



**Matthias Steinmetz**

---

## Die Vermessung des Universums

In: Grötschel, Martin u.a. (Hg.): Vision als Aufgabe : das Leibniz-Universum im 21. Jahrhundert. – ISBN: 978-3-939818-67-0. – Berlin: [2016], S. 197-210

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26318](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26318)

---

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany (cc by-nc-sa 3.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Matthias Steinmetz

## Die Vermessung des Universums

Die Astronomie befasst sich seit vielen tausend Jahren mit dem gestirnten Himmel über uns. Dieser gibt jedoch zunächst kaum Zugang zu seiner unermesslichen Tiefe. So war die Astronomie für lange Zeit eine zweidimensionale Wissenschaft, zu der die Bestimmung der Stern- und Planetenörter in Form von Sternkarten sowie die Untersuchung der Bewegungen der Sterne und Planeten im Tages- und Jahresverlauf – das Kalender- und Zeitwesen – zählten. Nach wie vor sprechen wir vom Firmament als sei es eine große Kugelfläche, an der die Fixsterne angebracht sind, und vor deren Hintergrund sich Sonne, Mond und Planeten bewegen. Das Kalenderwesen war im späten 17. Jahrhundert eine wesentliche Problematik, denn die protestantischen Staaten folgten noch dem Julianischen Kalender, bei dem Jahrhunderte Schaltjahre sind, während die katholischen Länder dem von Papst Gregor XIII. im Jahre 1582 etablierten und genaueren Gregorianischen Kalender folgten, in dem Jahrhunderte nur dann Schaltjahre sind, wenn sie sich ohne Rest durch 400 teilen lassen. Ende des 17. Jahrhunderts betrug die Differenz nicht nur bereits 10 Tage, das (nicht durch 400 teilbare) Jahr 1700 drohte den Unterschied um einen weiteren Tag zu vergrößern. Da sich zudem das Osterdatum an dem Mondkalender orientiert, konnte dies zu Unterschieden von bis zu fünf Wochen bei der Berechnung des Osterdatums und der darauf beruhenden kirchlichen Feiertage führen. Gottfried Wilhelm Leibniz sah hier eine Möglichkeit, seine Vorstellung einer Brandenburgischen Societät, der Vorgängerinstitution der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, in die Tat umzusetzen. Die Gründung der Akademie im Jahr 1700 war verbunden mit der Etablierung einer Sternwarte sowie der Erteilung eines Kalenderpatents, das der Sternwarte ein Monopol in der Berechnung und dem Vertrieb von Kalendern in den preußischen Territorien verschaffte (Dick und Fritze 2000). Die Erträge des Kalenderpatents waren bis ins 19. Jahrhundert hinein die wesentliche Einnahmequelle der Akademie.

Ein historischer Höhepunkt in der Geschichte der Berliner Sternwarte, eine Vorgängerinstitution des heutigen Leibniz-Instituts für Astrophysik Potsdam (AIP), war die Entdeckung des Planeten Neptun 1846. Diese ist maßgeblich auf das von der Akademie herausgegebene Kartenmaterial von Bremiker zurückzuführen (Encke 1846). Nur damit konnte festgestellt werden, dass (i) sich in der Nähe zu der von Le Verrier berechneten Position in der Tat ein Objekt befand, das in den für Objekte dieser Helligkeit vollständigen Sternenkarte nicht erfasst war, und (ii) sich dieses Objekt im Verhältnis zu den Sternen im Umfeld bewegte.

Erst in den letzten beiden Jahrhunderten begann die Astronomie, sich systematisch der Messung von Entfernungen zu widmen. Dies nahm seinen Anfang mit der Bestimmung der ersten Fixsternparallaxe (siehe unten, Bessel 1838). Erst die Entwicklung der Spektroskopie, also der Zerlegung des Lichts in seine Bestandteile als Methode der Ferndiagnose, und des sich daraus Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelnden neuen Gebiets der Astrophysik, erlaubte es dann, mit

Hilfe der im Labor erprobten physikalischen Gesetze systematisch in immer größere Tiefen des Kosmos vorzudringen.

### 1 *Wie misst man kosmische Entfernungen?*

Hauptgrund für die Unzugänglichkeit der dritten Dimension unseres Kosmos ist seine schiefe Größe. In der allgemeinverständlichen Literatur werden Entfernungen üblicherweise in Lichtjahren angegeben,<sup>1</sup> also der Entfernung, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von knapp 300 000 km/sec innerhalb eines Jahres zurücklegt. Das uns nächste kosmische Objekt, der 384 000 km entfernte Mond, befindet sich demnach in einem Abstand von 1,3 Lichtsekunden; die 149,6 Millionen km entfernte Sonne im Abstand von gut 8 Lichtminuten; der nächste Stern Proxima Centauri 4,26 Lichtjahre; das Zentrum unserer Milchstraße rund 25 000 Lichtjahre; das am weitesten entfernte, noch mit bloßem Auge beobachtbare Objekt – die Andromedagalaxie – 2,5 Millionen Lichtjahre; die am weitesten entfernten, mit Großteleskopen beobachtbaren Galaxien etwa 13 Milliarden Lichtjahre.

Welche Möglichkeiten haben wir überhaupt, kosmische Entfernungen zu bestimmen? Es gibt eine Vielzahl von Methoden, weit mehr als hier dargestellt werden können. De facto wird jede physikalische oder astrophysikalisch festgestellte Gesetzmäßigkeit benutzt, Entfernungen zu bestimmen (für einen Überblick, siehe Weigert, Wendker und Wisotzki, 2010). Die verschiedenen Methoden lassen sich jedoch in vier Klassen unterteilen:

- (1) direkte Methoden
- (2) Parallaxen
- (3) Standardkerzen
- (4) Standardzollstöcke

Zu den *direkten Methoden* muss hier nicht viel gesagt werden, sie sind aus der Alltagserfahrung bekannt. Beispiele sind das Metermaß oder die Lichtlaufzeit, wie sie auch in laserbasierten Entfernungsmessern benutzt wird. Ihre Anwendung bleibt jedoch auf das Irdische sowie den nahen Weltraum beschränkt. Die weiteste, direkt gemessene Entfernung ist die Lichtlaufzeit zu der am 20. August 1977 gestarteten Raumsonde Voyager 2, die sich derzeit im Abstand von 15 Lichtstunden (oder 16,2 Milliarden km) befindet. Sie hat 2007 unser Sonnensystem verlassen und befindet sich nun im interstellaren Raum.

Die fundamentale Messmethode für Entfernungen in der Astronomie ist die sogenannte *Parallaxe*. Auf Grund der Bewegung der Erde um die Sonne verschiebt sich die Position eines nahen Sterns im Verhältnis zu den weiter entfernten Hintergrundsternen (siehe Abb. 1). Dieser Effekt ist auch für nahe Sterne sehr klein, aber messbar. So beschreibt ein Stern in einer Entfernung von 3,26 Lichtjahren (1 Parsec) am Himmel eine Ellipsenbahn mit dem Durchmesser von 1'' (eine Bogensekunde oder  $\frac{1}{3600}$  eines Grades).

Größere Entfernungen im Kosmos werden dann mit Hilfe von sogenannten *Standardkerzen* ausgelotet. Darunter verstehen wir Objekte, deren absolute Helligkeit wir auf Grund von physikalischen Gesetzmäßigkeiten kennen oder zumindest einschränken können. Da die Helligkeit eines Objekts quadratisch mit seinem Abstand abnimmt, können wir durch den



Abbildung 1. Parallaxe eines Vordergrundsterns vor den Hintergrundsternen, erzeugt durch die Bewegung der Erde um die Sonne

Vergleich der absoluten Helligkeit mit der gemessenen scheinbaren Helligkeit auf die Entfernung schließen. Das zugrundeliegende Prinzip verwenden wir intuitiv auch im täglichen Leben, z. B. wenn wir des Nachts auf einer Landstraße die Entfernung eines entgegenkommenden Wagens auf Grund der Helligkeit seiner Scheinwerfer abschätzen.

Eine ähnliche Methode ist die der *Standardzollstöcke*, nur dass hier anstatt des Vergleichs von absoluter und scheinbarer Helligkeit eines Objekts die Größe eines Objekts bekannten Ausmaßes herangezogen wird. Auch hier können wir auf die Erfahrung im täglichen Leben verweisen: weit entfernte Objekte erscheinen kleiner als nahe.

## 2 Die kosmische Entfernungsleiter

Die systematische Vermessung unseres Kosmos geschieht folglich über eine Sammlung verschiedener Entfernungsindikatoren. Jeder für sich ist über einen gewissen Entfernungsbereich anwendbar. Durch Überlappungen in den Grenzbereichen ist es möglich, die verschiedenen Indikatoren zu kalibrieren (siehe Abb. 2). Man spricht auch von der „kosmischen Entfernungsleiter“, deren verschiedene Sprossen hier vorgestellt werden sollen:

- (1) Am Beginn der Entfernungsleiter steht zunächst die Bestimmung der Größe unserer Erde durch direkte Methoden. Die Ermittlung der Entfernung zur Sonne und zu den anderen Planeten des Sonnensystems erfolgt dann über Parallaxen (mit dem Erddurchmesser als Basislänge) und Lichtlaufzeiten (Radarechos).
- (2) Die nächste Sprosse der Entfernungsleiter stellt die Messung der Parallaxen von nahen Sternen dar. Für diese dient nun die Umlaufbahn der Erde um die Sonne als Basislänge. Diese Messungen gelingen derzeit bis zu Entfernungen von wenigen hundert Lichtjahren. In naher Zukunft wird aber der Gaia-Satellit auf Grund präziserer Positionsbestimmungen erlauben, diese Methode zu deutlich größeren Entfernungen zu erweitern (Prusti 2012).

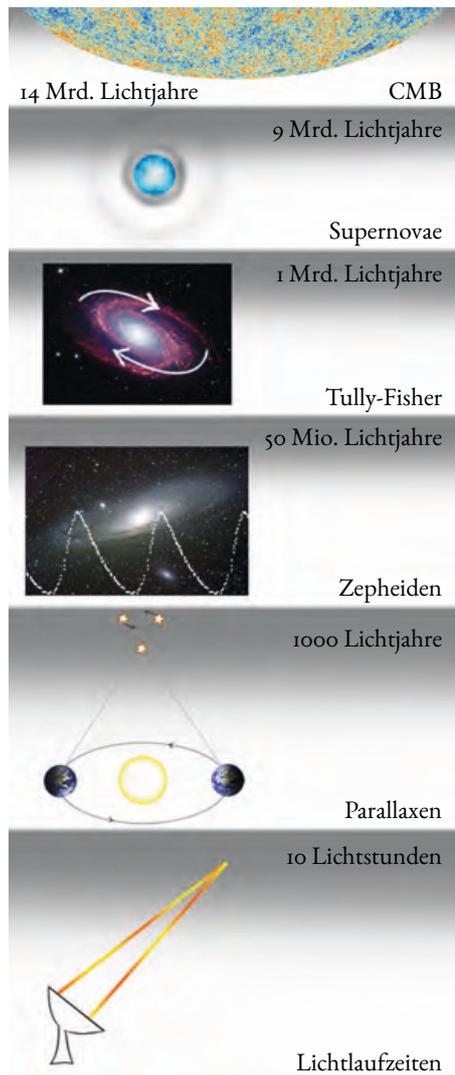


Abbildung 2. Die kosmische Entfernungsleiter

- (3) Anhand parallaktischer Messung von Sternhaufen wie den Plejaden, also Ansammlungen von Objekten gleicher Entfernung, gleichen Alters und gleicher chemischer Komposition, können dann Gesetzmäßigkeiten für die Leuchtkräfte der Sterne in diesen Sternhaufen abgeleitet werden (z. B. die Leuchtkraft der hellsten Sterne). Mittels dieser Sterne lassen sich dann auch die äußeren Bereiche unserer Milchstraße vermessen. Insbesondere erhalten wir aber Zugang zu den sogenannten Zepheidensternen.
- (4) Zepheidensterne (nach dem Stern  $\delta$  Cephei als Prototyp dieser Sternart) gehören zu der Klasse der veränderlichen Sterne. Dabei zeigen sie eine erstaunliche Gesetzmäßigkeit zwischen der Periode ihrer Helligkeitsschwankungen und ihrer intrinsischen Leuchtkraft (siehe Abb. 3, Leavitt und Pickering, 1912). Der Mechanismus dahinter ist gut verstanden: eine thermodynamische Schwingung zwischen zwei metastabilen Zuständen, oft verglichen mit dem Klappern eines Deckels auf einem Topf mit kochendem Wasser. Durch eine einfache Zeitreihe, also der Messung der Sternhelligkeit über mehrere Tage oder Wochen kann so

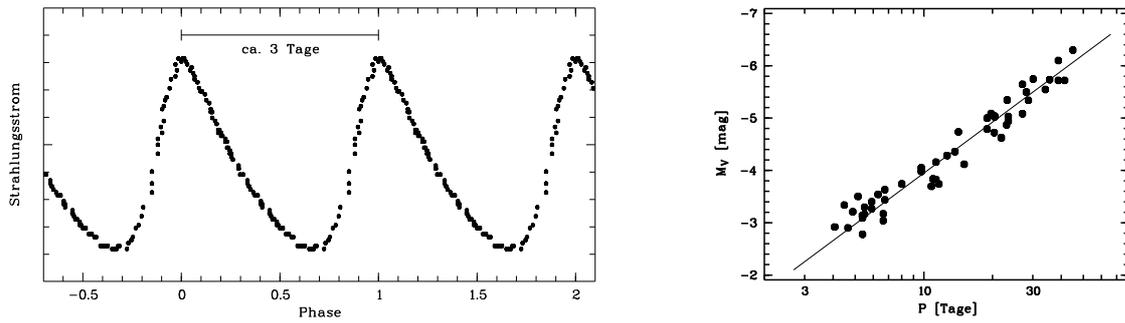


Abbildung 3. Links: Helligkeitsverlauf mit der Zeit des Zepheidensterns  $\delta$  Cephei. Rechts: Periode–Helligkeits-Relation für klassische Zepheidensterne in der Scheibe der Milchstraße

die Helligkeit des Zepheidensterns und über die Perioden–Helligkeits-Beziehung seine Entfernung bestimmt werden. Zudem sind Zepheidensterne sehr hell und können somit auch in benachbarten Galaxien bis hin zum Virgo-Galaxienhaufen beobachtet werden, d. h., wir erhalten einen Maßstab für extragalaktische Distanzen (siehe Abb. 4).



Abbildung 4. Zepheidenstern VI in unserer Nachbargalaxie M31 (Andromedanebel), aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop

- (5) Mittels der Zepheidendistanzen können wir die Entfernung zu einer Zahl von Galaxien messen. Viele dieser Galaxien ähneln auch der Form nach unserer Milchstraße, einer gewaltigen Scheibe mit einigen Zehntausend Lichtjahren Durchmesser, die mit einigen 100 km/s um ihre Achse rotiert. Dabei zeigen auch Galaxien eine erstaunliche Gesetzmäßigkeit: die Leuchtkraft skaliert mit der vierten Potenz der Rotationsgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wird nach seinen Entdeckern auch als Tully-Fisher-Beziehung bezeichnet (Tully und Fisher 1977). Die Rotationsgeschwindigkeit ist wiederum durch die sogenannte Dopplerverschiebung spektroskopisch vergleichsweise einfach zu bestimmen: Bewegt sich die eine Seite der Galaxie von uns weg, ist das Licht rotverschoben. Die Bewegung der anderen Seite auf uns zu resultiert in einer Blauverschiebung. Mit der Tully-Fisher-Beziehung sind Entfernungsmessungen von einigen hundert Millionen Lichtjahren möglich. Die Grenzen sind dabei eher systematischer Art, denn es werden nunmehr kosmologische Entfernungen vermessen und der Kosmos entwickelt sich sowohl als Ganzes, als auch seine einzelnen Bestandteile – die Galaxien. Es ist nach wie vor ein Forschungsgegenstand, wie sich die Tully-Fisher-Beziehung gegebenenfalls systematisch mit dem Alter des Kosmos bzw. der Galaxien ändert.
- (6) Eine zweite, auf kosmologischen Skalen anwendbare Standardkerze sind die Supernovae vom Typ Ia (für einen Überblick siehe Perlmutter 2003). Diese spezielle Klasse von Supernovae sind thermonukleare Explosionen von Sternüberresten, sogenannten Weißen Zwergsternen. Diese sind Objekte mit einer Masse vergleichbar mit unserer Sonne, aber zusammengepresst in ein viel kleineres Volumen, vergleichbar mit dem unserer Erde. Die Materie in solchen Sternen ist so stark kondensiert, dass sie die physikalische Grenze, gegeben durch die Gesetze der Quantenmechanik, insbesondere das sogenannte Pauli-Prinzip, erreichen. Jenseits der sogenannten Chandrasekhar-Masse von 1,4 Sonnenmassen gibt es keinen stabilen Gleichgewichtszustand. In einer thermonuklearen Explosion wird diese Masse von Kohlenstoff in Nickel fusioniert. Damit sind die Menge des vorhandenen „Brennstoffs“ wie auch die in der Reaktion freigesetzte Energie bekannt. Alle Typ Ia-Supernovae haben folglich eine vergleichbare, bekannte Helligkeit, können also als Standardkerze benutzt werden. Zudem sind die freigesetzten Energiemengen gewaltig – für einige Tage leuchten sie mit einer Helligkeit vergleichbar mit der Leuchtkraft ganzer Galaxien – und können somit auch über weiteste kosmische Entfernungen nachgewiesen werden.
- (7) Die letzte Stufe der kosmischen Entfernungsleiter ist der Urknall selbst. Die frühe, heiße Phase des Kosmos hat eine gleichförmige thermische Strahlung hinterlassen, die heute im Mikrowellenbereich entsprechend einer Temperatur von 2,7 K nachgewiesen werden kann. Überlagert sind kleine Temperaturschwankungen erzeugt durch Schallwellen im frühen Kosmos (siehe Abb. 5). Die Schallgeschwindigkeit des heißen Plasmas ist mit Hilfe der Gesetze der Thermodynamik bestimmbar. Ebenso bekannt ist die Schalllaufzeit, gegeben durch das Alter des Universums zu dem Zeitpunkt, als das frühe heiße Universum durchsichtig wurde und die Strahlung sich von den kosmischen Atomen abkoppelte. Die typische Größe der Flecken auf der Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung, wie sie z. B. von dem ESA-Satelliten Planck erfasst wurde, beträgt ein halbes Grad. Sie entspricht der Grundmode der akustischen Schwingungen im frühen Kosmos und ist vergleichbar mit dem Grundton der Saite einer Geige. Die Wellenlänge dieses Grundtons ist ermittelbar und mit Hilfe dieses Standardzollstocks lässt sich schließlich die Raumkrümmung des Kosmos vermessen.

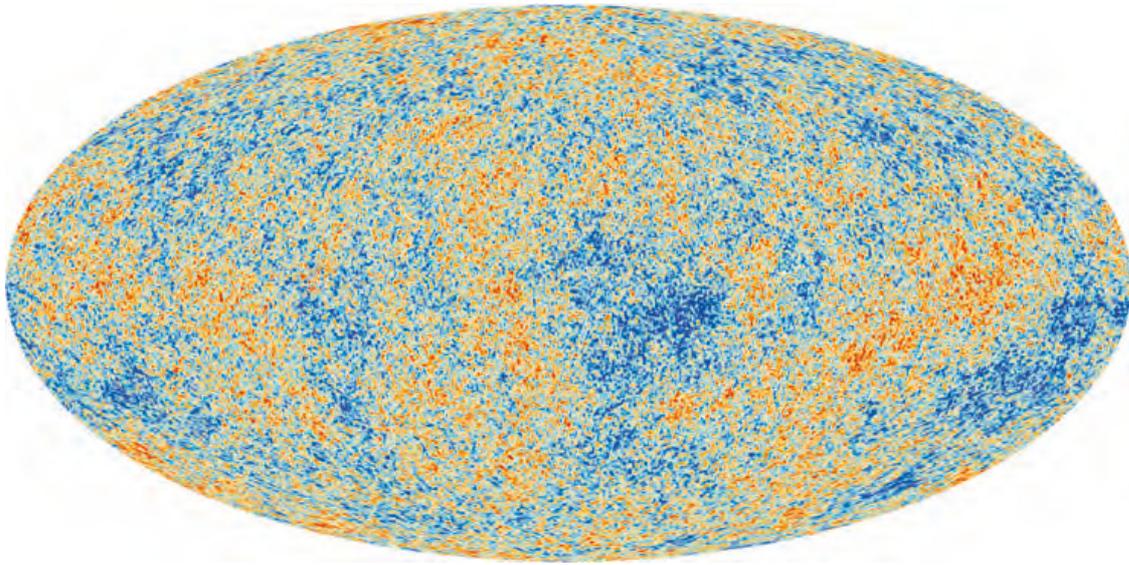
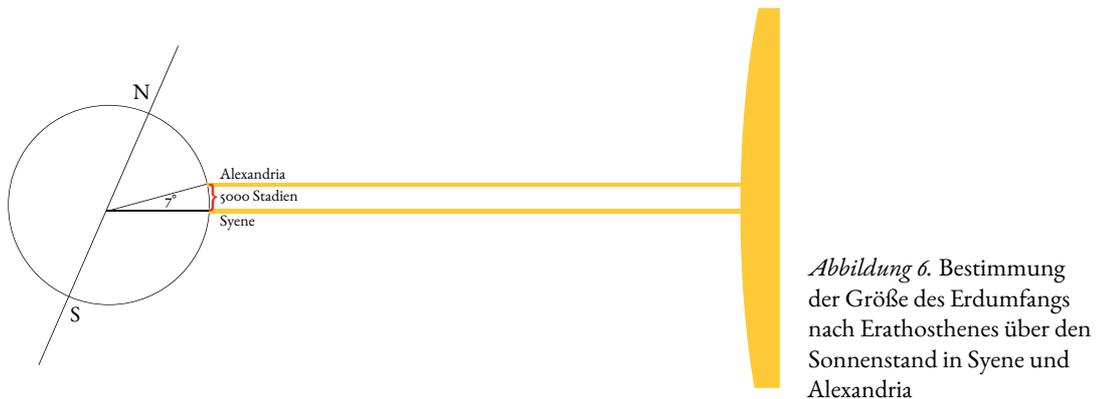


Abbildung 5. Temperaturkarte der kosmischen Hintergrundstrahlung, wie sie vom Planck-Satelliten aufgenommen wurde (ESA and the Planck Collaboration). Die mittlere Temperatur beträgt 2,73 K, die roten Flecken sind  $1/100\,000$  K heißer, die blauen Gebiete  $1/100\,000$  K kälter.

### 3 Die Größe der „Welt“

Die obige Aufstellung der Entfernungskennlinien zeigt, in welchem Maß unser Verständnis physikalischer Prozesse mit unserem Bild über die Art und Beschaffenheit des Kosmos verknüpft ist. Waren es zunächst noch primär geometrische Überlegungen, mit denen der Kosmos ausgelotet wurde, so wurden seine Weiten doch erst mit der modernen Physik, insbesondere mit Strahlungsgesetzen, Atom- und Kernphysik sowie der allgemeinen Relativitätstheorie, erfass- und begreifbar. Entsprechend änderte sich auch der Begriff „Welt“ von unserer Erde über das Sonnensystem bis hin zur Milchstraße, zu anderen Galaxien und, last but not least, zum expandierenden Kosmos. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über wesentliche „Horizontweiterungen“ und die zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien gegeben werden.

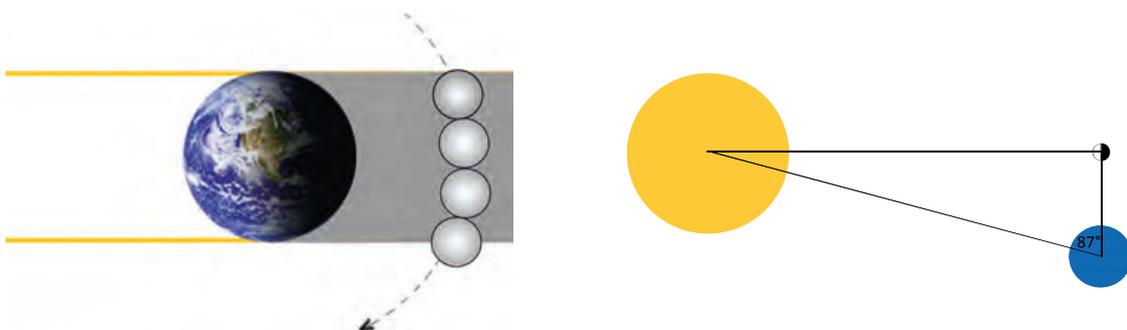
Dass die Erde und auch der Mond von Kugelgestalt sind, ist eine Erkenntnis, die bereits Pythagoras im 5. vorchristlichen Jahrhundert bekannt war, auch wenn sie sich erst 200 Jahre später mit Aristoteles endgültig durchsetzte (für einen Überblick siehe Lovell 1983 oder Weinberg 2015). Für die Erde beruht sie auf der bekannten Beobachtung, dass man bei einem in den Hafen einlaufenden Schiff zuerst den Mast sieht, dann das Deck, bis es schließlich in Gänze sichtbar ist. Ein weiteres Indiz ist die bei Mondfinsternissen beobachtbare Form des Erdschattens, wie bereits um 450 v. Chr. von Anaxagoras bemerkt. Die Form der Schattenlinie auf dem Mond führte Pythagoras zu dem Schluss, dass auch der Mond Kugelgestalt haben sollte. Eratosthenes von Samos nutzte um 200 v. Chr. den Bericht, dass im 5000 Stadien entfernten Syene (das heutige Assuan) zur Sommersonnenwende das Sonnenlicht bis auf den Boden eines tiefen Brunnens vordringen kann – die Sonne also im Zenit steht – während sie sich in Alexandria dem Zenit nur bis auf 7 Grad nähert, zu der Berechnung, dass dann der Erdumfang  $360/7 = 51$  mal größer sein



*Abbildung 6.* Bestimmung der Größe des Erdumfangs nach Eratosthenes über den Sonnenstand in Syene und Alexandria

müsse als der Abstand von Syene nach Alexandria (siehe Abb. 6). Daraus ergab sich mit hoher Genauigkeit ein Erdumfang von 40 000 km in heutigen Einheiten. Die Größe der Welt im Sinne unserer Erdkugel war also bereits vor mehr als 2000 Jahren bekannt!

Nahezu zeitgleich mit Eratosthenes konnte der Geometer Aristarch von Samos erstmals die Größenverhältnisse des Sonnensystems erfassen. Dies geschah mittels der beiden folgenden Beobachtungen: Die Zeitdauer von totalen Mondfinsternissen zeigt, dass der Erdschatten etwa dreimal größer ist als der Monddurchmesser (korrekter Wert: 3,46). Aus der gut messbaren Winkelgröße des Mondes von einem halben Grad ist somit auch der Mondabstand zumindest relativ zum Erddurchmesser bekannt. Die zweite kritische Beobachtung ist die Konstellation von Erde, Mond und Sonne zur Phase des Halbmondes – die drei Himmelskörper bilden ein rechtwinkliges Dreieck mit dem rechten Winkel beim Mond (siehe Abb. 7). Die Messung der Winkeldistanz zwischen Mond und Sonne erlaubt es, mittels elementarer Geometrie den Sonnenabstand relativ zum Mondabstand zu bestimmen. Auch wenn die Messung von Aristarch erhebliche systematische Fehler aufwies – er bestimmte den Winkel zwischen Sonne und Halbmond zu  $87^\circ$ , der korrekte Wert ist  $89,5^\circ$  – so sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen bahnbrechend: die Sonne ist neunzehnmal weiter entfernt als der Mond (korrekter Wert 390 mal) und da sie beide am Himmel gleich groß erscheinen, muss folglich die Sonne 19 mal größer sein als der Mond – oder sechsmal größer als die Erde! Abgesehen davon, dass erstmals die immensen



*Abbildung 7.* Links: Messung der relativen Mondgröße mittels einer Mondfinsternis; Rechts: Bestimmung des relativen Sonnenabstands nach Aristarch

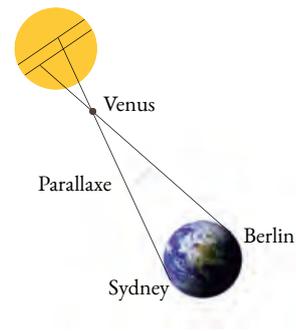


Abbildung 8. Bestimmung der Sonnenparallaxe und damit der Sonnenentfernung durch Messung des Venus-Transits an zwei verschiedenen Orten

Dimensionen des Kosmos erkennbar wurden, schloss Aristarch auch, 1700 Jahre vor Kopernikus, dass es widersinnig sei anzunehmen, die Sonne umkreise die deutlich kleinere Erde. Stattdessen stellte er die Sonne ins Zentrum des Kosmos. Auch wenn die Aristarchschen Werte zu den Größenverhältnissen im Sonnensystem bis in die Neuzeit benutzt wurden, so konnte sich das heliozentrische Weltbild selbst nicht durchsetzen. Wesentlich war hierfür, dass mit der Bewegung der Erde um die Sonne auch eine Fixsternparallaxe folgen musste. Eine solche konnte aber auch der beste Astronom der Antike, Hipparchos von Nicäa, nicht messen. Dieselben Gründe brachten auch noch 1700 Jahre später Tycho Brahe dazu, das heliozentrische Weltbild abzulehnen und sein eigenes vorzuschlagen, in dem die Planeten zwar die Sonne, letztere aber zusammen mit den Planeten die Erde umkreisen.

Im 17. und 18. Jahrhundert näherte sich der Wert für den Abstand der Erde zur Sonne dem heute bekannten an. Johannes Kepler vermutete bereits, dass die Sonne mindestens dreimal weiter entfernt sein müsse, als von Aristarch gemessen, da er ansonsten über den Parallaxeneffekt Positionsänderungen des Mars in den Aufzeichnungen von Tycho Brahe hätte finden müssen. Berühmt sind die Expeditionen in die Südsee 1761 und 1769, um die seltenen Durchgänge der Venus vor der Sonnenscheibe zu beobachten. Durch den Vergleich der Venusbahn, wie sie in Europa gemessen wurde, mit denen von der südlichen Halbkugel (siehe Abb. 8) ergab sich bald eine Sonnendistanz von rund 150 Millionen km, was im Wesentlichen dem heutigen Wert entspricht. Nach wie vor nicht messbar blieb jedoch die Parallaxe der Fixsterne, aber auch die Nicht-Messung war auf Grund der hohen Messgenauigkeit hinreichend, um festzustellen, dass die Fixsterne viele tausendmal weiter entfernt sein müssen als der Sonne–Erdbabstand. Eine unmittelbare Konsequenz ist, dass bei solch großen Abständen die Fixsterne Helligkeiten haben müssen, die denen der Sonne vergleichbar sind. Sterne sind folglich andere Sonnen oder gar Sonnensysteme mit eigenen Planeten – so wie schon im 16. Jahrhundert von Giordano Bruno vermutet. Diese Schlussfolgerungen bestätigten sich schließlich mit der tatsächlichen Bestimmung der Parallaxe des Sterns 61 Cygni durch Bessel im Jahr 1838 (Bessel 1838).

Mit der Erkenntnis der gewaltigen Abstände zwischen den Sternen richtete sich im 18. Jahrhundert die Aufmerksamkeit auf Form und Gestalt der Milchstraße. Thomas Wright und Immanuel Kant argwöhnten um 1750, dass die Milchstraße eine abgeflachte Scheibe von endlichem Ausmaß sei, in deren Zentrum die Sonne stehe. William Herschel, den man wohl als Erfinder des astronomischen Großteleskops bezeichnen kann, widmete sich um 1790 dieser These durch systematische Sternzählungen. Wie wir heute wissen, führte er seine Zählungen unter der falschen,

mangels begründeter Alternativen aber nachvollziehbaren Annahme durch, dass alle Sterne gleich hell seien. Seine Messungen bestätigten die von Kant und Wright vermutete abgeflachte Struktur mit einem Seitenverhältnis von 4 : 1. Thomas Wright vertrat auch die Ansicht, dass die insbesondere von Charles Messier mit dem Fernrohr in zunehmender Zahl entdeckten Nebel nichts anderes seien als andere Sternensysteme, vergleichbar denen der Milchstraße. Andere sahen dagegen in den Nebeln vielmehr Objekte in unserer Milchstraße. Es sollte noch mehr als 150 Jahre dauern, bis auf diese Frage eine Lösung gefunden wurde.

In der Tat herrschte in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein gewisser Totpunkt. Es war unklar, wie die Entwicklung in der Erforschung von Sternen und anderen entfernten Objekten weitergehen sollte, da außer der Entfernungsmessung mittels Parallaxe für ein paar wenige Objekte kein anderer Zugang bestand. 1835 schrieb etwa der französische Philosoph Auguste Comte „Wir können uns Möglichkeiten vorstellen, ihre Form, Größe und Bewegungen zu bestimmen, niemals aber werden wir – auf welche Art auch immer – die Möglichkeit haben, ihre chemische Komposition zu bestimmen“. 24 Jahre später wurde diese Mutmaßung widerlegt durch die Methode der Spektralanalyse von Kirchhoff und Bunsen. Sie erlaubte es, aus den Spektren heißer Gase, die auf der Quantisierung beruhenden charakteristischen Linien verschiedener Elemente zu messen und somit die chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Die Anwendung im Bereich der Astronomie erfolgte umgehend: 1863 zeigte Huggins in England, dass die Sonne aus denselben chemischen Elementen besteht wie die Erde. Der Begriff der „Astrophysik“ wurde geprägt. 1865 wurde der erste Lehrstuhl für „physikalische Astronomie“ in Leipzig eingerichtet. 1868 beobachtete Jule Janssen während einer Sonnenfinsternis in Indien in der Sonnenkorona das bis dato unbekannte chemische Element „Helium“, kurz darauf bestätigte Norman Lockyer auch direkt im Spektrum der Sonne diese Messung. Auf der Erde wurde Helium erst fast 14 Jahre später in den Ausgasungen von Vulkanen nachgewiesen. 1874 erfolgte schließlich in Potsdam die Gründung des „astrophysikalischen Observatoriums“, einer Einrichtung, die sich ausschließlich diesem neuen Forschungszweig widmen sollte. Mit den neuen Erkenntnissen zu den Strahlungsgesetzen, zur Atomphysik und schließlich zur Kernphysik ließen sich in der Folge die Sterne bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften charakterisieren und eine umfassende Theorie zum Aufbau und zu der Entwicklung von Sternen entwickeln.

Mit diesem Handwerkzeug konnte sich die Astronomie wieder den Fragen widmen, die schon Thomas Wright und William Herschel beschäftigt hatten: Wie groß ist die Milchstraße? Wo ist der Platz der Sonne in ihr? Und was sind die Spiralnebel? Sind es Objekte in unserer Milchstraße oder extragalaktische Systeme vergleichbar unserer Galaxis? Mit der Beantwortung dieser Fragen sollten dann auch Alter und Größe des Kosmos in den Fokus rücken. Zunächst jedoch entstanden eine veritable Diskrepanz und Debatte, auf deren einen Seite Herber Curtis, auf der anderen Harlow Shapley standen. Dieser auch als „die große Debatte“ oder Shapley–Curtis-Debatte bekannte Disput fand am 26. April 1920 im Baird-Auditorium des National Museum of Natural History in Washington statt (Shapley und Curtis 1920). Curtis vertrat darin die Auffassung, dass die Milchstraße nur einige zehntausend Lichtjahre groß sei, also etwa ein Fünftel des heute bestimmten Werts, mit der Sonne nahe ihres Zentrums. Die Spiralnebel sah er als andere Milchstraßensysteme an. Seine Sicht beruhte maßgeblich auch auf Arbeiten von Jacobus Kapteyn in Groningen, der wie einst Herschel Sterne in der Ebene unserer Milchstraße vermaß (Kapteyn 1922). Dank der Erkenntnisse der Astrophysik musste er aber nicht mehr

davon ausgehen, dass alle Sterne gleich hell sind. Das Ergebnis von Kapteyn war aber quantitativ vergleichbar mit dem von Herschel. Shapley hingegen nutzte Kugelsternhaufen, also dichte Ansammlungen von mehreren Millionen Sternen, die wir in den Außenbereichen von Galaxien finden. Aufgrund der asymmetrischen Verteilung der Kugelsternhaufen kam er zu dem Schluss, dass die Sonne 60 000 Lichtjahre außerhalb des Zentrums der Milchstraße stehe und damit sozusagen die Vervollkommnung des kopernikanischen Prinzips darstelle, das nun auch unsere Sonne aus dem Zentrum des Kosmos herausrückte. Für die Größe der Milchstraße selbst kam er auf ein Mehrfaches des heutigen Wertes, und nicht zuletzt aufgrund dieser Größe und der Entfernungsschätzung zu unserer Nachbargalaxie, der Andromedagalaxie, mit Hilfe der Helligkeit einer dort 1885 entdeckten Nova, lag für ihn der Schluss nahe, dass die Spiralnebel Teil unserer Milchstraße sind, und die Milchstraße selbst dem gesamten Kosmos entspricht.

Letztendlich hatten sowohl Curtis (bzw. Kapteyn) wie auch Shapley manche Teilaspekte richtig erkannt, andere nicht. Die Frage nach der Natur der Spiralnebel wurde wenige Jahre später von Edwin Hubble geklärt, indem er mit dem 2,5 m-Großteleskop auf dem Mount Wilson, Zepheidensterne in der Andromedagalaxie identifizieren und somit ihre Entfernung bestimmen konnte (für eine Übersicht siehe Hubble 1936). Die extragalaktische Natur der Andromedagalaxie war nun außer Zweifel,<sup>2</sup> zumal es sich später zeigte, dass das 1885 in der Andromedagalaxie beobachtete Ereignis keine Nova, sondern eine intrinsisch sehr viel hellere Supernova war. Was erklärte aber die signifikanten Unterschiede in der Größenbestimmung unserer Milchstraße? Es ist der interstellare Staub. Innerhalb der Scheibe der Milchstraße, also dort wo Herschel und Kapteyn ihre Messungen vornahmen, beschränkt dieser Staub die Entfernung, bis zu der wir stellare Objekte sehen können – vergleichbar etwa mit der beschränkten Sichtweite in Deutschland an einem nebligen Novembertag. Und da man dann in alle Richtungen gleich weit sehen kann, kommt man fast zwangsläufig zu dem Schluss, dass die Sonne im Zentrum steht. Shapley hingegen widmete sich den Kugelsternhaufen, beobachtete also senkrecht zur Scheibe unserer Milchstraße. Auch seine Messungen waren durch die interstellare Absorption verfälscht, allerdings führt die Extinktion nicht wie in der Scheibe zu einer kompletten Absorption dieser Objekte, sondern nur zu einer Helligkeitsreduzierung. Ohne eine angemessene Korrektur der interstellaren Extinktion erscheinen diese Objekte also weiter entfernt zu sein als sie es tatsächlich sind – woraus die Überschätzung der Größe unserer Milchstraße durch Shapley resultierte: die Sonne ist zwar deutlich außerhalb des galaktischen Zentrums, der Abstand beträgt aber „nur“ 26 000 Lichtjahre.

Es war auch Edwin Hubble, der wenige Jahre später der Kosmologie zu einem weiteren Meilenstein verhalf (Hubble 1929). Bereits in den ersten von Slypher 1917 publizierten Messungen der Dopplerverschiebung von Galaxien zeigte sich, dass das Licht der meisten Galaxien rotverschoben ist – sich diese also von uns entfernen. Nur wenige bewegen sich auf uns zu, sind also blauverschoben. Edwin Hubble konnte nun zeigen, dass diese Rotverschiebung systematisch mit der Entfernung der Galaxien wuchs (siehe Abb. 9). Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich von uns weg, und dieser Zusammenhang ist linear, wie bei einer zentrischen Streckung. Diese Beobachtungen bestätigten unmittelbar die Hypothese von Friedmann und Lemaitre, die gezeigt hatten, dass nur ein sich ausdehnendes Universum eine Lösung der von Einstein 1915 publizierten Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt. Die Konsequenz eines solchen Modells war jedoch dramatisch, führt sie doch praktisch

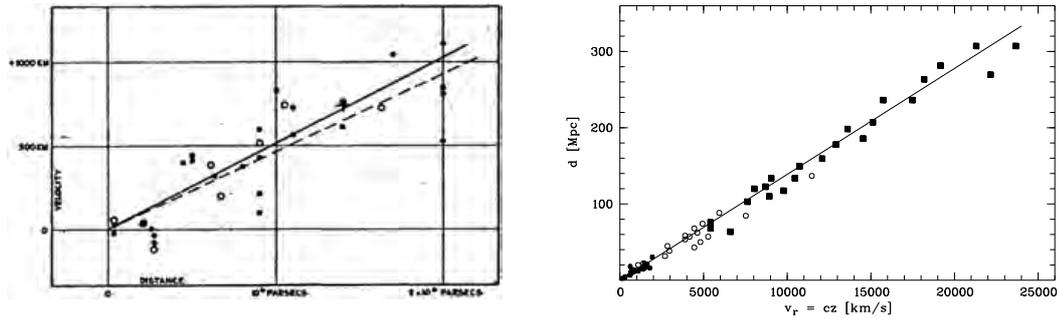


Abbildung 9. Expansion des Universums, auch als Hubblesches Gesetz bezeichnet. Links: Hubbles Messung von 1929 (PNAS 14, 3 [1929]), Rechts: Supernova-basierte Messungen (Stand 2010)

zwangsläufig dazu, dass das Universum irgendwann in einem singulären Zustand begann. Diese Erkenntnis war zu Beginn hochumstritten. In der Tat wurde der Begriff „Urknall“, mit dem wir nach wie vor diese Theorie bezeichnen, vom britischen Astrophysiker Fred Hoyle 1949 in einer Radioshow geprägt, um die vermeintliche Absurdität dieses Vorschlags zu untermauern, so zumindest der Vorwurf einiger Zeitgenossen. In der Tat gab es seinerzeit wohlbegründete Kritik an diesem Modell: Mit der von Hubble gemessenen Ausdehnungsrate, die fast eine Größenordnung höher ist als der heute gemessene Wert, wäre das Universum jünger als das von den Geologen bestimmte Erdalter!

Die Lösung dieser Diskrepanz gelang Walter Baade und wurde von ihm 1952 auf der Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union in Rom vorgestellt (Baade 1956). Walter Baade war in den 1940ern Direktor des Mt. Wilson Observatory in Kalifornien und stand als deutscher Staatsbürger dort während der Kriegsjahre de facto unter Hausarrest. Da gleichzeitig in Los Angeles Verdunklung verordnet war, konnte er mit dem größten Teleskop unter nahezu idealen Bedingungen praktisch exklusiv<sup>3</sup> beobachten. Ihm gelang es, den Andromedanebel bis ins Zentrum hinein photographisch in Einzelsterne aufzulösen und die Existenz von zwei Sternpopulationen nachzuweisen, metallarme<sup>4</sup> alte Sterne in den Außenbereichen (Population II) sowie metallreichere jüngere Sterne in der Scheibe von Spiralgalaxien (Population I). Folgebeobachtungen mit dem neuen Fünf-Meter-Teleskop auf dem Mt. Palomar zeigten, dass die Relation zwischen Periode und Leuchtkraft von der Metallhäufigkeit des Sterns abhängt. Die zepheidenartigen metallarmen alten Sterne (sogenannte Typ II Cepheiden) in den Außenbereichen einer Galaxie haben eine andere Perioden-Leuchtkraft-Beziehung als metallreichere klassische Zepheiden in der galaktischen Scheibe. Mit der korrekten Klassifikation musste somit die Entfernung zur Andromedagalaxie verdoppelt werden und damit auch die Distanzskala des Kosmos und das Alter des Universums (zur aktuellen Bestimmung der Hubble-Konstante mit Zepheiden siehe z. B. Freedman und Madore 2010).

Mit der Entdeckung der von Gamov in den 1940ern vorhergesagten kosmischen Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson (1965) hat sich das Urknallmodell als Standardmodell der Kosmologie fest etabliert. Es galt nun, mittels neuer Standardkerzen, dem Tully-Fisher Gesetz oder den Supernovae festzustellen, ob das Universum sich früher (also bei großen Distanzen)

schneller ausdehnte als heute. Denn die Stärke der Abbremsung bestimmt, ob sich das Universum immer weiter ausdehnen wird oder ob es auf Grund seiner eigenen Schwerkraft zum Halten kommt und danach wieder in sich zusammenfällt. Daran, dass das Universum sich nur abbremsen könne, bestand aber auf Grund der grundlegend anziehenden Natur der Gravitation wenig Zweifel. Um so überraschender war dann die Feststellung von zwei unabhängig voneinander arbeitenden Forschergruppen, dass die Ausdehnung des Universums sich eben nicht verlangsamt, sondern beschleunigt (Riess et al. 1998, Perlmutter et al. 1999) – ein Effekt, der sich nur erklären lässt, wenn das Vakuum mit einer positiven Energie behaftet ist. Diese „dunkle Energie“ ist ein fundamentales Rätsel des physikalischen Standardmodells, und ihr Ursprung oder ihre Natur sind bis heute unverstanden.

#### 4 *Ausblick: Präzisionsmessungen mit dem Gaia-Satelliten*

Die Bestimmung der extragalaktischen Entfernungsskala ist weiterhin ein aktives Forschungsgebiet. Nach wie vor sind die systematischen Effekte und die gegenseitige Kalibrierung der indirekten Entfernungskennzeichen mit Unsicherheiten behaftet. Als Beispiel sei die erste Sprosse der Entfernungsleiter genannt, die Kalibrierung der Distanz zu den Plejaden. Deren Entfernung kann mit zwei direkten Methoden bestimmt werden. Allerdings unterscheidet sich die mit dem Hipparcos-Satelliten gefundene Parallaxendistanz von 410 Lichtjahren signifikant von der mit über der Erdoberfläche verteilten Radioteleskopen interferometrisch gefundenen Distanz von 444 Lichtjahren. Der Unterschied beider Messungen ist deutlich größer als die gegebene Genauigkeit von jeweils ca. 3,5 Lichtjahren.

Mit dem 1989 gestarteten Hipparcos-Satelliten konnte erstmals die Entfernungen zu 100 000 Objekten in der Sonnenumgebung direkt und systematisch vermessen werden. Die erreichte Genauigkeit betrug bis zu einer halben Millibogensekunde (das 7,2 Millionstel eines Grades). Am 19. Dezember 2013 wurde der Gaia-Satellit der ESA gestartet, der im Sommer 2014 sein Wissenschaftsprogramm aufgenommen hat (Prusti 2012). Im Zentrum steht die Vermessung von bis zu einer Milliarde Objekten in der Milchstraße. Die erreichte Genauigkeit von 10 Mikrobogensekunden – dies entspricht dem Winkel, den eine 1-Cent-Münze auf die Entfernung des Mondes aufspannt – erlaubt es, wesentliche Entfernungskennzeichen wie den Abstand zu einigen tausend Zepheiden-Sternen absolut zu kalibrieren. Ja selbst die Bewegung von Sternen wird messbar, die Fixsterne sind nicht mehr fix! Bewegungen von 20 Mikrobogensekunden pro Jahr werden nachweisbar – das entspricht dem Wachstum des menschlichen Haars, gesehen auf die Entfernung des Mondes! Die nächste Generation von Großteleskopen erlaubt es dann, einzelne Sterne bis hin zu Entfernungen des Coma-Galaxienhaufens zu erfassen. Damit wird die Astronomie auch in der 3. Dimension zur Präzisionswissenschaft.

#### *Anmerkungen*

1. In der Fachliteratur wird hingegen das auf Parallaxenmessungen (siehe unten) beruhende Maß des „Parsec“ (pc) verwendet, 1 pc entspricht 3,26 Lichtjahren.
2. Hubble selbst vermied aber bis ans Ende seines Lebens den Begriff Galaxie in wissenschaftlichen Publikationen, sondern sprach immer von Nebulae.

3. Der Großteil seiner Kollegen an der Sternwarte war in die Militärforschung abgestellt.
4. Astrophysiker bezeichnen gemeinhin alle chemischen Elemente schwerer als Wasserstoff und Helium als „Metalle“.

### *Abbildungsnachweise*

- Abb. 1: AIP/ J. Fohlmeister  
 Abb. 2: AIP/ J. Fohlmeister  
 Abb. 3: Lutz Wisotzki  
 Abb. 4: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), R. Gendler  
 Abb. 5: ESA and the Planck Collaboration  
 Abb. 6–8: AIP/J. Fohlmeister  
 Abb. 9: Hubble, PNAS, 15, 3 (1929)/Lutz Wisotzki

### *Literatur*

- Baade, Walter (1956). “The period-luminosity relation of the Cepheids”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 68 (400), S. 5–16.
- Bessel, Friedrich W. (1839). „Bestimmung der Entfernung des 61sten Sterns des Schwans“. In: *Astronomische Nachrichten* 16 (5), S. 65–96.
- Dick, Wolfgang R. und Fritze, Klaus (2000). *300 Jahre Astronomie in Berlin und Potsdam. Eine Sammlung von Aufsätzen aus Anlaß des Gründungsjubiläums der Berliner Sternwarte. (Acta Historica Astronomiae Vol. 8)*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Encke, Johann F. (1846). „Schreiben des Herrn Professor Encke an den Herausgeber“. In: *Astronomische Nachrichten* 24 (3), S. 45–46.
- Freedman, Wendy L. und Madore, Barry F. (2010). “The Hubble constant”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 48, S. 673–710.
- Hubble, Edwin P. (1929). “A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae”, In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 15 (3), S. 168–173.
- (1936). *The Realm of the Nebulae*. Yale: Yale University Press.
- Kapteyn, Jacobus C. (1922). “First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system”. In: *The Astrophysical Journal* 55, S. 302–328.
- Leavitt, Henrietta S. und Pickering, Edward C. (1912). “Periods of 25 variable stars in the small Magellanic cloud”. In: *Harvard College Observatory Circular* 173, S.1–3.
- Lowell, Bernard (1983). *Das unendliche Weltall – Geschichte der Kosmologie von der Antike bis zur Gegenwart*. München: C.H. Beck.
- Penzias, Arno A. und Wilson, Robert W. (1965). “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”. In: *The Astrophysical Journal* 142 (1), S. 419–421.
- Perlmutter, Saul (2003). “Supernovae, dark energy, and the accelerating universe”. In: *Physics Today* 4 (03), S. 53–60.
- Perlmutter, Saul et al. (1999). “Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae”. In: *The Astrophysical Journal* 517 (2), S. 565–586.
- Prusti, Timo (2012). “The promises of gaia”. In: *Astronomische Nachrichten* 333 5 (6), S. 453–459.
- Riess, Adam et al. (1998). “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant”. In: *The Astronomical Journal* 116 (3), S. 1009–1038.
- Shapley, Harlow und Curtis, Heber (1921). “The scale of the Universe”. In: *Bulletin of the National Research Council* 2 (3), S. 171–217.
- Tully, R. Brent und Fisher, J. Richard (1977). “A new method of determining distances to galaxies”. In: *Astronomy and Astrophysics* 54 (3), S. 661–673.
- Weigert, Alfred, Wendker, Heinrich J. und Wisotzki, Lutz (2010). *Astronomy und Astrophysics*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Weinberg, Steven (2015). *To Explain the World: The Discovery of Modern Science*. New York: Harper Verlag.