



Wenn in einer entfernten Galaxie eine Supernova-Explosion auftritt, überstrahlt sie häufig die Galaxie. Das macht Supernovae ideal zur Entfernungsbestimmung. Die Collage zeigt Supernovae, die im Rahmen des adH0cc-Projekts (accurate determination of H0 with core-collapse supernovae) beobachtet wurden.

Stefan Taubenberger, MPA; ESO; Y. Beletsky

ASTROPHYSIK

Kontroverse um eine Konstante

Verschiedene Messungen liefern unterschiedliche Werte für die Hubble-Konstante: ein ewiges Problem der Kosmologie?

Bruno Leibundgut

Wir leben in einem dynamischen, expandierenden Universum. Die Beobachtung, dass die Radialgeschwindigkeit kosmischer Objekte mit ihrer Entfernung zunimmt, stellt eine der Säulen des kosmologischen Modells eines heißen Urknalls dar. Die anderen sind die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und die Häufigkeiten leichter Elemente: Damit Deuterium, Helium und Lithium aus Wasserstoff fusionieren, muss es eine sehr heiße Phase gegeben haben, die heute als Mikrowellen-Hintergrund beobachtet wird. Wenige Parameter reichen aus, um die Eigenschaften des expandierenden Universums zu beschreiben. Seine energetischen Inhalte bestimmen die Ausdehnung, und die momentane Ausdehnungsrate, die Hubble-Konstante, ist einer der wichtigsten Parameter. Im nahen Universum folgt sie dem Hubble-Lemaître-Gesetz; mit einem kosmologischen Modell ergibt sie sich aus der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung.

Mit der Annahme von räumlicher Homogenität und Isotropie (Robertson-Walker-Metrik) lassen sich die Einsteinschen Feldgleichungen auf die Friedmann-Gleichung reduzieren, um das beobachtbare Universum zu beschreiben. Die Friedmann-Gleichung gibt die kosmische Ausdehnung als Funktion von Hubble-Konstante, Raumkrümmung und den mittleren Energiedichten an. Letztere bestimmen die Dynamik der Expansion, zum Beispiel erzeugt eine höhere Materiedichte eine stärkere Abbremsung. Die Hubble-Konstante skaliert die kosmologischen Modelle und somit das absolute Alter des Universums.

Während der letzten zwei Jahrzehnte hat sich ein Modell des Universums mit einigen erstaunlichen Eigenschaften etabliert. Zusätzlich zur Strahlung, deren Energiedichte aufgrund der niedrigen Temperatur des Mikrowellenhintergrundes heute vernachlässigbar klein ist, und der „nor-

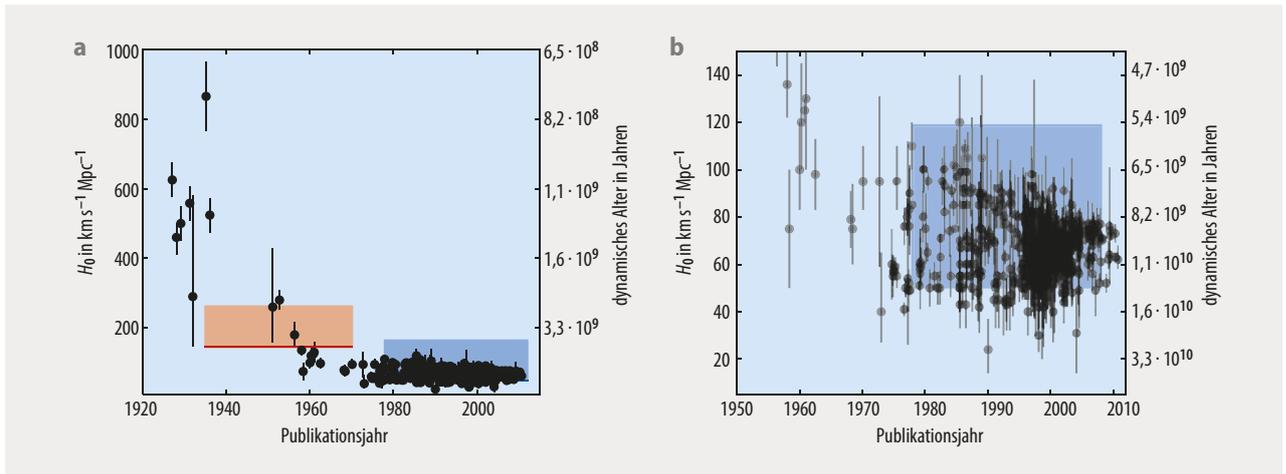


Abb. 1 Die gemessenen Werte der Hubble-Konstanten näherten sich in den letzten hundert Jahren einem Wert um $70 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ an (a). Das daraus folgende dynamische Alter des Universums ist verträglich mit dem Alter der Erde (rot). Obwohl sich Genauigkeit und Präzision der Messungen seit den 1950er-Jahren deutlich verbessert haben (b), steht das dynamische Alter vieler Ergebnisse noch immer in Konflikt mit dem Alter der ältesten Sterne (blau).

malen“ (baryonischen) Materie, die etwa fünf Prozent der Gesamtenergie ausmacht, braucht es zwei „dunkle“ Komponenten, um die Beobachtungen zu erklären. Ein Großteil der Materie interagiert nur durch die Gravitation mit dem Rest der Welt: Diese Dunkle Materie macht etwa ein Viertel der Energie im Universum aus. Da die kosmische Expansion heute beschleunigt ist, sollte es eine zusätzliche, abstoßend wirkende Energiekomponente geben. Eine mögliche Erklärung dieser Dunklen Energie steckt in Einsteins kosmologischer Konstante. Die Dunkle Energie dominiert heute den Energieinhalt des Universums mit einem Anteil von 70 Prozent. Dieses kosmologische Modell heißt Λ CDM, wobei Λ für die kosmologische Konstante steht und CDM für kalte Dunkle Materie (Cold Dark Matter). Mittlerweile gibt es aber Beobachtungen, die innerhalb des Λ CDM-Modells inkonsistent erscheinen. Am deutlichsten tritt dies bei der Hubble-Konstante zutage, für die sich unterschiedliche Werte durch Beobachtungen des frühen Universums und aus der lokalen Umgebung ergeben. Die Diskussion dieses als Hubble-Spannung (Hubble tension) bezeichneten Problems soll im Folgenden erläutert werden.

Eine rasante Entwicklung

Die Vermessung des Universums ist eine spektakuläre Geschichte wissenschaftlichen Fortschritts. Noch vor hundert Jahren war unklar, ob die Milchstraße das ganze Universum einschließt oder nur eine „Weltinsel“ in einem viel größeren Universum bildet. Als Edwin Hubble 1925 einen spezifischen veränderlichen Stern vom Typ der Cepheiden in der Andromeda-Galaxie entdeckte [1], nutzte er das Leavitt-Gesetz (Infokasten), um dessen Entfernung zu messen. Demnach stellt unsere Milchstraße nur eine von vielen Galaxien in einem riesigen Universum dar. Zwei Jahre darauf leitete Abbé Georges Lemaître aus den Einsteinschen Feldgleichungen eine lineare Beziehung zwischen Entfernung D und Fluchtgeschwindigkeit v her, das heute so bezeichnete Hubble-Lemaître-Gesetz: $v = H_0 D$ [4]. Damit bestimmte er

noch vor Hubble einen ersten Wert der Hubble-Konstanten. Edwin Hubble wiederum beobachtete 1929 die kosmische Ausdehnung [5]. Dabei griff er auf die Rotverschiebungen zurück, die Vesto Slipher für einige externe Galaxien bestimmt hatte. Frühere Versuche von Knut Lundgren oder Carl Wilhelm Wirth waren noch an unzureichend genauen Daten gescheitert.

Die Hubble-Konstante entspricht einem Geschwindigkeitszuwachs über eine gewisse Entfernung. Als kosmische Entfernungseinheit dient das Megaparsec (Mpc), das $3 \cdot 10^{22}$ m oder etwa drei Millionen Lichtjahren entspricht. Die frühen Werte der Hubble-Konstanten betragen etwa $500 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ und führten zu einem fundamentalen Problem. Da die Einheit der Hubble-Konstanten eine inverse Zeit ist, lässt sich aus einer Integration ein dynamisches Alter des Universums berechnen. Dabei gilt es, die Veränderung der Expansionsgeschwindigkeit aufgrund des Energie- bzw. Masseninhalts des Universums zu berücksichtigen. Doch für die ersten Werte der Hubble-Konstanten berechnete sich das dynamische Alter zu etwa $2 \cdot 10^9$ Jahren – das ist deutlich geringer als das bekannte Alter der Erde von mehr als $4,5 \cdot 10^9$ Jahren (Abb. 1a)!

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde der Wert von H_0 kontinuierlich nach unten korrigiert, bis in den 1980er-Jahren zwei Werte zur Diskussion standen: etwa $100 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ oder etwa $50 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ (Abb. 1b). Die großen Unsicherheiten ergaben sich, weil die verschiedenen Forschungsgruppen unterschiedliche Entfernungskindikatoren nutzten [6, 7]. Um die Jahrtausendwende lieferte das Hubble Space Telescope (HST) einen entscheidenden Beitrag: Es beobachtete Cepheiden-Sterne in mehreren nahen Galaxien und verbesserte damit die Kalibrierung weiterer Distanzindikatoren dramatisch. Trotzdem setzte sich die Diskussion fort – jetzt mit Werten für H_0 zwischen 70 und $60 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Nach der Entdeckung der beschleunigten Expansion folgte damit innerhalb des Λ CDM-Modells, dass die ältesten bekannten Sterne jünger sind als das Universum. Zwei Dekaden lang schien das Modell des Universums

konsistent zu sein – und die Kosmologie wandte sich anderen Themen zu, etwa der kosmischen Strukturentwicklung oder der Galaxienentstehung.

Obwohl die Bestimmung der Hubble-Konstanten auf dem einfachen, linearen Hubble-Lemaître-Gesetz beruht, stellt sie sich aufgrund der notwendigen absoluten Distanzmessungen als schwierig heraus. Bei kleinen Entfernungen, zum Beispiel in der unmittelbaren Umgebung der Milchstraße, überlagert die gravitative Anziehung zwischen den Galaxien die kosmische Ausdehnung. Am einfachsten zeigt sich dies an der Relativgeschwindigkeit zwischen Milchstraße und Andromeda-Galaxie: Die beiden bewegen sich mit etwa 300 km s^{-1} aufeinander zu. Solche Effekte sind auch in Galaxienhaufen leicht zu beobachten. Im Allgemeinen heißen solche Abweichungen von der kosmischen Ausdehnung, also vom Hubble-Lemaître-Gesetz, Pekuliargeschwindigkeiten. Erst bei Entfernungen ab etwa 100 Mpc – das entspricht einer Expansionsgeschwindigkeit von 7000 km s^{-1} oder einer Rotverschiebung von $z = 0,023$ – werden diese durch die inhomogene Massenverteilung induzierten Geschwindigkeiten vernachlässigbar. Daher gilt es, absolute Entfernungen bei kosmologischen Distanzen genau zu messen, um die Hubble-Konstante frei von lokalen Effekten zu bestimmen.

Einfache Gleichung, schwierige Messung

Damit dies gelingt, braucht es sehr leuchtkräftige, gut verstandene und kalibrierte Quellen. Da diese in kosmischen Entfernungen nicht bekannt waren, schlugen Allan Sandage und Gustav Andreas Tammann vor 50 Jahren vor [8], eine Folge aufeinander aufbauender Entfernungsbestimmungen zu kalibrieren, ausgehend von geometrischen Parallaxen über die nächsten Sterne bis zu kosmischen Distanzen. Auch heute ist eine solche Distanzleiter noch in Gebrauch,

allerdings nur mit drei Stufen (Abb. 2). Um einen Weg aus den lokalen Abweichungen von der kosmischen Ausdehnung in die reine Hubble-Expansion zu finden, kamen über 40 Jahre lang viele Kenntnisse aus der Astrophysik zusammen.

Generell gilt es, zwischen primären und sekundären Entfernungsindikatoren zu unterscheiden. Zu ersteren zählen die geometrischen Parallaxen und stellare Objekte innerhalb der Lokalen Gruppe bis etwa 1 Mpc. Dazu gehören die Cepheiden und andere leuchtkräftige Sterne. Sekundäre Entfernungsindikatoren ergeben sich aus häufig empirisch gemessenen, globalen Eigenschaften von Galaxien, wie Rotationsgeschwindigkeiten und Helligkeitsverteilungen, sowie aus Supernovae in großen Entfernungen. Dabei haben sich Supernovae vom Typ Ia als die exaktesten kosmologischen Distanzindikatoren bei Entfernungen jenseits 100 Mpc erwiesen.

Um die Fehler zu minimieren, war es wichtig, die Anzahl der „Sprossen“ in der Distanzleiter klein zu halten. Während die ersten Leitern noch sieben oder mehr Stufen benötigten, um bis in die Hubble-Expansion vorzudringen, gelingt dies heute mit drei „Sprossen“ (Infokasten): den Parallaxen zu nahen Cepheiden oder Roten Riesensternen (1. Stufe), der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden bzw. der Leuchtkraft der hellsten Roten Riesensterne (2. Stufe) sowie eine der beiden Eichungen, um die maximale Helligkeit von Supernovae Ia zu bestimmen (3. Stufe).

Dafür ermöglichte das Hubble Space Telescope mit seiner exquisiten Bildqualität einen entscheidenden Schritt: die Beobachtung von Cepheiden in externen Galaxien. Das Hubble Key Project zur Hubble-Konstante stellte eines der wichtigsten frühen HST-Programme dar. Es zielte darauf ab, sekundäre Entfernungsindikatoren durch eine Vielzahl von Cepheiden in nahen Galaxien zu eichen. Unter der Leitung von Wendy Freedman, Robert Kennicutt und Jeremy

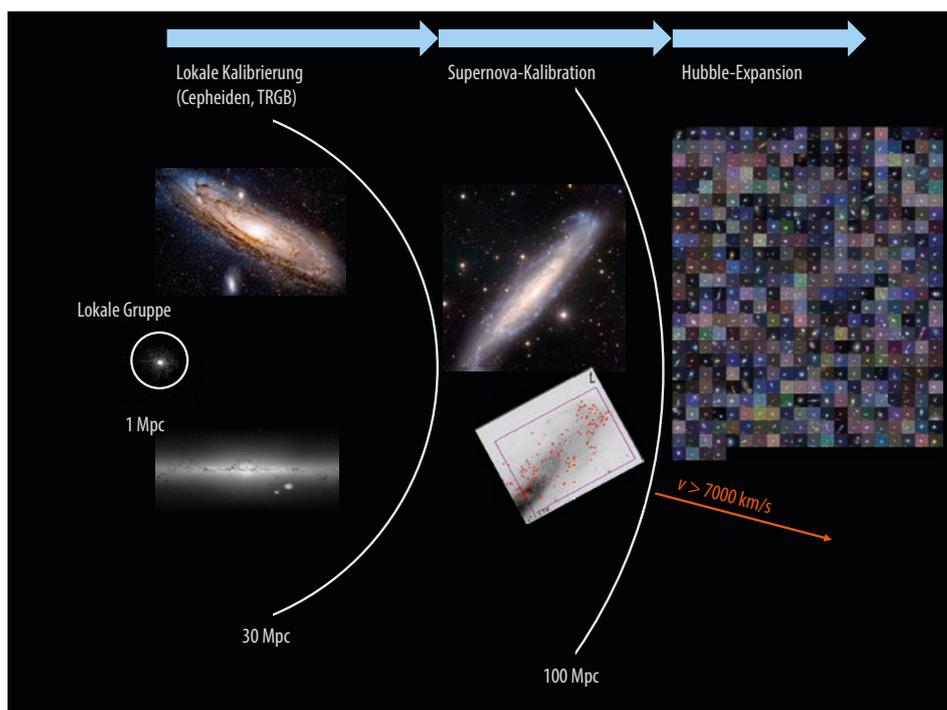


Abb. 2 Die Distanzleiter führt bis zu Entfernungen jenseits von 100 Mpc. Die erste Sprosse der lokalen Kalibrierung bilden unter anderem Cepheiden in der Milchstraße. Ihre exakte Entfernung ist durch Messungen des Gaia-Satelliten bekannt. Cepheiden in 30 bis 100 Mpc Entfernung dienen dazu, die zweite Stufe zu kalibrieren: Supernova-Explosionen vom Typ Ia. Ab etwa 100 Mpc wird die universelle Expansion beobachtbar und mit entfernten Supernovae gemessen.

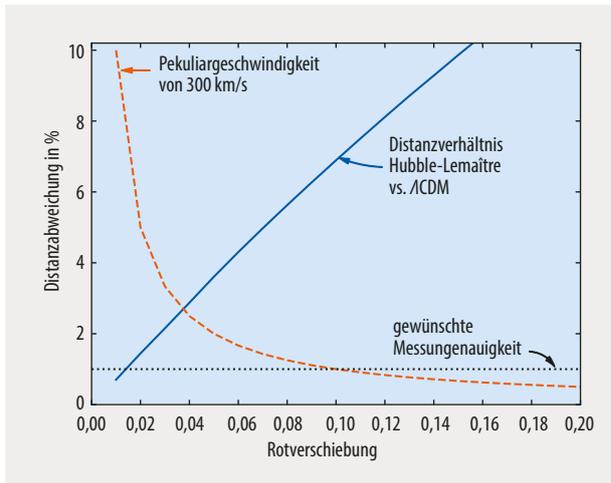


Abb. 3 Das Hubble-Lemaître-Gesetz weicht umso stärker vom Λ CDM-Modell ab, je mehr die Rotverschiebung zunimmt (blau). Inhomogene Massenverteilungen induzieren eine Unsicherheit für die Pekuliargeschwindigkeit (orange), die sich bei zunehmender Rotverschiebung reduziert. Heutige Messungen der Distanz erreichen Genauigkeiten von einem Prozent (schwarz).

Mould ergab sich daraus ein Wert von $H_0 \approx 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ mit einer Unsicherheit von etwa 10 Prozent [9]. Gleichzeitig hat eine Gruppe um Allan Sandage und Gustav Andreas Tammann Cepheiden in nahen Galaxien untersucht, in denen eine Supernova Ia vorlag, um die maximale Leuchtkraft dieser Sternexplosionen zu kalibrieren. Mit dieser Methode ergab sich $H_0 = (62 \pm 6) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [10].

Mittlerweile gibt es für Supernovae Ia als drittem Schritt in die kosmologische Ausdehnung neuere Eichungen. Adam Riess und die SH0ES-Kollaboration (Supernovae and H_0 for the Equation of State of Dark Energy) benutzen das Hubble Space Telescope, um 42 dieser Supernovae in Galaxien mit Cepheiden zu kalibrieren. Diese Eichung haben sie auf mehr als 250 Supernovae vom Typ Ia mit Rotverschiebungen von $0,023 < z < 0,15$ angewandt. Das entspricht Entfernungen zwischen 100 und 650 Mpc. Als Wert für die Hubble-Konstante hat die SH0ES-Kollaboration $H_0 = (73,0 \pm 1,0) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ publiziert [11]. Gleich-

zeitig haben Wendy Freedman und ihre Gruppe eine Kalibrierung der Supernovae Ia mithilfe Roter Riesensterne (TRGB) etabliert, was einen Wert für die Hubble-Konstante von $H_0 = (69,6 \pm 1,9) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ lieferte [12]. Die beiden Werte spiegeln die Genauigkeit der H_0 -Bestimmungen im lokalen Universum wider und sind gerade noch konsistent.

Ein anderer Weg in die Ferne

Große Distanzen lassen sich mit unterschiedlichen Methoden bestimmen. Eine sehr elegante und erfolgreiche besteht darin, die Objekte hinter einer Gravitationslinse zu beobachten. Gravitationslinsen entstehen aus einer Massenansammlung, wie einem Galaxienhaufen oder einer sehr massiven Galaxie, und können das Licht eines dahinter liegenden Objekts so ablenken, dass mehrere Bilder entstehen. Wenn ein Zeitunterschied messbar ist, ergibt sich daraus, wie weit Linse und Bildquelle entfernt sind. Linsensysteme mit Quasaren als Bildquelle finden sich typischerweise bei Rotverschiebungen von $z > 0,3$. Sherry Suyu hat im Rahmen des H0LICOW-Projektes mehrere Linsensysteme analysiert und eine Hubble-Konstante von $H_0 = (73,3 \pm 1,8) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ermittelt [13]. Aufgrund der hohen Rotverschiebungen hängt dieses Ergebnis stärker vom gewählten kosmologischen Modell (hier: Λ CDM) ab. In Zukunft sollte es möglich sein, eine Supernova hinter einer Linse mehrfach zu beobachten.

Die zunehmende Genauigkeit der Messungen von H_0 offenbart die Limitierung des Hubble-Lemaître-Gesetzes: Bei Unsicherheiten von etwa zehn Prozent ist die lineare Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Rotverschiebung bzw. Distanz problemlos anwendbar. Genauigkeiten im Prozentbereich, die heute möglich und für die Theorie wichtig sind, erfordern es, sowohl lokale Effekte als auch die nicht-linearen Beiträge des kosmologischen Modells bei größeren Entfernungen zu berücksichtigen: Bei größeren Entfernungen gilt das Hubble-Lemaître-Gesetz nicht mehr. Schon bei einer Rotverschiebung von $z = 0,05$ – das entspricht einer Fluchtgeschwindigkeit von $v = 15\,000 \text{ km s}^{-1}$ – beträgt die Abweichung von der Linearität aufgrund der beschleunigten Expansion des Universums 3,7 Prozent für

Die Stufen der Distanzleiter

Cepheiden zeigen als pulsierende Sterne eine regelmäßige Helligkeitsvariation. Leuchtkräftigere Sterne besitzen längere Helligkeitsperioden. Diese Perioden-Leuchtkraft-Beziehung heißt **Leavitt-Gesetz**, weil Henrietta Leavitt den Zusammenhang entdeckt hat, als sie veränderliche Sterne in der Kleinen Magellanschen Wolke, einer Begleitgalaxie der Milchstraße, untersuchte [2]. Mithilfe der charakteristischen Lichtkurve von Cepheiden gelang es Edwin Hubble, die Entfernung der Andromeda-Galaxie abzuschätzen. Walter Baade teilte die Cepheiden 1954 in zwei Klassen mit unterschiedlicher Leuchtkraft ein, sodass sich die Entfernungsskala verdoppelte und der Wert der Hubble-Konstanten halbierte (**Abb. 1a**). Der ESA-Satellit Gaia ermöglicht es, den Abstand vieler galaktischer Cepheiden durch Parallaxen zu bestimmen und damit die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung direkt zu kalibrieren.

Bei **Roten Riesensternen** hat die Fusion von Helium im Kern des Sterns als Stufe nach der Wasserstoff-Fusion gezündet. Kurz vorher besitzen diese Sterne eine charakteristische Leuchtkraft, sodass sie sich zur Distanzmessung eignen (Tip of the Red Giant Branch, TRGB).

Supernovae vom Typ Ia sind thermonukleare Explosionen kompakter Sterne, der Weißen Zwerge. Die Lichtkurven dieser Explosionen zeigen ein markantes Maximum etwa zwei bis drei Wochen nach der Explosion und fallen danach sehr gleichförmig ab. Ihre maximale Helligkeit lässt sich sehr gut aus dem Helligkeitsabfall und der Leuchtkraft bestimmen, wie ursprünglich Mark Phillips entdeckt hat. Weil Supernovae vom Typ Ia kurzzeitig ihre Galaxie überstrahlen, eignen sie sich selbst bei großen Entfernungen für relative Distanzmessungen und haben entscheidend zur Entdeckung der beschleunigten Expansion beigetragen [3].

das Λ CDM-Modell. Allerdings hängen die Abweichungen nur wenig von den Annahmen über Dunkle Energie und Dunkle Materie ab. Trotzdem zeigt sich hier ein fundamentales Problem der Messung der Hubble-Konstanten: Bei den heute erreichten Genauigkeiten können die Beiträge des kosmologischen Modells auch im nahen Universum nicht unberücksichtigt bleiben (Abb. 3).

Genauer mit dem Mikrowellenhintergrund

Der momentan genaueste Wert für H_0 leitet sich aus Beobachtungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds ab. Diese Strahlung stellt den Überrest einer heißen Phase des frühen Universums dar. Als sich Wasserstoffatome bilden konnten (Rekombination), entkoppelten Strahlung und Materie, sodass diese Photonen emittiert wurden. Seither hat sich das Universum mehr als tausendfach vergrößert, und die Strahlung hat sich adiabatisch auf heute 2,73 K abgekühlt. Aufeinander folgende Experimente haben die Eigenschaften des Mikrowellenhintergrundes immer besser bestimmt. Der CoBE-Satellit (Cosmic Background Explorer) bestimmte die Schwarzkörperform der Strahlung, ihre genaue Temperatur und erste Temperaturfluktuationen [14, 15]. Die Ballonexperimente BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics) und MAXIMA (Millimeter Anisotropy Experiment IMaging Array) stellten als erste fest, dass der Raum geometrisch flach ist und die Krümmung sehr klein sein muss. Dieses Ergebnis hat zusammen mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion wesentlich zur Akzeptanz des Λ CDM-Modells beigetragen.

Die Satelliten WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) und Planck haben minimale Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung über den ganzen Himmel vermessen. Ihre Ergebnisse haben das Λ CDM-Modell mit exquisiter Genauigkeit bestätigt und die Beiträge der verschiedenen Energiekomponenten des Universums sehr genau bestimmt: 5 Prozent baryonische Materie, 25 Prozent Dunkle Materie und 70 Prozent Dunkle Energie. Die Hubble-Konstante ergibt sich hier als abgeleitete Größe mit einer ausgezeichneten Genauigkeit für das Λ CDM-Modell. Ihr Wert hängt vor allem von den Energiedichten und der Raumkrümmung ab und ergab sich aus der genauesten Vermessung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds durch den Planck-Satelliten zu einem Wert von $H_0 = (67,4 \pm 0,5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [16].

Die Dichtefluktuationen aus dem frühen Universum, die der Mikrowellenhintergrund belegt, verstärken sich in einem materiedominierten Universum. Deshalb liegt in der großräumigen Galaxienverteilung eine bevorzugte Distanz zwischen den Galaxien vor. Diese Baryon Acoustic Oscillations lassen sich in Galaxiendurchmusterungen messen. Die typische Distanz beträgt etwa 140 Mpc für $H_0 \approx 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Die Oszillationen sind bei Rotverschiebungen zwischen $0,3 < z < 0,78$ gemessen und erlauben es, sehr entfernte Supernovae Ia zu eichen. Damit ergibt sich eine inverse Distanzleiter, bei der Supernovae im entfernten Universum kalibriert werden. Sie liefert für die Hubble-Konstante den Wert $H_0 = (67,4 \pm 1,2) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

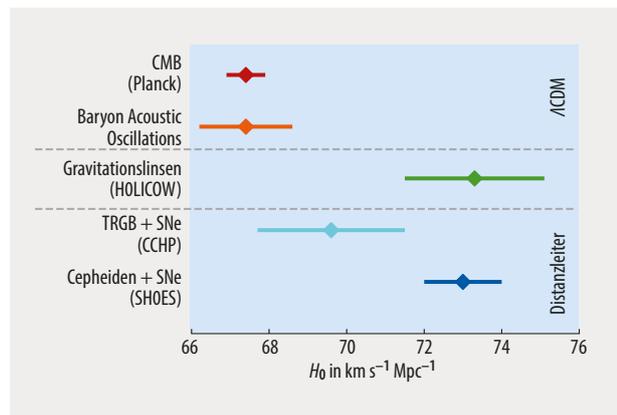


Abb. 4 Abweichungen bei den Messwerten der Hubble-Konstanten lassen sich auf die Eichungen durch die Distanzleiter bzw. mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (Λ CDM) zurückführen.

[17]. Dieser stimmt sehr gut mit dem Wert aus den Planck-Daten überein, weil in beiden Fällen die Eichung auf dem Mikrowellenhintergrund beruht. Außerdem zeigt das Ergebnis, dass die entfernten Supernovae „nur“ einen relativen Maßstab hergeben, und die Hubble-Konstante von deren Eichung abhängt.

Diskrepanzen jenseits der Fehler

Die heute vorliegenden Werte von H_0 unterscheiden sich nur um ein paar Prozent; gleichzeitig sind die publizierten Fehler kleiner als die Diskrepanzen (Abb. 4). Die Werte aus lokalen Messungen sind etwa vier bis sieben Prozent größer als diejenigen aus dem Mikrowellenhintergrund: Die Signifikanz der Abweichung beträgt bis zu 5σ . Das trifft vor allem auf die SH0ES-Messungen zu, während die Eichung mit den Roten Riesensternen einen Wert für H_0 zwischen SH0ES und dem Mikrowellenhintergrund liefert. Daher stellt sich die Frage, ob unbekannte Fehlerquellen für die unterschiedlichen Werte verantwortlich sind. Die Diskussion konzentriert sich vor allem auf die zweite Stufe der Entfernungleiter, die Eichung der Supernovae. Sowohl die Parallaxen wie auch die relativen Entfernungen der Supernovae vom Typ Ia sind sehr genau bekannt. Entscheidend sind Quervergleiche, wie die Entfernung zu galaktischen Sternhaufen oder zur Großen Magellanschen Wolke. Hier lässt sich die Entfernung auch für Cepheiden und Rote Riesensterne bestimmen; in der Großen Magellanschen Wolke existieren einige weitere lokale Entfernungsindikatoren. So haben Grzegorz Pietrzyński, Wolfgang Gieren und ihr Team innerhalb des Araucaria-Projekts Doppelsterne beobachtet, bei denen die Orbitalebene so ausgerichtet ist, dass sich beide Sterne bedecken. Damit lassen sich die Sternparameter wie Masse, Helligkeit, Größe und Temperatur sowie die Umlaufbahnen absolut bestimmen und exakte Entfernungen berechnen. Daher ist die Entfernung zur Großen Magellanschen Wolke besser als ein Prozent genau bekannt [18]. Mögliche Ansatzpunkte, um die Kalibrationen über Cepheiden und Rote Riesensterne in Einklang zu bringen, stellen Korrekturen für interstellare Absorption und das unterschiedliche Alter der Sterngruppen dar: Rote Riesensterne sind alt, Cepheiden dagegen jung.

Die Abweichungen für H_0 im lokalen Universum und aus dem Mikrowellenhintergrund reichen nicht aus, um das Λ CDM-Modell als obsolet zu erklären. Aber sie stellen einen Hinweis dar, dass dieses Modell unser Universum nicht vollständig beschreibt. Daher stehen verschiedene Erweiterungen oder Abweichungen des Modells zur Diskussion. So lässt sich die Friedmann-Gleichung mit zusätzlichen Energiedichten erweitern, die unterschiedliche Zustandsgleichungen besitzen; dafür gibt es jedoch keine unabhängigen Hinweise. Andere theoretische Betrachtungen postulieren Veränderungen der typischen Skalen der Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund. Solche Modelle greifen häufig auf eine „frühe Dunkle Energie“ zurück, die noch vor der Rekombination aktiv war und daher im Mikrowellenhintergrund nicht mehr beobachtbar ist. Weitere Ansätze betreffen die großräumige Homogenität der Masseverteilung: Ohne diese Forderung ist die Friedmann-Gleichung nicht anwendbar, sodass es gilt, andere Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen zu berücksichtigen.

Neue Modelle und Beobachtungen

Neben neuen theoretischen Betrachtungen ergänzen weitere Beobachtungen und neue Methoden die Messungen zu H_0 . Dies hat bisher jedoch nicht dazu geführt, die Diskrepanzen zu verringern. Idealerweise wäre es möglich, die Entfernungsleiter komplett zu umgehen und die kosmischen Entfernungen direkt zu bestimmen. Ein Beispiel für solche „physikalischen“ Methoden stellen die Gravitationslinsen dar. Um den Einfluss des kosmologischen Modells zu minimieren, sollte die Methode auch bei kleineren Rotverschiebungen Anwendung finden. Dazu braucht es Objekte, deren Leuchtkraft einerseits physikalisch gut verstanden ist und andererseits groß genug ausfällt, um die Objekte jenseits von 100 Mpc zu beobachten. Alle bisher vorgeschlagenen astronomischen Objekte konnten die verlangte Genauigkeit nicht erreichen. Als vielversprechende neue Möglichkeit erscheint es, die Ausdehnung einer Supernova-Explosion in verschiedenen Epochen zu beobachten und den wachsenden Winkeldurchmesser zu ermitteln. Dies entspricht der Baade-Wesselink-Methode für pulsierende Sterne, die Walter Baade [19] und Adrian Wesselink [20] unabhängig für Cepheiden vorgeschlagen haben. Bob Kirshner entwickelte vor 50 Jahren die „Expanding Photosphere Method“ für Supernovae [21]; seine Studenten Brian Schmidt und Ron Eastman haben sie vor 30 Jahren weiter verfeinert [22]. Entscheidend ist es hierbei, den Strahlungstransport innerhalb der Supernovae gut zu kennen, vor allem die Abweichungen von der Schwarzkörperstrahlung. Dann lässt sich mit der Temperatur und der Ausdehnungsgeschwindigkeit der Supernova-Hülle die Entfernung direkt messen; Christian Vogl hat weitere Fortschritte in der Bestimmung der Parameter für individuelle Supernovae gemacht [23]. Forschende des Max-Planck-Instituts für Astrophysik und der ESO haben Spektralserien von 24 Supernovae vom Typ II bei Rotverschiebungen von $0,03 < z < 0,08$ beobachtet und möchten damit eine Hubble-Konstante unabhängig von der Distanzleiter bestimmen (**Abb.** auf S. 23). Solche neuen

Herangehensweisen sind wichtig, um systematische Fehlerquellen auszuschließen.

Als Expansionsparameter hat die Hubble Konstante eine fundamentale Bedeutung in den kosmologischen Modellen. Die Messgenauigkeit liegt inzwischen bei wenigen Prozent. Diskrepanzen zwischen den Werten, die im frühen Universum bestimmt und im nahen Universum gemessen werden, liefern einen Hinweis, dass das präferierte Λ CDM-Modell unvollständig sein könnte. Weitere Tests und Quervergleiche sowie neue Beobachtungen sollen das Verständnis verbessern. Der exakte Wert der Hubble-Konstanten hat auch wichtige Konsequenzen für die Natur der Dunklen Energie und deren Zustandsgleichung. Mehrere geplante Projekte, vor allem der ESA-Satellit Euclid, versprechen in den nächsten Jahren weitere Erkenntnisse dazu.

Literatur

- [1] E. Hubble, *Obs.* **48**, 139 (1925)
- [2] H. Leavitt, *Harvard College Observatory Circ.* 173 (1912)
- [3] A. Goobar und B. Leibundgut, *Ann. Rev. Part. Nucl. Phys.* **61**, 251 (2011)
- [4] G. Lemaitre, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* **47**, 49 (1927)
- [5] E. Hubble, *PNAS* **15**, 168 (1929)
- [6] D. Branch und G. A. Tammann, *ARAA* **30**, 359 (1992)
- [7] D. Branch, *ARAA* **36**, 17 (1998)
- [8] A. Sandage und G. A. Tammann, *ApJ* **190**, 525 (1974)
- [9] W. Freedman et al., *ApJ* **553**, 47 (2001)
- [10] A. Sandage et al., *ApJ* **653**, 843 (2006)
- [11] A. G. Riess et al., *ApJ* submitted (arXiv:2112.04510) (2021)
- [12] W. Freedman, *ApJ* **919**, 16 (2021)
- [13] K. C. Wong et al., *MNRAS* **498**, 1420 (2020)
- [14] J. C. Mather et al., *ApJ* **420**, 439 (1994)
- [15] G. F. Smoot et al., *ApJL* **396**, 1 (1992)
- [16] *Planck Collaboration*, *A&A* **641**, A6 (2020)
- [17] T. Abbott, *MNRAS* **480**, 3879 (2018)
- [18] G. Pietrzyński et al., *Nature* **567**, 200 (2019)
- [19] W. Baade, *Astr. Nachrichten* **228**, 359 (1926)
- [20] A. F. Wesselink, *Bull. Astr. Netherlands* **10**, 88 (1946)
- [21] R. P. Kirshner und J. Kwan, *ApJ* **193**, 27 (1974)
- [22] R. Eastman und B. P. Schmidt, *R. P. Kirshner, ApJ* **466**, 911 (1996)
- [23] C. Vogl et al., *A&A* **633**, 88 (2020)

Der Autor



Bruno Leibundgut ist Programmwissenschaftler des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und seit 2019 Honorarprofessor an der TU München. Er beobachtet Supernovae seit seiner Promotion an der U Basel, Schweiz und hat am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, USA, und an der University

of California, Berkeley, gearbeitet. Als Mitarbeiter der ESO hat er das operationelle Modell des Very Large Telescope mitentwickelt und wechselte danach in die wissenschaftliche Führung. Er war Mitglied des High- z -Supernova Search Teams, hat am ESSENCE Projekt mitgewirkt und verfolgt die späte Entwicklung der SN 1987A.

Dr. Bruno Leibundgut, Europäische Südsternwarte, Karl-Schwarzschild-Straße 2, 85748 Garching und Fakultät für Physik, TU München, James-Franck-Str. 1, 85748 Garching