

KOSMOLOGIE

# Als Einstein noch nicht vom Urknall überzeugt war

Überraschend zeigt ein lange unbeachtetes Manuskript, dass Albert Einstein 1931 über Alternativen zur Urknalltheorie nachdachte. Viel früher als Steady-State-Kosmologen wie Fred Hoyle, Hermann Bondi und Thomas Gold stellte er sich ein expandierendes Universum vor, in dem unablässig neue Materie entsteht.

VON GEORG WOLSCHIN

Die Theorie vom Urknall ist nicht nur in der wissenschaftlichen Kosmologie, sondern auch in der breiteren Öffentlichkeit weitgehend akzeptiert. Ähnliches gilt für ihre wichtigste Erweiterung, derzufolge das Universum unmittelbar nach seiner Entstehung durch eine ultrakurze, inflationäre Phase gegangen ist. Ein Unbehagen bleibt dennoch: Die Vorstellung einer explosionsartigen, exponentiellen Ausdehnung des Raums (die so genannte Inflation) im Gefolge einer Urknall-Singularität (einem mathematischen Punkt ohne Ausdehnung, aber mit unendlich großer Energiedichte) ist zumindest gewöhnungsbedürftig.

Seit kurzem aber behaupten Forscher sogar, experimentelle Belege für die Inflation entdeckt zu haben. Das am Südpol installierte BICEP2-Teleskop hat vielleicht Hinweise auf Gravitationswellen aus der Inflationsphase gefunden (siehe SdW 5/2014, S. 14). Allerdings sind diese Ergebnisse bislang nicht abgesichert; bis zu ihrer unabhängigen Überprüfung ist es noch ein weiter Weg, unter anderem bleibt denkbar, dass Staub in der Galaxis das behauptete kosmo-

logische Resultat nur vortäuscht, wie etwa Hao Liu, Philipp Mertsch und Subir Sarkar, ein Theoretikerteam aus Stanford beziehungsweise Kopenhagen, in einer Online-Publikation erörterten (arXiv:1404.1899, siehe auch Kasten S. (6)). Grundsätzliche Zweifel an der Theorie könnte aber auch dieser Fall nicht auslösen, schließlich würde es sich nur um ein Messproblem handeln.

Trotzdem lohnt ein Blick auf mögliche Gegenmodelle, und sei es nur, um uns der Entstehungsgeschichte unseres gegenwärtigen Weltbilds noch einmal zu versichern. Überraschenderweise setzt sich ein kürzlich aufgespürtes Manuskript Albert Einsteins – des Schöpfers jener Feldgleichungen, die den gängigen kosmologischen Theorien zu Grunde liegen – tatsächlich mit einer Alternative zum Urknallmodell auseinander. Das handschriftliche und undatierte vierseitige Original trägt den Titel »Zum kosmologischen Problem« und stammt vermutlich aus dem Jahr 1931. Es gehört schon lange zum Bestand des Archivs der Hebräischen Universität in Jerusalem. Bisher sah man es aber irrtümlich als Vorläufer zu Einsteins im selben Jahr

publizierter Arbeit »Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie« (Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1931, S. 235–237) an – und ignorierte es.

## Zeitgleiche Erkenntnis

Nun haben unabhängig voneinander die Physiker Cormac O’Raifeartaigh aus Irland und Harry Nussbaumer aus Zürich seine wissenschaftshistorische Bedeutung erkannt. O’Raifeartaigh hat gemeinsam mit Brendan McCann eine Arbeit im European Physical Journal veröffentlicht (H 39, S. 63–85, 2014; dort haben die Autoren bereits eine weitere Publikation eingereicht), während Nussbauers Online-Veröffentlichung (arXiv:1402.4099) in den Acta Historica Astronomiae erscheinen soll.

Vieles weist darauf hin, dass Einstein das Manuskript während seiner Reise zum California Institute of Technology in Pasadena verfasst hatte, wo er mit dem Theoretiker Richard Tolman im Januar und Februar 1931 intensiv über kosmologische Fragen diskutierte. Ende Januar besuchte er auch Edwin Hubble am nahen Mount Wilson Observatory (Foto oben). Zu diesem Zeitpunkt war ihm bereits bewusst, dass sein Universum, das er in den Feldgleichungen von 1917 noch mithilfe eines »kosmologischen Glieds« – heute als kosmologische Konstante bekannt – als statisch zu konzipieren versucht hatte, nicht der

Am Anfang war der Urknall. In dessen Verlauf entsteht Materie, deren Dichte mit der Expansion des Universums immer weiter abnimmt (unten links). Die Steady-State-Theorie behauptet dagegen, dass überall dort, wo die Materiedichte während der Expansion abnimmt, aus Energie neue Materie entsteht (unten rechts). Sie macht aber keine Angaben darüber, aus welchem Anfangszustand das Universum in diesem Fall hervorgeht.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH NASA





CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY ARCHIVES



PUBLIC DOMAIN



PUBLIC DOMAIN

Von der Vorstellung eines expandierenden Universums war Albert Einstein (Foto oben, mit Edwin Hubble und Walter Adams, v.l.n.r.) nach Vesto Sliphers (Foto Mitte) Entdeckung der Rotverschiebung von Licht ferner Galaxien und dank der Beobachtungsda-

ten von Hubble spätestens ab 1931 überzeugt. Bereits 1922 hatte der russische Physiker und Mathematiker Alexander Friedman (Foto rechts) gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen dieses auch korrekt zu beschreiben vermochten.

Realität entsprach. Das zeigt unter anderem ein Interview, das er der New York Times am 2. Januar 1931 gab.

Unsere Vorstellung von einem expandierenden Universum verdankt sich Vesto Sliphers Beobachtungen der so genannten kosmologischen Rotverschiebung des Lichts entfernter Galaxien. Dieses Phänomen, das Slipher zwischen 1912 und 1917 am Lowell Observatory in Arizona untersucht hatte, gilt als Hinweis darauf, dass die elektromagnetischen Wellen einen sich ausdehnenden Raum durchquert haben müssen, bevor sie auf unsere irdischen Detektoren treffen. In den Jahren 1929 bis 1931 erkannten dann Edwin Hubble und Milton Humason, dass zwischen der Entfernung von Galaxien und ihrer von der Erde weg gerichteten »Fluchtgeschwindigkeit« ein linearer Zusammenhang besteht. Auf dieser empirischen Basis formulierten der russische Physiker George Gamov und andere schließlich das Urknallmodell.

Nach der Entdeckung der Raumexpansion verwarf Einstein das kosmologische Glied wieder: In seinen Feldgleichungen hatte es die Funktion einer antigravitativen Komponente, die der anziehenden Gravitation entgegenwirken und seiner Ansicht nach für die Stabilität des Universums sorgen sollte – nun war es verzichtbar geworden. Mathematisch war die Sache ohnehin längst geklärt. Der russische Physiker

Alexander Friedman hatte als Erster darauf hingewiesen, dass Einsteins statisches Universum instabil war. Und bereits 1922 hatte er in seiner Arbeit »Über die Krümmung des Raumes« gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen auch ein expandierendes Universum beschreiben können. Einstein widersprach zwar, ließ sich später aber doch überzeugen. In einer späteren Diskussion mit George Gamov nannte er das kosmologische Glied dann sogar seinen »biggest blunder«, seine größte Eselei.

### Altersloses Universum

Das neu entdeckte Manuskript zeigt nun, dass Einstein dennoch weiter mit dem kosmologischen Glied experimentierte – diesmal, um ein so genanntes Gleichgewichtsmodell (»steady state«) zu entwickeln. Ein steady-state-Universum expandiert gemäß den beobachteten Rotverschiebungen, seine mittlere Materiedichte bleibt aber unverändert, da im ganzen Raum kontinuierlich neue Materie aus der so genannten Vakuumenergie entsteht. Teilchen, die »ihren« Raumbereich verlassen und so zur Expansion beitragen, werden damit durch neu erzeugte Teilchen ersetzt. Das kosmologische Glied diente Einstein nun nicht mehr dazu, (vermeintlich) ein statisches Universum zu garantieren, sondern stellte stattdessen die zur Teilchenerzeugung notwendige Energie bereit. So hoffte er, sein stati-

ches Modell in eines zu überführen, in dem ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Expansion und Materieproduktion herrscht – ein quasi altersloses Universum von unbegrenzter Dauer, das auf großen Skalen stets gleich aussieht.

Als er wenige Tage später einen Rechenfehler im Manuskript korrigierte, wurde ihm allerdings klar: Die von ihm zunächst gefundene Beziehung zwischen der mittleren Dichte des Universums und dem Parameter, der seine Expansion und damit indirekt auch die Teilchenerzeugung bestimmte, war falsch und verlor in der neuen Fassung jegliche physikalische Aussagekraft.

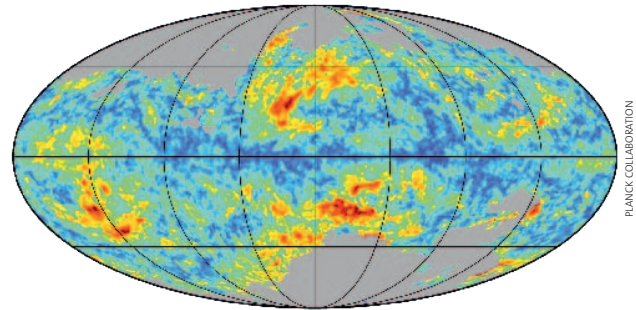
Der erste Anlauf, ein Steady-State-Universum zu beschreiben, war also gescheitert – wohl deshalb blieb das Manuskript unpubliziert. Weil Einstein anschließend keine weiteren Versuche in dieser Richtung unternahm, blieb die Arbeit auch ohne direkten Einfluss auf die Entwicklung der Kosmologie. Erst 17 Jahre später entwarfen dann Fred Hoyle sowie Hermann Bondi und Thomas Gold die ersten detaillierteren Steady-State-Theorien und publizierten sie im Verlauf des Jahres 1948 in den Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Insbesondere Hoyle legte die Feldgleichungen ohne kosmologisches Glied zu Grunde, führte aber stattdessen einen neuen Term ein, der die Teilchenerzeugung beschrieb. So vermied er die

## Zweifel an BICEP-Daten

**Lassen sich im kosmischen Mikrowellenhintergrund** Hinweise auf Gravitationswellen aus der Phase der Inflation entdecken, die das Universum unmittelbar nach dem Urknall vermutlich durchlief? Ja, schlossen Forscher jüngst aus Daten des BICEP2-Teleskops am Südpol. Die Meldung ging um die Welt, nachdem die Ergebnisse am 17. März auf einer Pressekonferenz des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und zeitgleich auf dem Online-Server arxiv vorgestellt worden waren. Schon Tage später wurden aber Zweifel laut (SdW 5/2014, S. 14). Diesen zufolge könnten die Polarisationsmuster im Mikrowellenhintergrund auch von Staub in der Milchstraße oder von Synchrotronstrahlung stammen. Letztere entsteht, wenn schnelle geladene Teilchen aus ihrer geraden Bahn abgelenkt werden.

Am 5. Mai haben neue Daten die Diskussion weiter befeuert (arXiv:1405.0871). Auf Basis von Messungen des Satelliten Planck konnten Forscher eine Karte der elektromagnetischen Emission erstellen, die von Staub in der Milchstraße ausgeht. Diese Vordergrundstrahlung überlagert die von außerhalb der Milchstraße stammenden Signale, für die sich das BICEP-Team interessiert, und muss daher aus den Messdaten herausgerechnet werden. Zum Pech der BICEP-Forscher erwies sich der Anteil polarisierter Strahlung in den Planck-Daten als unerwartet groß. Für ihre eigenen Berechnungen hatten sie sich noch auf Modelle und vorläufige Daten verlassen, die niedrigere Werte nahe legen. Möglicherweise sind sie also tatsächlich einem Vordergrundeffekt aufgesessen.

Zwei Forscher der University of California, Berkeley, Michael J. Mortonson und Uroš Seljak, kommen in einer Online-Publikation vom 22. Mai (arXiv:1405.5857) sogar zu dem Ergebnis, dass sich die BICEP-Ergebnisse auf Basis der neuen Planck-Messungen wohl am besten ohne Bezug auf Gravitationswellen erklären las-



**Der Satellit Planck hat jüngst Messdaten zur Vordergrundstrahlung geliefert, die von Staub in der Galaxis ausgeht und die im Rahmen des BICEP-Experiments als Störfaktor gilt. Die Farben stehen für die von blau über gelb nach rot zunehmende Größe ihres polarisierten Anteils. Für die grauen Bereiche ließen sich bisher keine aussagekräftigen Daten ermitteln.**

sen. Allerdings schließen sie nicht aus, dass die Daten nicht vielleicht doch Hinweise auf Gravitationswellen enthalten.

Die entscheidenden Daten fehlen trotzdem noch: Die Planck-Forscher klammern ausgerechnet diejenige Himmelsregion aus, durch die BICEPs Sichtlinie führt. Böser Wille ist dabei nicht im Spiel, vielmehr liegt der Grund darin, dass sich das BICEP-Team gezielt eine Region ausgesucht hatte, in der besonders wenig Vordergrundstrahlung zu erwarten ist – so wenig offenbar, dass ihr Signal bisher im Rauschen der Planck-Instrumente verschwindet.

Übrigens ist die Online-Publikation noch immer nicht in einem regulären Fachjournal erschienen (Stand 3. Juni). Ob die Arbeit abgelehnt wurde oder ob die Gutachter einfach nur besondere Sorgfalt walten lassen wollen, bevor sie ihr ihren Segen geben, darüber lässt sich bislang nur spekulieren.

inkonsistenten Resultate, wie sie Einstein erhalten hatte. Tatsächlich erfreute sich das Steady-State-Universum einige Zeit lang einer gewissen Popularität. Es wurde aber weitgehend obsolet, als Arno Penzias und Robert Wilson 1965 die kosmische Hintergrundstrahlung nachwiesen und damit nachhaltig das Urknallmodell stärkten.

1998 kehrte die kosmologische Konstante überraschend wieder in die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie zurück. Zwei Beobachtergruppen hatten bei der Vermessung ferner Supernovae unabhängig voneinander festgestellt, dass sich die Expansion des Universums seit etwa fünf Milliarden Jahren beschleunigt. Der Abbremsung durch die zwischen den Galaxien

herrschende Schwerkraft scheint also eine antigravitative Kraft entgegenzuwirken. Ergänzende Beobachtungen zum Beispiel ferner Galaxienhaufen und der Fluktuation des Mikrowellenhintergrunds sichern diesen 2011 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichneten Befund inzwischen sehr gut ab.

Die Kosmologen führten darum das Konzept einer Dunklen Energie ein: eine gleichmäßig im All verteilte Energieform, die der Schwerkraft entgegenwirkt. Je nach ihren noch genauer zu bestimmenden Eigenschaften könnte sie sich tatsächlich sehr gut durch Einsteins kosmologische Konstante beschreiben lassen. Allerdings gibt es weiterhin denkbare Alternativen, wie etwa eine zeitlich veränderliche und mit ei-

nem neuen skalaren Feld verknüpfte Dunkle Energie. Einige Forscher gehen zudem davon aus, dass vielleicht die grundlegenden Gravitationsgleichungen verändert werden müssen. Zwar haben sie sich auf kleineren Skalen stets als korrekt erwiesen, aber über kosmologische Distanzen hinweg ist ihre Gültigkeit streng genommen nur eine unüberprüfte, wenn auch plausible Vermutung. Und schließlich dürfen wir nicht vergessen, dass es letztlich vor allem darum geht, endlich auch die noch unbekanntenen physikalischen Mechanismen hinter den mathematischen Formeln zu entschlüsseln.

**Georg Wolschin** ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.