

Trouble mit

Die Hubble-Konstante ist ein Maß dafür, wie schnell sich das Universum jetzt ausdehnt. Astronomen messen diese Größe anhand von kosmischer Hintergrundstrahlung, Supernovae vom Typ Ia, Riesensternen und Gravitationslinsen. Die Methoden kommen jedoch zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen. Bislang gibt es dafür keine Erklärung. Befindet sich die moderne Kosmologie in einer neuen Krise?

NASA, ESA, and E. Rivera-Thorsen (Institute of Theoretical Astrophysics Oslo, Norway)

Albert Einstein hätte an diesem Bild, das in beeindruckender Weise den Gravitationslinseneffekt zeigt, seine wahre Freude gehabt und nicht schlecht darüber gestaunt, dass er beobachtet werden kann. Denn vor etwa 100 Jahren hatte Einstein dieses Phänomen vorausgesagt: Eine Massenansammlung im Vordergrund wirkt wie eine Linse und lenkt das Licht der Hintergrundquellen ab. So werden die Anmutungen von Galaxien in längliche Gebilde und Bögen (rechts oben) verzerrt – auch Mehrfachbilder einer Galaxie kommen so zu Stande. Diese Aufnahme stammt vom Weltraumteleskop Hubble, das in diesem Jahr sein 30-jähriges Jubiläum im All feierte. Astronomen können mit Gravitationslinsen von dieser Art die Hubble-Konstante unabhängig bestimmen.

Hubble



IN KÜRZE

- Wie schnell dehnt sich das Universum zurzeit aus? Die Hubble-Konstante gibt darüber Auskunft.
- Nach einer heftigen Krise um ihren genauen Zahlenwert in den 1990er Jahren entbrennt nun ein neuer Streit, weil sich aktuelle Messergebnisse widersprechen.
- Neue Messmethoden nutzen den kosmischen Mikrowellenhintergrund, Gravitationslinsen und Rote Riesen. Bringen sie endlich Klarheit?

NASA, ESA, and E. Rivera-Thorsen (Institute of Theoretical Astrophysics Oslo, Norway)

Noch vor fast 100 Jahren war unklar, ob das Universum größer ist als das Milchstraßensystem. Erst im Jahr 1925 konnte Edwin Hubble die Distanz zum »Andromedanebel« messen und dadurch belegen, dass dieser uns nächstgelegene große Nebel mehr als zwei Millionen Lichtjahre entfernt ist und damit weit außerhalb unserer Galaxis liegt.

Zu dieser Zeit war bereits bekannt, dass mit diesen Nebeln, die sich durch Hubbles Messung endgültig als Galaxien entpuppten, etwas nicht ganz stimmte. Bereits in den Jahren kurz vor und nach 1920 hatten sich Vesto Slipher in den USA und Carl Wirtz in Deutschland die einfache Frage gestellt, ob sich etwa gleich viele Galaxien auf uns zu wie von uns weg bewegten. Das wäre nur natürlich, wenn die Galaxien zufällige Geschwindigkeiten hätten. Zur Überraschung beider stellte sich jedoch heraus, dass bei Weitem die Mehrheit der Galaxien sich von uns entfernt, als ob diese auf der Flucht vor uns wären. Ende der 1920er und Anfang der 1930er Jahre konnte Hubble die Entfernungen zu ausreichend vielen Galaxien messen, um festzustellen, dass die Geschwindigkeit dieser

Fluchtbewegung mit der Entfernung der Galaxien linear zunimmt, also derart, dass sich die Geschwindigkeit bei doppelter Entfernung verdoppelt. Die Geschwindigkeiten der Galaxien sind also zu deren Entfernung proportional. Die Proportionalitätskonstante wurde bald als Hubble-Konstante bezeichnet. Sie wird gewöhnlich durch H_0 abgekürzt.

Die Hubble-Konstante gibt an, wie schnell sich eine Galaxie von uns fortbewegt, wenn sie eine bestimmte Entfernung hat. Sie hat daher die Bedeutung Geschwindigkeit/Entfernung und wird in den in der Astronomie und Kosmologie üblichen Einheiten in Kilometer pro Sekunde und Megaparsec ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) angegeben. Ihr Wert gibt demnach an, um wie viele Kilometer pro Sekunde eine Galaxie auf Grund der kosmischen Fluchtbewegung schneller wird, wenn sie ein Megaparsec (Mpc) weiter entfernt ist. Hubble selbst fand einen Wert nahe $500 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, der sich aber später als grob fehlerhaft erwies.

Nach Jahrzehnten einer langsamen Annäherung durch zahllose Messungen sind wir heute davon überzeugt, dass H_0 etwa $70 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ beträgt. Kürzt man

die beiden Längeneinheiten, erhält man einen Wert von ungefähr $2,2 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, der die Ausdehnungsrate des Universums beschreibt. Etwas anschaulicher kann man sie so deuten, dass ein Meterstab, wenn er an der kosmischen Ausdehnung teilnimmt, pro Jahr um den Radius eines Wasserstoffatoms länger würde.

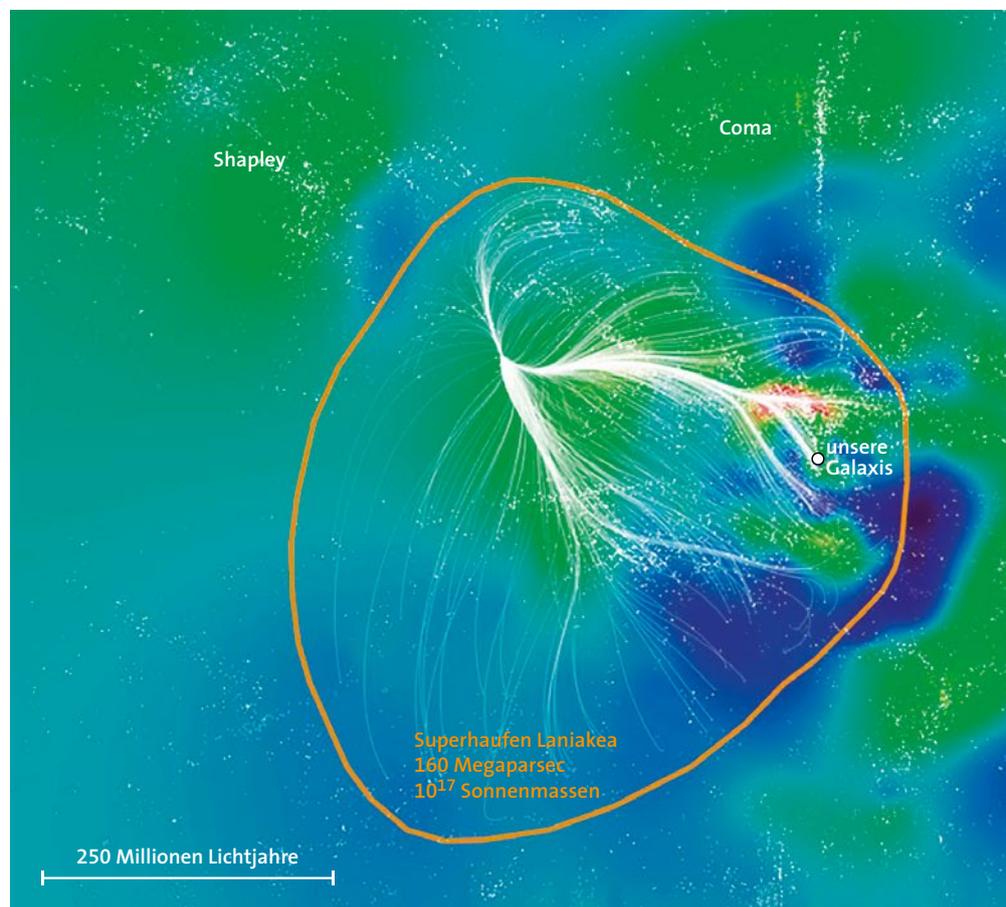
Geschwindigkeiten im Universum zu messen, ist einfach. Dazu braucht ein Astronom einen Spektrografen und ein Objekt, in dessen Spektrum Fraunhofer-Linien identifiziert werden können. Diese Linien erscheinen bei etwas größeren oder kleineren Wellenlängen, als die Atomphysik sie vorgibt, wenn das Objekt sich von uns weg oder auf uns zu bewegt. Aus dem Betrag dieser Rot- oder Blauverschiebung ergibt sich direkt die Geschwindigkeit.

Das Problem dabei ist also nicht die Messung, sondern deren Deutung. Die Galaxien, die wir beobachten können, nehmen einerseits an der kosmischen Fluchtbewegung teil, haben andererseits aber auch Eigen- oder Pekuliargeschwindigkeiten (siehe Grafik unten). Diese kommen dadurch zu Stande, dass die Galaxien durch die Schwerkraft anderer Objekte in ihrer Nachbarschaft angezogen werden.

Zu Hause im Superhaufen

Ströme von Galaxien, die sich unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Anziehung und der kosmischen Expansion durchs All bewegen, enthüllen die Umriss einer gigantischen Struktur. Astronomen gaben ihr den Namen Laniakea – hawaiianisch für »unermesslicher Himmel«. Unsere Galaxis (Kreis) ist Teil dieses 520 Millionen Lichtjahre großen Gebildes. Es umfasst rund eine Million Galaxien (weiße Punkte) und Regionen großer (rot, gelb) und mittlerer Dichte (grün). Die Expansion des Universums zeigt sich erst außerhalb der orange markierten Zone. Innerhalb von Laniakea folgen die Galaxien verschiedenen Strömungen, die durch weiße Linien angedeutet sind.

Unser heimatlicher Superhaufen Laniakea im Video:
<http://goo.gl/VjWRLL>



SDvision interactive visualization software by DP at CEA/Saclay, France (public.nrao.edu/news/supercluster-gbt/) / CC BY 3.0 (creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode)

Damit die Pekuliargeschwindigkeiten gegenüber den Hubble-Geschwindigkeiten unbedeutend werden, müssen die Galaxien mindestens etwa 50 Mpc von uns entfernt sein. Solche und noch wesentlich größere Entfernungen zu messen, ist die eigentliche Herausforderung bei der Bestimmung der Hubble-Konstante.

Bedeutung der Hubble-Konstante

Warum ist uns die Hubble-Konstante überhaupt so wichtig? Warum wollen wir sie so genau wie nur möglich wissen? Der wichtigste Grund dafür ist, dass allein die Hubble-Konstante unserem Universum eine Skala und damit einen Maßstab verleiht. Um das zu verdeutlichen, lohnt es sich, kurz darüber nachzudenken, welche Arten von Größen in der Astronomie und Kosmologie eigentlich gemessen werden. Beobachten wir Objekte am Himmel, sehen wir Winkelgrößen, aber keine absoluten Längen. Ohne die Entfernung dieser Objekte zu kennen, können wir nicht wissen, wie groß sie wirklich sind. Ein ähnliches Problem betrifft die Leuchtkraft der Objekte im Universum. Da uns ein Objekt umso lichtschwächer erscheint, je weiter es von uns entfernt ist, können wir lediglich den Energiefluss messen, der bei uns

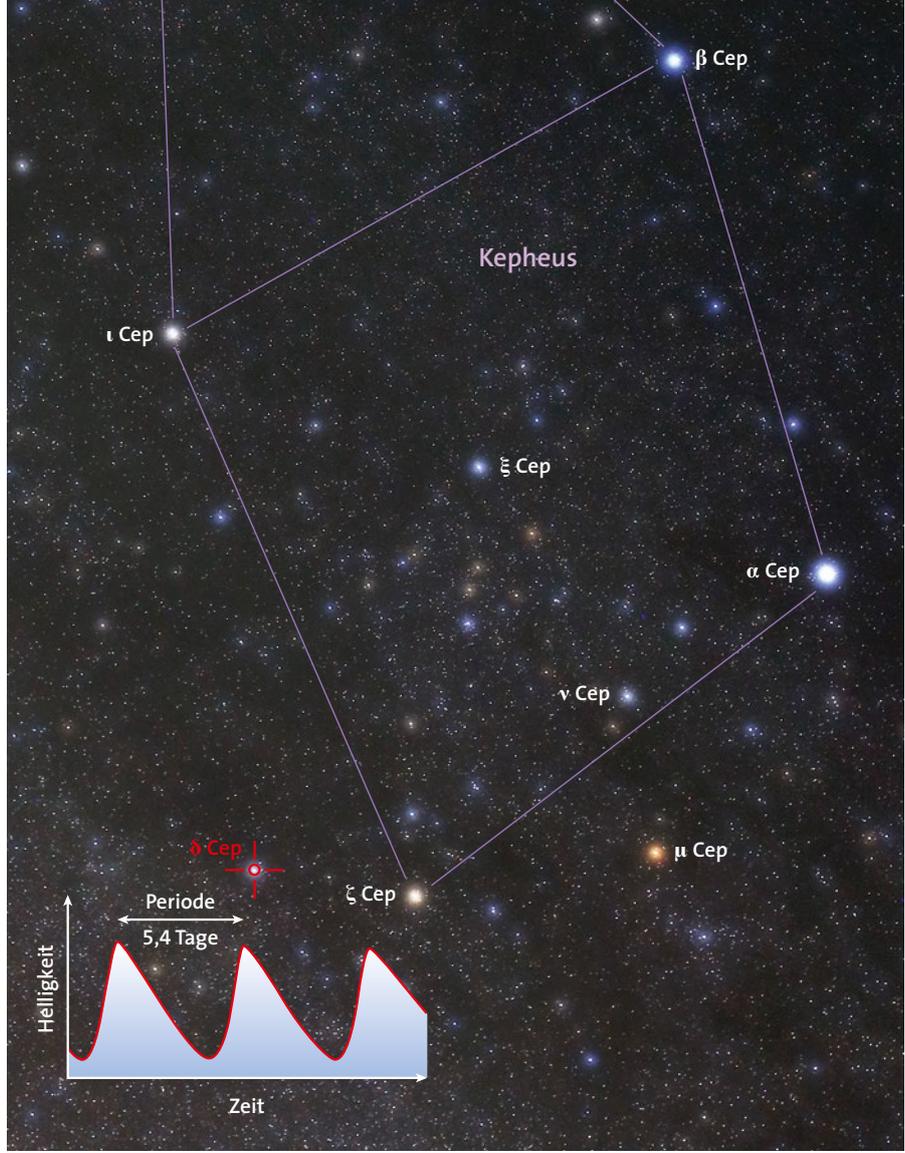
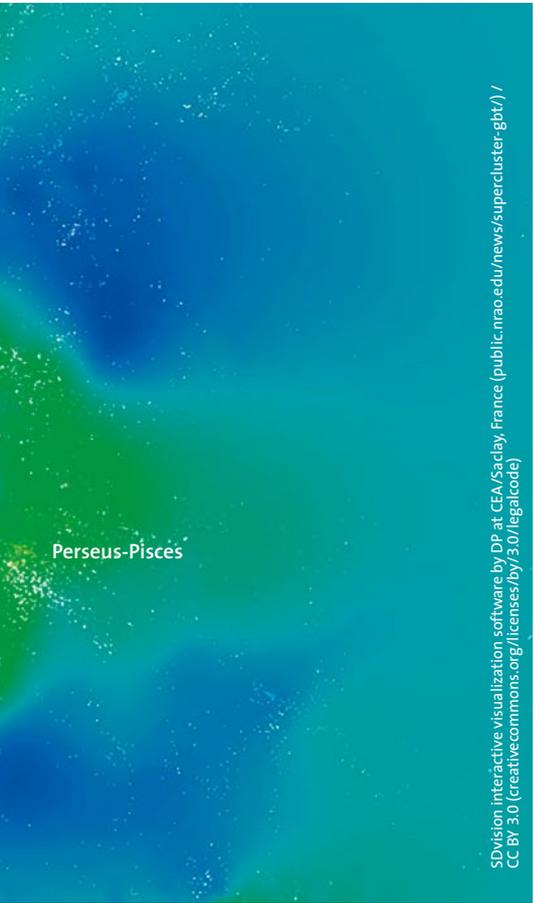


Foto: Uwe Reichert; Grafik: SuW-Grafik



SDSS interactive visualization software by DP at CEA/Saclay, France (public.nrao.edu/news/supercluster-gbr/) / CC BY 3.0 (creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode)

Standardkerzen 1: Veränderliche Sterne

Delta Cephei (δ Cep; rotes Kreuz) im Sternbild Kepheus ist der Prototyp für Veränderliche, die Cepheiden. Diese jungen Sterne variieren ihre Größe, was zu periodischen Schwankungen der Helligkeit führt (siehe Lichtkurve unten).

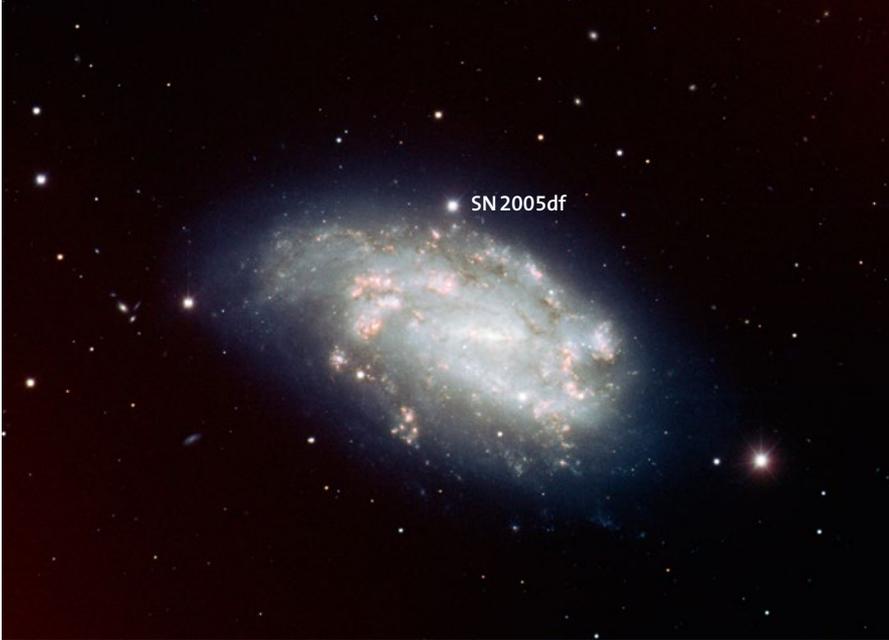
nachweisbar ist. Das ist die Energie, die wir von den Objekten pro Zeiteinheit und Detektorfläche empfangen. Die Leuchtkraft bekämen wir daraus nur, wenn wir die Entfernung schon wüssten. Genau wie die absolute Größe eines Objekts können wir daher auch die absolute Helligkeit eines Objekts nicht direkt messen. Mit Spektrografen können wir schließlich Geschwindigkeiten messen. Die haben zwar einen absoluten Wert, setzen sich aber aus der Flucht- und der Pekuliargeschwindigkeit zusammen. Keine dieser beobachtbaren Größen verrät uns jedoch, wie groß das Universum tatsächlich ist.

In dem im Großen und Ganzen homogenen Universum, in welchem wir uns aus gutem Grund aufzuhalten glauben, gibt es nur eine einzige Skala, nämlich diejenige, welche durch die Hubble-Konstante

gesetzt wird. Der Kehrwert der Hubble-Konstante, $4,5 \cdot 10^{17}$ Sekunden, setzt eine Zeitskala von 14,4 Milliarden Jahren. Multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich daraus eine Längenskala von 4,4 Gigaparsec. Ohne die Hubble-Konstante hätten wir keine Vorstellung davon, wie alt das Universum ist und welche Längenskala dafür charakteristisch ist.

Standardkerzen 1: Veränderliche Sterne

Die traditionelle und bis heute betriebene Methode, die Hubble-Konstante zu messen, beruht auf verschiedenen Klassen von Objekten, deren Leuchtkraft wir kennen oder zu kennen glauben. Solche Objekte werden als Standardkerzen bezeichnet. Historisch die erste dieser Klassen waren bestimmte Sterne, die deswegen



Standardkerzen 2: Typ Ia-Supernovae

Dieses Farbenkompositbild zeigt die Spiralgalaxie NGC 1559 im Sternbild Netz und wurde mit dem Instrument FORS1 am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile aufgenommen. Hervorgehoben ist die Position der Sternexplosion SN 2005df, die als Supernova vom Typ Ia klassifiziert wurde. Astronomen können einige dieser Supernovae nutzen, um die kosmologischen Parameter, darunter auch die Hubble-Konstante, zu bestimmen.

veränderlich sind, weil sie periodisch ihre Größe ändern, also pulsieren. Die Entfernungen zu einigen dieser Sterne können direkt durch die Parallaxe bestimmt werden, welche durch die Umlaufbewegung der Erde um die Sonne im Lauf eines Jahres zu Stande kommt. In solchen Fällen rechnen Astronomen den Energiefluss in die Leuchtkraft um. Dabei fanden sie, dass bei solchen pulsationsveränderlichen Sternen ein Zusammenhang zwischen der Periode des Lichtwechsels und der Leuchtkraft besteht, so dass die Leuchtkraft auch indirekt dadurch bestimmt werden kann, dass man die Periode der Veränderlichkeit misst. Solche Sterne hatte Hubble im Andromedanebel identifiziert, als er dessen Entfernung bestimmte. Es gibt jedoch wieder verschiedene Klassen dieser Sterne, namentlich die Delta-Cephei-Sterne oder Cepheiden (siehe Bild S. 29) in der Sternpopulation I (metallreiche) und die RR-Lyrae-Sterne in der Population II (metallärmere). Eines der Probleme bei Hubbles eigener Bestimmung von H_0 war, dass er RR-Lyrae für Delta-Cephei-Sterne hielt und deshalb die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung falsch kalibrierte.

Da jede Geschwindigkeitsmessung die Summe aus der Hubble- und der Eigengeschwindigkeit bestimmt, müssen die Pekuliargeschwindigkeiten entweder bekannt sein und abgezogen werden, oder sie müssen so klein sein, dass sie nicht stören. Bei Geschwindigkeits- und Entfernungsmessungen innerhalb von 50 Mpc müssen Astronomen daher einen großen Aufwand betreiben, um die Eigengeschwindigkeiten so genau wie möglich modellieren und bestimmen zu können. Wenn sie dagegen zu größeren Entfernungen übergehen, erwächst das Problem, dass Sterne

bald nicht mehr einzeln optisch aufgelöst werden können. Aus diesem Grund sind die Kosmologen gezwungen, bei großen Distanzen zu anderen, helleren Standardkerzen überzugehen, deren Entfernung sie dann mit Hilfe der pulsationsveränderlichen Sterne kalibrieren. Auf diese Weise entsteht eine »kosmische Entfernungsleiter«, auf der jede Sprosse durch die vorherige geeicht werden muss. Die Kosmologen hangeln sich Sprosse für Sprosse in die Tiefe des Alls vor (siehe SuW 11/2014, S. 30).

Standardkerzen 2: Supernovae vom Typ Ia

Die vielleicht wichtigste Klasse von Standardkerzen, die hell genug für kosmologische Messungen sind, bilden die Supernovae vom Typ Ia (siehe SuW 3/2020, S. 30, und Bild oben). Solche Supernovae sind Sternexplosionen, die innerhalb einiger Tage eine Leuchtkraft entwickeln, wie sie sonst nur von ganzen Galaxien abgestrahlt wird. Sie werden dadurch ausgelöst, dass ein Weißer Zwergstern so gestört wird, dass das in seinem Kern angereicherte Material zündet und in einer Kernfusionsreaktion verbrennt, die sich wegen der besonderen Bedingungen im Weißen Zwerg sehr rasch ausbreiten kann.

Normale Sterne werden durch den Druck stabilisiert, der durch die hohen Temperaturen in ihrem Inneren zu Stande kommt. Das ist bei Weißen Zwergen anders. Dort ist der Druck nicht mehr thermischen Ursprungs, sondern wird allein durch die Elektronen verursacht, die sich wegen des Pauli-Verbots nicht beliebig nahe kommen dürfen. Ein solcher quantenphysikalischer Druck wird als Entartungsdruck bezeichnet. Seine Besonder-

heit ist, dass er nur noch von der Dichte der Elektronen, aber nicht mehr von ihrer Temperatur abhängt. Wird solches entartetes Material stark komprimiert, läuft der Betazerfall »rückwärts« ab, durch den freie Neutronen in Protonen und Elektronen zerfallen: Die Elektronen vereinigen sich dann mit den Protonen zu Neutronen und verschwinden – und mit ihnen auch ihr Entartungsdruck. Daraufhin wird das Material extrem verdichtet, erhitzt sich stark und zündet. Im Inneren des Weißen Zwergs breitet sich eine unregelmäßig geformte Brennfront mit großer Oberfläche aus, die überschallschnell wird und so viel Energie freisetzt, dass der Stern explodiert.

Das Entscheidende dabei ist, dass die Masse vorgegeben ist, bei der bereits eine kleine Störung genügt, um einen Weißen Zwerg derart zu zünden. Es ist ein fester Bruchteil der Chandrasekhar-Grenzmasse, bei der es sich um die größte Masse handelt, die durch den Entartungsdruck der Elektronen stabilisiert werden kann. Also ist bekannt, wie viel Material bei solchen Supernovae explodiert. Bekannt ist aber auch dessen Zusammensetzung: Es handelt sich um Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffatomkerne. Auf Grund der bekannten Menge und Art des Sprengstoffs liegt es nahe, dass die durch die Explosion freigesetzte Energie ebenfalls bekannt ist und damit die Leuchtkraft der Supernovae. Dabei spielt es eine untergeordnete Rolle, durch welche Art der Störung der Weiße Zwerg zur Explosion getrieben wird. In vielen Fällen wird er durch einen benachbarten roten Riesenstern überfüttert, von dem lose gebundenes Material auf den Weißen Zwergstern abfließt. In anderen Fällen verschmelzen zwei Weiße Zwerge (siehe SuW 4/2020, S. 40).

Dieses Explosionsschema muss noch erheblich verfeinert werden, um auf beobachtete Supernovae anwendbar zu sein. Für unsere Diskussion ist nur wichtig, dass solche Supernovae sehr hell und in ihrem Mechanismus bekannt genug sind, um über kosmische Entfernungen hinweg als Standardkerzen dienen zu können.

Standardkerzen 3: Die Spitze des roten Riesenasts

Weißer Zwerge und Rote Riesen sind zwei Arten von Sternen, die an ganz verschiedenen Stellen in einem der wichtigsten Schemata der Astrophysik angesiedelt sind. Gemeint ist das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD), in dem die Leuchtkraft der Sterne gegenüber ihrer Farbe angeordnet ist (siehe Grafik rechts). Das markanteste Gebilde in dieser Darstellung ist die Hauptreihe, auf der solche Sterne zu liegen kommen, die dadurch stabilisiert werden, dass in ihrem Inneren Wasserstoff zu Helium verbrennt. Die Hauptreihe zieht sich von der hellen blauen Ecke links oben diagonal durch das HRD in die leucht-schwache rote Ecke rechts unten.

Wenn der Wasserstoffvorrat der Hauptreihensterne zur Neige geht, verlassen sie die Hauptreihe, wandern von dort aus auf die helle rote Ecke des Diagramms zu und bilden auf diese Weise den roten Riesenast. An dessen Spitze zündet im Inneren der Sterne das dort angereicherte Helium. In nicht zu massereichen Sternen mit einer Masse von weniger als etwa 1,8 Sonnenmassen ist dieser Heliumkern bis zur Zündung entartet, ähnlich wie bei den Weißen Zwergen. Die Entartung kann Heliumkerne bis zu etwa 0,5 Sonnenmassen stabilisieren. Wenn diese Masse überschritten wird, kommt es zu einer explosionsartigen Zündung des Heliums, die als Helium-Flash bezeichnet wird. Weil dabei wiederum eine bekannte Menge bekannten Materials als Brennstoff dient, können die Sterne an der Spitze des roten Riesenasts ebenfalls als Standardkerzen dienen, die über weite kosmische Distanzen beobachtbar sind.

Jenseits der Entfernungsleiter

Die Hubble-Konstante anhand von Standardkerzen zu messen, entspricht einem Aufstieg auf der schon erwähnten Entfernungsleiter, die jedoch auf lokalem und festem Boden stehen muss: Der Abstand ihrer Sprossen muss durch Messungen in unserer unmittelbaren kosmischen Nach-

barschaft geeicht werden. Jeder Fehler, der sich dort einschleichen mag, überträgt sich von einer Sprosse auf die nächste. Deshalb streben die Forscher an, die Hubble-Konstante möglichst auch mit anderen Methoden zu messen, welche ohne die Entfernungsleiter auskommen und dennoch gleich zu großen kosmischen Entfernungen reichen. Ein faszinierender neuer Ansatz, die Hubble-Konstante zu messen, kann in etwas fernerer Zukunft aus der Analyse von Gravitationswellen entstehen.

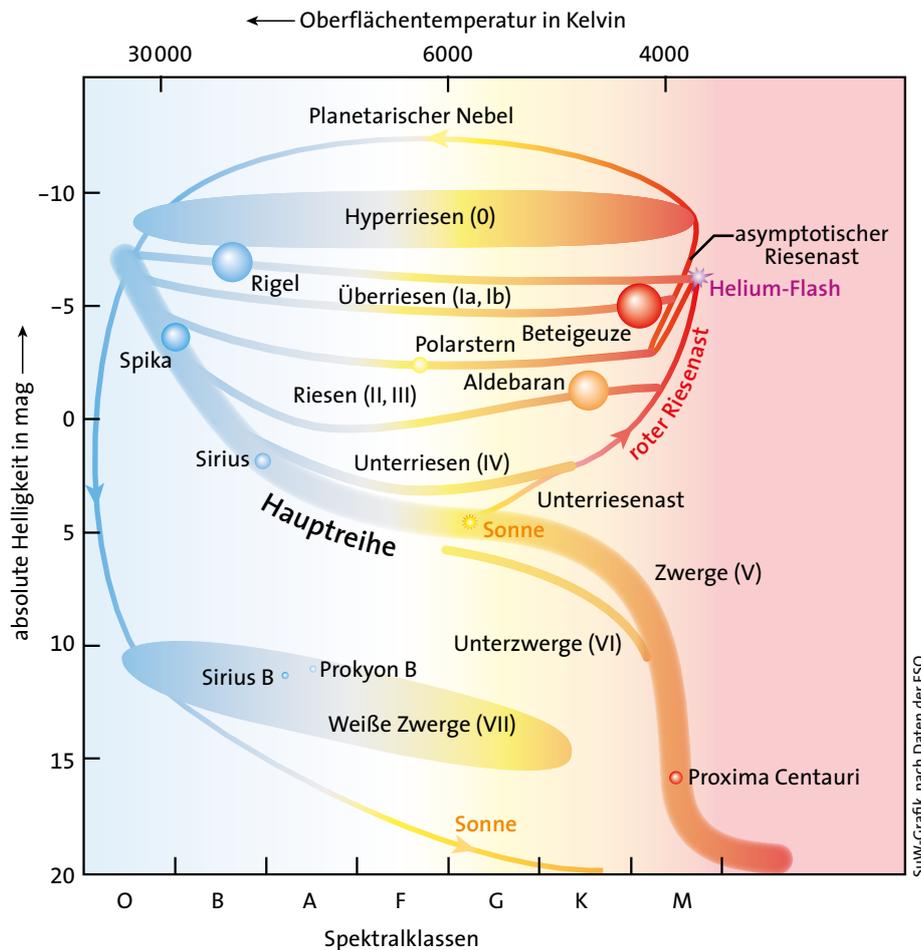
An dieser Stelle ist es vielleicht sinnvoll, auf einen Einwand einzugehen, der häufig vorgebracht wird. Bekanntlich schauen wir in die Vergangenheit, wenn wir Objekte in großen Entfernungen beobachten, weil die Lichtgeschwindigkeit endlich ist. Das Licht einer Quelle braucht umso länger zu uns, je weiter die Quelle entfernt ist. Bedeutet das nicht, dass wir die Hubble-Konstante zu immer früheren

Zeiten messen, wenn wir immer weiter entfernte Objekte beobachten? Sollten wir dann nicht andere Werte erwarten, als wenn wir sie heute messen?

So nachvollziehbar diese Kritik zu sein scheint, trifft sie doch nicht zu. Bei solchen Messungen wird nicht nur die Hubble-Konstante, sondern eigentlich ein Integral über ihren zeitlichen Verlauf gemessen. Als Resultat wird dann die heutige Hubble-Konstante angegeben, auch wenn dafür sehr weit entfernte und damit sehr tief in unserer Vergangenheit liegende Objekte beobachtet werden.

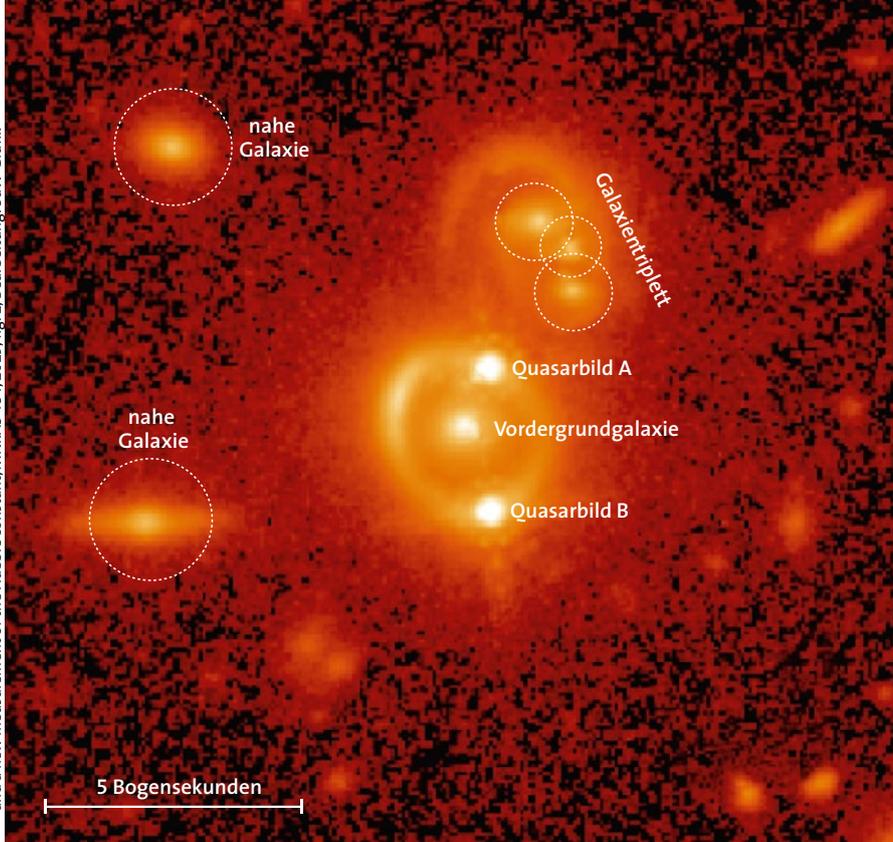
Gravitationslinsen

Eine der bestechendsten, weil konzeptionell einfachsten Methoden, die Hubble-Konstante direkt bei kosmischen Entfernungen zu messen, beruht auf der Lichtablenkung im Schwerfeld von Galaxien. Geht ein Lichtstrahl auf seinem Weg



Standardkerzen 3: Rote Riesen

Im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) ist die absolute Helligkeit oder Leuchtkraft senkrecht gegen die Temperatur der Sternoberfläche (nach links zunehmend!) oder Spektralklasse in der Waagerechten aufgetragen. Die dünne Linie folgt dem Weg der Sonne. Sie wird sich zum leuchtkräftigen Roten Riesen vergrößern und durch den Bereich rechts oben im HRD wandern. Die Maximalhelligkeiten Roter Riesen benutzen Forscher als Standardkerze.



Kosmische Fata Morgana

Mit dem Weltraumteleskop Hubble nahm das H0LiCOW-Team das Doppelbild A und B des Quasars SDSS 1206+4332 auf. Dieses Trugbild kommt maßgeblich von der als Vordergrundgalaxie bezeichneten Linse, die bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 0,748$ liegt. Der Quasar ist als Hintergrundquelle mit $z = 1,789$ viel weiter entfernt. Der Laufzeitunterschied zwischen den beiden Quasarbildern beträgt $111,3 \pm 3$ Tage. In einer neuen Forschungsarbeit aus dem Jahr 2019 berücksichtigt das H0LiCOW-Team bei der Modellierung ein Galaxientriplett (rechts) und zwei weitere nahe Galaxien (links).

von einer weit entfernten Quelle zum Beobachter nahe am Zentrum einer Galaxie vorbei, wird er leicht zu diesem Sternsystem hin gekrümmt. Der Beobachter, der die Quelle in der rückwärtigen Verlängerung des Lichtstrahls, der bei ihm eintrifft, sieht, nimmt die Quelle daher leicht von der Galaxie weg versetzt wahr: Die Galaxie wirkt wie eine Sammellinse und wird daher treffend als Gravitationslinse bezeichnet. Steht die als Gravitationslinse wirkende Galaxie in günstiger Entfernung und ist sie genügend massereich, kann sie Doppel- oder Mehrfachbilder desselben Objekts erzeugen, denn mehrere verschiedene Lichtwege von der Quelle am Zentrum der Linse vorbei zum Beobachter sind möglich.

Seitdem Astronomen im Jahr 1979 den ersten derart doppelt abgebildeten Quasar QSO0957+561 entdeckt hatten, wurden viele solcher Mehrfachbilder gefunden (siehe Bild oben). Betrachten wir ein solches Gravitationslinsensystem näher, in dem beispielsweise aus einem einzelnen Quasar vier Bilder längs vier verschiedener Lichtwege entstehen. Diese Lichtwege haben im Allgemeinen leicht unterschiedliche Längen, so dass sich die Laufzeiten, die das Licht bis zum Beobachter benötigt, leicht unterscheiden. Hinzu kommt ein Phänomen der allgemeinen Relativitätstheorie, der Shapiro-Effekt: Ein Lichtstrahl, der tiefer in ein Gravitationsfeld eindringt, erscheint gegenüber einem Lichtstrahl verzögert, der weniger

tief eindringt. Beide Effekte zusammen bewirken, dass die Lichtlaufzeit in jedem unserer vier Bilder etwas verschieden ist. Wenn sich die Quelle verändert, etwa indem sie einen Lichtblitz abgibt, erscheint dieser Blitz dem Beobachter vierfach, aber zu unterschiedlichen Zeiten.

Also lässt sich dann gegenüber dem ersten Bild eine Laufzeitverzögerung messen. Bei Galaxien, die als Gravitationslinsen wirken, beträgt diese Verzögerung üblicherweise einige Wochen bis Monate; sogar Unterschiede von Jahren wurden gemessen. Dabei lohnt es sich, die Laufzeiten zu vergleichen: Das Licht einer Quelle, die wir über kosmische Entfernungen hinweg beobachten, ist üblicherweise einige Milliarden Jahre unterwegs. Von Bild zu Bild verändert sich diese gigantische Laufzeit lediglich um einige Wochen bis Monate! Es handelt sich im Grunde um einen winzigen Effekt.

Laufzeiten und Hubble-Konstante

Für unsere Diskussion ist entscheidend, dass dieser Laufzeitunterschied in mehrfach abbildenden Gravitationslinsensystemen davon abhängt, wie groß das für uns überschaubare Universum ist und dass diese kosmische Längenskala durch die Hubble-Konstante beziehungsweise ihren Kehrwert bestimmt wird (siehe SuW 7/2020, S.20). Der Laufzeitunterschied erweist sich als direkt proportional zur Hubble-Zeit H_0^{-1} . Wenn wir ihn messen und diese Messung interpretie-

ren könnten, stünde uns eine Methode zur Verfügung, die Hubble-Konstante direkt zu bestimmen. Um solche Messungen durchzuführen, benötigen Astronomen ein Mehrfachbild einer veränderlichen Quelle. Deren Lichtkurve müssen sie dann in mindestens zweien dieser Bilder messen. Eines der Bilder, gewöhnlich das hellste, wird die kürzeste Laufzeit haben. Die Lichtkurven der anderen Bilder werden mit einer gewissen Verzögerung der Lichtkurve des ersten Bildes folgen, und diese Verzögerung gilt es zu messen. Ohne auf die erheblichen Schwierigkeiten einzugehen, die dabei auftreten, nehmen wir an, dass diese Messung mit genügender Genauigkeit gelungen ist. Wie lässt sie sich nun deuten?

Da die Längen der verschiedenen Lichtwege und die Reisezeiten des Lichts auf diesen Wegen davon abhängen, wie die Massenverteilung der Linse beschaffen ist, muss diese Massenverteilung noch modelliert werden, bevor die Hubble-Konstante aus der Laufzeitverzögerung bestimmt werden kann. Darin liegt die größte Unsicherheit dieser Methode. Sie wurde jedoch erheblich dadurch verringert, dass vor allem durch das Weltraumteleskop Hubble hochaufgelöste Bilder von Gravitationslinsensystemen aufgenommen werden konnten, deren Detailreichtum die Vielzahl möglicher Modelle sehr stark einschränkt. Inzwischen sind die Modelle so gut geworden, dass auch kleine Einzelheiten der beob-

achteten Bilder im Modell reproduziert werden können. Dadurch wächst das Vertrauen darauf, dass auch die Werte der Hubble-Konstante, die aus Laufzeitverzögerungen in Gravitationslinsensystemen bestimmt wurden, zuverlässig sind.

Der kosmische Mikrowellenhintergrund

Das älteste elektromagnetische Signal, das wir beobachten können, ist der kosmische Mikrowellenhintergrund (englisch: cosmic microwave background, CMB). Er entstand, als das kosmische Plasma etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall zum ersten Mal neutral wurde und die Wärmestrahlung freisetzte, die im heißen, frühen Anfangszustand des Universums entstanden war (siehe SuW 5/2014, S. 36). Genaue Beobachtungen dieser kosmischen Restwärmestrahlung zeigen, dass bereits damals Strukturen im Universum angelegt waren, die heute noch in Form von geringen Temperaturschwankungen des CMB beobachtbar sind.

Um diese Variationen unter einer Vielzahl von Vordergründen freizulegen und genau zu vermessen, muss der gesamte Himmel bei möglichst vielen Frequenzen um 100 Gigahertz beziehungsweise Wellenlängen um drei Millimeter beobachtet werden. Das gelingt am besten außerhalb der Erdatmosphäre, zuletzt mit dem europäischen Planck-Satelliten. Unter den wichtigsten Ergebnissen dieser Mission ist eine Himmelskarte der Temperaturschwankungen im CMB, die hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit und Genauigkeit kaum mehr übertroffen werden kann. Um diese Karte zu interpretieren, filtern die Experten in einem Verfahren, das eng mit einer Fourier-Transformation verwandt ist, Strukturen bestimmter Winkelgröße heraus und bestimmen deren Amplitude. Wiederholen sie dies für möglichst viele Winkelgrößen, können sie die Amplitude als Funktion der Winkelgröße auftragen. Die Kurve, die dabei entsteht – ein so genanntes Leistungsspektrum (englisch: power spectrum) –, weist eine ganz charakteristische Folge von Maxima und Minima auf (siehe Kasten und Grafik rechts). Die Lage dieser Maxima und Minima, deren Höhen beziehungsweise Einsenkungen, verraten einige wesentliche Eigenschaften unseres Universums.

Die physikalische Ursache der Schwingungen, die sich in der Folge von Maxima und Minima zeigen, sind Schallwellen im

frühen Universum. Sie werden dadurch angetrieben, dass gewöhnliche, baryonische Materie durch die Schwerkraft der Dunklen Materie komprimiert wird und infolge ihres dadurch wachsenden Drucks wieder expandiert. Da die baryonische Materie im frühen Universum eng an die überreich vorhandene Wärmestrahlung gekoppelt ist, ist die Schallgeschwindigkeit sehr hoch: Sie liegt bei knapp 60 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Außer der Schallgeschwindigkeit ist aber auch bekannt, wie lange diese Schallwellen Zeit hatten, sich auszubreiten, nämlich während der insgesamt etwa 380 000 Jahre, die zwischen dem Urknall und der Frei-

setzung des CMB vergingen. Diese Zeitspanne, multipliziert mit 60 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, ergibt den Schallhorizont von etwa 230 000 Lichtjahren. Damit haben wir also genau eine solche absolute Längenskala zur Verfügung, wie sie uns eingangs fehlte. Diese Längenskala wurde nicht nur dem CMB aufgeprägt, sondern auch der später aus den frühen kosmischen Strukturen entstandenen Galaxienverteilung. Große Durchmusterungen der Galaxienverteilung zeigen tatsächlich ein Schwingungsmuster mit einer dem Schallhorizont entsprechenden Wellenlänge, das auf die frühen baryonischen akustischen Oszillationen (BAOs)

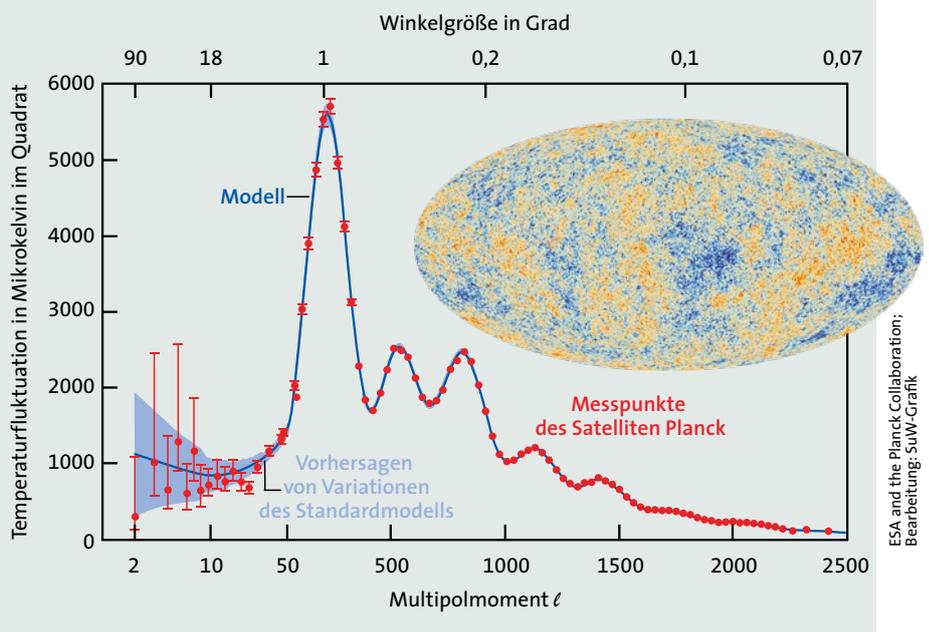
Lesen im Muster der Hintergrundstrahlung

Aus den Messdaten der kosmischen Hintergrundstrahlung (englisch: cosmic microwave background, kurz CMB) des Planck-Satelliten (siehe kleines Bild unten) rekonstruieren die Kosmologen eine wichtige Kurve: das Leistungsspektrum der CMB-Temperaturschwankungen (siehe Grafik unten).

Nach oben ist ein Maß für die Schwankung – genauer gesagt das Quadrat der Schwankungsamplitude – aufgetragen. Nach rechts nimmt die Winkelgröße der Schwankungen immer weiter ab. Eine wesentliche Aussage aus dem Kurvenverlauf ist, dass »Flecken« von der Größe eines Grads auf der CMB-Karte am häufigsten vorkommen: deshalb das Maximum bei 1 Grad. Dies verträgt sich mit dem Wissen der Kosmologen über das Wachstum von Strukturen.

Simuliert man das Leistungsspektrum für unterschiedliche Kombinationen der kosmologischen Parameter, ändern sich insbesondere die Werte für die Maxima und Minima. Diese hängen vor allem von der gesamten Materiedichte im Kosmos und seiner Geometrie ab. Aus der Position des ersten Maximums im beobachteten Spektrum ergibt sich, dass der Raum nahezu oder ganz flach (euklidisch) ist.

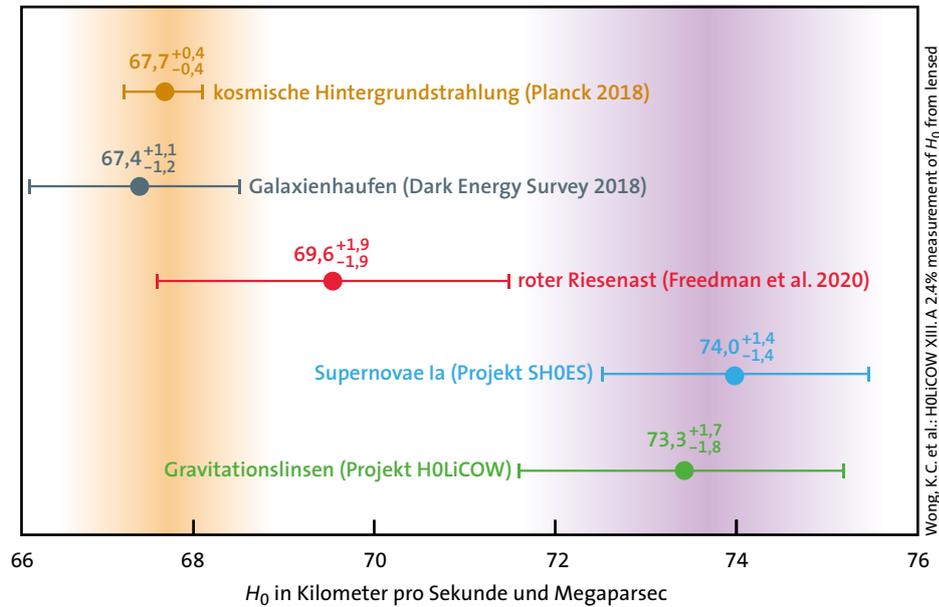
Weitere Parameter wie Alter des Universums, Hubble-Konstante und Dichten für Baryonen, Dunkle Materie, Dunkle Energie und Gesamtdichten lassen sich so bestimmen. Die Dichtefluktuationen wurden im sehr frühen Universum angelegt und spiegeln die Verteilung der Dunklen Materie wider.



ESA and the Planck Collaboration; Bearbeitung: SuW-Grafik

Eine klaffende Lücke

Die Messwerte der Hubble-Konstante H_0 mit den jeweiligen Unsicherheiten für das frühe (orange hinterlegt) und späte Universum (violett hinterlegt) widersprechen sich: Einerseits liefern die Messungen des Mikrowellenhintergrunds (Planck-Mission) und der kombinierten Analyse der großräumigen Verteilung von Galaxien (Dark Energy Survey) einen H_0 -Wert von rund 67 Kilometern pro Sekunde und Megaparsec. Andererseits ist der Wert aus Supernovae vom Typ Ia (Projekt SH0ES) und Gravitationslinsen (Projekt H0LICOW) fast zehn Prozent höher. Wie ist das zu erklären? Leider tendiert der Wert basierend auf der neuen Methode mit Roten Riesen (rot) weder zur einen, noch zur anderen Seite.



Wong, K. C. et al.: H0LICOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3% tension between early and late-universe probes. MNRAS 498, 2020, fig. 12; Bearbeitung: SuW-Grafik

zurückgeht (siehe SuW 7/2020, S. 26). Aus Messungen der beobachteten Winkelgröße der BAOs und deren Vergleich mit der bekannten Größe des Schallhorizonts ergibt sich ebenfalls ein Entfernungsmaß, das für die Kosmologie zunehmend genutzt wird.

Für unsere Diskussion sind die Lage des ersten Maximums sowie die Amplituden des zweiten und dritten Maximums im Leistungsspektrum besonders wichtig: Die Lage des ersten Maximums

ist durch die Summe der Dichteparameter Ω_m der gesamten Materie und der kosmologischen Konstante Ω_Λ bestimmt, während die Amplituden des zweiten und des dritten Maximums die Dichten ρ_b und ρ_d der baryonischen und der Dunklen Materie verraten. Die Materiedichte ist die Summe aus diesen beiden: $\rho_m = \rho_b + \rho_d$.

Nun unterscheiden sich die Dichten von den Dichteparametern auf eine Weise, die für unsere Diskussion wichtig

wird. Die newtonsche Gravitationskonstante G zusammen mit der Hubble-Konstante H_0 ergibt die kritische Dichte, definiert als $\rho_{cr} = 3H_0^2/(8\pi G)$.

Hätte die kosmische Materie diese kritische Dichte, käme die Ausdehnung des Universums nach beliebig langer Zeit gerade zum Stillstand. Der Dichteparameter der Materie ist das dimensionslose Verhältnis aus der Materiedichte und der kritischen Dichte, $\Omega_m = \rho_m/\rho_{cr} = (8\pi G/(3H_0^2)) \rho_m$, und der kosmologischen

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

► Kostenfreie Exkursionen und Begegnungen

11.11.2020: Virtueller Redaktionsbesuch bei **Sterne und Weltraum**, digital

20.11.2020: Online-Exkursion »Besichtigung des Weltraumbeobachtungsrads TIRA«, digital

► Eigene Veranstaltungen und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis

30.01.2021: **Spektrum-LIVE**-Veranstaltung »Space Simulator, B777 & Flugkapitän C. Frick«, Zürich

► Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im November: **Gehirn&Geist** Dossier 4/2019 »Hirnforschung«

Reduzierte Digitalpakete »Supernovae«, »Sinne« sowie »Liebe, Glück und Freundschaft«

Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

► Verlosungen von Büchern und Spektrum-Magazinen

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

Konstante Λ wird der Dichteparameter $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H_0^2)$ zugeordnet. Beide Dichteparameter hängen damit vom Quadrat der Hubble-Konstante ab. Die Dichten selbst sind dagegen von der Hubble-Konstante unabhängig.

Aus dem CMB können daher die Größen $\Omega_m + \Omega_\Lambda$ und ρ_m abgeleitet werden. Die Summe aus den beiden Dichteparametern Ω_m und Ω_Λ liegt sehr dicht bei eins. Wäre sie genau gleich eins, würde das bedeuten, dass das Universum räumlich flach ist. Nun kann man sich

- entweder über die verbleibende Unsicherheit in $\Omega_m + \Omega_\Lambda$ hinwegsetzen und diese Summe gleich eins setzen oder
- den Messwert von $\Omega_m + \Omega_\Lambda$ aus dem CMB entnehmen und
- den Dichteparameter Ω_Λ der kosmologischen Konstante und
- den Parameter Ω_m der Materiedichte dadurch festlegen, dass man die Beobachtungen des CMB mit anderen kosmologischen Messungen verbindet.

Dann – und nur unter solchen weiteren Annahmen oder mit Hilfe weiterer Daten! – lässt sich die Hubble-Konstante indirekt aus dem CMB bestimmen. Erst die Kombination von anderen Datensätzen mit dem CMB schränkt die möglichen Werte von H_0 immer weiter ein. Die erwähnten anderen kosmologischen Messungen betreffen insbesondere die Entfernungen der Supernovae vom Typ Ia, die BAOs und den schwachen kosmischen Gravitationslinseneffekt. Während die Supernovae und die BAOs vor allem die kosmologische Konstante einschrän-

ken, erlaubt es der schwache kosmische Gravitationslinseneffekt, die Massendichte des Universums einzuschränken, wenn auch nur gemeinsam mit der Amplitude der Schwankungen in dieser Massendichte.

Frappierende Ergebnisse

Lokale Messungen der Hubble-Konstante anhand der Helligkeiten von Supernovae vom Typ Ia ergeben Werte um $74,03 \pm 1,42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, wie ein Team um Adam Riess im Jahr 2019 publizierte. Die Werte der Hubble-Konstante, die aus der Laufzeitverzögerung in Gravitationslinsensystemen mit Mehrfachbildern gewonnen werden, schwanken noch recht stark. Ihr Mittelwert $73,3^{+1,7}_{-1,8} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ liegt aber nahe bei demjenigen aus den Typ-Ia-Supernovae, wie im Jahr 2019 das H0LiCOW-Team um Sherry Suyu mit einer Arbeit von Kenneth Wong und anderen bekannt gab. Das ist insofern besonders bemerkenswert, als die Entfernungsleiter mit Hilfe der Gravitationslinsensysteme übersprungen werden kann, so dass sich der daraus bestimmte Wert der Hubble-Konstante direkt auf kosmischen Längenskalen messen lässt.

Bestimmungen der Hubble-Konstante aus den Temperaturschwankungen im CMB, welche wie oben beschrieben durch weitere kosmischen Datensätze ergänzt werden, kommen dagegen zu dem spürbar kleineren Ergebnis des Planck-Teams von etwa $67,66 \pm 0,42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Obwohl der Unterschied zu den genannten etwa $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ klein erscheinen mag, ist er doch erheblich größer als die erwartete

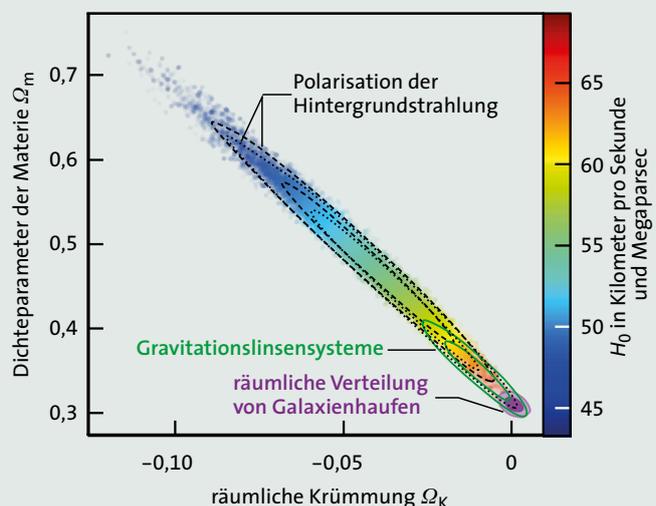
Unsicherheit auf Grund der Messung (siehe Grafik S. 34). Bisher ist weder klar, wie ernst wir diese Diskrepanz nehmen müssen, die in der Fachliteratur oft als »Hubble-Spannung« (englisch: Hubble tension) bezeichnet wird, noch, worauf sie zurückzuführen sein könnte.

Um die Verwirrung zu vervollständigen, ergeben Messungen der Hubble-Konstante anhand der Spitze des roten Riesenast einen Wert, der mit $69,6 \pm 1,9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ zwischen diesen beiden Extrema liegt. Dieses Resultat wurde von Wendy Freedman in diesem Jahr publiziert. Verwendet man zur Bestimmung der Hubble-Konstante aus dem CMB nur kleinskalige Temperaturschwankungen, sinkt ihr Wert weiter auf $64,1 \pm 1,7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ab. Beschränkt man sich umgekehrt nur auf die großskaligen Temperaturschwankungen, steigt er auf $69,7 \pm 1,7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Das mag darauf hindeuten, dass mindestens in einer der Methoden, vielleicht auch in mehreren, noch unerkannte systematische Fehler stecken.

Andere mögliche Erklärungen beginnen mit der Feststellung, dass die Materiedichte in unserer weiteren kosmischen Nachbarschaft geringer als im Mittel ist. Deshalb sollte die Ausdehnungsgeschwindigkeit in unserer Umgebung etwas höher sein als im Mittel, was etwas höhere Werte der lokal gemessenen Hubble-Konstante begründen könnte. Dann sollten aber auch die Messungen der Laufzeitverzögerungen in mehrfach abgebildeten Objekten geringere Werte ergeben, die näher bei denjenigen liegen, die aus dem CMB abgeleitet werden. Dies ist allerdings nicht

Der Wert der Hubble-Konstante und das flache Universum

Die Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung allein legen die Dichteparameter Ω_m für die Materie und Ω_K für die räumliche Krümmung noch nicht fest. Dieser Spielraum ist im Diagramm rechts farbig dargestellt. Wenn Ω_m (senkrechte Achse) groß ist, muss Ω_K (waagerechte Achse) klein werden – und umgekehrt. Das ist möglich, solange die Hubble-Konstante H_0 noch nicht fixiert ist. Sollte H_0 klein sein, dann sind sogar Abweichungen von einem aktuell favorisierten räumlich flachen Universum mit $\Omega_K = 0$ möglich. Erst wenn weitere Messdaten wie die Polarisation der Hintergrundstrahlung (gestrichelte Linien), aus Gravitationslinsensystemen (grüne Ellipse) und die großräumige Struktur in der räumlichen Verteilung der Galaxienhaufen (lilafarbene Ellipse) kombiniert werden, erhalten wir stark eingeschränkte Dichteparameter der Materie und der räumlichen Krümmung.



Planck Collaboration et al.: Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. arXiv:1807.06209, 2018, fig. 29 / Bearbeitung: SuW-Gratik

der Fall. Es dürfte allerdings verfrüht sein, nach allzu weitreichenden Deutungen der »Hubble-Spannung« zu suchen. Eines nicht allzu fernen Tages kann sich leicht herausstellen, dass alle Messungen denselben Wert ergeben, wenn man sämtliche Ursachen systematischer Unsicherheiten berücksichtigt.

Dennoch gibt eine solche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen verschiedener

Energieinhalt des Universums durch eine Dunkle Energie dominiert wird, deren Natur fundamentale Fragen aufwirft.

Aber welche der drei einfachen Annahmen würde man aufgeben? Es mag naheliegend aussehen, dass die allgemeine Relativitätstheorie zu ersetzen ist, aber viele Jahre intensiver theoretischer Forschung haben gezeigt, dass sie eine ganz außerordentlich robuste Theorie ist und

Man könnte die allgemeine Relativitätstheorie ersetzen, aber sie ist außerordentlich robust und hat sich bewährt.

Messungen derselben Größe Anlass zu allerlei Spekulationen über deren Ursache. Es ist statistisch unwahrscheinlich, dass wir in einer so leeren und dabei so großen Region des Universums leben, dass hier die lokale Ausdehnungsrate derart deutlich höher wäre als in größerer Entfernung von uns. Eine Möglichkeit, diese Abweichung zu erklären, besteht darin, dass sich zumindest eine der beiden dunklen Komponenten des kosmologischen Standardmodells, in diesem Fall die Dunkle Energie, mit der Zeit entwickelt und das auf eine Weise tut, die bei größeren Entfernungen eine geringere Ausdehnungsgeschwindigkeit bewirkt als wir annehmen. Um diese und vergleichbare Hypothesen zu testen, werden wir erheblich mehr und genauere Daten brauchen, denn die Messungen sind schwierig und die Effekte subtil.

Das Ende eines Erfolgsmodells?

Bringt eine solche Diskrepanz das kosmologische Standardmodell in Schwierigkeiten oder gar zu Fall? Wir dürfen bei einer solchen Frage nicht vergessen, dass dieses inzwischen bestens etablierte und durch zahllose Messungen unterstützte Weltmodell auf nur drei einfachen Annahmen beruht, aber zu weit reichenden Schlussfolgerungen gelangt: Es setzt voraus, dass die allgemeine Relativitätstheorie zumindest eine zur Beschreibung des Universums geeignete Theorie ist, dass das Universum um uns herum im Mittel richtungsunabhängig oder isotrop ist und dass auch jeder andere Beobachter im Universum diese Isotropie sieht. Zu diesen einfachen Annahmen passt das beobachtete Universum dann und nur dann, wenn man akzeptiert, dass etwa 85 Prozent der Materie von einer Form sind, die wir nicht kennen, und dass der

höchstens unter sehr speziellen Voraussetzungen durch eine alternative Theorie ersetzt werden kann. Es erscheint daher sehr unwahrscheinlich, dass die »Hubble-Spannung« durch eine alternative Gravitationstheorie gelöst werden kann.

Als empirisch gestütztes und gut ausgebautes Gedankengebäude wird das kosmologische Standardmodell durch die »Hubble-Spannung« daher wohl nicht in Frage gestellt. Eher sind es entweder die genauen Werte der kosmologischen Parameter oder eine bisher unerkannte zeitliche Änderung der Dichte Dunkler Energie, die den Verdacht auf sich ziehen, noch nicht genügend verstanden zu sein oder verändert werden zu müssen. Die »Hubble-Spannung« ist jedenfalls ein besonders herausforderndes, subtiles, aktuelles Problem der Kosmologie. Eine Lösung könnte aus ganz verschiedenen Ecken kommen, zum Beispiel von einer der folgenden in den nächsten Jahren an den Start gehenden Missionen:

- vom im Jahr 2022 startenden ESA-Weltraumteleskop Euclid, wenn eine Zeitabhängigkeit der Dunklen Energie dahintersteckt;

- vom James Webb Space Telescope (JWST), dessen Start Ende 2021 erfolgen soll, oder dem im Jahr 2025 startenden Nancy Grace Roman Space Telescope der NASA (früher WFIRST genannt), wenn damit eine noch bessere Kalibration der Cepheiden oder der Typ-Ia-Supernovae gelingen sollte;

- vom JWST, wenn mit diesem Teleskop noch genauere Abbildungen von Gravitationslinsensystemen möglich werden.

Das letzte Wort ist in der Hubble-Krise also noch nicht gesprochen, allerdings dürfen wir in naher Zukunft auf neue Ergebnisse gespannt sein.



MATTHIAS BARTELMANN ist seit 2003 Professor für theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg. Er ist Mitherausgeber von »Sterne und Weltraum«.

Am Institut für Theoretische Physik arbeitet er über statistische Physik und kosmische Strukturbildung.



JOHANNES SCHWINN ist Doktorand am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg. Er forscht über die Wahrscheinlichkeitsverteilung des kosmischen Dichtefeldes und die Statistik gravitativ gebundener Strukturen.

Literaturhinweise

- Abbott, T. M. C. et al.:** Dark Energy Survey year 1 results: A precise H_0 estimate from DES Y1, BAO, and D/H data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 480, 2018
- Bartelmann, M.:** Das kosmologische Standardmodell: Grundlagen, Beobachtungen und Grenzen. Springer Spektrum Heidelberg, 2019
- Wong, K. C. et al.:** H0LICOW – XIII. A 2.4 per cent measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early- and late-Universe probes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 498, 2020
- Freedman, W. L. et al.:** Calibration of the tip of the red giant branch. The Astrophysical Journal 891, 2020
- Riess, A. G. et al.:** Large Magellanic Cloud Cepheid Standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM. The Astrophysical Journal 876, 2019
- The Planck Collaboration:** Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. arXiv:1807.06209

Dieser Artikel und Weblinks unter:
www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1771449

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **33**
13.08.
2020

- > Forscher funktionieren Ziegelsteine zu Energiespeichern um
- > Meine intelligentere Hälfte
- > Achillesferse des Schwarms enttarnt

TITELTHEMA: SONNENSYSTEM
Ceres' verborgener Ozean

Der Zwergplanet im Asteroidengürtel wirkt auf den ersten Blick wie der Inbegriff einer toten Welt. Doch womöglich tut sich unter ihrer Oberfläche mehr als gedacht.

MISSISSIPPI-BLASE
1720 – das Jahr des ersten großen Crashes

MEERESÖKOLOGIE
Das Dilemma der Blauwale

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ
Multitalent für Sprache

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung.

Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

www.spektrum.de/abonnieren

