

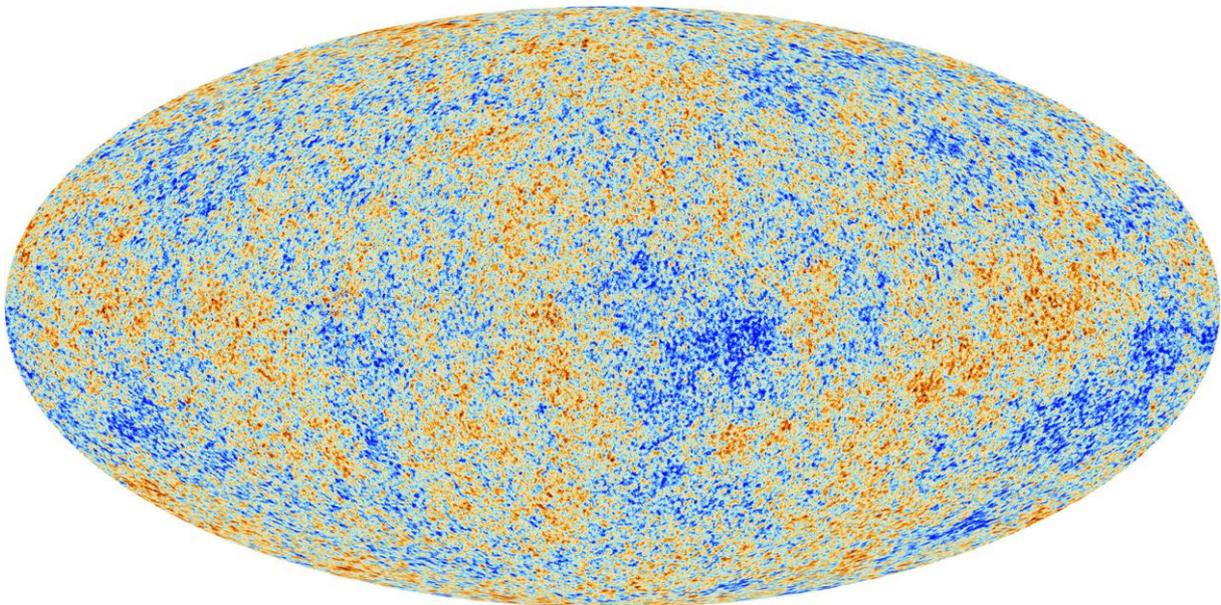
## Vom Anfang bis zum Ende – die Entwicklung des Kosmos

In Bezug zum SuW-Beitrag „Wie dunkel ist das Weltall?“ aus der Rubrik: „Blick in die Forschung: Nachrichten“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 12/2024, WIS-ID: 1571260, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe

Andreas Jørgensen

Warum wird es nachts dunkel, und woher wissen wir eigentlich, dass es den Urknall gab? Um diese und ähnliche Fragen zu beantworten, tauche mit diesem WIS-Beitrag in die Kosmologie ein und lerne mehr über die kosmische Mikrowellenstrahlung, den Urknall und wie das Ende des Kosmos aussehen könnte.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kosmologie	<a href="#">Olbersches Paradoxon</a> , <a href="#">kosmologisches Prinzip</a> , <a href="#">Hubble-Gesetz</a> , <a href="#">Urknall</a> , <a href="#">kosmische Mikrowellenstrahlung</a> , <a href="#">Big Chill</a> , <a href="#">Big Rip</a> , <a href="#">Big Crunch</a>
Physik	Wellenlehre, Quantenmechanik	<a href="#">Photonen</a> , <a href="#">Wellenlänge</a> , <a href="#">Energie</a> , <a href="#">Wiensches Verschiebungsgesetz</a>
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Mathematik	Größen und Einheiten
Lehre allgemein	Kompetenzen (Fachwissen, Erkenntnis- gewinnung, Kommunika- tion)  Lehr-/ Sozialformen Unterrichtsmittel	<a href="#">Nachvollziehen des Olberschen Paradoxons und des kosmologischen Prinzips</a> , <a href="#">Gewinnung eines Überblickswissens zu den verschiedenen Vorhersagen der kosmischen Entwicklung</a> , <a href="#">Abschätzungen zum Einfluss verschiedener Parameter auf die kosmische Entwicklung</a>  Recherche, Projektarbeit, Einzelarbeit, Partner- und Gruppenarbeit, Plenum, Diskussionsaufgaben, Ergebnisse beurteilen



**Abbildung 1:** Die Abbildung zeigt den kosmischen Mikrowellenhimmel, der wie ein Körper mit einer Temperatur von im Mittel 2,7 K strahlt. Die farblich kodierten Abweichungen verdeutlichen Temperaturabweichungen von nur bis zu wenigen hundert Mikrokkelvin. Die Abweichungen in der Mikrowellenstrahlung deuten auf Ungleichmäßigkeiten in der Massenverteilung im frühen Universum. Diesen Ungleichmäßigkeiten haben wir die Strukturbildung zu verdanken.

©: ESA and the Planck Collaboration; CMB; [ESA Standard License](#).

## Wieso wird es nachts dunkel?

Stell dir vor, dass du dich nachts draußen in der Wildnis befindest und den Sternenhimmel beobachtest. Über dir siehst du das Band der Milchstraße sowie eine große Anzahl leuchtender Punkte, die relativ gleichmäßig verteilt erscheinen. Dazwischen ist Schwärze. Schon anhand dieser wenigen Beobachtungen lassen sich interessante Schlüsse ziehen.

Stellen wir hierfür ein Gedankenexperiment an, indem wir annehmen, dass das Universum unendlich groß ist. Des Weiteren nehmen wir an, dass die Sterne wirklich gleichmäßig verteilt sind. Falls diese Annahmen zutreffen, müsstest du in jede Richtung durch das Universum reisen können und würdest direkt auf die Oberfläche eines Sterns zusteuern. Gäbe es eine Richtung, in der du auf keinen Stern treffen würdest, wären nicht alle Richtungen gleich und die Sterne wären somit ziemlich ungleichmäßig verteilt. Nehmen wir nun weiterhin an, dass das Universum unendlich alt und unveränderlich ist, daher dass es immer Sterne gab. Wenn diese Annahmen stimmen, hätte das Licht von Sternen, die unendlich weit entfernt sind, Zeit genug gehabt, um zu uns zu reisen. Wenn also in jeder Richtung ein Stern liegt, und das Licht eines jeden Sterns Zeit genug hat, um uns zu erreichen, wieso ist zwischen den leuchtenden Punkten am Nachthimmel dann Schwärze? Müsste die Nacht nicht von Sternen aus jeder Richtung hell erleuchtet sein? Dies ist das Olberssche Paradoxon.

Die Lösung des Paradoxons muss sein, dass eine oder mehrere unserer Annahmen falsch sind. Daraus folgt, dass das Universum nicht unendlich groß ist, es nicht unendlich alt ist, es nicht unveränderlich ist, und/oder die Sterne nicht gleichmäßig verteilt sind. Heute wissen wir, dass das Universum einen Anfang hatte und eine 13,7 Milliarden Jahre lange Entwicklungsgeschichte vorzuweisen hat. In den folgenden Abschnitten werden näher darauf eingegangen, wie wir zu diesem Schluss kommen können.

## Expansion

Aus Beobachtungen kann man schließen, dass ferne Galaxien sich stetig weiter von uns wegbewegen. Im Unterricht seid ihr in diesem Zusammenhang vielleicht schon auf das Hubblesche Gesetz gestoßen, das besagt, dass die Geschwindigkeit ( $v$ ) mit der sich ein weit entferntes Objekt von uns wegbewegt proportional zu dessen Abstand ( $D$ ) zu uns ist:

$$v = H_0 D$$

Hier bezeichnet  $H_0$  die Hubble-Konstante. Basierend auf dieser Beobachtung gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder befinden wir uns zufälligerweise an einem ganz besonderen Punkt im Universum, oder ein Beobachter würde von jedem Punkt im Universum das Hubblesche Gesetz bestätigt finden. Die letztere Erklärung scheint am wahrscheinlichsten, woraus folgt, dass der Kosmos sich in jede Richtung ausdehnt (siehe auch Übungsaufgabe 1). Anhand von neueren Beobachtungen an Supernovae, die 2011 zum Nobelpreis führten, wissen wir, dass diese Expansion sich sogar immer weiter beschleunigt: Die Galaxien streben immer schneller auseinander.

Galaxien ziehen sich durch die Schwerkraft gegenseitig an, was der Expansion entgegenwirkt (Wieso?). Wie kann es also sein, dass die Expansion sich beschleunigt, statt sich zu verlangsamen? Es muss irgendwas geben, dass die Galaxien immer weiter auseinander treibt. Um dieses Phänomen zu erklären, haben Astrophysiker die Dunkle Energie postuliert (siehe auch Übungsaufgaben 2 und 3).

## Restwärme vom Urknall

Wenn sich der Kosmos wie oben festgestellt immer weiter ausdehnt, heißt das im Umkehrschluss, dass die Galaxien in der Vergangenheit näher beieinander lagen. Früher muss also die gesamte Energie des beobachtbaren Universums auf einen kleineren Raum konzentriert gewesen sein. Am Anfang war die Energiedichte des Universums somit sehr hoch, aber durch die fortwährende Expansion des Universums kühlte es sich so weit ab, dass sich die ersten Sterne bilden konnten. Das klingt zwar sehr überzeugend, aber woher wissen wir, dass es sich auch wirklich so abgespielt hat?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir zuerst auf einige Fakten aus der Thermodynamik zu sprechen kommen. Wenn die Dichte und Energiedichte sehr hoch ist, gehen Atome keine chemischen Verbindungen ein. Mehr noch, die Elektronen sind nicht am Kern gebunden. In einem solchen Plasma können Lichtteilchen nicht weit reisen bevor sie auf elektrische Ladungen treffen und mit ihnen wechselwirken. Diese ständigen Wechselwirkungen bedeuten, dass die Lichtteilchen die Temperatur des Plasmas widerspiegeln. Es stellt sich mit anderen Worten ein Gleichgewicht ein.

Nimmt die Temperatur und Dichte des Plasmas durch die Expansion des Kosmos nun immer weiter ab, formen die Atomkerne und Elektronen irgendwann Atome. Das passierte, als die Temperatur des Kosmos ungefähr 3.000 K betrug. Während das Plasma für das Licht noch undurchdringbar war, konnten die Lichtteilchen nun plötzlich ungehindert durch den Raum reisen. Als die Materie durch ihre eigene Schwerkraft anfing Sterne und Galaxien zu bilden, lies sie also eine elektromagnetische Strahlung zurück, die zuvor im Gleichgewicht mit der Materie war, aber die von der Strukturbildung unbeeinflusst blieb.

Mit diesem Wissen sind wir nun bereit einen näheren Blick auf die Entwicklungsgeschichte des Universums zu nehmen. Die Urknalltheorie besagt, dass das Universum nach seiner Entstehung eine hohe Energiedichte hatte, diese aber durch die Expansion des Raums abnahm, bis sich die ersten Sterne entwickelten. Wenn diese Entwicklung wirklich so stattgefunden hat, dann müsste doch überall im All noch die elektromagnetische Strahlung zurückgeblieben sein, die kaum mit der Materie Wechselwirkungen hatte, seit die Temperatur des Universums unter 3.000 K fiel. 1964 wurde diese Hintergrundstrahlung, auch kosmische Mikrowellenstrahlung genannt, von Arno Allan Penzias und Robert Woodrow Wilson entdeckt, was die Urknalltheorie bestätigte.

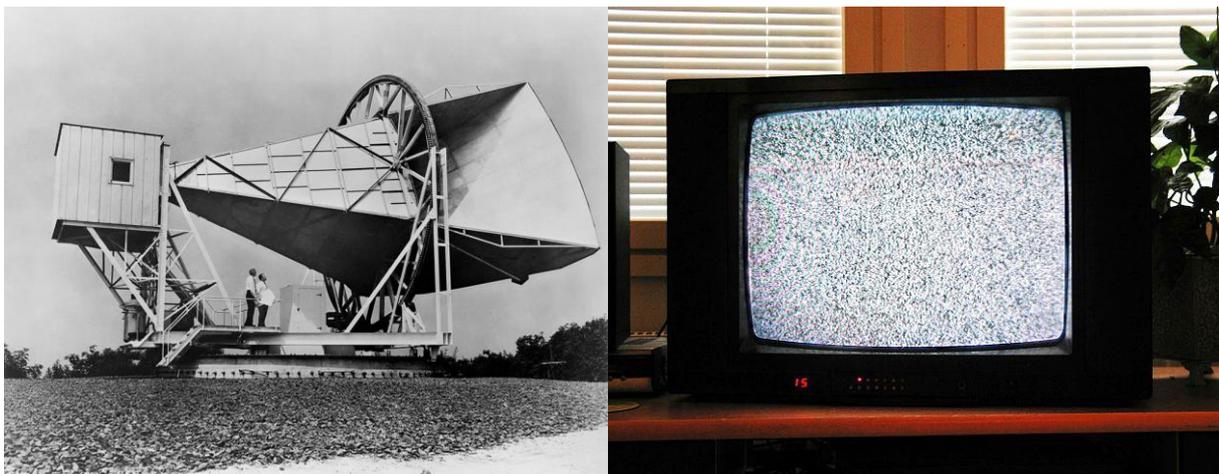


Abbildung 2: Penzias und Wilson arbeiteten in der Radioastronomie an der [Holmdel Horn Antenna](#) der Bell Telephone Laboratories. Dabei stießen sie auf ein Störsignal, dass sie einfach nicht loswerden konnten. Sie versuchten alles, einschließlich einer gründlichen Säuberung des Teleskops, nachdem sie Taubem verjagt hatten, die sich im Teleskop eingenistet hatten. Es half alles nicht. Penzias und Wilson waren, ohne danach zu suchen, auf die komische Mikrowellenstrahlung gestoßen, die von der Urknalltheorie vorgeschagt worden war. Eure Eltern und Großeltern werden sich übrigens noch an die altmodischen [Röhrenfernseher](#) erinnern können. Bei diesen Geräten gab es, wenn es mal überhaupt nichts zu sehen gab, ein weißes Rauchen auf einem schwarzen Hintergrund. Ein Prozent dieses Störsignals stammte von der kosmischen Mikrowellenstrahlung. ©: Wikimedia Commons, C0.

[zurück zum Anfang](#)

Die Hintergrundstrahlung weist aber keine 3 000 K mehr auf. Das liegt daran, dass die Abstände im Universum durch die Ausdehnung des Raums sich immer weiter vergrößert haben. Um diese Aussage zu verstehen, müssen wir kurz auf die Quantenmechanik und die Wellenlehre zurückgreifen: Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen, dessen Wellenlänge ( $\lambda$ ) mit der Energie ( $E$ ) der einzelnen Lichtteilchen zusammenhängt.

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Hier bezeichnen  $h$  und  $c$  die Planck-Konstante beziehungsweise die Lichtgeschwindigkeit. Wenn der Raum sich also ausdehnt, werden die elektromagnetischen Wellen gestreckt, sprich die Wellenlänge vergrößert sich mit der Ausdehnung des Raums. Nun ist die Energie der Lichtteilchen aber wie oben angegeben umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Damit fällt die Energie der einzelnen Lichtteilchen mit der Ausdehnung des Kosmos, und die Temperatur der Strahlung nimmt ab. Heute beträgt die Temperatur der Hintergrundstrahlung deshalb nur 2,7 K. Während die Hintergrundstrahlung bei 3.000 K somit im infraroten Bereich lag, ist sie heute im Bereich der Mikrowellenstrahlung (siehe auch Übungsaufgaben 4 und 5). Daher stammt der Name kosmische Mikrowellenstrahlung.

Dabei ist die kosmische Mikrowellenstrahlung übrigens nicht aus jeder Richtung genau 2,7 K. Es gibt kleine Abweichung (siehe Abbildung 1 auf der Titelseite). Diese Ungleichheiten in der Mikrowellenstrahlung gingen im frühen Universum mit Ungleichheiten in der Massenverteilung einher, die die Ausgangsbedingungen dafür bildeten, dass die Schwerkraft zum Kollaps verschiedener Regionen führte, was wiederum zur Bildung von Sternen und Galaxien hervorrief.

Die Hintergrundstrahlung liefert somit auch einen Blick aufs Universum, als es noch ganz am Anfang stand. In der Tat, da Licht Zeit braucht, um uns von einem fernen Himmelskörper zu erreichen, sind alle Erscheinungen am Nachthimmel Bilder aus der Vergangenheit. Je weiter entfernt ein Objekt ist, desto älter ist das Bild, das uns erreicht. Astrophysiker\*innen können also direkt die Entwicklungsgeschichte des Universums und nicht nur eine Momentaufnahme beobachten.

## Wie geht die Geschichte aus?

Heute können Physiker\*innen detaillierte Angaben über die bisherige Entwicklungsgeschichte des Kosmos machen. Können sie auch Aussagen über die Zukunft machen?

Früher war die gängige Theorie, dass die Schwerkraft der Expansion des Universums entgegenwirken würde. Irgendwann würde die Expansion deshalb zum Halten kommen und der Kosmos würde sich wieder zusammenziehen. Die Dichte und Energiedichte würden wieder anwachsen, bis das Universum an seine Ausgangsbedingungen angelangt sein würde. Dieses Szenario bezeichnete man als Big Crunch als Anspielung auf die englische Bezeichnung für den Urknall (Big Bang). Vielleicht würde das Universum sich danach wieder ausdehnen und wäre somit in einem ewigen Zyklus der Zerstörung und Neuerschaffung. Man spricht bei diesem Szenario vom Big Bounce.

Heute wissen wir aber aus neueren Beobachtungen, dass das Universum sich immer schneller ausdehnt, was die oben beschriebenen Szenarien als unwahrscheinlich erscheinen lässt. Wenn die Beschleunigung immer weiter zunimmt, beschleunigt das Universum seine Expansion vielleicht sogar so weit, dass die Raumzeit an sich irgendwann auseinandergerissen wird. Man spricht in diesem Falle vom Big Rip oder dem Endknall (siehe auch Übungsaufgaben 7 und 8).

[zurück zum Anfang](#)

Es könnte aber auch gut sein, dass es zu keinem solchen jähen Ende der Raumzeit kommt. Stattdessen bewegen sich die Galaxien einfach immer weiter auseinander. Man spricht vom Big Chill oder Big Freeze. Um dieses Szenario besser zu verstehen, schauen wir uns wieder das Hubblesche Gesetz an. Da sich die Galaxien auseinander bewegen, wächst mit oder ohne Beschleunigung der Abstand zwischen den Galaxien. Anhand des Hubbleschen Gesetzes folgt daraus, dass die relative Geschwindigkeit ( $v$ ) immer weiter anwächst. Wenn eine weit entfernte Galaxie sich nun aber relativ zu uns mit einer Geschwindigkeit entfernt, die die Lichtgeschwindigkeit übersteigt, heißt das, dass uns das Licht aus dieser Galaxie nicht mehr erreichen kann. Aus dem Hubble-Gesetz folgt also, dass am Nachthimmel immer weniger Galaxien zu sehen sein werden, bis es keine weit entfernten Galaxien mehr zu sehen gibt. Ein Beobachter wird nur noch nahe Objekte, sowie die Sterne in der eigenen Galaxis, sehen. Auch die Temperatur der kosmische Mikrowellenstrahlung wird irgendwann so gering sein, dass Messungen der Hintergrundstrahlung schwer zu machen sein werden. Ein Beobachter würde zwar in einem Universum leben, das immer weiter abkühlt, aber er wird keine Möglichkeit haben, auf das Hubblesche Gesetz oder auf den Urknall zu schließen. Ein solcher Beobachter würde also nichts vom Big Chill wissen. Er würde nachts zum Sternenhimmel blicken und auf die Frage, warum es nachts dunkel wird, antworten, dass es scheinbar abgesehen von seiner Galaxis wenig andere Objekte gibt, die den Himmel erleuchten könnten, und er hätte keinen Grund, anzuzweifeln, dass das Universum unveränderlich ist.

## Literatur und Quellen

Für weitere Informationen zu empfehlen sind:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery\\_of\\_cosmic\\_microwave\\_background\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Universum#Ende>
- <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/press-release/>

## Übungsaufgaben

1. Es erscheint unwahrscheinlich, dass wir uns an einem besonderen Ort befinden, an dem es zufälligerweise so aussieht, als würde das Universum sich ausdehnen. Diese Aussage knüpft sich an das kosmologische Prinzip. Erklärt, was es damit auf sich hat.
2. Im WIS-Beitrag sind wir auf Strahlung, Materie und die sogenannte Dunkle Energie zu sprechen gekommen. Es gibt aber noch die sogenannte Dunkle Materie. Recherchiert, um herauszufinden, was es damit auf sich hat. Setzt euch in diesem Zusammenhang mit der Arbeit von Vera Rubin auseinander. Welche Entdeckung hat diese Wissenschaftlerin über die Rotationskurven von Galaxien gemacht?
3. Es gibt also neben der Materie, die alle Planeten und Sterne bildet, auch noch Dunkle Energie, die zur beschleunigten Expansion des Universums führt, und Dunkle Materie (siehe Übungsaufgabe 2). Wie hoch ist der Anteil jeder dieser Komponenten zur Energiedichte im Universum? Erstellt ein Tortendiagramm, um das Verhältnis dieser Anteile zu veranschaulichen.
4. Das Spektrum der kosmischen Mikrowellenstrahlung entspricht dem eines planckschen Strahlers, auch Schwarzer Körper oder Schwarzer Strahler genannt.

a) Recherchiert, um herauszufinden, was ein planckscher Strahler ist.

b) Ein planckscher Strahler emittiert elektromagnetische Strahlung mit verschiedenen Wellenlängen ( $\lambda$ ). Die Wellenlänge ( $\lambda_{\max}$ ) der Strahlung mit der höchsten Intensität ist umgekehrt proportional zur Temperatur ( $T$ ) des planckschen Strahlers. Man bezeichnet dies als Wiensches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m/K}}{T}$$

Berechnet für eine Temperatur von 3 000 K anhand des Wienschen Verschiebungsgesetzes die Wellenlängen, bei der die Intensität maximal ist (passt bei den Einheiten auf). Wie viel Energie hat ein einzelnes Lichtteilchen (Photon)? Wo im elektromagnetischen Spektrum befindet sich dieses Licht?

5. Wiederholt Aufgabe 4b für einen planckschen Strahler mit einer Temperatur von 2,7 K.
6. Sieht man von verschiedenen Absorptions- und Emissionslinien ab, ist ein planckscher Strahler (siehe Übungsaufgaben 4 und 5) auch eine gute Annäherung an das Spektrum der Sonne. Die Oberflächentemperatur der Sonne entspricht 5 772 K. Berechnet die Wellenlänge, bei der die Intensität bei der Sonne maximal ist. Die berechnete Wellenlänge liegt im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Welche Farbe entspricht diese Wellenlänge?

[zurück zum Anfang](#)

7. Nehmen wir an, dass es zum „Endknall“ kommt (Big Rip). Die Zeit, die bis zu diesem Ereignis bleiben würde, kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden ([https://de.wikipedia.org/wiki/Big\\_Rip](https://de.wikipedia.org/wiki/Big_Rip)):

$$t_{\text{rip}} \approx \frac{2}{3 \cdot |1 + w| \cdot H_0 \cdot \sqrt{1 - \Omega_m}}$$

Hier bezeichnet  $t_{\text{rip}}$  die Zeit, die vergeht bis der Endknall stattfinden würde relativ zu heute.  $\Omega_m$  bezeichnet die gegenwärtige Materiedichte, einschließlich der Dunklen Materie (siehe Übungsaufgaben 2 und 3).  $H_0$  ist die Hubble-Konstante, und  $w$  beschreibt die Dunkle Energie. Berechnet  $t_{\text{rip}}$ . Setzt hierfür  $H_0$  gleich 68 km/s/Mpc und  $\Omega_m$  gleich 0,3. Nehmt für diese Aufgabe an, dass der Wert von  $w$  -1,3 entspricht.

8. Abgesehen von der Annahme, dass  $w$  gleich -1,3 ist, stimmen die Werte, die in Aufgabe 7 benutzt wurden, mit Beobachtungen überein. Beobachtungen deuten darauf hin, dass  $w$  eher einem Wert um -1 entspricht. Was würde mit  $t_{\text{rip}}$  passieren, wenn wir für  $w$  einen Wert sehr nahe an -1 einsetzen würden? Was heißt das für das Schicksal des Universums?
9. Im WIS-Beitrag werden Messungen an Supernovae genannt, anhand dessen Astrophysiker\*innen auf die beschleunigte Expansion des Universums schließen konnten. Um mehr über Supernovae in Erfahrung zu bringen, tauche mit WIS tiefer ins Thema ein:  
<https://www.spektrum.de/alias/material/supernovae-grosses-finale-und-neuanfang/2191491>
10. Im WIS-Beitrag wurden viele Details der Geschichte des Universums übersprungen. Recherchiert daher zu Themen, auf die wir nicht zu sprechen gekommen sind: Die kosmologische Inflation, die primordiale Nukleosynthese, und die großräumige Struktur des Kosmos.

## Lösungen zu den Übungsaufgaben

- Zu 1.** Das kosmologische Prinzip besagt, dass das Universum homogen und isotrop ist ([https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmologisches\\_Prinzip](https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmologisches_Prinzip)).
- Zu 2.** Bei der Dunklen Materie handelt es sich um eine postulierte Art der Materie, die durch die Schwerkraft mit normaler Materie wechselwirkt. So beobachtete Vera Rubin (nach der das [Vera C. Rubin Observatory](#) benannt wurde), dass die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne in den äußeren Bereichen von Spiralgalaxien konstant bleibt, obwohl die sichtbare Materie auf das Zentrum der Galaxien konzentriert ist. Diese Beobachtung ist nur dann mit den Keplerschen Gesetzen vereinbar, wenn ein Großteil der Masse der Dunklen Materie zugeschrieben wird. Ähnlich verhält es sich mit den Bewegungen von Galaxien in Galaxienhaufen: Fritz Zwicky zeigte in den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts, dass man die Bewegungen der Galaxien nur dadurch erklären kann, dass der Großteil der Masse in den Galaxienhaufen nicht beobachtet worden war und prägte den Begriff „Dunkle Materie“.
- Zu 3.** Rund 5 Prozent der gesamten Energiedichte des Universums lassen sich heute auf Materie zurückführen. Rund 25 Prozent werden von der Dunklen Materie ausgemacht, während der Anteil der dunklen Energie rund 70 Prozent ausmacht. Somit dominiert die Dunkle Energie heute die Entwicklung des Kosmos. Hierzu muss man anmerken, dass der Anteil der Dunklen Energie mit der Expansion des Universums stetig anwächst. Mit anderen Worten war das früher anders. Es gab eine Zeit, da dominierte der Anteil der Strahlung, und eine Zeit, da dominierte der Anteil der Materie und Dunklen Materie die Entwicklung des Universums.
- Zu 4.** a) [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer\\_K%C3%B6rper](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper)  
b) Die Wellenlänge beträgt 966 nm. Dieses Licht befindet sich im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums.
- Zu 5.** Die Wellenlänge beträgt 1,07 m. Es handelt sich also um Radiowellen/Mikrowellen.

[zurück zum Anfang](#)

**Zu 6.** Die Wellenlänge beträgt 502 nm. Die Farbe ist somit grün. Man könnte sich nun übrigens die Frage stellen, warum Pflanzen eigentlich grün sind. Dass sie grün sind, heißt ja, dass sie zwar andere Wellenlängen absorbieren, aber das grüne Licht reflektieren. Wenn aber die Intensität des grünen Lichts höher ist als die aller anderen Wellenlängen, entgeht den Pflanzen der energiereichste Teil des Sonnenlichts. Warum sind die Blätter der Pflanzen also nicht etwa Schwarz oder sonst eine Farbe? Wieso grün? Wissenschaftler\*innen haben erst vor kurzem eine Antwort auf diese Frage gefunden: Pflanzen legen Wert auf eine stabile Energiezufuhr, d.h. sie wollen plötzliche Variationen vermeiden, z. B. als Folge von Schatten, weshalb sie nicht auf grünes Licht, sondern auf rotes und blaues Licht zurückgreifen.

Für mehr Details siehe: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba6630>.

**Zu 7.** 37 Milliarden Jahre.

**Zu 8.**  $t_{\text{rip}}$  divergiert. Der Endknall rückt immer weiter in die Zukunft, je näher der Wert von  $w$  sich an  $-1$  annähert. Ist  $w$  also wirklich  $-1$  (bei der Dunklen Energie handelt es sich um eine kosmische Konstante), wird es keinen Endknall geben. Stattdessen sieht es nach einem Big Chill aus.

**Zu 9.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein. Besonderen Fokus sollten die Schüler hierbei auf die Supernovae als Standardkerze legen.

**Zu 10.** Diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten und Präsentationen ein. Bei der Inflation handelt es sich um eine Phase, in der das Universum sehr schnell expandierte. Bei der primordialen Nukleosynthese handelt es sich um die Bildung verschiedener Elemente am Anfang des Universums.

Um auch auf die Nukleosynthese, die später im Inneren der Sterne stattfand und stattfindet, einzugehen, siehe beispielsweise

[https://astro.uni-bonn.de/~nlangner/siu\\_web/nucscript/Nucleo.pdf](https://astro.uni-bonn.de/~nlangner/siu_web/nucscript/Nucleo.pdf)

Sollten die Schüler sich mit der großräumigen Struktur des Universums beschäftigen wollen, sind beispielsweise Videos der Millenniums-Simulationen zu empfehlen:

<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>