Downloadmaterial zum Beitrag „Die Ausdehnung des Weltalls" – MINT *Zirkel* 3-2021

Die Expansionsrate des Universums

Kosmologie galt lange als die Suche nach zwei Zahlen: den Werten der Hubble-Konstante H_0 und des Bremsparameters q_0. Der Index 0 bezieht sich auf unsere Gegenwart – genau genommen handelt es sich also nicht um universelle Konstanten, sondern um Momentaufnahmen von zeitabhängigen Größen. Dabei beschreibt H_0 die heutige Expansionsrate des Weltraums und q_0 die Änderung von H_0 im Lauf der Zeit t.

Im Hubble-Lemaître-Gesetz $v = H_0D$ ist H_0 eine Proportionalitätskonstante sowie der Quotient der Fluchtgeschwindigkeit v der sich ändernden Distanz D idealisierter Raumpunkte, wie sie beispielsweise von Galaxien markiert werden. Das bedeutet: In und mit jeder Strecke von einem Megaparsec Länge (3,26 Millionen Lichtjahren) wächst die Distanz um den Wert von H_0. Messungen ergaben $H_0 \approx 70$ Kilometer pro Megaparsec und Sekunde. Somit dehnt sich der Weltraum pro Megaparsec in einer Sekunde um 70 Kilometer aus. Mit wachsender Distanz summiert sich dieser Effekt. Folglich entfernt sich eine Galaxie, die einen Abstand von 100 Megaparsec zur Milchstraße hat, etwa doppelt so schnell von uns wie eine Galaxie, die sich nur halb so weit weg von uns befindet.

Man kann H_0 auch in der Einheit Sekunde^{-1} angeben. Beträgt H_0 sieben Prozent pro Jahrmilliarde, dann dehnt sich ein gravitativ ungebundenes System in einer Milliarde Jahre um sieben Prozent aus.

In der weiteren kosmischen Nachbarschaft besteht gemäß $v = H_0D$ ein linearer Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und somit der Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie einerseits und ihrer Distanz andererseits. Daher liegen die Messpunkte dieser Größen von verschiedenen Galaxien in einem Diagramm ungefähr auf einer Geraden. Deren Steigung ist die Hubble-Konstante H_0. Sie gibt die Expansionsrate des Universums heute an – genauer: in unserer näheren Umgebung und Vergangenheit.

Diese lineare Proportionalität gilt allerdings nicht beliebig weit. In einigen 100 Millionen Lichtjahren Entfernung weicht die Expansionsrate von einer Geraden ab. Sie muss, abhängig vom kosmologischen Weltmodell, anders beschrieben werden. Dafür bildet die Allgemeine Relativitätstheorie den Rahmen. Eine lineare Extrapolation würde eine unrealistisch schnelle Expansion bedingen, die Spezielle Relativitätstheorie eine unrealistisch langsame. Dies bedeutet auch, dass sich Galaxien mit Distanzen größer als dem Hubble-Radius $r_H = c/H_0$ schneller als mit Lichtgeschwindigkeit c von uns entfernen – was der Relativitätstheorie aber nicht widerspricht, weil keine Bewegung im Raum dahintersteckt, sondern eine Ausdehnung des Raums selbst.

Die relativistische Korrektur hängt unter anderem von der Geometrie, Materieverteilung und -dichte sowie der Energiedichte des Universums ab. Es ist eine Frage der Bestimmung dieser Eigenschaften, mithin also eine Entscheidung anhand astronomischer Messungen, ob die durch die Datenpunkte gezogene idealisierte Kurve ansteigt oder abfällt, ob sie sich im Diagramm also nach oben oder unten biegt. Denn der Hubble-Parameter H_t ist zeitabhängig. Er ergibt sich aus der Steigung der Tangente am jeweiligen Zeitpunkt t. Für unsere Gegenwart t = 0 ist H_0 somit die Steigung der Kurve am Koordinatenursprung des Hubble-Diagramms.

Der Kehrwert $1/H_0$ ist die Hubble-Zeit und gibt das Weltalter für ein „leeres" Universum an (je nach Materie- und Energiedichte ist das wahre Alter seit dem Urknall größer oder kleiner).

Zur Charakterisierung der zeitlichen Veränderung von H_t benötigt man den Bremsparameter $q_0 = \rho_m/2\rho_c - \Lambda c^2/3H_0^2$ als zweite Größe. Λ ist die Kosmologische Konstante, G die Gravitationskonstante, ρ_m die gegenwärtige Dichte der Materie (einschließlich Dunkler Materie) und $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$ die kritische Dichte heute. Sie entspricht etwa fünf Wasserstoff-Atomen pro Kubikmeter und markiert für $\Lambda = 0$ den Grenzfall eines immer langsamer expandierenden, aber niemals kollabierenden Weltalls. Für $q<0$ beschleunigt sie sich, sodass die Bezeichnung Bremsparameter hier nicht passt. Tatsächlich zeigten Messungen ab 1998, dass $q_0 \approx -0{,}6$. Die Ausdehnung des Weltraums wird also schneller, nicht langsamer.

© Klett MINT GmbH, 2021

Die kosmische Distanzleiter

Um die Hubble-Konstante zu bestimmen, die Ausdehnungsrate des Alls, muss man die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien und deren Entfernung kennen. Die Fluchtgeschwindigkeit lässt sich direkt aus der Rotverschiebung des Spektrums ermitteln. Distanzmessungen sind jedoch schwieriger – und waren in der Geschichte der Astronomie schon immer eine heikle Angelegenheit. Astronomen brauchen dazu gewissermaßen kosmische Lineale. Allerdings haben sie keine metaphorischen Meterstäbe, die sie beliebig am Himmel ansetzen und verschieben können. Und doch lässt sich etwas Vergleichbares finden und nutzen: die kosmische Distanzleiter. Auf dieser Himmelsleiter gelangen die Wissenschaftler Sprosse um Sprosse weiter in All hinaus und schaffen es so, die Entfernungen der Galaxien auszuloten.

Die erste Leitersprosse ist die geometrische Methode der Landvermesser und Seefahrer: die Triangulation. Dabei geht es um Winkelmessungen. Weil sich die Erde im Jahreslauf um die Sonne bewegt, erscheint die Position naher Sterne am Himmel geringfügig perspektivisch versetzt, wenn man sie beispielsweise am Frühlings- und Herbstbeginn anvisiert. Mittels Trigonometrie lässt sich die Stern-Distanz errechnen, da unsere Basislänge des himmlischen Dreiecks gut bekannt ist: der Abstand der Erde von der Sonne, rund 150 Millionen Kilometer. Der Winkel, unter dem der Radius der Erdbahn von einem Stern aus erscheint, heißt Parallaxe. Beträgt sie eine Bogensekunde, das heißt 1/3600stel Grad, entspricht das einer Entfernung von rund 31 Billionen Kilometern oder 3,26 Lichtjahren oder exakt einem Parsec (Parallaxensekunde). Mit dieser trigonometrischen Methode konnte Friedrich Wilhelm Bessel erstmals 1838 die Entfernung eines Sterns bestimmen. Allerdings funktioniert diese Methode bislang nur innerhalb der Milchstraße.

Die zweite Sprosse ist die absolute Helligkeit der Sterne. Sie nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Ist ein Stern beispielsweise doppelt so weit entfernt wie ein anderer mit gleicher Leuchtkraft, beträgt die scheinbare Helligkeit des ferneren Sterns nicht die Hälfte, sondern ein Viertel von der des Vordergrundsterns. Weil die absolute Helligkeit eines Sterns mit seinen Spektraleigenschaften zusammenhängt, lässt sie sich auch für Gestirne bestimmen, die keine Parallaxe mehr zeigen, wenn man die Spektralklassen anhand von näheren Sternen geeicht hat. So können Astronomen dank der über viel größere Distanzen messbaren Emissionslinien im Sternspektrum den Abstand dieser Sterne errechnen. Das reicht weit über die Milchstraße hinaus.

Die dritte Sprosse basiert auf demselben Prinzip. Sie hängt aber nicht von Emissionslinien ab, sondern von besonders hellen Gestirnen, die in noch größeren Distanzen identifizierbar sind. Astronomen sprechen von Standardkerzen. Hat man diese mit näheren Exemplaren über die Triangulation oder das Spektrum geeicht, kennt man die Leuchtkraft der weit entfernten Standardkerzen und kann daraus wiederum ihre Distanz bestimmen.

Inzwischen nutzen Astronomen sehr erfolgreich zwei verschiedene solcher Standardkerzen. Zum einen – das tat schon Edwin Hubble bei der Entfernungsbestimmung der Andromeda-Galaxie – sind das die Cepheiden: helligkeitsvariable Riesensterne mit teilweise der 100.000-fachen Leuchtkraft der Sonne, die mit dem Hubble-Weltraumteleskop noch 130 Millionen Lichtjahre entfernt erspäht werden können. Sie pulsieren innerhalb weniger Wochen oder Tage periodisch. Weil diese Periode mit ihrer Leuchtkraft-Änderung korreliert (hellere Sterne haben langsamere Perioden), verrät die Pulsationsdauer ihre Distanz.

Zum anderen eignen sich Supernovae vom Typ Ia als kosmische Standardkerzen. Besser wäre eigentlich der Ausdruck standardisierbare kosmische Bomben. Denn dabei wird ein ganzer Stern zerrissen. Diese stellaren Explosionen können so hell wie zehn Milliarden Sonnen werden und entstehen, wenn Materie von einem Nachbarstern auf einen kompakten Weißen Zwergstern stürzt. Überschreitet dessen Masse schließlich einen charakteristischen Schwellenwert vom 1,4-Fachen der Sonne, kommt es zu einer nuklearen Kettenreaktion: Der Wasserstoff fusioniert wie bei einer Wasserstoffbombe. Weil die Dauer der hellsten Phase einer solchen Supernova Ia verlässlich mit ihrer absoluten Leuchtkraft zusammenhängt, eignen sich diese Phänomene sehr gut als himmlischer Maßstab. Allerdings sind sie unvorhersagbar und selten – sie ereignen sich in einer typischen

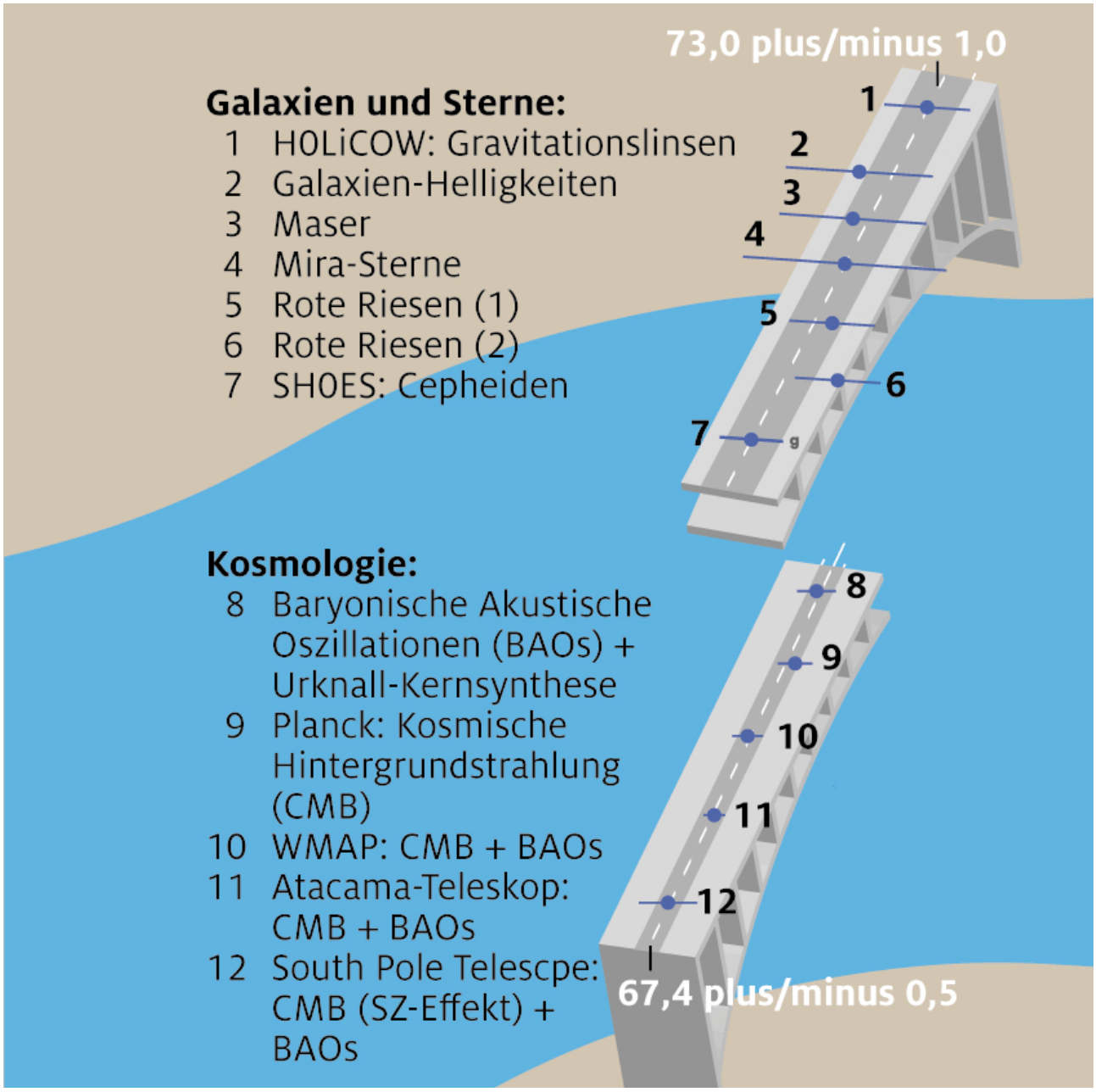
© Klett MINT GmbH, 2021

Galaxie nur etwa einmal pro Jahrhundert –, sodass ständig weite Himmelsbereiche mit empfindlichen Teleskopen überwacht werden müssen.

Mittlerweile ist es den Astronomen gelungen, die kosmische Distanzleiter Sprosse für Sprosse zu präzisieren und die unvermeidlichen systematischen Fehler dabei immer genauer in den Griff zu bekommen.

Mithilfe des berühmten Hubble-Weltraumteleskops – der Name war und ist Programm – sollte die Hubble-Konstante mit Messungen von Cepheiden und Supernovae Ia auf zehn Prozent genau bestimmt werden. Das ist 2001 tatsächlich gelungen. Seither konnten Astronomen die Messfehler sogar noch einmal um eine Größenordnung reduzieren. Und so schien es, als würde eine Jahrhundertaufgabe schon beinahe gelöst sein. Doch jüngst wendete sich das Blatt. Ein Graben zwischen den Resultaten zweier miteinander konkurrierender Methoden begann sich ab 2013 zu öffnen: einerseits den Messungen der kosmischen Distanzleiter, die von uns aus gesehen in immer größere Entfernungen reicht, andererseits einer inversen Distanzleiter vom beobachtbaren Rand des Universums auf uns zu. Inzwischen klafft diese Diskrepanz statistisch gesehen abgrundtief – die Daten sind nun deutlich unvereinbar miteinander. Die Kosmologie steckt in der Krise.

Rüdiger Vaas



NASA, ESA, A. James/STScI, R. Vaas

© Klett MINT GmbH, 2021