

Die Hubble-Kontroverse

Weisen neue Diskrepanzen bei der Hubble-Konstante auf systematische Fehler oder neue Physik?

Matthias Steinmetz

Das Hubble-Gesetz ist einer der Grundpfeiler des Urknallmodells und beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen der Fluchtgeschwindigkeit entfernter Galaxien und ihrer Entfernung. Die Proportionalitätskonstante H_0 , gemeinhin als Hubble-Konstante bezeichnet, ist das Verhältnis von Ausdehnungsrate zur Größenskala des Kosmos. Der Kehrwert von H_0 liefert uns somit direkt die Altersskala des Universums. Die präzise Messung von H_0 ist folglich eine der zentralen Aufgaben der Astronomie. Die Hubble-Konstante ist räumlich konstant, ändert sich aber mit der Zeit in Abhängigkeit vom Masseinhalt des Kosmos, seiner räumlichen Krümmung und dem Wert der kosmologischen Konstante. Die lineare Gesetzmäßigkeit gilt also streng genommen nur in unserer „lokalen“ Umgebung, in der die Zeitabhängigkeit von H_0 noch nicht berücksichtigt werden muss.

Hauptproblem bei der Bestimmung der Hubble-Konstanten sind die Entfernungen der Galaxien. Diese sind direkten Messungen nicht zugänglich und müssen über eine Reihe aufeinander abgestimmter Entfernungskennzeichen abgeleitet werden, der kosmischen Entfernungsleiter. Diesen Prozess störten lange Zeit erhebliche systematische und statistische Unsicherheiten. Von etwa 1970 bis 2000 kam es in der astronomischen Community zu einer heftigen Debatte um H_0 : Die beiden Werte $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ und $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ standen zur Debatte. Die von beiden Lagern angegebenen Unsicherheiten der eigenen Messungen waren so klein, dass die Werte statistisch unverträglich waren.

Doch die Ergebnisse konvergierten, und gegen Ende der 1990er-Jahre schien sich diese Diskrepanz aufzulösen. Das Hubble-Weltraumteleskop (HST) erlaubte es, mit Hilfe der Periode-Leuchtkraft-Beziehung (Leavittsches Gesetz) die Entfernung von Ce-



Zdeněk Bardon / ESO

Anhand von 70 Cepheiden-Sternen in der Großen Magellanschen Wolke, einer Satellitengalaxie unserer Milchstraße, ließ sich der Wert der Hubble-Konstante genauer bestimmen.

pheiden-Sternen bis zu einer Distanz von 25 Mpc zu bestimmen. Da die Physik dieser veränderlichen Sterne gut verstanden ist, ließen sich sekundäre Entfernungskennzeichen verlässlich kalibrieren, bis hin zu Supernovae vom Typ Ia. Für diese thermonuklearen Sternexplosionen von Weißen Zwergen ist die absolute Helligkeit bekannt, sodass sie sich ebenfalls als „Standardkerzen“ eignen – bis hin zu kosmologischen Entfernungen, also bei Rotverschiebungen von $z = 1$ und höher. Das Ergebnis war nicht nur eine Konsolidierung der Hubble-Konstante bei $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, sondern auch die überraschende Erkenntnis, dass sich das Universum beschleunigt ausdehnt (Physik-Nobelpreis 2011 an Perlmutter, Riess und Schmidt).

Die Bestimmung der heutigen (lokalen) kosmischen Expansionsgeschwindigkeit geschieht anhand der genannten Standardkerzen. Seit rund zehn Jahren bietet sich die Möglichkeit, H_0 vom frühen Universum aus zu bestimmen, und zwar über „Objekte“ bekannter Größe, also „Standardzollstöcke“. Die charakteristische Skala

ist hierbei durch die Wellenlänge von Temperaturfluktuationen (Baryonic Acoustic Oscillations, BAO) in der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) gegeben. Die Fundamentalmode dieser Temperaturfluktuationen ergibt sich aus der Größe des Schallhorizonts zur damaligen Epoche. Erste Messungen mit dem WMAP-Satelliten ergaben für H_0 zunächst einen Wert von $(71 \pm 2,4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [1], in exzellenter Übereinstimmung mit den Werten des HST Key Projects zur Messung der Hubble-Konstanten. Alles sah danach aus, als sei die heute gemessene kosmische Ausdehnungsrate konsistent mit derjenigen aus dem frühen Universum.

Nach einigen Jahren der Ruhe an der Hubble-Front traten in den letzten Jahren jedoch neue Spannungen auf: Die beiden Hubble-Skalen ließen sich zunehmend präzisieren. Für das frühe Universum erlaubte dies die deutlich höhere Messgenauigkeit des Planck-Satelliten, mit einer unabhängigen Bestätigung über die Längenskala der BAOs in großen Rotverschiebungsdurchmusterungen. Die BAO-

Längenskala prägt der statistischen Verteilungsfunktion der Galaxien eine charakteristische Skala auf. Diese Daten führen zu einem Wert von eher $(67,5 \pm 0,5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (**Abb. 1**, blau).

Für die Hubble-Skala des lokalen Universums (**Abb. 1**, rot) konnten mittlerweile fünf voneinander unabhängige Entfernungskindikatoren herangezogen werden. Mit der herausragenden Messgenauigkeit des Gaia-Satelliten, Langzeitbeobachtungen mit dem HST und der Positionsbestimmung von interstellaren Gaswolken, die in benachbarten Galaxien als Maser emittieren, gelang es, die Unsicherheit in den geometrischen Entfernungskindikatoren erheblich zu reduzieren.

Nun hat ein Team um den polnischen Astronomen Grzegorz Pietrzyński die Entfernung der Großen Magellanschen Wolke mittels 20 bedeckungsveränderlicher Sterne geometrisch auf besser als ein Prozent bestimmt [2]. Gleichzeitig gelang es einer Gruppe um Adam Riess über eine neue Kalibrierung der WFC3-IR-Kamera des HST, die Helligkeit von Cepheiden in der Großen Magellanschen Wolke und in entfernten Galaxien mit Typ-1a-Supernovae erstmals mit dem gleichen Helligkeitssystem zu bestimmen [3]. Die Unsicherheiten in der kosmischen Entfernungsskala verringerten sich so auf 1,3 Prozent. Für die Hubble-Konstante ergab sich $(74,22 \pm 1,82) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Die statistische Signifikanz der Diskrepanz zum Wert im frühen Kosmos beträgt somit $4,4 \sigma$!

Einiges spricht dafür, dass sich diese Diskrepanz nicht einfach auflösen lässt.¹⁾ Ein Versuch, sie einfach auf eine besondere Position der Milchstraße und der lokalen Gruppe im lokalen Dichte- und Geschwindigkeitsfeld der Galaxien zu reduzieren, wäre gleichbedeutend mit einer systematischen Ausflussgeschwindigkeit von Galaxien mit 700 km/s bei einem Abstand von 200 Mpc [4]. Diese Eigentümlichkeit

ließe sich nur vermeiden, wenn die lokale Verankerung der Cepheiden-Skala signifikant reskaliert würde, im Widerspruch zu jüngsten Ergebnissen mit Gaia und dem Hubble-Teleskop. Bodengebundene Teleskope wie das South Pole Telescope haben die Messungen mit WMAP und Planck mittlerweile mit höherer Auflösung bestätigt und sind in Übereinstimmung mit den BAO-Messungen von Galaxienmusterungen. Daher sollten die Fehlerbalken sowohl der vom frühen wie vom späten Universum abgeleiteten Werte in den nächsten Jahren weiter schrumpfen, auch dank neuer Messmöglichkeiten.

Eine Lösung könnte neue Physik im zugrundeliegenden kosmologischen Modell sein, etwa in Form zusätzlicher Energie, welche die Expansionsrate vor dem Zeitpunkt der Rekombination erhöht. Dies würde den Schallhorizont und so die Diskrepanzen verkleinern. Doch die dafür notwendigen Modifikationen sind beträchtlich (**Abb.1**, schwarz): Diskutierte Ansätze, wie für eine weitere Spezies relativistischer Teilchen oder wechselwirkende Dunkle Materie, sind nur bedingt in der Lage, die Diskrepanz von fast 10 Prozent oder $6,6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ zu überwinden.

Könnten alternative, unabhängige Entfernungskindikatoren helfen? Ein Kandidat hierfür sind Messungen der Hubble-Konstanten durch die Zeitverzögerung zwischen verschiedenen Bildern eines durch eine Gravitationslinse mehrfach abgebildeten Quasars. Hier ist, nach Konstruktion eines Massenmodells für die Gravitationslinse, die Zeitverzögerung direkt proportional zum Kehrwert der Hubble-Konstanten. Messungen für bisher vier Systeme weisen auf einen hohen Wert von $(72,5 \pm 2,2) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ hin, konsistent mit der lokalen Distanzskala, jedoch noch mit signifikanten Variationen von Objekt zu Objekt [5]. Bleiben Gravitationswellen, deren Signal auch unmittelbar die Ableitung einer Entfernung zum Binärsystem und somit der Hubble-Konstanten ermöglicht: Die drei Observablen Amplitude, Frequenz und deren Zeitableitung stehen in direktem Zusammenhang mit den Grundeigenschaften des Binärsystems, wie Masse,

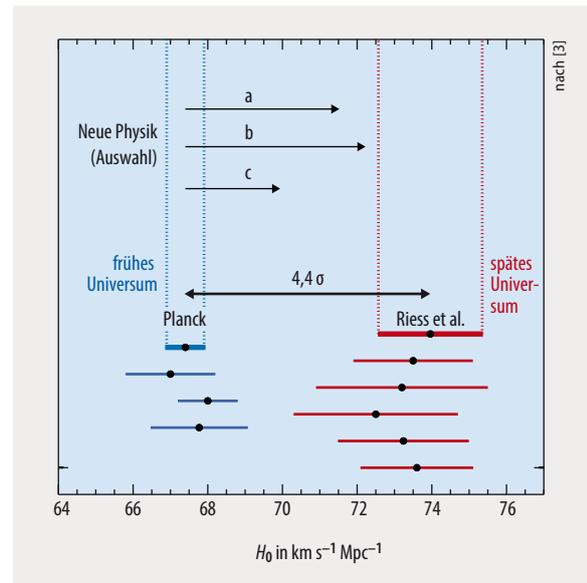


Abb. 1 Der Vergleich der Messwerte für die Hubble-Konstante H_0 aus dem lokalen Universum (rot) mit denen aus dem frühen Universum (blau) zeigt die mit großer statistischer Signifikanz bestehende Diskrepanz. Diese lässt sich auch nicht durch Effekte neuer Physik vollständig überwinden. Dazu zählen zusätzliche relativistische Teilchen (a), wechselwirkende Dunkle Materie (b) oder zeitlich veränderliche Dunkle Energie und Raumkrümmung (c).

Abstand und Winkelgeschwindigkeit des Orbits [6]. Die von den bisherigen Messungen abgeleiteten Werte lassen noch keine Schlussfolgerungen zu. Für eine geeignete Kalibrierung der Entfernungsskala im Prozentbereich sind rund hundert Gravitationswellenereignisse nötig. Hier ruht die Hoffnung auf der Anfang April begonnenen dritten Messkampagne der Gravitationswellendetektoren LIGO, VIRGO und GEO600.

- [1] N. Jarosik, ApJS 192, 14 (2011)
- [2] G. Pietrzyński et al., Nature 567, 200 (2019)
- [3] A. Riess et al., arxiv:1903.07603 (2019)
- [4] B. Tully, H. M. Courtois und J. Sorce, ApJ 152, 50 (2016)
- [5] S. Birrer et al., Mon. Notices Royal Astron. Soc. 484, 4726 (2019)
- [6] B. Schutz, Nature 323, 310 (1986)

Autor

Prof. Dr. Matthias Steinmetz, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam

1) Damit befassten sich 130 Forscherinnen und Forscher im November 2018 beim WE-Heraeus-Symposium „The Hubble Constant Controversy“ in Berlin. Weitere Infos, inklusive des Programms mit den Vortragssfolien, finden sich auf www.we-heraeus-stiftung.de/veranstaltungen/tagungen/2018/hubble2018.