

Eins-a-Vermessung des Universums

Für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums erhalten Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam G. Riess den Nobelpreis für Physik 2011.

Bruno Leibundgut

Walter Baade und Fritz Zwicky, ein deutscher und ein schweizer Astrophysiker, die in Kalifornien forschten, prägten 1934 den Begriff „Supernova“ für gigantische Sternexplosionen. Diese erstrahlen so hell, dass sie über weite Bereiche des Universums zu beobachten sind. Baade und Zwicky identifizierten zwei Hauptgruppen von Supernovae – solche mit Wasserstofflinien in ihren Spektren (als Typ II bezeichnet) und solche ohne Wasserstoff (Typ I) – und schlugen bereits vor, dass sich mithilfe von Supernovae kosmologische Entfernungen bestimmen lassen. Anfang der 1980er-Jahre griff vor allem Andreas Tamman diese Idee wieder auf und zeigte, dass sich dafür vor allem Supernovae vom Typ Ia eignen. Bei dieser wichtigen Unterkategorie handelt es sich um thermonukleare Explosionen von Weißen Zwergen, erloschenen Sternen mit etwa 1,4 Sonnenmassen, die kurzzeitig sogar eine ganze Galaxie überstrahlen können. Im Verlauf der Explosion ändert sich die Helligkeit der Supernovae natürlich sehr stark und innerhalb weniger Tage. Der Helligkeitsverlauf ist aber relativ homogen, sodass die Hoffnung bestand, dass sie immer dieselbe Leuchtkraft am Maximum ihrer Lichtkurve erreichen würden. Damit würden sich Entfernungen einfach aus der beobachteten Helligkeit ableiten. Diese Hoffnung zerschlug sich 1991 gründlich, als einige Typ-Ia-Supernovae mit sehr unterschiedlichen Leuchtkräften beobachtet wurden. Zwei Jahre später zeigte allerdings Mark Phillips, dass sich die Form der Lichtkurve eignet, um die Leuchtkraft zu normieren. Seitdem gelten Typ-Ia-Supernovae als beste kosmische „Zollstöcke“.

Zu dieser Zeit bestand die Hauptaufgabe der beobachtenden



Der helle Punkt links unten ist die 1994 beobachtete Supernova 1994D nahe der Galaxie NGC 4526. Diese Supernova ge-

hört zum Typ Ia, die sich besonders gut als „Standardkerzen“ für die kosmische Entfernungsmessung eignen.

Kosmologie darin, den Wert der momentanen Expansionsrate des Universums und der Abbremsung aufgrund der Gravitationsanziehung der Materie zu bestimmen. Die Expansionsrate, also die Hubble-Konstante, muss im nahen Universum gemessen werden. Aufgrund der Abbremsung hat sich diese „Konstante“ als Funktion der Zeit verändert, man spricht daher vom Hubble-Parameter. In der Vergangenheit hatte er einen größeren Wert als heute. Diese Abbremsung lässt sich nur über große Distanzen messen.

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben die Lemaître-Friedmann-Modelle ein isotropes und homogenes Universum. In diese Modelle gehen die Dichten von Materie- und Energieinhalt des Universums im Verhältnis zu einer kritischen Dichte ein. Sie entspricht einem Universum mit flacher Raumgeometrie, in dem die Expansion erst in unendlicher Zeit zum Stillstand kommen würde. Ein Universum mit einer höheren Materiedichte würde in absehbarer Zukunft wieder in sich zusammen-

stürzen, während solche mit einer kleineren Dichte für immer expandieren. Die Entwicklung des Universums hängt von den Beiträgen der einzelnen Komponenten ab. Um zwischen diesen Möglichkeiten zu unterscheiden, war es nötig, die mittlere Materiedichte zu messen.

Die kosmische Expansion lässt sich messen, indem man Entfernungen abhängig von der Rotverschiebung bestimmt (Hubble-Diagramm, Abb. 1). Rotverschiebungen ergeben sich relativ einfach aus den Spektren, aber den kosmischen Entfernungen war über lange Zeit nicht zuverlässig beizukommen. Mark Philipps initiierte selbst, zusammen mit Nicholas Suntzeff, Mario Hamuy und José Maza, eine Suche nach *nahen* Supernovae, um die Hubble-Konstante zu bestimmen. Diese Suche, organisiert von den Observatorien Cerro Calán und Cerro Tololo in Chile, hat die nun mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Analysen entscheidend unterstützt [1].

Ferne Supernovae sind sehr schwach und entsprechend schwer zu beobachten. Eine dänische For-

Dr. Bruno Leibundgut, ESO, Karl-Schwarzschild-Straße 2, 85748 Garching

scherguppe unternahm die ersten Versuche und wurde nach mehreren Jahren 1988 endlich fündig. Im gleichen Jahr regte Saul Perlmutter, zusammen mit Richard Muller und Carl Pennypacker, an, die mittlere Materiedichte des Universums mit Supernovae bei großen Entfernungen zu bestimmen. Daraus ging das Supernova Cosmology Project (SCP) hervor. Als klar wurde, dass sich die Entfernungen mit der Methode von Phillips genau genug messen lassen, organisierte Brian Schmidt 1994 das High- z Supernova Search Team (HZT). Zu dem Zeitpunkt hatte das SCP schon die erste entfernte Supernova gefunden (1992) und einen entscheidenden technischen Vorsprung gewonnen.

Die beiden Teams unterschieden sich sehr in Bezug auf ihre Zusammensetzung und Erfahrung. Das SCP wurde von einer Gruppe von Teilchenphysikern gegründet und war entsprechend gut organisiert. Die spezifisch astrophysikalischen Probleme, z. B. die Eichung der Lichtabsorption in der Erdatmosphäre oder das etwas archaische astronomische photometrische System, musste sich das Team erst noch erarbeiten. Die Mitglieder des HZT waren dagegen ausgewiesene Spezialisten, die viele Analysemethoden für Supernovae



Saul Perlmutter (geb. 1959) hat 1986 an der University of California, Berkeley, promoviert und ist Professor für Astrophysik am Lawrence Berkeley National

Laboratory und an der University of California, Berkeley. Als Chef des Supernova Cosmology Projects erhält er die Hälfte des diesjährigen Nobelpreises.

selbst entwickelt hatten und die entsprechenden Erfahrungen zur Photometrie und Spektroskopie mitbrachten. Das HZT begann 1995 mit den ersten Beobachtungen. Der Erfahrungsvorsprung hat sich in der Interpretation der Daten positiv ausgewirkt. Bis 1997 hatten beide Gruppen genügend entfernte Supernovae beobachtet, um eine erste stichhaltige Analyse zu versuchen (Abb. 1).

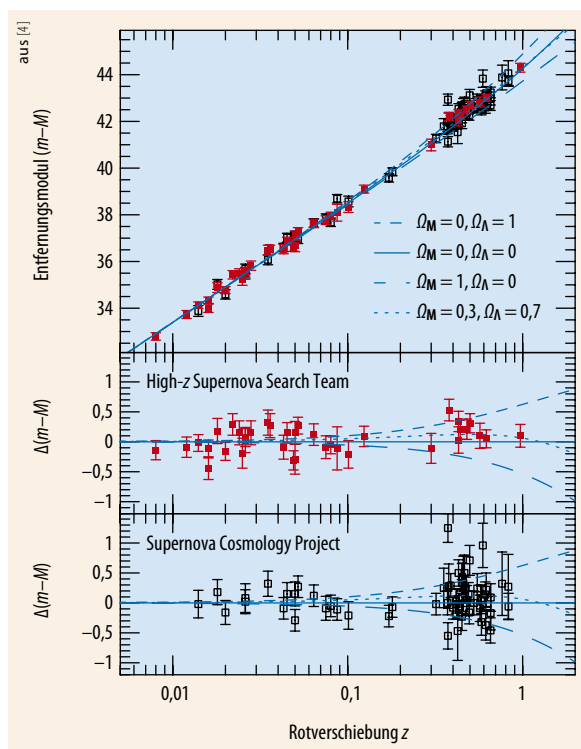
Oft wird übersehen, dass die Messung der entfernten Supernovae nur die eine Hälfte der Ana-

lyse liefert. Denn es ist erforderlich, sie mit einer Stichprobe naher Supernovae zu vergleichen, die quasi den Nullpunkt im Hubble-Diagramm definieren. Das Calán/Tololo-Experiment hat die nahen Supernovae dafür geliefert. Das SCP hatte keine nahen Supernovae gemessen, während das HZT zusätzlich nahe Supernovae, die in einem langjährigen Programm unter Leitung von Robert Kirshner beobachtet worden waren, benutzen konnte. Überhaupt war die Gruppe um Kirshner ein Zentrum für Supernova-Beobachter: Brian Schmidt und Adam Riess sowie einige weitere Mitarbeiter des HZTs hatten dort gearbeitet und bildeten zusammen mit dem Calán/Tololo-Survey den Kern des HZT.

Obwohl das HZT nur 10 entfernte Supernovae beobachtet hatte [2], war sein Resultat vergleichbar mit der Erkenntnis, die das SCP mit 42 entfernten Supernovae gewonnen hatte [3]. Hierfür gibt es zwei wichtige Gründe: erstens die bessere Kontrolle und größere Stichprobe der nahen Supernovae und zweitens die besseren Messungen der entfernten Supernovae. Zum Beispiel hat das HZT für neun seiner zehn Supernovae ein Spektrum beobachtet, um sicher zu gehen, dass alle auch wirklich vom Typ Ia waren.

In einem Universum mit abgebremster Expansion sollten die entfernten Supernovae etwas

Abb. 1 Im Hubble-Diagramm der Typ-Ia-Supernovae ist deren Entfernungsmodul ($m-M$) gegen ihre Rotverschiebung z aufgetragen. Das Entfernungsmodul entspricht einer logarithmischen Entfernung, bei der die beobachtete Helligkeit (m) mit der intrinsischen Leuchtkraft (M) verglichen wird. Im nahen Universum (bis $z \approx 0,1$) ist die Expansion linear [1]. Die Daten von Riess et al. [2] (rote Quadrate) und Perlmutter et al. [3] (offene Quadrate) zeigen, dass sich die Expansion am besten durch $\Omega_M = 0,3$ und $\Omega_\Lambda = 0,7$ beschreiben lässt. Dabei sind Ω_M bzw. Ω_Λ die mittlere Materiedichte bzw. die unbekannte Energiedichte relativ zur kritischen Dichte, die einer flachen Raumgeometrie entspricht. Die unteren Abbildungen zeigen die Daten der beiden Teams relativ zum leeren, ungebremsten Universum ($\Omega_M = 0, \Omega_\Lambda = 0$).





Die zweite Hälfte des Nobelpreises teilen sich Brian P. Schmidt (geb. 1967, links) und Adam G. Riess (geb. 1969), die im High-z Supernova Search Team arbeiten. Schmidt und Riess haben in Harvard pro-

näher als in einem ungebremsten, also leeren, Universum liegen (vgl. Abb. 1). Zur Überraschung aller erschienen die entfernten Supernovae jedoch schwächer als in einem ungebremsten Universum. Entweder waren sie weiter entfernt als in einem leeren Universum oder ein astrophysikalischer Effekt, zum Beispiel interstellare Absorption des Lichtes oder eine Entwicklung der Leuchtkraft über kosmische Zeiten, hatte die Messung beeinflusst. Sorgfältige Untersuchungen der Supernovae ergaben aber, dass die astrophysikalischen Effekte weitgehend unerheblich waren und die Beobachtungen wirklich darauf hinwiesen, dass sich die Expansion in den letzten 6,5 Milliarden Jahren, etwa der Hälfte des Alters des Universums, beschleunigt hatte. Innerhalb der Lemaitre-Friedmann-Modelle ist dies nur möglich, mithilfe einer zusätzlichen Energiekomponente. Einstein hatte schon 1917 eine kosmologische Konstante vorgeschlagen, um seine Weltmodelle zu „stabilisieren“, da sie keine statischen Lösungen lieferten. Diese kosmologische Konstante kann die Messungen erstaunlich gut erklären und ist bis heute ein möglicher theoretischer Ansatz.

Sehr bald haben unabhängige Beobachtungen die Supernova-Messungen gestützt. Genaue Messungen der Fluktuationen in der



moviert und sind heute Professor an der Australian National University in Weston Creek bzw. an der Johns Hopkins University in Baltimore.

kosmischen Hintergrundstrahlung zeigten 1999, dass die Raumgeometrie flach ist. Gleichzeitig wurde die Materiedichte immer genauer unabhängig bestimmt. Dabei resultierte allerdings weniger als 30 Prozent der kritischen Dichte, und in der Energiebilanz des Universums fehlten etwa 70 Prozent. Dadurch wurde die Vorstellung einer zusätzlichen Komponente, „Dunkle Energie“ genannt, durch die Supernova-Beobachtungen plötzlich sehr attraktiv.

Die Entdeckung der beschleunigten Expansion liegt weniger als 15 Jahre zurück. In der Zwischenzeit ließen sich die ursprünglichen Messungen mehrfach bestätigen und stärken [5]. Während die ersten Resultate noch auf ein paar Dutzend Supernovae basierten, sind bis

heute beinahe 600 Typ-Ia-Supernovae publiziert, bis zu einer Rotverschiebung von 1. Umfangreiche Beobachtungen mit den größten verfügbaren Teleskopen haben es erlaubt, die Beschleunigung sehr genau zu vermessen. Adam Riess konnte 2007 zeigen, dass das frühe Universum aufgrund der kleineren Distanzen und der deshalb noch höheren Dichte abgebremst war [6].

Die Eigenschaften der Dunklen Energie sind noch weitgehend unbekannt. Dabei könnte es sich um Einsteins kosmologische Konstante handeln oder um ein zerfallendes Teilchenfeld. Der entscheidende Unterschied wäre eine zeitliche Veränderung. Die Untersuchungen dazu sind in vollem Gange, und verschiedene Experimente sind in der Vorbereitung. Die ESA hat am selben Tag, an dem der Nobelpreis verkündet wurde, eine Mission zur Untersuchung der Dunklen Energie, Euclid, als nächstes Projekt in ihrem Programm „Cosmic Vision“ ausgewählt. Damit bleibt die Entdeckung von Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess und ihren Forschergruppen ein Brennpunkt der Kosmologie.

Literatur

- [1] M. Hamuy et al., *Astrophys. J.* **112**, 2398 (1996)
- [2] A. Riess et al., *Astron. J.* **116**, 1009 (1998)
- [3] S. Perlmutter et al., *Astroph. J.* **517**, 565 (1999)
- [4] B. Leibundgut, *Ann. Rev. Astr. Astroph.* **39**, 67 (2001)
- [5] A. Goobar und B. Leibundgut, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **61**, 251 (2011)
- [6] B. Leibundgut, *Physik Journal*, Januar 2007, S. 16

DER AUTOR

Bruno Leibundgut ist wissenschaftlicher Direktor der Europäischen Südsternwarte (ESO). Seit seiner Promotion mit einer Arbeit zu Supernova-Lichtkurven an der Universität Basel hat er sich mit Supernova-Beobachtungen beschäftigt. Er hat am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, USA, und dann an der University of California, Berkeley, gearbeitet. Seit 1993 ist er bei der ESO angestellt, wo er das operationelle Modell des Very Large Telescope mitentwickelt hat und danach in der wissenschaftlichen Führung der ESO tätig war. Bruno Leibundgut war Mitglied des High-z-Supernova Search Teams, hat am ESSENCE Projekt mitgewirkt und verfolgt die späte Entwicklung von SN 1987A.

