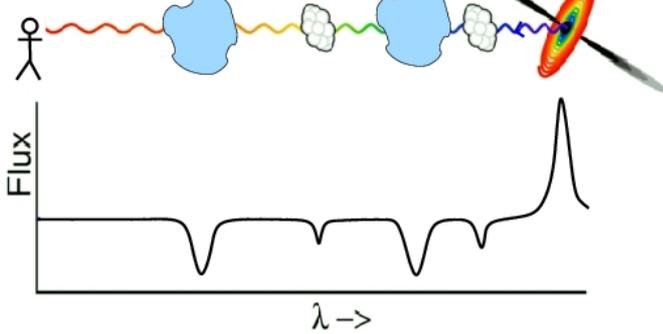
3 Quasarspektrum ohne kosmische Expansion und mit absorbierenden Wasserstoffwolken



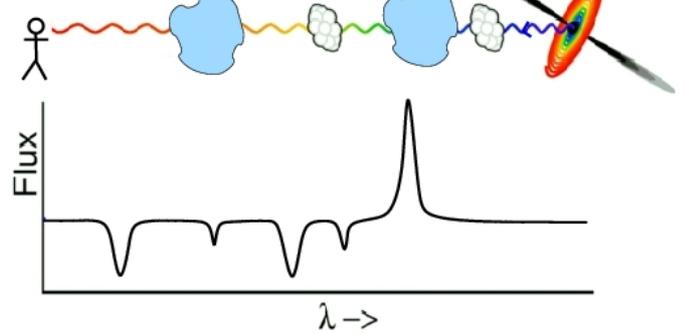
4 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und mit absorbierenden Wasserstoffwolken



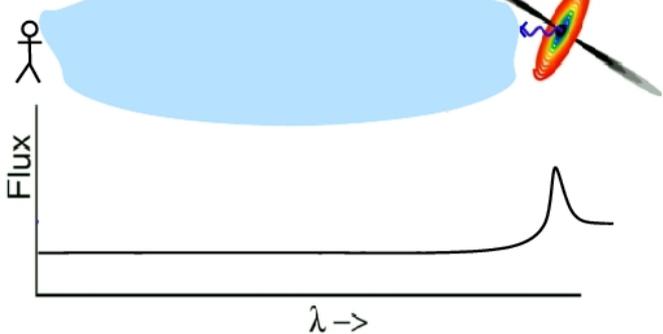
5 Quasarspektrum bei kosmischer Expansion und stark wie auch schwach absorbierenden Wasserstoffwolken



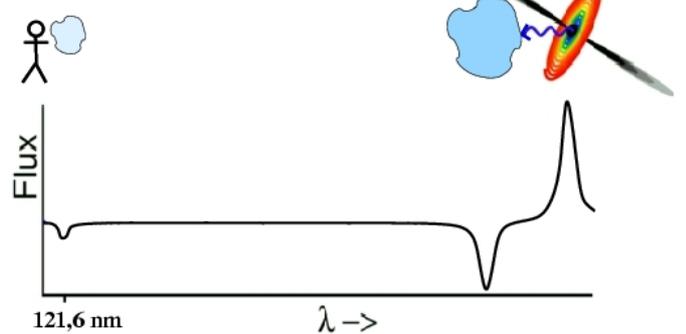
6 Quasarspektrum für Kosmos, der nach einer Expansionsphase nun statisch ist



7 Quasarspektrum für expandierenden Kosmos und gleichmäßig mit Wasserstoff besetzte Sichtlinie



8 Ort und Größe absorbierender Wasserstoffwolken für gegebenes Quasarspektrum bei Galaxienflucht



Das Modell „Gummiband-Universum“

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Die Expansion des Universums und damit im Zusammenhang stehende Sachverhalte lassen sich mit einem Gummiband-Modell veranschaulichen. Das Modell eröffnet zudem Freiräume für Schüleraktivität.

Das für das Modell benutzte Gummiband (z. B. Gummilitze für Bekleidung, siehe Abb. 4) repräsentiert den kosmischen Raum an beliebiger Stelle in einer beliebigen Richtung. So, wie sich das Band an allen Stellen gleichmäßig dehnt, wenn man daran zieht, so kann man sich die kosmische Expansion als zu einem gegebenen Zeitpunkt überall gleich erfolgend vorstellen.

Farbmarkierungen in regelmäßigen Abständen deuten die kosmische Materie an, die großräumig betrachtet als homogen verteilt angenommen wird. Kleine Pappscheiben mit aufgeklebten Galaxienbildchen (Modellgalaxien), die mit Heftklammern am Gummiband befestigt werden können, dienen der Lenkung der Aufmerksamkeit auf ausgewählte Punkte auf dem Band. Zudem bieten sie durch die Konkretheit der Galaxien ein Gegengewicht zur Abstraktheit des „Gummiband-Universums“. Außerdem veranschaulichen sie die Tatsache, dass das Universum zwar expandiert, die Galaxien sich dabei aber nicht ausdehnen.



Abbildung 4: Verschiedene Ausführungen des Gummibandmodells vom Universum, die für verschiedene Demonstrationen geeignet sind. Links: ca. 2m Gummilitze mit angehefteten Modellgalaxien (kleine auf Pappe geklebte Galaxienbildchen) und zwei noch zur Verfügung stehenden Modellgalaxien. Rechts: ca. 0,5m Gummilitze mit regelmäßig aufgetragenen Farbmarkierungen. Oben mittig: Ausgeschnittener Ring aus einem Gummihandschuh mit aufgezeichneter Wellenlinie. Untere Reihe: Mögliche Vorlagen für die Modellgalaxien (Bilddatei: **modellgalaxien.jpg**). ©: Olaf Fischer.

Die folgenden Erkenntnisse lassen sich gewinnen bzw. anschaulich untermauern:

- **Die Erde ist kein ausgezeichneter Ort im expandierenden Universum** ([→zurück zum Anfang](#))
Die kosmische Expansion gilt für jeden Ort des Universums gleichermaßen; kein Punkt ist ausgezeichnet. An Hand des in Abb. 5 gezeigten Gummibandmodells wird anschaulich, dass die Erde bzw. das Milchstraßensystem nur scheinbar das Zentrum der Expansion ist. Für jede Modellgalaxie ergibt sich das gleiche Bild, dass die anderen Modellgalaxien von ihr wegstreben.

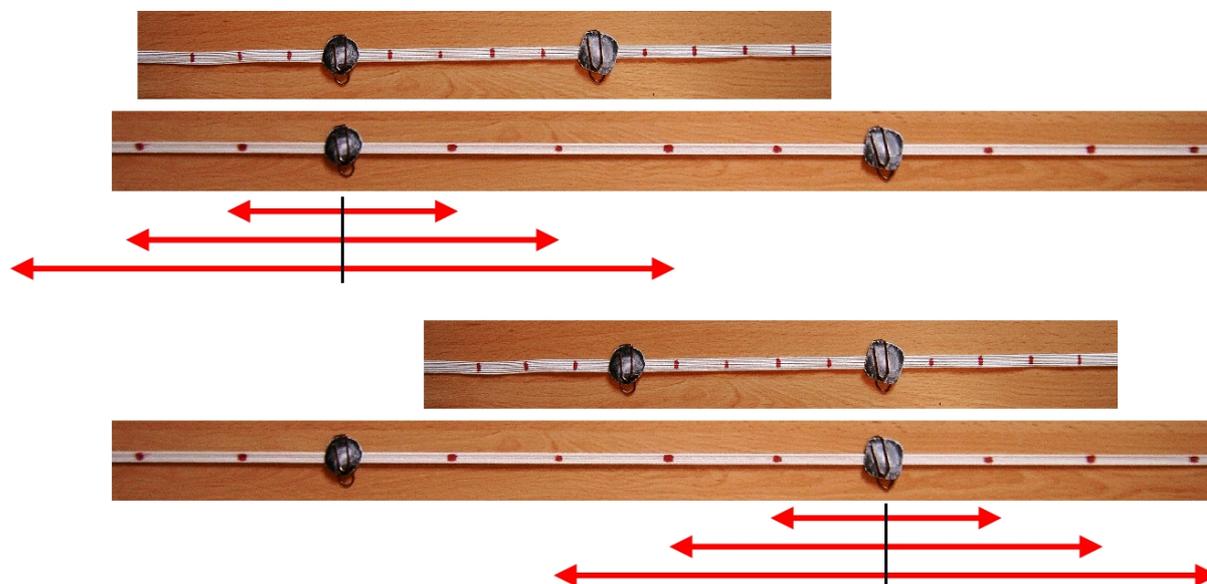


Abbildung 5: Überall im Kosmos scheint man im Zentrum der Galaxienflucht zu stehen. Mit Hilfe von ca. 0,5m Gummilitze mit regelmäßig aufgebrachten Farbmarkierungen und zwei anheftbaren Modellgalaxien kann diese Tatsache veranschaulicht werden. Alle Farbmarkierungen sollen beobachtbare Objekte (i. A. Galaxien) im Kosmos darstellen (die Regelmäßigkeit ihrer Verteilung ist großräumig gesehen richtig). Zwei dieser Objekte wurden durch Modellgalaxien hervorgehoben. Bei der Dehnung des Gummibandes (kosmische Expansion) bewegen sich, vom Standpunkt beider Modellgalaxien aus gesehen, alle anderen Galaxien weg. Die im Bild durch rote Pfeile angedeutete Fluchtgeschwindigkeit wächst mit zunehmender Entfernung. ©: Olaf Fischer.

- **Das Hubblegesetz** ([→zurück zum Anfang](#))
Im Jahre 1929 stellte Edwin Hubble fest, dass die Rotverschiebung der Galaxienspektren proportional zu ihrem Abstand d wächst. Die Rotverschiebung entsteht durch die Expansion des Universums. Die damit einher gehende Abstandsvergrößerung zwischen den Galaxien wird des Öfteren auch als Fluchtgeschwindigkeit (v) betrachtet, auch wenn es sich dabei nicht um eine Geschwindigkeit im eigentlichen Sinne handelt. Die Galaxien bewegen sich nicht im Raum (Eigenbewegung sei nicht betrachtet), sondern der Raum zwischen ihnen expandiert. Der derzeit ermittelte Wert der Proportionalitätskonstante für $v \sim d$, die Hubblezahl H_0 , beträgt etwa 71 (km/s)/Mpc.
Mit dem Gummibandmodell kann das Hubblegesetz anschaulich gemacht werden. Dazu wird z. B. ein Band von knapp 2 m Länge quer vor einer Tafel angebracht (siehe Abb. 6). Ausgehend vom festen Ende, welches den Ort der Erde markiert (was kein Merkmal für Geozentrismus sein soll), wird alle 0,5 m eine Modellgalaxie angebracht und ihre Position an der Tafel markiert. Zieht man das Band nun innerhalb von 1 s etwas auseinander und markiert die Endpunkte wieder an der Tafel, so kann man modellhafte Fluchtgeschwindigkeiten für die verschiedenen Distanzen ermitteln.
Dazu sei jedoch bemerkt, dass die Fluchtgeschwindigkeit, die in der Realität über die Auswertung der Rotverschiebung der Strahlung erfolgt, eine Momentangeschwindigkeit

darstellt. Um die Momentangeschwindigkeit im Modell anzunähern, sollte die Messstrecke nicht zu groß gewählt werden. Würde man das Gummiband so dehnen, dass die dem freien Ende nächste Modellgalaxie um 21 cm verschoben wird (also von 1,5 m auf 1,71 m Abstand), so erhielte man 0,07 m/s, 0,14 m/s und 0,21 m/s für die Entfernungen von 0,5 m, 1 m und 1,5 m. Trägt man die Modellergebnisse für v und d in einem Diagramm ab, so erhält man einen linearen Zusammenhang. Die Steigung der Geraden gibt dann die Expansionsrate, d. h. die Hubblezahl für das Gummibanduniversum wieder; hier im Beispiel beträgt sie $(0,14\text{m/s})/\text{m}$.

Das Diagramm unterstützt dann auch die Diskussion des Fehlers, der bei der Modelldarstellung des Hubblegesetzes gemacht wurde. Es wird ersichtlich und berechenbar, dass die Modellgalaxie, die von 1,5 m auf 1,71 m Abstand „flüchtete“, dort eine Geschwindigkeit von $v = H_0 \cdot d = (0,14\text{m/s})/\text{m} \cdot 1,71\text{m} \approx 0,24\text{m/s}$ (anstatt 0,21 m/s) hätte. Um eine gleichmäßige Expansion des Raumes zu simulieren, müsste das Gummiband beschleunigt gedehnt werden.

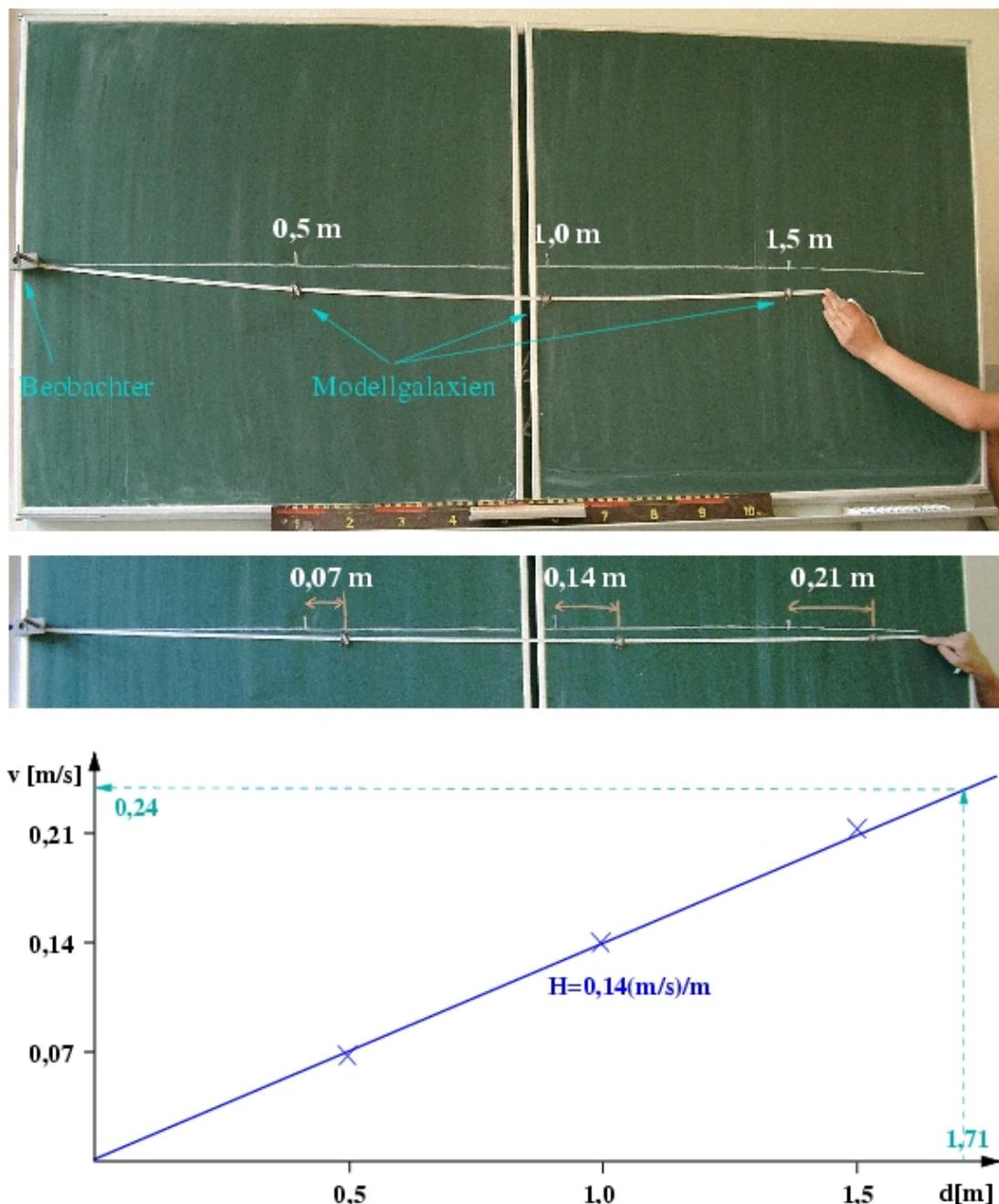


Abbildung 6: Veranschaulichung des Hubble-Gesetzes mit dem Gummibandmodell. ©: Olaf Fischer.

Weitere Anmerkungen:

Die Expansionsrate (Hubblezahl) ist keine konstante Größe. Der Index 0 sagt, dass es sich um den gegenwärtigen Wert einer zeitlich veränderlichen Größe handelt. Bisher ging man von einer durch die Eigengravitation gebremsten Expansion aus. Neuere Beobachtungen legen nahe, dass die Expansion seit einigen Milliarden Jahren wieder beschleunigt erfolgt.

Frage an Schüler: Wie äußern sich gebremste und beschleunigte Expansion im v - d -Diagramm (Abb. 6)? **Antwort:** Beschleunigte Expansion heißt, dass die Ausdehnung des Kosmos zur früheren Zeit langsamer vonstatten ging. Sehr weit entfernte Objekte (Entfernungsbestimmung z. B. mittels Supernova Ia) würden dann eine für ihre Entfernung zu geringe Rotverschiebung ausweisen, die Hubblezahl und damit der Anstieg im v - d -Diagramm wäre kleiner als die für relativ nahe Objekte.

Die Expansion des Raums gilt nicht für Objekte, die durch die Fundamentalkräfte gebunden sind (Atome wachsen nicht, Galaxis wird nicht größer, Galaxienhaufen wachsen nicht).

- **Rotverschiebung des Lichts im expandierenden Universum** [\(→zurück zum Anfang\)](#)

Licht und Raum sind miteinander „verkettet“. Die Expansion des Universums bedingt eine als kosmologische Rotverschiebung bezeichnete Dehnung der Wellenlänge des sich im Raum ausbreitenden Lichts, die man mit einem breiteren Gummiband veranschaulichen kann (siehe Abb. 4 und 7).

Die Rotverschiebung z entspricht dem Anteil der emittierten Wellenlänge (auch Laborwellenlänge genannt), um den diese bis zur beobachteten Wellenlänge verlängert wurde.

$$\lambda_{\text{beob}} = \lambda_{\text{emitt}} + z \cdot \lambda_{\text{emitt}}$$

$$z = \frac{\lambda_{\text{beob}} - \lambda_{\text{emitt}}}{\lambda_{\text{emitt}}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{emitt}}} \quad \text{oder} \quad z + 1 = \frac{\lambda_{\text{beob}}}{\lambda_{\text{emitt}}}$$

Die Rotverschiebung eines Spektrums wird des Öfteren so verstanden, dass es als Ganzes zu größeren Wellenlängen hin geschoben wird. Dies ist jedoch ein **Missverständnis**, was man mit Hilfe des Gummibandmodells und/oder einer kleinen Tafelskizze (siehe Abb.7) oder aber an Hand der obigen Formel belegen kann.

Hinsichtlich der Lyman-Alpha-Absorptionslinien taucht die **Frage** auf, welche Rotverschiebungen geeignet sind, damit die Absorptionslinien eines Lyman-Alpha-Waldes im sichtbaren Spektralbereich (also auch mit erdgebundenen Teleskopen) beobachtet werden können?

Geg.: Wellenlänge der Lyman-Alpha-Linie $\lambda_{\text{emitt}} = \lambda_{\text{absorb}} = 121,6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
Wellenlängenbereich für sichtbares Licht $\lambda_{\text{beob}} = (400 \text{ bis } 750) \cdot 10^{-9} \text{ nm}$

Ges.: Rotverschiebungen z

Lös.:

Die Rotverschiebung bezieht sich nicht auf den Quasar, sondern auf die absorbierenden Wasserstoffwolken.

$$z = \frac{\lambda_{\text{beob}} - \lambda_{\text{absorb}}}{\lambda_{\text{absorb}}} = \frac{400 \cdot 10^{-9} \text{ nm} - 121,6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}}{121,6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}} \approx 2,3,$$

$$z = \frac{\lambda_{\text{beob}} - \lambda_{\text{absorb}}}{\lambda_{\text{absorb}}} = \frac{750 \cdot 10^{-9} \text{ nm} - 121,6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}}{121,6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}} \approx 5,1.$$

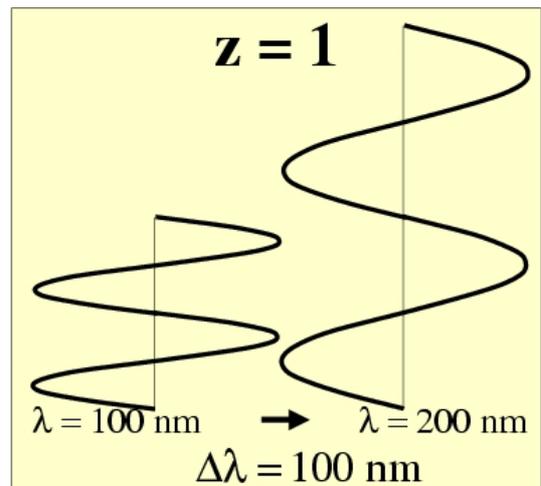
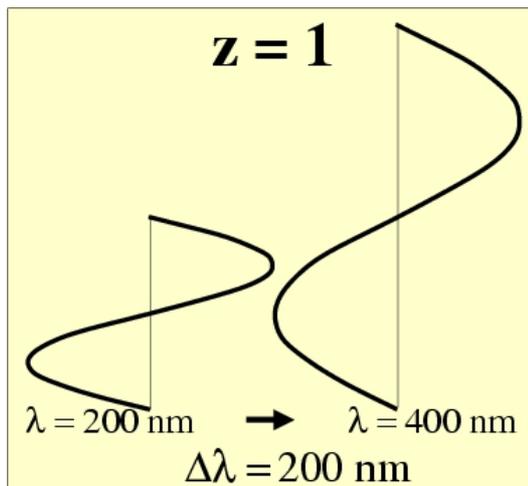
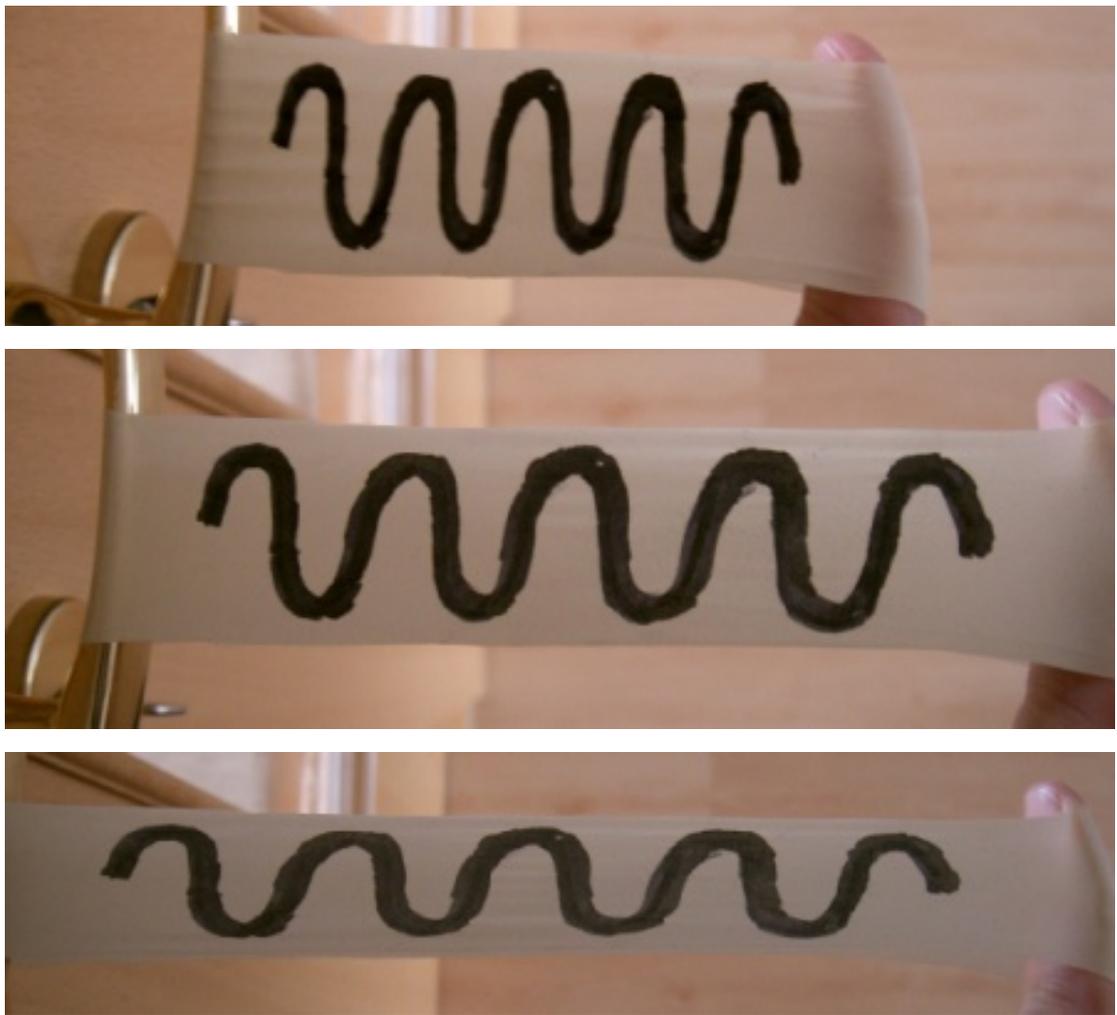


Abbildung 7: Oben: Gummibandmodell zur Veranschaulichung der kosmologischen Rotverschiebung. Das Gummiband repräsentiert den Raum in einer beliebigen Richtung. Die auf das Band gezeichnete Lichtwelle dehnt sich mit dem Raum. Unten: Im Zusammenhang mit der Rotverschiebung des Lichts verschiedener Wellenlängen muss gesagt werden, dass sich diese nicht im gleichen Maße auf das gesamte Spektrum auswirkt. Die Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ ist umso größer, je größer die Wellenlänge λ ist. Das Spektrum wird also nicht als Ganzes einfach nur verschoben (eine mögliche falsche Vorstellung), sondern dabei auch gedehnt. (Bilddatei: [rotverschiebung.jpg](#)). ©: Olaf Fischer.

- Doppler-Effekt im Vergleich zur kosmischen Rotverschiebung***

Während die Dehnung des Gummibandes die Expansion des Universums modelliert und dabei die Rotverschiebung des Lichts bewirkt, entspricht die Verschiebung einer Modellgalaxie entlang des Gummibands der Bewegung im Raum, die zur Rotverschiebung des Lichts durch den Dopplereffekt führt. Es ist empfehlenswert, diesen Unterschied am Gummibandmodell explizit zu zeigen.

Trotzdem kann man die Rotverschiebung z durch die Expansion des Universums im Sinne einer Fluchtgeschwindigkeit v interpretieren (für $v \ll c$: $v = c \cdot z$.) und so über das Hubble-Gesetz auf Entfernungen schließen ($d = v/H_0$).
- Lyman-Alpha-Absorptionslinie im sichtbaren Spektralbereich***

Mit Hilfe eines Gummibandmodells und der in Abb. 8 oben gezeigten Darstellung (Folienbild) kann anschaulich gezeigt werden, warum eine Lyman-Alpha-Absorptionslinie im sichtbaren Spektralbereich erscheinen kann. Dargestellt ist die Konfiguration Beobachter-Wasserstoffwolke-Quasar. Die Entfernung der Objekte wächst in drei Zeitschritten im Zuge der Expansion des Kosmos. Die Wellenlänge der Lyman-Alpha-Absorption ist in jeder Wolke anschaulich gemacht.

Das Folienbild wird an die Wand projiziert. Ausbreitung und Rotverschiebung der Quasarstrahlung werden mit dem Gummibandmodell an der entsprechenden Stelle vor dem Projektionsbild veranschaulicht. Drei auf das breite Gummiband gezeichnete Wellenlinien mit verschiedenen Wellenlängen stehen stellvertretend für das gesamte Quasarspektrum.

Der unterste Wellenzug auf dem Band soll die Lyman-Alpha-Emission des Quasars darstellen. Bei Ausstrahlung bleibt das Gummiband ungedehnt (1. Zeitpunkt). Angekommen bei der Wasserstoffwolke (2. Zeitpunkt) ist die Strahlung rotverschoben, was durch Dehnung des Gummibandes modelliert wird. Der mittlere Wellenzug auf dem Band hat dadurch die absorptionsfähige Wellenlänge erreicht. Auf dem Weg zum Beobachter wird die Strahlung weiter rotverschoben (das Gummiband wird weiter gedehnt), so dass die durch Absorption entstandene Lücke im Spektrum beim Beobachter weiter in Richtung zum sichtbaren Spektralbereich verschoben erscheint (3. Zeitpunkt).

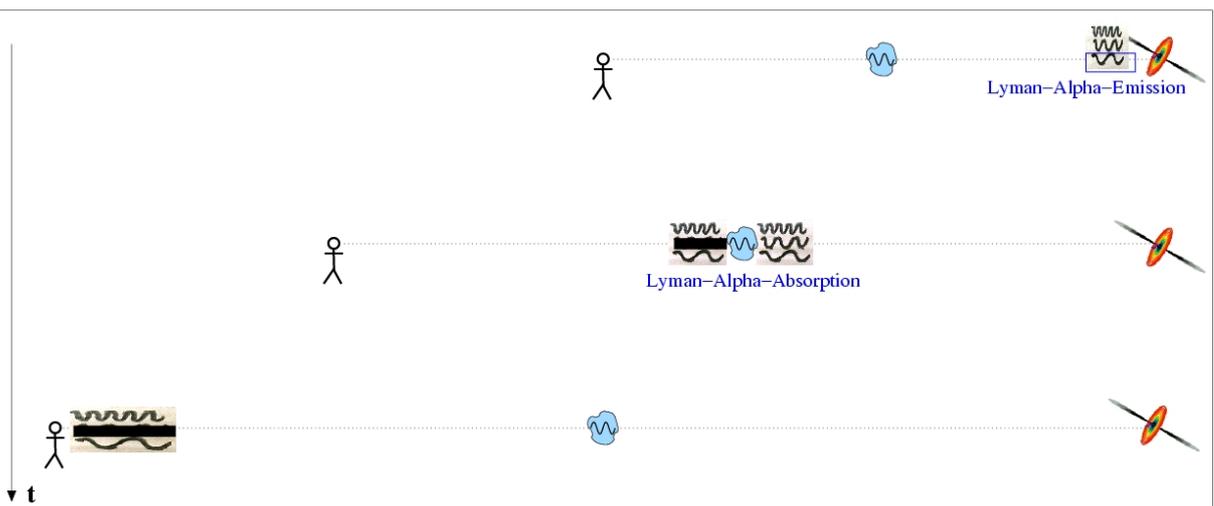
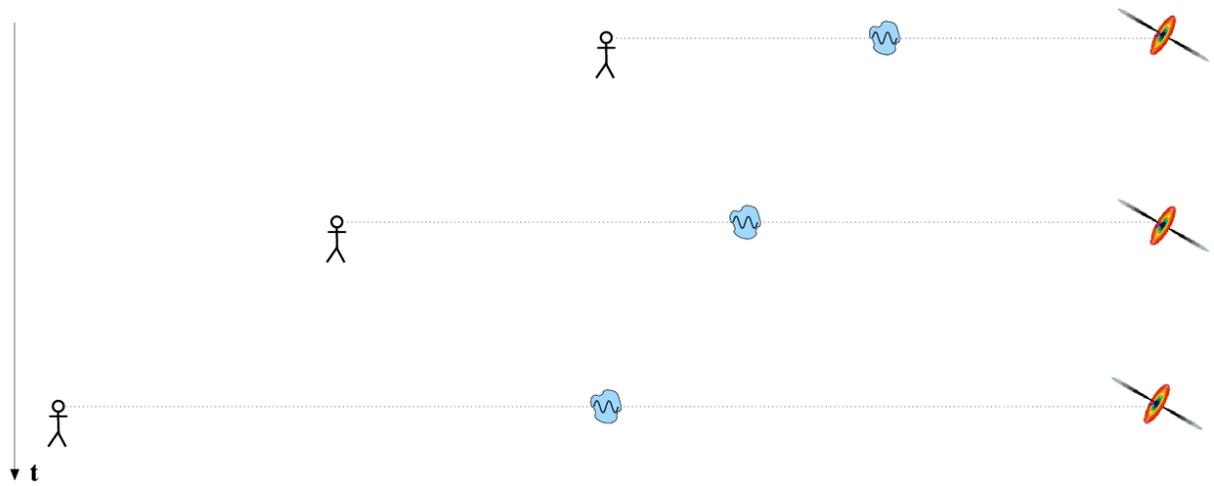


Abbildung 8: Oben: Folienvorlage zur Veranschaulichung, warum eine Lyman-Alpha-Absorptionslinie im sichtbaren Spektralbereich erscheinen kann (Bilddatei: **folie.jpg**). Unten: Das Gummibandmodell wird aktiv vor dem Projektionsbild der Folie angewendet. ©: Olaf Fischer.