minærva

AS 10

SKRIPT

Galaxien und Kosmos

Erklärskript

Die Aufgaben 312–345 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Astronomie – Klasse 7 bis Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe AS · Astronomie (Klasse 7 bis Kursstufe)

AS1 Himmel	**AS2** Erde und Mond	**AS3** Sonnensystem	**AS4** Sonne	**AS5** Himmelsmechanik
AS6 Licht aus dem All	**AS7** Planeten und Leben	**AS8** Sterne	**AS9** Sternentwicklung	**AS10** Kosmos

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Astronomie: zehn Themenskripte AS1–AS10 von Klasse 7 bis zur Kursstufe mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan der Stoff stammt (Physik, IMP, Basisfach Astrophysik, Wahlfach Astronomie) oder ob er Zusatz ist.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht **4**
1 Der Aufbau des Universums im Überblick **5**
1.1 Vom Stern zum kosmischen Netz 5
1.2 Sternhaufen und interstellare Materie 6
1.3 Entfernungen und der Blick zurück 6
2 Die Milchstraße **8**
2.1 Das Band am Himmel 8
2.2 Aufbau der Milchstraße 8
2.3 Die Bahn der Sonne und die Masse der Milchstraße 9
2.4 Rotationskurve und Dunkle Materie 10
2.5 Sagittarius A*: das Schwarze Loch im Zentrum 11
3 Galaxien **13**
3.1 Welteninseln 13
3.2 Galaxientypen nach Hubble 13
3.3 Entfernungen von Galaxien: die Entfernungsleiter 14
3.4 Entstehung und Entwicklung 15
3.5 Aktive Galaxienkerne 15
4 Galaxienhaufen, Filamente und Voids **17**
4.1 Die Lokale Gruppe 17
4.2 Galaxienhaufen 17
4.3 Superhaufen, Filamente und Voids 18
5 Hubble-Relation und Expansion **19**
5.1 Die Rotverschiebung der Galaxien 19
5.2 Das Hubble-Diagramm 19
5.3 Expansion des Raums 20
5.4 Hubble-Zeit und Weltalter 22
6 Urknall und Entwicklung des Universums **23**
6.1 Vom statischen zum dynamischen Universum 23
6.2 Die ersten Minuten: Entstehung der Elemente 23
6.3 Die kosmische Hintergrundstrahlung 24
6.4 Von den ersten Sternen bis heute 24
6.5 Beschleunigte Expansion und Dunkle Energie 25

Worum es geht

In einer klaren Sommernacht fern der Stadtlichter zieht sich ein blasses, fleckiges Lichtband quer über den Himmel: die Milchstraße. Schon ein Fernglas zeigt, dass sie aus unzähligen schwachen Sternen besteht. Wir sehen unsere eigene Galaxie von innen – eine flache Scheibe aus einigen hundert Milliarden Sternen, in der die Sonne ein ganz gewöhnlicher Stern am Rand eines Spiralarms ist. Im Herbst findet man hoch im Osten einen kleinen Nebelfleck im Sternbild Andromeda. Sein Licht war zweieinhalb Millionen Jahre unterwegs; es stammt von einer zweiten, noch größeren Galaxie.

Erst seit gut hundert Jahren weiß man, dass es solche Galaxien gibt, und erst seit knapp hundert Jahren, dass sie sich voneinander entfernen: Das Universum dehnt sich aus. Wer diese Bewegung in Gedanken rückwärts laufen lässt, kommt zu einem heißen, dichten Anfangszustand vor 13,8 Milliarden Jahren, dem Urknall. Dieses Skript folgt dem Weg von der Milchstraße zum Universum als Ganzem: Kapitel 1 gibt einen Überblick über die Bausteine des Universums, Kapitel 2 stellt die Milchstraße vor, ihre rätselhafte Rotation und das Schwarze Loch in ihrem Zentrum. Kapitel 3 handelt von den anderen Galaxien und davon, wie man ihre Entfernungen misst, Kapitel 4 von den noch größeren Strukturen. Kapitel 5 zeigt, wie man die Expansion des Universums entdeckt hat, und Kapitel 6, was das kosmologische Standardmodell über seine Geschichte sagt.

Gebraucht werden das Entfernungsmodul und die Cepheiden aus dem Skript AS8, das dritte Keplersche Gesetz aus AS5 und der Doppler-Effekt aus AS6; das Nötige wird an Ort und Stelle kurz wiederholt.

Galaxien und Kosmos im Lehrplan. Stufe: Klasse 10 und Kursstufe. Welcher Plan welchen Abschnitt verlangt, sagen die Marken unter den Überschriften. In IMP 10 kommen die Masse von Sagittarius A* und die Rotationskurven vor (Kapitel 2); vollständig ist das Skript Stoff des Wahlfachs Astronomie (3.1.4 „Struktur des Universums“) und des Physik-Basisfachs mit Schwerpunkt Astrophysik (Kosmologie).

Quellen-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, aus welchem Bildungsplan Baden-Württembergs der Stoff stammt: Physik 7/8 | IMP 8 | IMP 9 | IMP 10 für die Mittelstufe (Physik und Profilfach IMP), Basisfach Astrophysik | Wahlfach Astronomie für die Kursstufe (Physik-Basisfach mit Schwerpunkt Astrophysik, Wahlfach Astronomie). Zusatz heißt: Der Abschnitt steht in keinem dieser Pläne, gehört aber in anderen Ländern zum Pflichtstoff Astronomie (Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen) und ist hier Bonus.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit Verweisen auf passende Übungen in **noctua** und Stationen in **fabrica**. Fachbegriffe sind beim ersten Auftreten **fett** gesetzt und am Ende jedes Kapitels in einem Kasten zusammengefasst.

1 Der Aufbau des Universums im Überblick

1.1 Vom Stern zum kosmischen Netz

Wahlfach Astronomie

Das Universum ist nicht gleichmäßig mit Sternen gefüllt. Seine Materie ist in Stufen geordnet, und jede Stufe ist in die nächstgrößere eingebettet – ähnlich wie Häuser in Städten, Städte in Ländern und Länder in Kontinenten. Man spricht vom **hierarchischen Aufbau** des Universums.

- **Sterne** sind die Grundbausteine; viele haben Planeten (Skripte AS7 bis AS9). Zwischen den Sternen liegt die **interstellare Materie**: sehr dünnes Gas und Staub.
- Sterne entstehen in Gruppen und bilden **Sternhaufen** mit Dutzenden bis Millionen Mitgliedern.
- Sterne, Sternhaufen und interstellare Materie bilden zusammen mit viel unsichtbarer Dunkler Materie eine **Galaxie**, ein durch die Schwerkraft zusammengehaltenes System aus Millionen bis Billionen Sternen. Unsere Galaxie ist die **Milchstraße**.
- Galaxien kommen selten allein vor. Kleine Gruppen wie unsere **Lokale Gruppe** enthalten einige Dutzend Galaxien, **Galaxienhaufen** Hunderte bis Tausende.
- Haufen und Gruppen reihen sich entlang langer Fäden und Wände auf, den **Filamenten**. Dazwischen liegen riesige, fast leere Blasen, die **Voids**. Zusammen ergibt das ein schwammartiges **kosmisches Netz**, die größte Struktur im Universum.

Stufe	Beispiel	Durchmesser	Inhalt
Planetensystem	Sonnensystem	Neptunbahn 60 AE	ein Stern, Planeten, Kleinkörper
Sternhaufen	Plejaden, M13	einige pc bis rund 100 pc	Dutzende bis Millionen Sterne
Galaxie	Milchstraße	rund 30 kpc (100 000 Lj)	einige hundert Milliarden Sterne, Gas, Staub, Dunkle Materie
Galaxiengruppe	Lokale Gruppe	rund 3 Mpc (10 Mio. Lj)	über 50 Galaxien, meist Zwerggalaxien
Galaxienhaufen	Virgo-Haufen	einige Mpc	Hunderte bis Tausende Galaxien, heißes Gas
Superhaufen, Filament	Laniakea	rund 160 Mpc (500 Mio. Lj)	Zehntausende Galaxien
Void	Bootes-Void	etwa 10 bis 100 Mpc	fast keine Galaxien
beobachtbares Universum	–	Radius rund 14 Gpc	einige hundert Milliarden Galaxien (Schätzung)

Tabelle 47: Die Stufen des hierarchischen Aufbaus (typische, gerundete Größen).

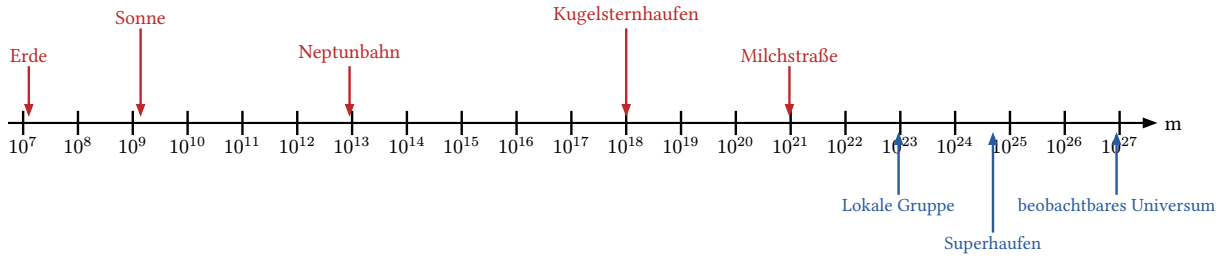


Abbildung 142: Durchmesser von der Erde bis zum beobachtbaren Universum auf einer logarithmischen Skala: Jeder Teilstrich bedeutet „zehnmal so groß“.

Bemerkenswert ist, wie unterschiedlich „voll“ die Stufen sind. Der nächste Stern ist rund dreißig Millionen Sonnendurchmesser von der Sonne entfernt; zwei Sterne stoßen praktisch nie zusammen. Galaxien dagegen sind meist nur einige Dutzend Galaxiendurchmesser voneinander entfernt: Die Andromedagalaxie ist nur 25 Milchstraßendurchmesser weit weg. Galaxien begegnen einander deshalb häufig und verschmelzen sogar (Kapitel 3).

1.2 Sternhaufen und interstellare Materie

Wahlfach Astronomie

Die **interstellare Materie** macht in der Scheibe der Milchstraße etwa ein Zehntel der sichtbaren Masse aus. Sie besteht zu rund 99 % aus Gas (vor allem Wasserstoff und Helium) und zu 1 % aus feinem Staub. Wo das Gas dicht und kalt ist, in den Molekülwolken, entstehen neue Sterne (Skript AS9); junge, heiße Sterne bringen das Gas in ihrer Umgebung zum Leuchten, wie im Orionnebel. Der Staub schluckt das Licht der Sterne dahinter. Deshalb erscheint das Band der Milchstraße fleckig, und deshalb kann man ihr Zentrum im sichtbaren Licht nicht sehen.

Sterne entstehen nie einzeln, sondern zu vielen in einer Molekülwolke. Die so entstandenen Gruppen heißen **Sternhaufen**. Man unterscheidet zwei Sorten, die sich in fast allem unterscheiden (Tabelle 48). Wie man aus dem Hertzsprung-Russell-Diagramm eines Sternhaufens sein Alter abliest, zeigt das Skript AS9: Je älter ein Haufen, desto weiter ist die Hauptreihe von oben her „abgebrannt“, weil die schweren, heißen Sterne zuerst sterben.

	offener Sternhaufen	**Kugelsternhaufen**
Zahl der Sterne	einige Dutzend bis einige Tausend	Hunderttausende bis Millionen
Form	locker, unregelmäßig	kugelförmig, zur Mitte hin sehr dicht
Ort in der Milchstraße	in der Scheibe, oft in Spiralarmen	im Halo und im Bulge
Alter	jung: Millionen bis wenige Milliarden Jahre	sehr alt: 10 bis 13 Milliarden Jahre
Zusammensetzung	reich an schweren Elementen („Metallen“)	arm an schweren Elementen
Sternfarben, HRD	heiße blaue Sterne noch auf der Hauptreihe	nur kühle, gelbe und rote Sterne auf der Hauptreihe, viele Rote Riesen
Anzahl, Beispiele	Tausende bekannt; Plejaden, Hyaden	rund 150 bekannt; M13 im Herkules, Omega Centauri

Tabelle 48: Offene Sternhaufen und Kugelsternhaufen im Vergleich.

Dass die Kugelsternhaufen so arm an schweren Elementen sind, verrät ihr Alter: Sie entstanden, als noch kaum Sterne gelebt und Elemente erbrütet hatten (Skript AS9). Die Plejaden dagegen sind erst etwa 100 Millionen Jahre alt – als sie entstanden, lebten auf der Erde schon die Dinosaurier.

1.3 Entfernungen und der Blick zurück

Wahlfach Astronomie

Für Galaxien und größere Strukturen ist selbst das Parsec (Skript AS8) zu klein. Man verwendet das **Kiloparsec** (1 kpc = 1000 pc) für Abstände innerhalb von Galaxien, das **Megaparsec** (1 Mpc = 10^6 pc) für Abstände zwischen Galaxien und das **Gigaparsec** (1 Gpc = 10^9 pc) für die größten Entfernungen.

Merksatz

Astronomische Längeneinheiten für große Entfernungen

$$1\ \text{pc} \approx 3{,}26\ \text{Lj} \approx 3{,}086 \cdot 10^{16}\ \text{m}, \quad 1\ \text{Mpc} \approx 3{,}26 \cdot 10^{6}\ \text{Lj} \approx 3{,}086 \cdot 10^{22}\ \text{m}\ .$$

Weil Licht eine endliche Geschwindigkeit hat, ist jeder Blick in die Ferne ein Blick in die Vergangenheit (**Signallaufzeit**, Skript AS6). Das Licht der Andromedagalaxie hat sie vor 2,5 Millionen Jahren verlassen; wir sehen sie so, wie sie damals war. Bei Galaxien in Milliarden Lichtjahren Entfernung sehen wir das Universum in seiner Jugend. Das ist ein großer Vorteil: Die Astronomie kann die Geschichte des Universums nicht nur erschließen, sondern direkt beobachten – je weiter weg, desto früher.

Typischer Fehler

Falsch: Wir sehen die Andromedagalaxie so, wie sie heute ist.

Richtig: Wir sehen sie so, wie sie vor 2,5 Millionen Jahren war, als ihr Licht sie verließ. Wie sie heute aussieht, kann niemand wissen.

Bei sehr fernen Galaxien kann sich in der Laufzeit des Lichts viel verändert haben; manche ihrer Sterne gibt es längst nicht mehr.

Wie groß ist das beobachtbare Universum?

Das Universum ist 13,8 Milliarden Jahre alt. Trotzdem liegt der Rand dessen, was wir prinzipiell sehen können, heute rund 46 Milliarden Lichtjahre (14 Gpc) entfernt. Der Grund ist die Expansion (Kapitel 5): Während das Licht unterwegs war, hat sich der Raum gedehnt, und die Quelle ist inzwischen viel weiter weg, als das Licht in 13,8 Milliarden Jahren in einem ruhenden Raum hätte zurücklegen können. Wie groß das ganze Universum ist und ob es überhaupt endlich ist, weiß man nicht.

Fachbegriffe: hierarchischer Aufbau · interstellare Materie · Sternhaufen · offener Sternhaufen · Kugelsternhaufen · Galaxie · Galaxienhaufen · Filament · Void · kosmisches Netz · Kiloparsec · Megaparsec · Signallaufzeit

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Logarithmisch darstellen** ↗ · **Hertzsprung-Russell-Diagramm** ↗



2 Die Milchstraße

2.1 Das Band am Himmel

Wahlfach Astronomie

Fast alle Kulturen haben das Lichtband am Himmel als Weg, Fluss oder verschüttete Milch gedeutet; daher der Name (griechisch *galaxías*, von *gála*, Milch). Galileo Galilei richtete 1609/1610 als einer der Ersten ein Fernrohr darauf und sah, dass es sich in zahllose einzelne Sterne auflöst. Um 1785 zählte Wilhelm Herschel Sterne in verschiedenen Richtungen und schloss, dass die Sterne eine flache Scheibe bilden. Sehen wir in die Scheibenebene, blicken wir durch sehr viele Sterne hindurch – das ist das Band. Quer zur Scheibe sehen wir nur wenige Sterne.

Wo in der Scheibe die Sonne steht, war lange unklar. Herschel vermutete sie in der Mitte, weil der Staub die Sicht in alle Richtungen gleich weit begrenzt. Erst 1918 zeigte Harlow Shapley mit den Kugelsternhaufen, dass die Sonne weit außerhalb steht: Die Kugelsternhaufen sammeln sich um einen Punkt im Sternbild Schütze, und dieser Punkt ist das Zentrum der Milchstraße. Nach Kopernikus, der die Erde aus der Mitte der Welt nahm, nahm Shapley auch die Sonne aus der Mitte der Galaxie.

> **⋆ Die Milchstraße sehen**
> Am besten im Juli und August gegen Mitternacht, bei Neumond und fern der Ortsbeleuchtung (Dunkeladaption von mindestens 20 Minuten). Das Band zieht sich dann von Norden (Kassiopeia) über das Sommerdreieck hoch im Süden bis zum Schützen tief am Südhorizont, wo es am hellsten ist: Dort liegt, hinter Staubwolken verborgen, das Zentrum. Ein Fernglas löst das Band in Sterne auf und zeigt dunkle Staubwolken und Sternhaufen.

2.2 Aufbau der Milchstraße

Wahlfach Astronomie Basisfach Astrophysik

Heute kennt man den Aufbau der Milchstraße aus Messungen im Infrarot- und Radiobereich, die den Staub durchdringen, und aus den Positionen und Bewegungen von fast zwei Milliarden Sternen, die der Satellit Gaia vermessen hat. Die Milchstraße ist eine **Balkenspiralgalaxie** (Abbildung 143):

- Die **Scheibe** ist rund 30 kpc (100 000 Lj) groß, aber nur etwa 0,3 kpc dick – im Verhältnis so flach wie eine CD. In ihr liegen die **Spiralarme** mit viel Gas, Staub und jungen Sternen.
- In der Mitte sitzt eine Verdickung aus alten Sternen, der **Bulge**, mit einem länglichen **Balken**. Im Zentrum befindet sich ein supermassereiches Schwarzes Loch, **Sagittarius A*** (Abschnitt „Sagittarius A*“).
- Scheibe und Bulge sind in einen fast kugelförmigen **Halo** eingebettet, in dem wenige alte Sterne und die Kugelsternhaufen auf langgestreckten Bahnen umlaufen. Er geht in einen noch viel größeren Halo aus Dunkler Materie über.

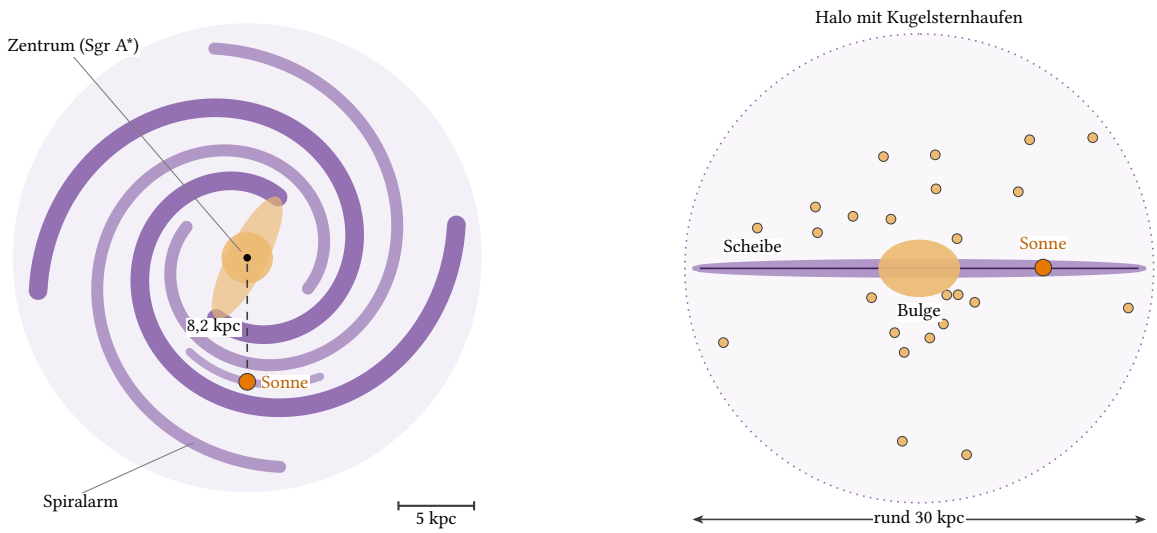


Abbildung 143: Die Milchstraße von oben (links) und von der Seite (rechts), schematisch. Die Sonne steht 8,2 kpc vom Zentrum entfernt in einem kleinen Arm, dem Orion-Arm, zwischen zwei großen Spiralarmen. Die Scheibe ist rechts dicker gezeichnet, als sie ist.

Eine Galaxie ist also ein **zusammengesetztes System**: Sterne aller Alter mit ihren Planetensystemen, Sternhaufen, interstellares Gas und Staub, ein zentrales Schwarzes Loch – und Dunkle Materie, die nach heutiger Kenntnis den größten Teil der Masse ausmacht (Abschnitt „Rotationskurve und Dunkle Materie“).

Größe	Wert (gerundet)
Typ	Balkenspiralgalaxie
Durchmesser der Scheibe	rund 30 kpc (100 000 Lj)
Dicke der Scheibe	rund 0,3 kpc (1000 Lj)
Zahl der Sterne	100 bis 400 Milliarden (Schätzung)
Masse	rund $10^{12}\,M_\odot$ samt Dunkler Materie (Schätzung); Sterne und Gas nur etwa $6 \cdot 10^{10}\,M_\odot$
Abstand der Sonne vom Zentrum	8,2 kpc (rund 27 000 Lj)
Bahngeschwindigkeit der Sonne	etwa $230\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$
Umlaufzeit der Sonne	etwa 220 Millionen Jahre („galaktisches Jahr“)
Zentrales Schwarzes Loch	Sagittarius A*, $4{,}3 \cdot 10^6\,M_\odot$

Tabelle 49: Steckbrief der Milchstraße.

Junge und alte Sterne sind dabei nicht gleich verteilt. In der Scheibe, besonders in den Spiralarmen, entstehen bis heute neue Sterne; dort findet man junge, heiße, blaue Sterne und offene Sternhaufen. Im Bulge und im Halo leben fast nur alte, kühle Sterne, die arm an schweren Elementen sind. Die Sonne ist mit 4,6 Milliarden Jahren ein Stern mittleren Alters der Scheibe.

2.3 Die Bahn der Sonne und die Masse der Milchstraße

Wahlfach Astronomie | IMP 10

Die Milchstraße steht nicht still: Alle ihre Sterne umkreisen das Zentrum. Die Sonne läuft mit etwa $230\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ auf einer fast kreisförmigen Bahn und braucht für einen Umlauf rund 220 Millionen Jahre. Seit ihrer Entstehung hat sie das Zentrum etwa zwanzigmal umrundet; bei ihrem letzten Umlauf lebten auf der Erde gerade die ersten Dinosaurier.

Aus der Bahn der Sonne kann man die Masse bestimmen, die sie zusammenhält – genauso, wie man aus der Bahn der Erde die Masse der Sonne bestimmt (Skript AS5). Für eine Kreisbahn liefert die Gravitationskraft die Zentripetalkraft. Liegt die Masse der Galaxie ungefähr kugelsymmetrisch verteilt, zählt dabei nur die Masse $M(r)$ **innerhalb** der Bahn:

Merksatz

Masse innerhalb einer Kreisbahn: Aus $\frac{mv^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$ folgt

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad \Longleftrightarrow \quad M(r) = \frac{v^2 r}{G}.$$

Die Masse m des umlaufenden Sterns kürzt sich heraus.

Beispiel 1

Für die Sonne ist $r = 8{,}2\ \text{kpc} = 8{,}2 \cdot 3{,}086 \cdot 10^{19}\ \text{m} \approx 2{,}53 \cdot 10^{20}\ \text{m}$ und $v = 2{,}3 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$:

$$M = \frac{\left(2{,}3 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 2{,}53 \cdot 10^{20}\ \text{m}}{6{,}674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{s}^2}} \approx 2{,}0 \cdot 10^{41}\ \text{kg} \approx 1{,}0 \cdot 10^{11} M_\odot.$$

Innerhalb der Sonnenbahn steckt also die Masse von rund hundert Milliarden Sonnen.

2.4 Rotationskurve und Dunkle Materie

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik | IMP 10

Misst man die Bahngeschwindigkeit nicht nur bei der Sonne, sondern in allen Abständen vom Zentrum, erhält man die **Rotationskurve** der Galaxie. Die Geschwindigkeiten misst man über den Doppler-Effekt (Skript AS6): an Sternen und Gaswolken, weit draußen vor allem am Radiolicht des Wasserstoffs bei 21 cm Wellenlänge, das noch jenseits der letzten hellen Sterne messbar ist. Bei anderen Spiralgalaxien geht das besonders anschaulich: Ist die Scheibe schräg zu uns geneigt, kommt die eine Seite auf uns zu (blauverschoben), die andere entfernt sich (rotverschoben).

Was man erwartet. Der größte Teil der leuchtenden Materie, der Sterne und des Gases, sitzt im inneren Teil der Galaxie. Weit draußen sollte sich deshalb fast nichts mehr zu $M(r)$ hinzufügen, $M(r)$ wäre praktisch konstant. Dann gilt dort $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ wie für die Planeten um die Sonne: Die Geschwindigkeit müsste mit $\frac{1}{\sqrt{r}}$ abnehmen. Im Sonnensystem ist das so – Neptun ist mit $5{,}4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ viel langsamer als die Erde mit $30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Man nennt einen solchen Verlauf **keplersch**.

Was man misst. Die Rotationskurven fast aller Spiralgalaxien bleiben weit draußen **flach**: Die Geschwindigkeit nimmt kaum ab, oft bis zum Doppelten oder Dreifachen des sichtbaren Scheibenradius (Abbildung 144). Gezeigt hat das vor allem die Amerikanerin Vera Rubin in den 1970er-Jahren an Dutzenden Galaxien, unter anderem an der Andromedagalaxie.

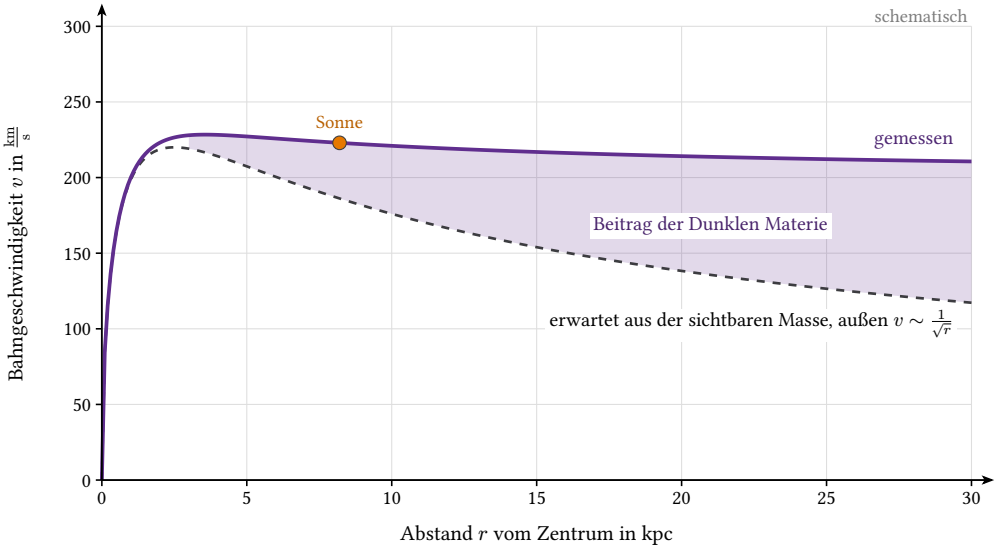


Abbildung 144: Rotationskurve einer Spiralgalaxie wie der Milchstraße (schematisch). Gestrichelt: der erwartete Verlauf, wenn nur die sichtbare Materie da wäre; außen fällt er keplersch wie $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Durchgezogen: der gemessene, flache Verlauf. Die Lücke dazwischen schreibt man der Dunklen Materie zu.

Bleibt v konstant, wächst nach $M(r) = \frac{v^2 r}{G}$ die eingeschlossene Masse **proportional zu r** – weit über den Bereich hinaus, in dem man noch Sterne sieht. Es muss also Materie geben, die Schwerkraft ausübt, aber kein Licht aussendet oder schluckt. Sie heißt **Dunkle Materie**. Schon 1933 hatte Fritz Zwicky im Coma-Galaxienhaufen bemerkt, dass sich

die Galaxien viel zu schnell bewegen, um von der sichtbaren Masse zusammengehalten zu werden, und von „dunkler Materie“ gesprochen (Kapitel 4).

Merksatz

Rotationskurve und Dunkle Materie

- Erwartet (Masse innen konzentriert): $v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$, die Geschwindigkeit nimmt nach außen ab.
- Gemessen: $v \approx$ konstant, also $M(r) \sim r$.
- Deutung: Jede Spiralgalaxie ist in einen Halo aus **Dunkler Materie** eingebettet, der viel weiter reicht als die Sterne und ein Vielfaches ihrer Masse hat.

Woraus die Dunkle Materie besteht, weiß niemand. Sicher ist, was sie **nicht** ist: Dunkle Gas- und Staubwolken, ausgebrannte Sterne oder Braune Zwerge kommen bei Weitem nicht auf die nötige Menge, und aus der Hintergrundstrahlung und der Entstehung der ersten Atomkerne (Kapitel 6) weiß man, dass es insgesamt viel zu wenig gewöhnliche Materie gibt. Die meisten Forscher vermuten eine noch unbekannte Teilchensorte, die nur über die Schwerkraft (und vielleicht sehr schwach anders) mit gewöhnlicher Materie wechselwirkt; gefunden hat man sie trotz vieler Experimente bisher nicht. Einige Forscher versuchen stattdessen, das Gravitationsgesetz für sehr schwache Felder abzuändern. Für die Dunkle Materie sprechen aber außer den Rotationskurven noch weitere, unabhängige Beobachtungen: die Bewegungen in Galaxienhaufen, die Lichtablenkung durch Haufen (Kapitel 4) und das Muster der Hintergrundstrahlung.

Typischer Fehler

Falsch: Dunkle Materie ist gewöhnliche Materie, die man nur nicht sieht, etwa Staub, dunkle Gaswolken oder ausgebrannte Sterne.

Richtig: Staub und Gas sieht man im Infrarot- und Radiolicht, und ihre Masse reicht bei Weitem nicht aus. Die Dunkle Materie ist nach allem, was man weiß, keine gewöhnliche Materie aus Atomen.

2.5 Sagittarius A*: das Schwarze Loch im Zentrum

Wahlfach Astronomie | IMP 10

Im Zentrum der Milchstraße, im Sternbild Schütze (lateinisch *Sagittarius*), sitzt eine kompakte Radioquelle, **Sagittarius A*** (kurz Sgr A*). Im sichtbaren Licht ist dort nichts zu sehen; der Staub schwächt es auf ein Billionstel. Im Infraroten aber kann man die Sterne in nächster Nähe des Zentrums beobachten. Zwei Forschergruppen haben das seit den 1990er-Jahren getan: die von Reinhard Genzel mit den Teleskopen der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile und die von Andrea Ghez mit den Keck-Teleskopen auf Hawaii. Sie verfolgten die Bahnen von Dutzenden Sternen, die ein unsichtbares Objekt in Jahren bis Jahrzehnten umkreisen.

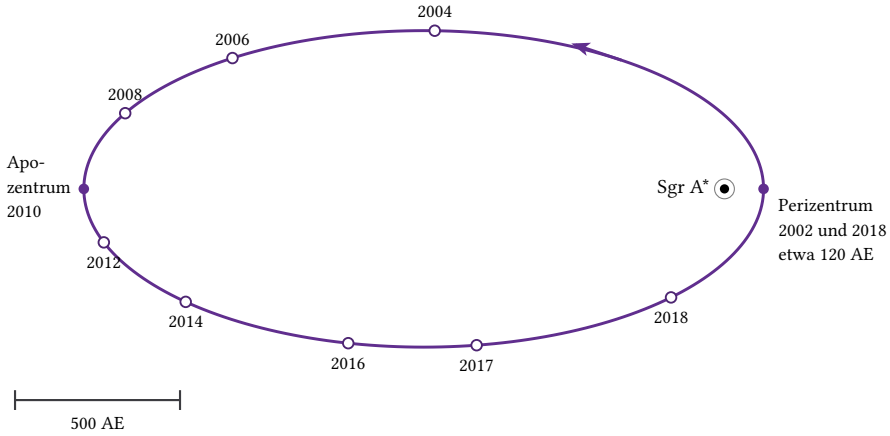


Abbildung 145: Bahn des Sterns S2 um Sgr A*, Draufsicht auf die Bahnebene, berechnet aus gerundeten Bahnelementen ($a \approx 1030$ AE, Exzentrizität 0,88, Umlaufzeit 16,0 Jahre; GRAVITY Collaboration 2020). Die Kreise zeigen die Orte jeweils zu Jahresbeginn: In Zentrumsnähe ist der Stern viel schneller. Der kleine Kreis um Sgr A* hat zum Vergleich den Radius der Neptunbahn.

Am genauesten bekannt ist die Bahn des Sterns **S2** (Abbildung 145). Er umläuft Sgr A* auf einer stark gestreckten Ellipse in 16,0 Jahren; die große Halbachse ist rund 1030 AE. Im Mai 2018 kam er dem Zentrum bis auf etwa 120 AE nahe – nur viermal so weit wie Neptun von der Sonne – und war dabei mit etwa $7700\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$ unterwegs, mehr als 2,5 % der Lichtgeschwindigkeit.

Beispiel 2

Die Masse von Sgr A* nach dem dritten Keplerschen Gesetz (Skript AS5). In der Form mit Astronomischen Einheiten, Jahren und Sonnenmassen lautet es $\frac{M}{M_\odot} = \frac{(a \text{ in AE})^3}{(T \text{ in Jahren})^2}$; die Masse von S2 ist dagegen vernachlässigbar:

$$\frac{M}{M_\odot} = \frac{1030^3}{16{,}0^2} \approx \frac{1{,}09 \cdot 10^9}{256} \approx 4{,}3 \cdot 10^6.$$

Im Zentrum der Milchstraße sitzen also über vier Millionen Sonnenmassen.

Diese Masse steckt in einem Raum, der kleiner ist als die Perizentrumsdistanz von S2 – und aus anderen Messungen weiß man: noch viel kleiner. Ein Haufen aus Millionen Sternen oder anderen dunklen Körpern wäre auf so engem Raum nicht stabil und würde in kurzer Zeit zusammenstürzen. Die einzige Erklärung, die bleibt, ist ein **supermassereiches Schwarzes Loch** (zu Schwarzen Löchern und dem Schwarzschild-Radius: Skript AS9). Für $4{,}3 \cdot 10^6 M_\odot$ ergibt sich ein Schwarzschild-Radius von $R_S = \frac{2GM}{c^2} \approx 1{,}3 \cdot 10^{10}$ m, weniger als ein Zehntel der Astronomischen Einheit.

Für diese Messungen erhielten Reinhard Genzel und Andrea Ghez 2020 den Nobelpreis für Physik (zusammen mit Roger Penrose für die Theorie der Schwarzen Löcher). Mit dem Gerät GRAVITY, das die vier großen ESO-Teleskope zusammenschaltet, ließ sich 2018 sogar zeigen, dass das Licht von S2 in Zentrumsnähe so gerötet wird, wie es die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt. 2022 veröffentlichte das **Event Horizon Telescope**, ein weltweiter Verbund von Radioteleskopen, ein Bild vom „Schatten“ von Sgr A*: ein dunkler Fleck in einem hellen Ring aus heißem Gas.

Typischer Fehler

Falsch: Das Schwarze Loch im Zentrum saugt nach und nach die ganze Milchstraße ein.

Richtig: Aus großer Entfernung wirkt ein Schwarzes Loch wie jede andere Masse: Sterne umkreisen es auf Keplerbahnen. Mit vier Millionen Sonnenmassen hat Sgr A* weniger als ein Hunderttausendstel der Masse der Milchstraße.

Nur was ihm sehr nahe kommt, kann es verschlucken.

Fachbegriffe: Milchstraße · Balkenspiralgalaxie · Scheibe · Spiralarm · Bulge · Balken · Halo · zusammengesetztes System · galaktisches Jahr · Rotationskurve · keplersche Rotation · Dunkle Materie · Sagittarius A* · supermassereiches Schwarzes Loch · Event Horizon Telescope

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Rotationskurve und Dunkle Materie** ↗ · **Keplersche Gesetze** ↗ · **Fluchtgeschwindigkeit und Schwarzschild-Radius** ↗ · **Gravitationsfeld** ↗



3 Galaxien

3.1 Welteninseln

Wahlfach Astronomie

Mit Fernrohren fand man im 18. und 19. Jahrhundert Tausende kleine Nebelflecke am Himmel. Charles Messier listete die auffälligsten 1781 in einem Katalog, damit Kometensucher sie nicht mit Kometen verwechselten; daher Namen wie M31 für den Andromedanebel. Manche Nebel ließen sich in Sterne auflösen, andere zeigten eine Spiralform. Schon 1755 hatte Immanuel Kant vermutet, es könne sich um ferne „Welteninseln“ handeln, Sternsysteme wie die Milchstraße. Bewiesen war das aber nicht, und noch 1920 stritten Astronomen öffentlich darüber, ob die Spiralnebel zur Milchstraße gehören.

Entschieden hat die Frage Edwin Hubble. Er fand 1923 im Andromedanebel einen Cepheiden, einen pulsierenden Stern, dessen Periode seine Leuchtkraft verrät (Skript AS8). Aus Periode und scheinbarer Helligkeit ergab sich eine Entfernung weit jenseits der Milchstraße: Der „Nebel“ ist eine eigene **Galaxie**. Heute schätzt man, dass es im beobachtbaren Universum einige hundert Milliarden Galaxien gibt.

> **⋆ Die Andromedagalaxie**
> Im Oktober und November steht sie abends hoch im Osten, später fast im Zenit, zwischen dem „W“ der Kassiopeia und dem Herbstviereck des Pegasus. Unter dunklem Himmel erkennt man mit bloßem Auge ein längliches Nebelfleckchen, im Fernglas das helle Zentrum. Das Licht, das dabei ins Auge fällt, ist 2,5 Millionen Jahre alt: Es ist das fernste Objekt, das man ohne Hilfsmittel sehen kann.

3.2 Galaxientypen nach Hubble

Wahlfach Astronomie

Hubble ordnete die Galaxien 1926 nach ihrer Gestalt. Sein Schema, wegen seiner Form **Stimmgabeldiagramm** genannt, wird bis heute benutzt (Abbildung 146):

- **Elliptische Galaxien** (E) sehen aus wie ellipsenförmige, nach außen gleichmäßig schwächer werdende Lichtflecke. Die Ziffer gibt an, wie abgeplattet sie erscheinen: E0 ist rund, E7 stark länglich. Sind a und b die große und die kleine Achse des Bildes, so ist die Ziffer $n = 10 \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right)$.
- **Spiralgalaxien** (S) haben eine flache Scheibe mit Spiralarmen und einen Bulge. Von Sa über Sb nach Sc wird der Bulge kleiner, die Arme werden offener und lockerer, und es gibt mehr Gas.
- **Balkenspiralen** (SB) haben zusätzlich einen Balken durch die Mitte, an dessen Enden die Arme ansetzen. Auch die Milchstraße gehört dazu.
- **Linsenförmige Galaxien** (S0) haben eine Scheibe, aber keine Spiralarme und kaum Gas; sie stehen zwischen den elliptischen und den Spiralgalaxien.
- **Irreguläre Galaxien** (Irr) haben keine regelmäßige Form, wie die beiden Magellanschen Wolken, Begleiter der Milchstraße am Südhimmel.

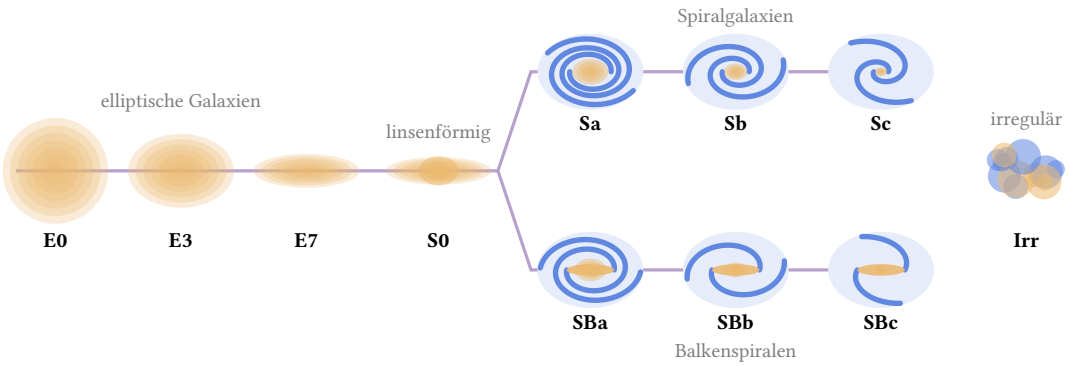


Abbildung 146: Galaxientypen nach Hubble im Stimmgabeldiagramm (Skizzen). Gelblich: alte Sterne; blau: junge Sterne und Sternentstehungsgebiete in den Spiralarmen. Spiral- und Balkenspiralgalaxien schräg von oben gesehen.

Spiralgalaxien und elliptische Galaxien unterscheiden sich nicht nur in der Form (Tabelle 50). Die blauen Spiralarme sind die Orte, an denen neue Sterne entstehen: Nur dort gibt es genug kaltes Gas. Die Arme leuchten so hell, weil die jungen, heißen und blauen Sterne darin sehr leuchtkräftig sind – und weil sie so kurz leben, dass sie sterben, bevor sie den Arm

verlassen. Elliptische Galaxien haben ihr Gas schon vor langer Zeit verbraucht oder verloren; in ihnen leben fast nur noch alte, kühle, rötliche Sterne.

	Spiralgalaxie	**elliptische Galaxie**
Struktur	flache, rotierende Scheibe mit Spiralarmen, Bulge, Halo	ellipsoidförmig, keine Scheibe; Sterne auf ungeordneten Bahnen
Sterne	junge und alte Sterne	fast nur alte Sterne
Gas und Staub	viel, in der Scheibe	kaum (nur sehr heißes, dünnes Gas)
Sternentstehung	laufend, in den Spiralarmen	fast keine
Farbe	Scheibe bläulich, Bulge gelblich	gelblich bis rötlich
Masse	etwa 10^9 bis $10^{12}\,M_\odot$	von Zwerggalaxien mit $10^7\,M_\odot$ bis zu Riesen mit über $10^{12}\,M_\odot$
Beispiele	Milchstraße, Andromedagalaxie (M31)	M87 im Virgo-Haufen, M32 (Begleiter von M31)

Tabelle 50: Spiralgalaxien und elliptische Galaxien im Vergleich.

Typischer Fehler

Falsch: Das Stimmgabeldiagramm ist ein Lebenslauf: Galaxien beginnen als elliptische und werden später zu Spiralgalaxien (oder umgekehrt).

Richtig: Das Diagramm sortiert nur nach der Form. Hubble nannte die elliptischen Galaxien zwar „frühe“ und die Spiralen „späte“ Typen, eine Entwicklung in dieser Richtung gibt es aber nicht.

Tatsächlich entstehen große elliptische Galaxien oft, wenn Spiralgalaxien verschmelzen (Abschnitt „Entstehung und Entwicklung“).

3.3 Entfernungen von Galaxien: die Entfernungsleiter

Wahlfach Astronomie

Die Entfernung einer Galaxie lässt sich nicht direkt messen; Parallaxen (Skript AS8) reichen nicht einmal durch die ganze Milchstraße. Man braucht **Standardkerzen**: Objekte, deren Leuchtkraft, also absolute Helligkeit M, man kennt. Misst man ihre scheinbare Helligkeit m, folgt die Entfernung aus dem **Entfernungsmodul** (Skript AS8):

$$m - M = 5 \cdot \lg\left(\frac{r}{10\ \text{pc}}\right) \quad \Longleftrightarrow \quad r = 10\ \text{pc} \cdot 10^{\frac{m-M}{5}}.$$

Cepheiden. Diese pulsierenden Überriesen sind Hunderte bis Zehntausende Male leuchtkräftiger als die Sonne und folgen der **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung** von Henrietta Leavitt (Skript AS8): Je länger die Periode, desto größer die Leuchtkraft. Man misst die Periode, liest die absolute Helligkeit ab und erhält mit der scheinbaren Helligkeit die Entfernung. Geeicht wird die Beziehung an Cepheiden der Milchstraße, deren Entfernung man über Parallaxen kennt. Mit dem Hubble- und dem James-Webb-Weltraumteleskop findet man Cepheiden in Galaxien bis etwa 40 Mpc Entfernung.

Supernovae vom Typ Ia. Für größere Entfernungen braucht man hellere Kerzen. Eine **Supernova vom Typ Ia** entsteht, wenn ein Weißer Zwerg in einem engen Doppelsternsystem Materie von seinem Begleiter aufsammelt, bis er sich der Grenzmasse von etwa 1,4 Sonnenmassen nähert und in einer thermonuklearen Explosion vollständig zerrissen wird. Weil das immer bei fast derselben Masse geschieht, erreichen alle Supernovae dieses Typs im Maximum ungefähr dieselbe absolute Helligkeit, etwa $M \approx -19{,}3$ mag – einige Milliarden Sonnenleuchtkräfte, so hell wie eine ganze Galaxie. Kleine Unterschiede kann man ausgleichen: Hellere Supernovae werden langsamer schwächer. Geeicht werden sie an Supernovae in nahen Galaxien, deren Entfernung man über Cepheiden kennt. Man sieht sie noch in Milliarden Parsec Entfernung.

Beispiel 3

In einer fernen Galaxie leuchtet eine Supernova vom Typ Ia auf und erreicht im Maximum $m = 15{,}7$ mag. Mit $M = -19{,}3$ mag ist $m - M = 35{,}0$ mag, also

$$r = 10\ \text{pc} \cdot 10^{\frac{35{,}0}{5}} = 10\ \text{pc} \cdot 10^7 = 10^8\ \text{pc} = 100\ \text{Mpc} \approx 330\ \text{Mio. Lj}\ .$$

Jede Methode reicht nur über einen bestimmten Bereich, und jede wird an der vorigen geeicht. So entsteht eine **Entfernungsleiter** (Abbildung 147): Radarmessungen im Sonnensystem liefern die Astronomische Einheit, mit ihr misst

man Parallaxen, mit Parallaxen eicht man Cepheiden, mit Cepheiden Supernovae, und mit Supernovae prüft und eicht man die Hubble-Relation (Kapitel 5), die für die fernsten Galaxien übrig bleibt. Daneben gibt es weitere Verfahren, etwa die Tully-Fisher-Beziehung: Je schneller eine Spiralgalaxie rotiert, desto leuchtkräftiger ist sie.

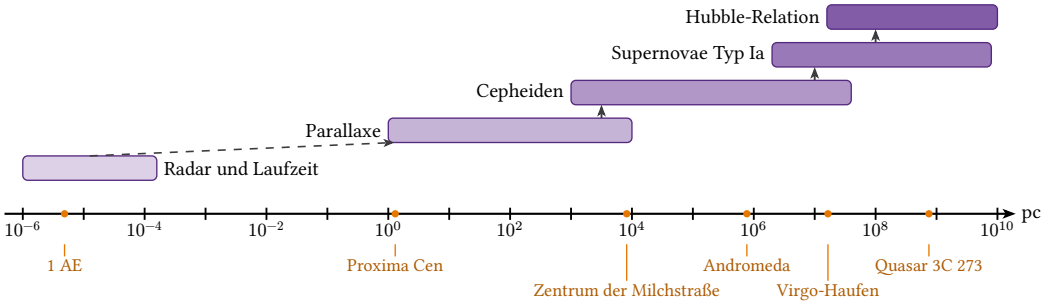


Abbildung 147: Die Entfernungsleiter: Reichweite der Verfahren auf einer logarithmischen Achse (gerundet). Die Pfeile zeigen, wo eine Sprosse die nächste eicht. Unten einige Ziele zum Vergleich.

Typischer Fehler

Falsch: Jede Methode misst die Entfernung unabhängig von den anderen.

Richtig: Die Sprossen bauen aufeinander auf. Ist eine Sprosse falsch geeicht, sind alle Entfernungen darüber um denselben Faktor falsch.

Hubble selbst hat die Entfernungen der Galaxien zunächst um einen Faktor von etwa sieben unterschätzt, unter anderem, weil man zwei Sorten von Cepheiden nicht unterschied (Kapitel 5).

3.4 Entstehung und Entwicklung

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Galaxien sind nicht fertig vom Himmel gefallen. Nach dem kosmologischen Standardmodell (Kapitel 6) wuchsen winzige Dichteschwankungen im frühen Universum durch die Schwerkraft: Zuerst sammelte sich die Dunkle Materie zu Klumpen, in die das gewöhnliche Gas hineinfiel, sich verdichtete und erste Sterne bildete. Die ersten Galaxien waren klein. Größere entstanden vor allem dadurch, dass kleine miteinander verschmolzen – man spricht von **hierarchischer Strukturbildung**. Das Weltraumteleskop James Webb hat Galaxien gefunden, deren Licht aus der Zeit weniger als 300 Millionen Jahre nach dem Urknall stammt.

Wechselwirkung und Verschmelzung. Kommen sich zwei Galaxien nahe, verformen sie sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft; lange Gezeitenarme aus Sternen und Gas werden herausgezogen. Die Sterne selbst stoßen dabei praktisch nie zusammen, dafür sind sie viel zu weit voneinander entfernt. Die Gaswolken aber prallen aufeinander, werden zusammengedrückt und bilden in kurzer Zeit sehr viele neue Sterne. Galaxien in einer solchen Phase heißen **Starburst-Galaxien**; ein bekanntes Beispiel ist M82 im Großen Bären, die von ihrer großen Nachbarin M81 gestört wird. Verschmelzen zwei große Spiralgalaxien, ordnen sich die Sternbahnen nicht mehr zu einer Scheibe: Am Ende steht meist eine elliptische Galaxie.

Auch die Milchstraße ist durch Verschmelzungen gewachsen. Mit den Daten von Gaia fand man 2018 die Überreste einer Zwerggalaxie, die vor rund zehn Milliarden Jahren mit ihr verschmolz; die Sagittarius-Zwerggalaxie wird gerade zerrissen. Und die Andromedagalaxie kommt mit gut $100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ auf uns zu. Nach heutigen Rechnungen werden sich beide Galaxien in einigen Milliarden Jahren nahe kommen und möglicherweise zu einer großen elliptischen Galaxie verschmelzen; wie wahrscheinlich das ist, hängt von Messgenauigkeiten ab, die noch umstritten sind.

3.5 Aktive Galaxienkerne

Wahlfach Astronomie

Nicht nur die Milchstraße hat ein supermassereiches Schwarzes Loch im Zentrum: Man findet sie in fast allen großen Galaxien, mit Massen von einer Million bis zu mehreren Milliarden Sonnenmassen. Die meisten verhalten sich ruhig wie Sgr A*. Fällt aber viel Gas hinein, sammelt es sich in einer schnell rotierenden **Akkretionsscheibe** (lateinisch *accretio*, Anwachsen) und wird durch Reibung auf Hunderttausende Grad aufgeheizt. Bevor es hinter dem Ereignishorizont verschwindet, strahlt es typischerweise etwa ein Zehntel seiner Ruheenergie $E = mc^2$ ab – weit mehr als die Kernfusion, die nur 0,7 % freisetzt. Senkrecht zur Scheibe schießen oft zwei **Jets** aus Teilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit hinaus, die Hunderttausende Lichtjahre weit reichen können.

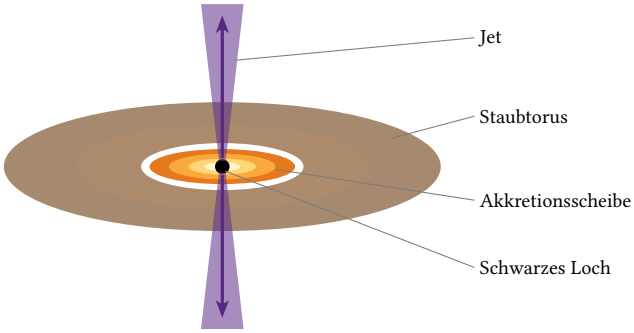


Abbildung 148: Aufbau eines aktiven Galaxienkerns (schematisch, nicht maßstäblich): Das Schwarze Loch ist von einer heißen Akkretionsscheibe umgeben, diese von einem Ring aus Staub. Senkrecht dazu treten die Jets aus. Je nach Blickrichtung sieht man die Scheibe direkt oder nur durch den Staub hindurch.

Solche Galaxien heißen **aktive Galaxien**, ihr Zentrum **aktiver Galaxienkern**. Die hellsten sind die **Quasare**: Ihr Kern strahlt Hunderte Male heller als alle Sterne einer großen Galaxie zusammen, und das aus einem Gebiet, das kaum größer ist als unser Sonnensystem. Der erste wurde 1963 erkannt, 3C 273 im Sternbild Jungfrau; sein Licht ist rund zwei Milliarden Jahre unterwegs. Quasare waren im frühen Universum viel häufiger als heute, weil damals mehr Gas vorhanden war, das in die Schwarzen Löcher fallen konnte. Das erste Bild vom Schatten eines Schwarzen Lochs zeigte 2019 das Zentrum der Riesengalaxie M87 im Virgo-Haufen: 6,5 Milliarden Sonnenmassen, mit einem Jet, den man schon seit über hundert Jahren kennt.

Fachbegriffe: Galaxie · Stimmgabeldiagramm · elliptische Galaxie · Spiralgalaxie · Balkenspirale · linsenförmige Galaxie · irreguläre Galaxie · Standardkerze · Entfernungsmodul · Cepheide · Perioden-Leuchtkraft-Beziehung · Supernova vom Typ Ia · Entfernungsleiter · hierarchische Strukturbildung · Galaxienverschmelzung · Starburst-Galaxie · Akkretionsscheibe · Jet · aktiver Galaxienkern · Quasar

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Größenklassen und Entfernungsmodul** ↗ · **Lebensweg der Sterne im HRD** ↗



4 Galaxienhaufen, Filamente und Voids

4.1 Die Lokale Gruppe

Wahlfach Astronomie | Zusatz

Die Milchstraße gehört zu einer kleinen Galaxiengruppe, der **Lokalen Gruppe**. Sie hat einen Durchmesser von rund 3 Mpc (10 Millionen Lichtjahre) und umfasst über 50 bekannte Galaxien. Die allermeisten sind **Zwerggalaxien** mit nur Millionen bis Milliarden Sternen; immer wieder werden neue, sehr leuchtschwache entdeckt. Drei Spiralgalaxien bestimmen das Bild: die Andromedagalaxie als größte, die Milchstraße und die kleinere Dreiecksgalaxie M33. Fast alle anderen sind Begleiter einer der beiden großen.

Galaxie	Typ	Entfernung	Bemerkung
Große Magellansche Wolke	irregulär	160 000 Lj	Begleiter der Milchstraße, am Südhimmel mit bloßem Auge
Kleine Magellansche Wolke	irregulär	200 000 Lj	Begleiter der Milchstraße
Andromedagalaxie (M31)	Spirale	2,5 Mio. Lj	größte Galaxie der Gruppe, fernstes Objekt für das bloße Auge
M32, M110	elliptisch	2,5 Mio. Lj	Begleiter der Andromedagalaxie
Dreiecksgalaxie (M33)	Spirale	rund 3 Mio. Lj	drittgrößte Galaxie der Gruppe

Tabelle 51: Einige Mitglieder der Lokalen Gruppe (Entfernungen gerundet).

Die Lokale Gruppe wird von ihrer eigenen Schwerkraft zusammengehalten. Deshalb bewegt sich die Andromedagalaxie auf uns zu, obwohl sich fast alle anderen Galaxien von uns entfernen (Kapitel 5).

4.2 Galaxienhaufen

Wahlfach Astronomie

Galaxienhaufen sind die größten durch die Schwerkraft zusammengehaltenen Gebilde im Universum: Hunderte bis Tausende Galaxien in einem Gebiet von einigen Mpc Durchmesser, mit Gesamtmassen von 10^{14} bis 10^{15} Sonnenmassen. Der nächste große ist der **Virgo-Haufen** in rund 16,5 Mpc (54 Millionen Lj) Entfernung mit über tausend Galaxien; in seiner Mitte sitzt die Riesengalaxie M87. Weiter entfernt, in rund 100 Mpc, liegt der Coma-Haufen im Sternbild Haar der Berenike. In den dichten Kernen der Haufen überwiegen elliptische Galaxien, wohl weil dort Begegnungen und Verschmelzungen häufig sind.

An Galaxienhaufen hat man die Dunkle Materie entdeckt. Fritz Zwicky maß 1933 die Geschwindigkeiten der Galaxien im Coma-Haufen und fand, dass sie mit rund $1000\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ durcheinanderfliegen. Um so schnelle Galaxien zusammenzuhalten, braucht der Haufen nach dem Gravitationsgesetz ein Vielfaches der Masse, die seine leuchtenden Sterne haben – Zwicky schätzte das Vierhundertfache. Zwicky schrieb von „dunkler (kalter) Materie“ – fast vierzig Jahre, bevor die Rotationskurven das bestätigten.

Heute kennt man drei unabhängige Wege, die Masse eines Haufens zu bestimmen:

- aus den **Geschwindigkeiten** der Galaxien, wie Zwicky;
- aus dem **heißen Gas** zwischen den Galaxien: Es hat Temperaturen von zehn bis hundert Millionen Kelvin, leuchtet deshalb im Röntgenlicht und ist nur von Satelliten aus zu sehen. Es enthält mehr Masse als alle Sterne des Haufens, und um es bei dieser Temperatur festzuhalten, braucht man wieder viel mehr Masse, als man sieht;
- aus **Gravitationslinsen**: Ein Haufen lenkt das Licht von Galaxien hinter ihm ab, wie es die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, und verzerrt ihre Bilder zu Bögen. Aus der Verzerrung folgt die Masse, die das Licht ablenkt – egal, ob sie leuchtet oder nicht.

Alle drei Verfahren ergeben übereinstimmend: Grob 85 % der Masse eines Galaxienhaufens ist Dunkle Materie, gut 10 % heißes Gas und nur wenige Prozent Sterne.

⋆ Der Virgo-Haufen im Teleskop
Im Frühling (März bis Mai) steht der Virgo-Haufen abends im Süden zwischen den Sternbildern Löwe und Jungfrau. Schon ein Teleskop mit 15 bis 20 cm Öffnung zeigt bei dunklem Himmel Dutzende kleine Nebelflecke – jeder eine Galaxie mit Milliarden Sternen, deren Licht über 50 Millionen Jahre unterwegs war. Eine Sternkarte oder App hilft beim Aufsuchen, etwa von M87 und der „Markarjanschen Kette“.

4.3 Superhaufen, Filamente und Voids

Wahlfach Astronomie | Zusatz

Um zu sehen, wie die Galaxien im Raum verteilt sind, braucht man ihre Entfernungen. Seit den 1980er-Jahren hat man mit großen **Durchmusterungen** die Rotverschiebungen von Hunderttausenden, inzwischen Millionen Galaxien gemessen und daraus über die Hubble-Relation (Kapitel 5) räumliche Karten gezeichnet. Das Ergebnis war überraschend: Die Galaxien liegen nicht gleichmäßig verteilt, sondern bilden ein **kosmisches Netz** (Abbildung 149).

- Gruppen und Haufen reihen sich entlang von **Filamenten** und flächigen Wänden auf, die Hunderte Millionen Lichtjahre lang sind; die Sloan Great Wall ist über eine Milliarde Lichtjahre lang.
- Dort, wo sich Filamente kreuzen, sitzen die großen Galaxienhaufen. Haufen und Gruppen samt den Filamenten dazwischen fasst man zu **Superhaufen** zusammen. Die Milchstraße liegt am Rand des Superhaufens **Laniakea** (hawaiianisch für „unermesslicher Himmel“), rund 160 Mpc groß, zu dem auch der Virgo-Haufen gehört. Anders als Haufen sind Superhaufen nicht als Ganzes durch die Schwerkraft gebunden.
- Zwischen den Filamenten liegen **Voids**, fast leere Gebiete von 10 bis über 100 Mpc Durchmesser.

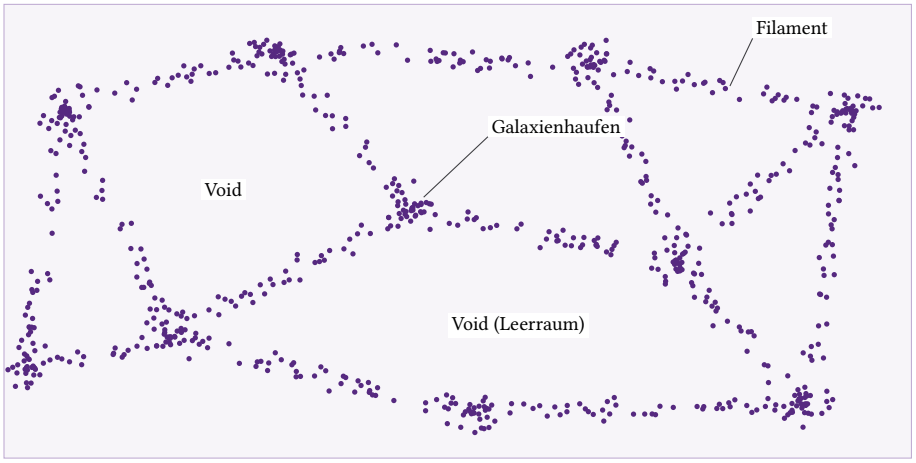


Abbildung 149: Das kosmische Netz (schematisch): Galaxien (Punkte) liegen in Filamenten, an deren Knoten Galaxienhaufen sitzen; dazwischen fast leere Voids. Ausschnitt einige hundert Millionen Lichtjahre breit.

Wie konnte so ein Netz entstehen? Computersimulationen, die nur die Schwerkraft der Dunklen und der gewöhnlichen Materie in einem expandierenden Universum nachrechnen, beginnend mit den winzigen Dichteschwankungen, die man in der Hintergrundstrahlung sieht (Kapitel 6), erzeugen genau solche Netze. Dichtere Gebiete ziehen Materie an und werden immer dichter, dünnere werden immer leerer.

Auf noch größeren Skalen, ab einigen hundert Millionen Lichtjahren, verschwindet die Struktur: Ein Würfel dieser Größe sieht im Mittel aus wie jeder andere. Das Universum ist im Großen **homogen** (überall gleich) und **isotrop** (in allen Richtungen gleich). Diese Annahme heißt **kosmologisches Prinzip**; sie ist die Grundlage aller Modelle des Universums als Ganzes.

Fachbegriffe: Lokale Gruppe · Zwerggalaxie · Galaxienhaufen · Virgo-Haufen · heißes Haufengas · Gravitationslinse · Durchmusterung · Filament · Superhaufen · Laniakea · Void · kosmisches Netz · kosmologisches Prinzip

Üben: **noctua** ↗



5 Hubble-Relation und Expansion

5.1 Die Rotverschiebung der Galaxien

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Das Licht einer Galaxie ist das gemischte Licht ihrer Milliarden Sterne. Zerlegt man es in ein Spektrum, sieht man darin dunkle Absorptionslinien, zum Beispiel die starken Linien H und K des Calciums, Linien des Wasserstoffs und des Natriums (Skript AS8). Bei den allermeisten Galaxien liegen diese Linien aber nicht dort, wo man sie im Labor misst, sondern bei größeren Wellenlängen: Sie sind zum Roten hin verschoben (Abbildung 150). Schon zwischen 1912 und 1917 hatte Vesto Slipher das an den damals noch rätselhaften Spiralnebeln gemessen.

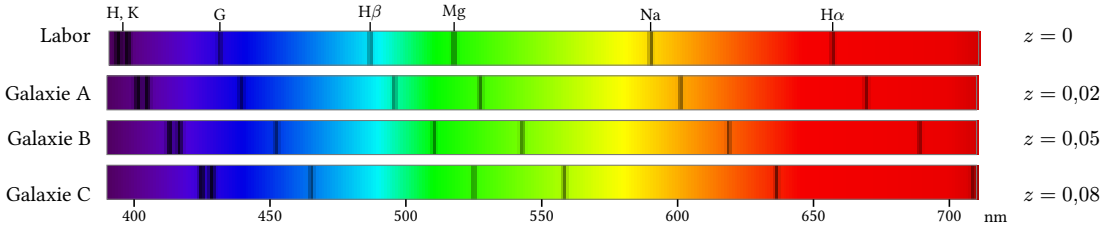


Abbildung 150: Spektren dreier Galaxien (vereinfacht) im Vergleich mit den Laborwellenlängen: Alle Linien sind um denselben Faktor $1 + z$ zu größeren Wellenlängen verschoben, bei Galaxie C am stärksten.

Definition

Die **Rotverschiebung** z ist die relative Verschiebung einer Spektrallinie:

$$z = \frac{\lambda_{\text{beob}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}.$$

Dabei ist λ_0 die Wellenlänge im Labor und λ_{beob} die beobachtete. Alle Linien eines Spektrums haben dasselbe z.

Deutet man die Verschiebung als **Doppler-Effekt** (Skript AS6), entfernt sich die Galaxie von uns. Für Geschwindigkeiten, die klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind, gilt dann

$$v \approx c \cdot z.$$

Man nennt v die **Fluchtgeschwindigkeit** der Galaxie. Galaxie C in Abbildung 150 entfernt sich danach mit $v \approx 3 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot 0{,}08 = 24\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Dass es sich nicht wirklich um einen Doppler-Effekt handelt, sondern um eine Folge der Ausdehnung des Raums, zeigt der Abschnitt „Expansion des Raums“; für kleine z liefern beide Deutungen dasselbe.

Beispiel 4

Die Wasserstofflinie Hα ($\lambda_0 = 656{,}3$ nm) erscheint im Spektrum einer Galaxie bei 669,4 nm. Dann ist

$$z = \frac{669{,}4\ \text{nm} - 656{,}3\ \text{nm}}{656{,}3\ \text{nm}} = \frac{13{,}1\ \text{nm}}{656{,}3\ \text{nm}} \approx 0{,}020 \quad \text{und} \quad v \approx c \cdot z \approx 6000 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

5.2 Das Hubble-Diagramm

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

1929 trug Edwin Hubble für zwei Dutzend Galaxien die Fluchtgeschwindigkeit über der Entfernung auf, die er aus Cepheiden und hellen Sternen bestimmt hatte. Trotz großer Streuung war klar: Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto schneller entfernt sie sich. Zwei Jahre zuvor hatte der belgische Physiker und Priester Georges Lemaître denselben Zusammenhang aus der Allgemeinen Relativitätstheorie hergeleitet und aus Messdaten abgeschätzt. Die Internationale Astronomische Union empfiehlt deshalb seit 2018 den Namen **Hubble-Lemaître-Gesetz**; im Unterricht heißt er meist **Hubble-Relation**.

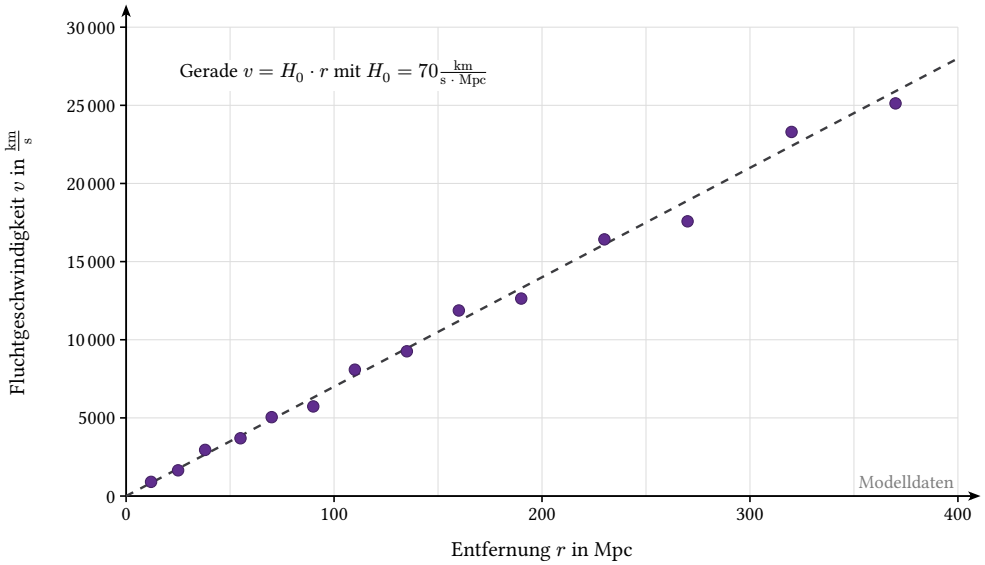


Abbildung 151: Hubble-Diagramm mit Modelldaten (nach dem Vorbild heutiger Messungen mit Supernovae vom Typ Ia). Die Punkte streuen um eine Ursprungsgerade; ihre Steigung ist die Hubble-Konstante.

Merksatz

Hubble-Relation: Die Fluchtgeschwindigkeit v einer Galaxie ist proportional zu ihrer Entfernung r:

$$v = H_0 \cdot r \quad \text{mit} \quad H_0 \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}.$$

Die **Hubble-Konstante** H_0 sagt: Mit jedem Megaparsec Entfernung wächst die Fluchtgeschwindigkeit um rund $70 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Die Hubble-Relation ist damit selbst eine Methode der Entfernungsbestimmung, die oberste Sprosse der Entfernungsleiter: Aus der gemessenen Rotverschiebung folgt die Fluchtgeschwindigkeit und daraus die Entfernung. Galaxie C aus Abbildung 150 ist danach etwa

$$r = \frac{v}{H_0} = \frac{24\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}} \approx 340 \text{ Mpc}$$

entfernt.

Zwei Einschränkungen gibt es. Erstens bewegen sich Galaxien zusätzlich in ihrer Umgebung, mit einigen hundert Kilometern pro Sekunde, etwa in Gruppen und Haufen. Bei nahen Galaxien ist diese **Eigenbewegung** größer als die Fluchtgeschwindigkeit; deshalb kommt die Andromedagalaxie sogar auf uns zu. Die Hubble-Relation gilt erst ab etwa 10 Mpc gut. Zweitens gilt $v \approx c \cdot z$ nur für kleine Rotverschiebungen, etwa bis $z \approx 0{,}1$; für die fernsten Galaxien braucht man das Modell der Raumdehnung.

5.3 Expansion des Raums

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Dass sich fast alle Galaxien von uns entfernen, scheint uns in den Mittelpunkt zu rücken. Doch das täuscht. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie fliegen die Galaxien nicht durch einen festen Raum auseinander, sondern der Raum selbst dehnt sich aus und nimmt die Galaxien mit. Alle Abstände zwischen Galaxien, die nicht durch die Schwerkraft aneinander gebunden sind, wachsen im selben Verhältnis. Dieses Verhältnis beschreibt der **Skalenfaktor** $a(t)$: Heute ist $a = 1$, und ein Abstand, der heute r_0 beträgt, hatte zur Zeit t den Wert $r(t) = a(t) \cdot r_0$.

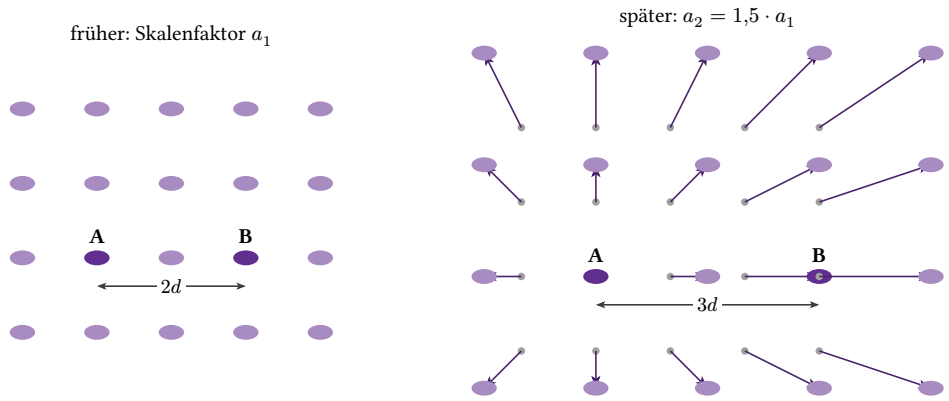


Abbildung 152: Expansion: Rechts sind alle Abstände 1,5-mal so groß wie links. Die grauen Punkte zeigen die alten Lagen, von A aus gesehen. Die Pfeile sind umso länger, je weiter eine Galaxie von A entfernt ist: B hat sich um d entfernt, ihre Nachbarin nur um $\frac{d}{2}$. Von jeder anderen Galaxie aus sähe das Bild genauso aus.

Daraus folgt die Hubble-Relation. Wächst der Skalenfaktor in der kurzen Zeit Δt von a_1 auf a_2, so wächst der Abstand einer Galaxie von r_1 auf $r_2 = \frac{a_2}{a_1} \cdot r_1$. Ihre Geschwindigkeit von uns weg ist

$$v = \frac{r_2 - r_1}{\Delta t} = \frac{a_2 - a_1}{a_1 \cdot \Delta t} \cdot r_1 = H \cdot r_1 \quad \text{mit} \quad H = \frac{\Delta a}{a \cdot \Delta t}.$$

Der Faktor H ist für alle Galaxien derselbe: v ist proportional zur Entfernung, genau wie beobachtet. H gibt an, um welchen Bruchteil die Abstände pro Zeiteinheit wachsen; sein heutiger Wert ist die Hubble-Konstante H_0. Mit $H_0 = 70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ wachsen alle kosmischen Abstände heute um etwa 0,7 % in 100 Millionen Jahren. Weil Abbildung 152 von jeder Galaxie aus gleich aussieht, beobachtet jeder Beobachter in jeder Galaxie dieselbe Hubble-Relation: Das Universum hat **keinen Mittelpunkt** der Expansion.

Merksatz

Kosmische Expansion

- Der Raum dehnt sich aus; alle Abstände zwischen nicht gebundenen Galaxien wachsen mit dem **Skalenfaktor** $a(t)$, heute $a = 1$.
- Daraus folgt $v = H \cdot r$ mit $H = \frac{\Delta a}{a \cdot \Delta t}$, heute $H = H_0$.
- **Kosmologische Rotverschiebung:** Während das Licht unterwegs ist, wird seine Wellenlänge mit dem Raum gedehnt. Wurde es ausgesandt, als der Skalenfaktor a war, gilt

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{beob}}}{\lambda_{\text{aus}}} = \frac{1}{a}.$$

Streng genommen ist die Rotverschiebung ferner Galaxien also **kein** Doppler-Effekt, sondern eine Dehnung der Lichtwellen mit dem Raum. Für kleine z ergibt sie dieselbe Formel $v \approx c \cdot z$; bei großen z aber nicht. Eine Galaxie mit $z = 2$ entfernt sich nicht mit doppelter Lichtgeschwindigkeit, sondern ihr Licht wurde ausgesandt, als alle Abstände im Universum nur ein Drittel so groß waren wie heute ($a = \frac{1}{3}$).

Typischer Fehler

Falsch: Der Urknall war eine Explosion an einem bestimmten Ort; die Galaxien fliegen von diesem Ort aus durch den Raum, und wir sitzen zufällig in der Nähe der Mitte.

Richtig: Der Raum selbst dehnt sich aus, überall gleichzeitig. Jeder Beobachter in jeder Galaxie sieht alle anderen Galaxien nach der Hubble-Relation fliehen; einen Mittelpunkt gibt es nicht.

Gute Modelle sind ein Hefeteig mit Rosinen, der beim Gehen aufgeht (aber ohne Rand), oder die Oberfläche eines Luftballons mit aufgemalten Punkten (aber nur zweidimensional).

Typischer Fehler

Falsch: Weil sich das Universum ausdehnt, werden auch die Erde, das Sonnensystem und die Milchstraße immer größer.

Richtig: Systeme, die durch Schwerkraft oder elektrische Kräfte zusammengehalten werden – Atome, Planeten, Sterne, Galaxien, auch die Lokale Gruppe – dehnen sich nicht mit aus.

Die Expansion zeigt sich nur in den Abständen zwischen Galaxiengruppen und -haufen.

5.4 Hubble-Zeit und Weltalter

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik | Zusatz

Wenn sich alle Galaxien voneinander entfernen, waren sie früher näher beieinander. Hätte sich das Universum immer gleich schnell ausgedehnt, so hätte eine Galaxie in der Entfernung r, die sich mit $v = H_0 r$ entfernt, für diese Strecke die Zeit

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{H_0 r} = \frac{1}{H_0}$$

gebraucht – für **alle** Galaxien dieselbe Zeit. Diese Zeit heißt **Hubble-Zeit**.

Beispiel 5

Mit $1\ \text{Mpc} = 3{,}086 \cdot 10^{19}\ \text{km}$ ist

$$t_H = \frac{1}{H_0} = \frac{3{,}086 \cdot 10^{19}\ \text{km}}{70 \frac{\text{km}}{\text{s}}} \approx 4{,}4 \cdot 10^{17}\ \text{s} \approx 1{,}4 \cdot 10^{10}\ \text{a}\ .$$

Die Hubble-Zeit beträgt also rund 14 Milliarden Jahre.

Die Expansion verlief aber nicht gleichmäßig: Zuerst bremste die Schwerkraft der Materie sie ab, seit etwa sechs Milliarden Jahren beschleunigt sie sich (Kapitel 6). Rechnet man das genau, ergibt sich ein **Weltalter** von **13,8 Milliarden Jahren** (Planck-Satellit, 2018). Dass es so nahe an der Hubble-Zeit liegt, ist ein Zufall unserer Epoche: Abbremsen und Beschleunigen gleichen sich bis heute ungefähr aus. Das Weltalter passt zu den ältesten Sternen, die man kennt – sie sind etwa 13 Milliarden Jahre alt.

Die Hubble-Spannung. Wie groß H_0 genau ist, ist eine der großen offenen Fragen der Kosmologie. Aus der Hintergrundstrahlung (Kapitel 6) folgt mit dem Standardmodell $H_0 = 67{,}4 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ (Planck-Satellit, 2018). Die Entfernungsleiter aus Cepheiden und Supernovae liefert dagegen $H_0 \approx 73 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ (SH0ES-Projekt, 2022). Beide Werte sind auf etwa 1 bis 2 % genau, unterscheiden sich aber um fast 10 %. Andere Verfahren liegen dazwischen. Entweder steckt in einer der Messungen ein noch unentdeckter Fehler, oder dem Standardmodell fehlt etwas. Man nennt diesen Widerspruch die **Hubble-Spannung**; aufgelöst ist er bisher nicht.

Typischer Fehler

Falsch: Die Hubble-Konstante ist eine Naturkonstante, die sich nie ändert.

Richtig: Sie heißt Konstante, weil sie heute überall im Universum denselben Wert hat. Mit der Zeit ändert sich die Expansionsrate H aber: Früher war sie viel größer.

H_0 bezeichnet ihren heutigen Wert.

Fachbegriffe: Rotverschiebung · Doppler-Effekt · Fluchtgeschwindigkeit · Hubble-Diagramm · Hubble-Relation · Hubble-Konstante · Eigenbewegung · Expansion · Skalenfaktor · kosmologische Rotverschiebung · Hubble-Zeit · Weltalter · Hubble-Spannung

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Hubble-Diagramm** ↗ · **Doppler-Effekt** ↗ · **Linienspektren und Energieniveaus** ↗



6 Urknall und Entwicklung des Universums

6.1 Vom statischen zum dynamischen Universum

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Noch Anfang des 20. Jahrhunderts hielten fast alle Forscher das Universum für ewig und unveränderlich. Albert Einstein wandte 1917 seine Allgemeine Relativitätstheorie auf das Universum als Ganzes an und fand, dass ein mit Materie gefülltes Universum nicht stillstehen kann: Es müsste sich zusammenziehen oder ausdehnen. Um trotzdem ein **statisches Universum** zu erhalten, fügte er seinen Gleichungen eine zusätzliche Größe hinzu, die **kosmologische Konstante**. Alexander Friedmann (1922) und Georges Lemaître (1927) zeigten, dass die Gleichungen auch Lösungen für ein sich ausdehnendes, **dynamisches Universum** haben. Nach Hubbles Messungen gab Einstein das statische Modell auf.

Lemaître zog 1931 die Konsequenz: Wenn sich das Universum ausdehnt, muss es früher dichter und heißer gewesen sein, und es muss einen Anfang gehabt haben. Das ist die Grundidee des **Urknallmodells**. Lange hatte es eine Konkurrenz, das Steady-State-Modell von Fred Hoyle und anderen (1948): Das Universum dehnt sich zwar aus, aber in den entstehenden Lücken bildet sich ständig neue Materie, sodass es immer gleich aussieht und keinen Anfang hat. Ausgerechnet Hoyle prägte 1949 im Rundfunk spöttisch den Namen „Big Bang“. Entschieden wurde der Streit durch Beobachtungen, vor allem durch die Entdeckung der Hintergrundstrahlung 1965, die nur das Urknallmodell erklärt.

So zeigt sich an der Kosmologie, wie Modelle in der Astronomie arbeiten: Ein Modell muss überprüfbare Vorhersagen machen; es wird beibehalten, solange die Beobachtungen zu ihm passen, und verworfen oder verbessert, wenn sie ihm widersprechen.

Typischer Fehler

Falsch: Der Urknall war eine Explosion, bei der Materie von einem Punkt aus in einen leeren Raum geschleudert wurde.

Richtig: Der Urknall bezeichnet den heißen, dichten Anfangszustand des **ganzen** Universums, der überall zugleich herrschte. Raum und Zeit entstanden nach heutigem Verständnis mit ihm; es gab kein „Außen“, in das etwas fliegen konnte.

Was genau im allerersten Augenblick geschah, kann die heutige Physik nicht beschreiben.

Warum ist es nachts dunkel?

Wäre das Universum unendlich groß, unendlich alt, unveränderlich und überall mit Sternen gefüllt, so träfe jede Blickrichtung irgendwann auf eine Sternoberfläche, und der ganze Himmel wäre so hell wie die Sonnenoberfläche. Dieses **Olberssche Paradoxon** (nach Wilhelm Olbers, 1823) löst das Urknallmodell: Weil das Universum erst 13,8 Milliarden Jahre alt ist, kann uns nur Licht aus einem begrenzten Gebiet erreicht haben, und die Sterne leben nicht ewig. Zusätzlich schwächt die Rotverschiebung das Licht ferner Galaxien. Der dunkle Nachthimmel ist also selbst ein Hinweis darauf, dass das Universum einen Anfang hatte.

6.2 Die ersten Minuten: Entstehung der Elemente

Basisfach Astrophysik | Zusatz

Lässt man die Expansion in Gedanken rückwärts laufen, wird das Universum immer dichter und heißer, denn die Temperatur der Strahlung ist umgekehrt proportional zum Skalenfaktor: $T \sim \frac{1}{a}$. Eine Sekunde nach dem Urknall herrschten etwa zehn Milliarden Kelvin; das Universum war eine Suppe aus Protonen, Neutronen, Elektronen, Photonen und Neutrinos, viel heißer als das Innere jedes Sterns.

Nach etwa drei Minuten war es auf rund eine Milliarde Kelvin abgekühlt. Jetzt konnten Protonen und Neutronen zu Atomkernen verschmelzen, ohne sofort wieder zerschlagen zu werden – vor allem zu Helium-4. Nach etwa zwanzig Minuten war das Universum zu kühl und zu dünn für weitere Fusionen. Das Ergebnis dieser **primordialen Nukleosynthese** (Elemententstehung am Anfang): rund 75 % Wasserstoff und 25 % Helium (Massenanteile), dazu Spuren von Deuterium, Helium-3 und Lithium. Alle schwereren Elemente, aus denen Planeten und Lebewesen bestehen, sind erst viel später in Sternen entstanden (Skript AS9).

Genau diese Mischung findet man in den ältesten Sternen und in fernen, unberührten Gaswolken, und das Urknallmodell sagt sie aus bekannter Kernphysik vorher. Die beobachtete Menge an Deuterium hängt dabei empfindlich davon ab, wie viel gewöhnliche Materie es gibt – und zeigt, dass gewöhnliche Materie nur rund 5 % des Universums ausmacht.

6.3 Die kosmische Hintergrundstrahlung

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

In den ersten Jahrhunderttausenden war das Universum ein glühendes **Plasma** aus Atomkernen und freien Elektronen. Licht kam darin nicht weit: Die Photonen wurden ständig an den freien Elektronen gestreut, wie Licht im Nebel. Das Universum war undurchsichtig. Erst als es sich auf etwa 3000 Kelvin abgekühlt hatte, rund **380 000 Jahre nach dem Urknall**, verbanden sich die Elektronen mit den Atomkernen zu neutralen **Atomen**. Neutrale Atome streuen das Licht kaum, und das Universum wurde schlagartig durchsichtig.

Die Strahlung dieses Augenblicks erfüllt seitdem den ganzen Raum. Damals war sie die Wärmestrahlung eines 3000 K heißen Gases, rötlich-gelb wie eine Glühlampe. Seitdem hat sich das Universum etwa um den Faktor 1100 ausgedehnt ($z \approx 1100$), und mit ihm wurden die Wellenlängen gedehnt. Heute ist es Mikrowellenstrahlung mit dem Spektrum eines Schwarzen Körpers von nur **2,725 K**, die **kosmische Hintergrundstrahlung**.

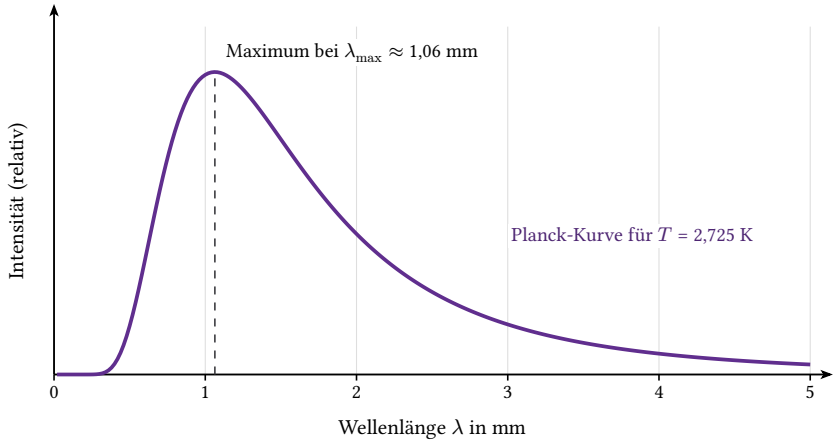


Abbildung 153: Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung: eine Planck-Kurve für 2,725 K mit dem Maximum bei gut 1 mm Wellenlänge, im Mikrowellenbereich (berechnet). Die Messwerte des Satelliten COBE liegen so genau auf dieser Kurve, dass ihre Fehlerbalken in der Zeichnung nicht zu sehen wären.

Vorhergesagt hatten diese Strahlung George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman schon 1948. Entdeckt wurde sie 1964/65 zufällig von Arno Penzias und Robert Wilson, die ein störendes Rauschen in ihrer Radioantenne nicht loswurden – es kam gleichmäßig aus allen Richtungen (Nobelpreis 1978). Die Satelliten COBE (1989), WMAP (2001) und Planck (2009) haben sie genau vermessen. Sie ist in allen Richtungen fast gleich hell, aber nicht ganz: Es gibt winzige Temperaturschwankungen von etwa einem Hunderttausendstel. Das sind die Spuren der Dichteunterschiede im frühen Universum, aus denen durch die Schwerkraft später Galaxien, Haufen und das kosmische Netz wuchsen.

Merksatz

Kosmische Hintergrundstrahlung

- Ausgesandt rund 380 000 Jahre nach dem Urknall, als sich Atome bildeten und das Universum durchsichtig wurde, bei etwa 3000 K.
- Heute: Schwarzkörperstrahlung von $T = 2{,}725\ \mathrm{K}$ im Mikrowellenbereich, um den Faktor $1 + z \approx 1100$ gedehnt, aus allen Richtungen fast gleich stark.
- Sie ist das älteste Licht, das wir sehen können; ihre winzigen Schwankungen sind die Keime der Galaxien.

6.4 Von den ersten Sternen bis heute

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Nach der Entstehung der Atome folgte eine Zeit ohne jede Lichtquelle, die „dunklen Zeitalter“. In den dichtesten Klumpen aus Dunkler Materie sammelte sich Gas. Nach etwa 100 bis 200 Millionen Jahren leuchteten die ersten Sterne auf: vermutlich sehr massereiche Sterne aus reinem Wasserstoff und Helium, die nach wenigen Millionen Jahren als Supernovae explodierten und die ersten schweren Elemente verstreuten. Aus Sternhaufen und kleinen Galaxien wuchsen

durch Verschmelzungen die großen Galaxien (Kapitel 3). Vor 4,6 Milliarden Jahren, also gut 9 Milliarden Jahre nach dem Urknall, entstand in einer Spiralgalaxie die Sonne mit ihren Planeten.

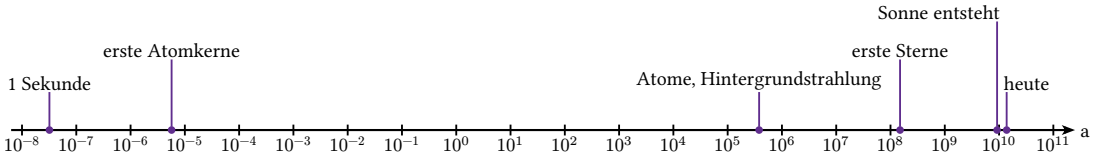


Abbildung 154: Die Geschichte des Universums auf einer logarithmischen Zeitachse (Zeit seit dem Urknall in Jahren, gerundet). Was vor der ersten Sekunde geschah, links außerhalb der Achse, beschreibt man nur mit Theorien, die noch nicht durch Beobachtungen gesichert sind.

Zeit nach dem Urknall	Temperatur	Ereignis
1 Sekunde	10^{10} K	Protonen, Neutronen, Elektronen, Photonen, Neutrinos
3 bis 20 Minuten	10^{9} K	Entstehung der Atomkerne: 75 % Wasserstoff, 25 % Helium
380 000 Jahre	3000 K	Atome entstehen, das Universum wird durchsichtig: Hintergrundstrahlung
100 bis 200 Mio. Jahre	50 bis 80 K	erste Sterne, danach erste Galaxien
rund 7,7 Mrd. Jahre	rund 4,5 K	die Expansion beginnt sich zu beschleunigen
9,2 Mrd. Jahre	rund 3,9 K	Sonne und Erde entstehen
13,8 Mrd. Jahre	2,725 K	heute

Tabelle 52: Zeittafel des Universums nach dem kosmologischen Standardmodell (gerundet; Temperatur der Hintergrundstrahlung).

6.5 Beschleunigte Expansion und Dunkle Energie

Wahlfach Astronomie | Basisfach Astrophysik

Lange erwartete man, dass die Schwerkraft aller Materie die Expansion allmählich abbremst. Um das zu messen, verfolgten zwei Forschergruppen in den 1990er-Jahren Supernovae vom Typ Ia in sehr fernen Galaxien. 1998 kamen beide zum selben, verblüffenden Ergebnis: Die fernen Supernovae waren **schwächer**, also weiter entfernt, als sie es in einem gebremsten Universum hätten sein dürfen. Die Expansion verlangsamt sich nicht, sie **beschleunigt** sich – seit etwa sechs Milliarden Jahren. Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess erhielten dafür 2011 den Nobelpreis für Physik.

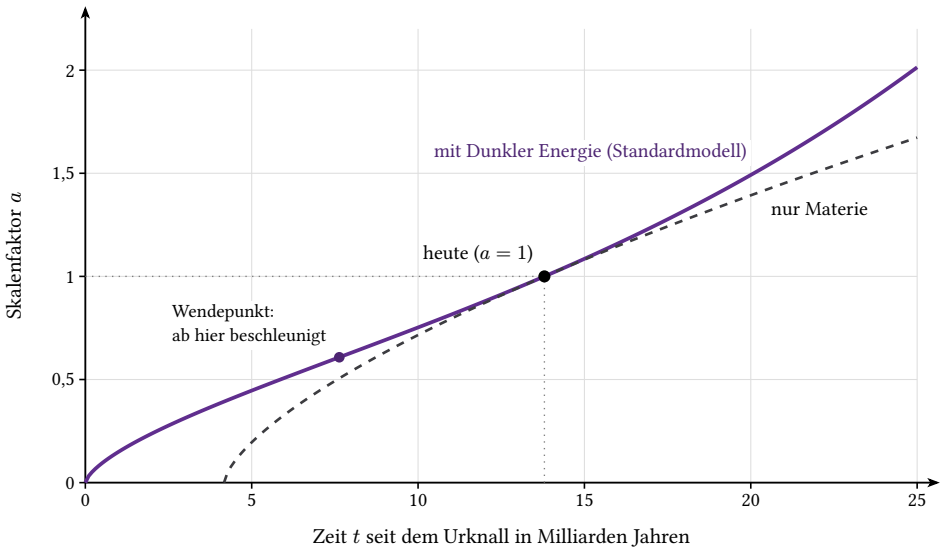


Abbildung 155: Skalenfaktor a über der Zeit im kosmologischen Standardmodell (berechnet mit $H_0 = 67{,}7 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$, 31 % Materie, 69 % Dunkle Energie). Anfangs bremst die Schwerkraft die Expansion, später beschleunigt die Dunkle Energie sie. Gestrichelt: ein Universum nur aus Materie mit derselben heutigen Expansionsrate – es wäre nur 9,6 Milliarden Jahre alt, jünger als die ältesten Sterne.

Was die Expansion antreibt, ist unbekannt. Man nennt es **Dunkle Energie**. Die einfachste Erklärung ist Einsteins kosmologische Konstante: eine Energie, die zum leeren Raum selbst gehört und deshalb nicht verdünnt wird, wenn er sich ausdehnt. Während die Dichte der Materie mit der Expansion abnimmt, bleibt die der Dunklen Energie gleich; seit einigen Milliarden Jahren überwiegt sie.

Zusammen mit der Hintergrundstrahlung, den Galaxienhaufen und dem kosmischen Netz ergibt sich ein stimmiges Bild, das **kosmologische Standardmodell**. Danach besteht der Energieinhalt des Universums zu

- etwa **5 %** aus gewöhnlicher Materie (Atome; davon steckt nur ein kleiner Teil in Sternen),
- etwa **27 %** aus Dunkler Materie,
- etwa **68 %** aus Dunkler Energie (Planck 2018, gerundet).

Was wir sehen und woraus wir bestehen, ist also nur ein kleiner Teil des Ganzen; die beiden größten Anteile verstehen wir nicht. Bleibt die Dunkle Energie so, wie sie ist, wird sich das Universum für immer und immer schneller ausdehnen; ferne Galaxien entschwinden nach und nach aus dem Blick, während die Lokale Gruppe zusammenbleibt. Neuere Messungen der Galaxienverteilung (DESI, 2024 und 2025) deuten allerdings an, dass sich die Dunkle Energie mit der Zeit ändern könnte. Gesichert ist das nicht – die Kosmologie bleibt eine Wissenschaft mit offenen Fragen.

Merksatz

Belege für das Urknallmodell

- **Expansion:** Die Galaxien entfernen sich voneinander nach der Hubble-Relation.
- **Hintergrundstrahlung:** Sie kommt gleichmäßig aus allen Richtungen und hat genau das Spektrum eines Schwarzen Körpers von 2,725 K.
- **Elementhäufigkeit:** Die ältesten Sterne und Gaswolken bestehen zu etwa 75 % aus Wasserstoff und 25 % aus Helium, wie es die Kernfusion in den ersten Minuten vorhersagt.
- **Entwicklung:** Ferne Galaxien, die wir in der Vergangenheit sehen, sind kleiner und unregelmäßiger, Quasare waren häufiger; kein Stern ist älter als das Universum.

Fachbegriffe: statisches Universum · dynamisches Universum · kosmologische Konstante · Urknallmodell · Olberssches Paradoxon · primordiale Nukleosynthese · Plasma · Entstehung der Atome · kosmische Hintergrundstrahlung · beschleunigte Expansion · Dunkle Energie · kosmologisches Standardmodell

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Farbe und Temperatur** ↗ · **Elektromagnetisches Spektrum** ↗

