

# Daten vom Anfang der Welt

Neue Polarisationsmessungen zeigen, dass Gravitationswellen aus der Entstehungsphase des Universums ihre Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen haben. Bestätigen sich die Ergebnisse, wären sie die größte Sensation in der Kosmologie seit der Entdeckung der Hintergrundstrahlung selbst.

VON GEORG WOLSCHIN

Die Kosmologie erlebt aufregende Zeiten: Forscher haben möglicherweise Signale aus der Geburtsphase des Kosmos aufgespürt – entstanden vor rund 13,8 Milliarden Jahren, als das Universum unmittelbar nach dem Urknall in einer nur Sekundenbruchteile dauernden Inflationsphase rasend schnell expandierte. Das rund 50 Mitglieder zählende BICEP2-Team um John M. Kovac vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts, hatte dazu die Polarisation des kosmischen Mikrowellenhintergrunds vermessen – BICEP steht für Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization. Die Indizien, die das nahe der Amundsen-Scott-Station in der Antarktis errichtete Experiment fand, fallen sogar unerwartet deutlich aus.

Der Mikrowellenhintergrund ist eine Strahlung, die rund 380 000 Jahre

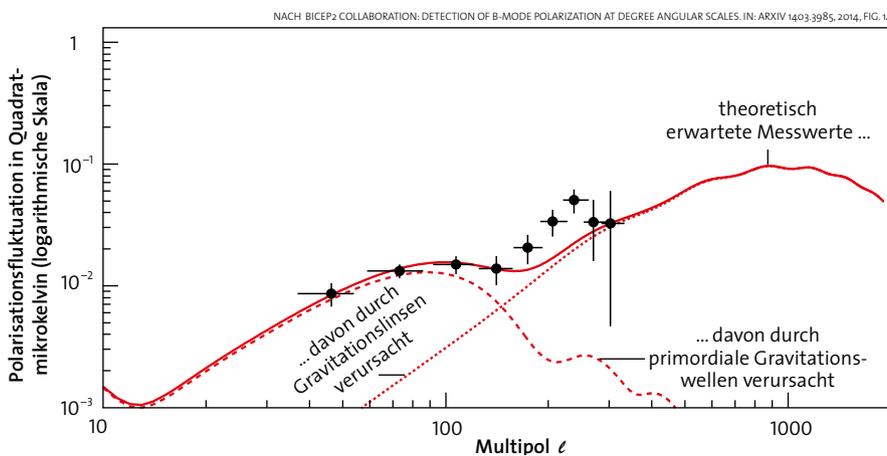
nach dem Urknall bei der Bildung von Wasserstoffatomen aus Protonen und Elektronen freigesetzt wurde und noch heute in fast perfekter Gleichmäßigkeit das gesamte Universum erfüllt. Kosmologischen Theorien zufolge sollten Gravitationswellen – wellenförmig verlaufende Stauchungen und Streckungen der Raumzeit –, die während der Inflation entstanden sind, der Hintergrundstrahlung ein bestimmtes Polarisationsmuster aufprägen. Genau dieses Muster behaupten die BICEP2-Forscher nun erstmals in ihren Daten gefunden zu haben.

Bestätigt sich das Ergebnis, bringt es enorme Konsequenzen nicht nur für die Kosmologie, sondern für unser gesamtes Weltbild mit sich. Eine kritische Prüfung steht allerdings noch aus. Bekannt gegeben wurden die Daten auf einer Pressekonferenz an der Harvard University in Cambridge sowie als Pre-

print auf der Onlineplattform [arxiv.org](http://arxiv.org). Üblich wäre gewesen, dass die Presse erst dann informiert wird, wenn die Studie von unabhängigen Kollegen geprüft wurde und zur Publikation in einem Fachjournal vorgesehen ist. Der Schritt in die Öffentlichkeit erfolgte also eigentlich zu früh. Kein Wunder, dass sich nun viele Mitglieder der kosmologischen Community zur kritischen Mitbegutachtung aufgefordert sehen, zumal die Ergebnisse in vielfacher Hinsicht noch als recht vorläufig gelten müssen.

## Entscheidende Jahre für Gravitationswellenforscher

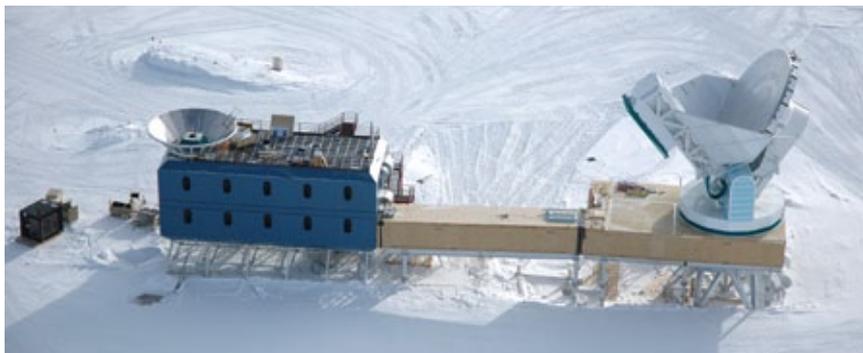
Gravitationswellen sind derzeit ein heißes Thema. Ein erster indirekter Nachweis dieser von Albert Einstein vorausgesagten Erschütterungen der Raumzeitstruktur gelang Russell Hulse und Joseph Taylor zwar schon in den 1970er Jahren. Damals vermaßen die US-Forscher zwei einander umkreisende Pulsare in der Milchstraße und konnten aus der allmählichen Abnahme ihrer Bahnperioden darauf schließen, dass sich der Energieverlust auf die Aussendung von Gravitationswellen zurückführen lässt. In den nächsten paar Jahren, so sind Physiker überzeugt, werden Interferometer wie LIGO solche Störungen der Raumzeit endlich auch direkt registrieren. Die mit BICEP2 gewonnenen indirekten Signale sind dennoch eine Sensation, schließlich stammen sie nicht aus unserer kosmischen Nachbarschaft, sondern aus der Entstehungszeit der Welt. Auch ist der direkte Nachweis solcher primordialen, also »ursprünglichen« Gravitationswellen so gut wie ausgeschlossen. Wahrscheinlich wird nicht einmal das geplante



Erst BICEP2 (schwarze Messpunkte) fand B-Moden der Polarisation, die sich auf primordiale Gravitationswellen zurückführen lassen (vier Messpunkte links). Erkennen lässt sich das an ihren so genannten Multipolen, einem Parameter, der sich aus der mathematischen Analyse der polarisierten Strahlung ergibt. Hingegen lagen die vom South Pole Telescope 2013 entdeckten B-Moden (nicht gezeigt) im Bereich von Multipolen um  $l = 1000$ , die vom Gravitationslinseneffekt herrühren.



STEFFEN RICHTER, HARVARD UNIVERSITY



GLENN GRANT, NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

Das Teleskop BICEP2 (Foto oben, im Vordergrund) ist auf dem Dach einer Forschungseinrichtung nahe der Amundsen-Scott-Station in der Antarktis installiert (Foto links). Es befindet sich im Zentrum eines Trichters, der irdische Störstrahlung absorbiert (links außen im Bild). Direkt benachbart ist das South Pole Telescope (rechts außen), mit dem Forscher 2013 erstmals die B-Moden-Polarisation der Hintergrundstrahlung nachwies.

Weltrauminterferometer LISA die äußerst schwachen Signale registrieren.

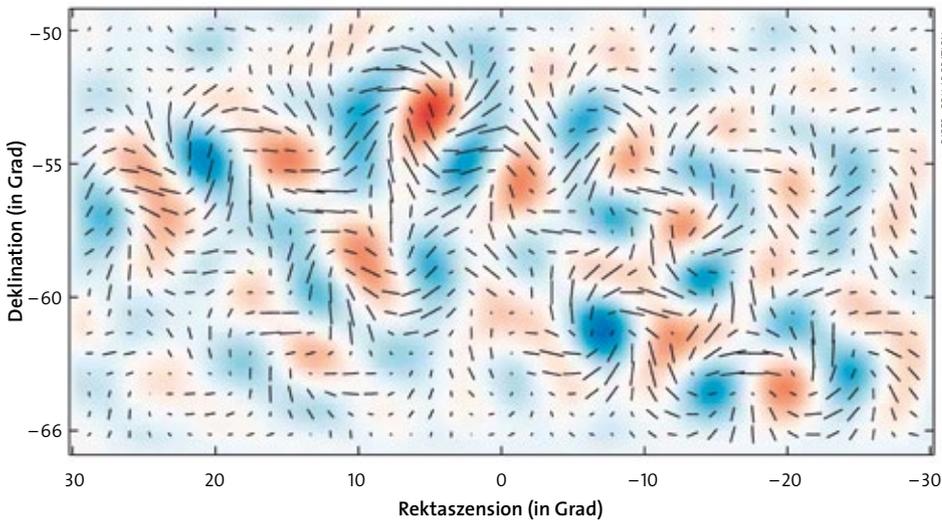
Die Polarisation des Mikrowellenhintergrunds, also die Tatsache, dass seine elektromagnetischen Wellen bevorzugt in bestimmten Richtungen schwingen, ist ebenfalls schon länger bekannt. Als Arno Penzias und Robert Wilson die Hintergrundstrahlung 1965 entdeckten, hielt man sie erst einmal für nahezu unpolarisiert; die Messapparatur war allerdings nicht dafür geeignet, um das zu überprüfen. Der entsprechende Nachweis gelang erst 2002:

Mit DASI, dem Degree Angular Scale Interferometer am Südpol, untersuchten Forscher die Hintergrundstrahlung, die aus zwei jeweils 3,8 Grad großen Himmelsfeldern kam, und fanden so genannte E-Polarisationsmoden (siehe kleines Bild S. 16). Deren mathematische Analyse zeigte, dass sie von Dichteschwankungen im frühen Universum herrührten.

Noch interessanter sind die B-Moden. Auch sie werden zunächst einer so genannten Fourier-Analyse unterzogen. Dazu rechnet man die Strahlungs-

daten in eine Reihe von Summanden um, die durch einen fortlaufenden Parameter  $\ell$  gekennzeichnet und Multipole genannt werden. Je nachdem, bei welchen Multipolen sich die beobachteten E- oder B-Moden zeigen, kommen andere Entstehungsursachen für sie in Frage.

B-Moden sind sehr schwach und daher viel schwieriger zu erkennen. Im Strahlungshintergrund ließen sie sich aber ebenfalls bereits nachweisen. Das dem BICEP2-Instrument benachbarte South Pole Telescope fand jedoch nur



Gravitationswellen aus der Inflationsphase des nur Sekundenbruchteile alten Universums bewirken eine charakteristische Verwirbelung der so genannten B-Moden der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. Rote Bereiche in diesem vom BICEP2-Team gewonnenen Diagramm stehen für Verwirbelung im Uhrzeigersinn, blaue für die Gegenrichtung. An den beiden Achsen sind die Himmelskoordinaten abzulesen. Das Instrument vermaß ein Himmelfeld in den südlichen Sternbildern Indus, Pendeluhr und Tukan, auf das vom Südpol aus besonders gute Sicht im Mikrowellenbereich herrscht.

Signale mit B-Moden im Bereich hoher Multipole oberhalb von etwa  $\ell=300$ , mit einem Maximum nahe bei  $\ell=500$  (*Physical Review Letters* 111, 141301, 4. Oktober 2013). Das ist typisch für Polarisierungseffekte, die auf so genannte Gravitationslinsen zurückgehen. Diese großen Masseansammlungen im Universum lenken durch ihre Schwerkraft elektromagnetische Strahlung ab; dabei wandelt sich ein Teil der E-Moden in B-Moden um. Kurz darauf fand auch das POLARBEAR-Team in Chile B-Moden, die von Gravitationslinsen stammen. Erst BICEP2 maß dann diejenigen B-Moden, die tatsächlich auf Gravitationswellen aus der Inflationsphase hinweisen.

Die Idee von der Inflation kam Forschern Anfang der 1980er Jahre. Kurz nach der Entstehung des Universums, so postulierten damals Theoretiker wie Alexei Starobinski, Alan Guth und Andrei Linde, vergrößerten sich winzig kleine Abstände binnen kürzester Zeit immens. Typische Modelle besagen, dass dabei innerhalb von nur  $10^{-32}$  Sekunden eine Expansion des Raums um den Faktor  $10^{26}$  stattfand. Die Inflation

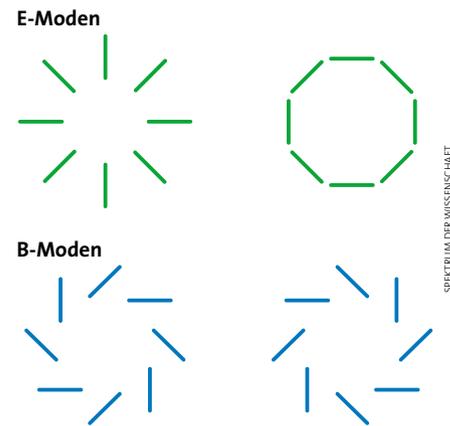
löste eine ganze Reihe gravierender Probleme des Standardmodells der Kosmologie, indem sie zum Beispiel erklärte, warum der Raum im Allgemeinen nicht gekrümmt ist, warum der Mikrowellenhintergrund so extrem gleichmäßig erscheint und warum Materie nicht diffus verteilt ist, sondern sich in Galaxien und Galaxienhaufen anordnet. Auch der Mikrowellenhintergrund selbst trägt möglicherweise noch Spuren von ihr in sich: Satelliten wie WMAP und Planck haben darin Schwankungen nachgewiesen, die sich aus winzigen, dann aber durch die Inflation extrem stark gedehnten Quantenfluktuationen entwickelt haben könnten.

**Mögliches Ende der Spekulationen über die Inflation**

Dennoch gilt die Theorie weiterhin als sehr spekulativ. Sie basiert zwar zum großen Teil auf bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten, weitet deren Gültigkeit jedoch in Richtung noch unerforschter, extrem hoher Energien aus. Nun allerdings scheint es, als sei durch BICEP2 erstmals ein Nachweis für sie erbracht worden. Das Instrument basiert

auf dem Prototypen BICEP1, der mit 98 supraleitenden Sensoren die Frequenzen 100 sowie 150 Gigahertz untersuchte. BICEP2 hat 512 Antennen, operiert aber lediglich bei 150 Gigahertz. Zwischen 2010 und 2012 war es auf ein kleines Areal von etwa einem Prozent des Himmels gerichtet, aus dem wenig störende Vordergrundstrahlung kommt, und vermaß die B-Modens-Polarisation des Hintergrunds. Die geringen Störeffekte konnten die Forscher vergleichsweise leicht aus ihren Daten herausrechnen. Bei der Analyse zeigte sich dann, dass der Multipolbereich der erfassten Strahlung etwa zwischen  $\ell=20$  und  $\ell=340$  liegt. Für B-Moden, die von primordialen Gravitationswellen erzeugt wurden, hatten die Theoretiker mit Werten im Bereich von 30 bis 150 gerechnet.

Der Schluss der Forscher ist eindeutig und wird von vielen Kosmologen geteilt: Verursacht wurde das Signal nahe



E- und B-Moden in der Polarisation der Hintergrundstrahlung lassen sich bildlich als Striche darstellen, die angeben, in welcher Richtung das Licht an einer bestimmten Stelle des Himmels polarisiert ist. Bei E-Moden zeigen sich radiale oder kreisförmige Muster der Polarisation (oben), bei B-Moden (unten) wirbelförmige, die in unterschiedliche Richtung zeigen können. E-Moden rühren von Dichteschwankungen im primordialen Universum her. B-Moden können von primordialen Gravitationswellen stammen, aber auch von Vordergrundeffekten, zum Beispiel von Gravitationslinsen oder von Staub in der Sichtlinie.



STEFFEN RICHTER, HARVARD UNIVERSITY

**Wurden hier am Südpol Signale vom Anfang der Welt aufgefangen – aus einer Zeit, als das Universum nur Sekundenbruchteile alt war?**

$\ell=80$  durch Gravitationswellen aus der Entstehungsphase des Universums. Außerdem erwies es sich als fast doppelt so stark, wie Satellitendaten haben erwarten lassen. Demnach muss bei der Inflation eine viel höhere Energie im Spiel gewesen sein als es viele Modelle vorhersagen: Der aus den Messungen ableitbare Wert von rund  $2 \cdot 10^{16}$  GeV liegt bei etwa einem Hundertstel der Planck-Skala, die als eine Art Energieobergrenze für die Anwendbarkeit bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten gilt. Zum Vergleich: Der LHC bringt es auf gerade einmal ein Billionstel dieses Werts. Den Forschern scheint also in der Tat ein Blick in die energiereichste und somit früheste Phase unseres Universums gelungen zu sein.

Der Medienhype um die vermeintlich endgültige Bestätigung der Inflation ist zahlreichen Forschern zufolge dennoch verfrüht. Als erste Messung dieser Art muss sie durch mindestens ein weiteres Experiment bestätigt werden – schließlich galt auch die Entdeckung des Higgs-Bosons vor allem deshalb als glaubwürdig, weil zwei unabhängig voneinander arbeitende

Experimente, nämlich die LHC-Detektoren ATLAS und CMS, dasselbe Ergebnis erzielten. Ist das BICEP2-Signal echt, werden wir dies allerdings schon in den nächsten ein bis zwei Jahren erfahren, denn weitere Experimente wie der Atacama B-mode Search, POLARBEAR und der Cosmology Large Angular Scale Surveyor, alle in Chile, oder auch das High-altitude balloon-borne E and B Experiment und das Keck-Array am Südpol liefern bald ebenfalls Daten.

**Könnte der Effekt doch nur vorgetäuscht sein?**

Selbst dann ist aber noch nicht abschließend geklärt, ob nicht doch Vordergrundeffekte den gesuchten Effekt nur vortäuschen. Im Prinzip lässt sich das einfach überprüfen, denn anders als Vordergrundsignale sollten primordiale Signale stets identisch ausfallen, egal bei welcher Frequenz man sie misst. Tatsächlich sprechen auch die BICEP1-Messungen bei 100 Gigahertz für ein primordiales Signal – allerdings ist die statistische Aussagekraft nach den Maßstäben der Teilchenphysiker noch nicht hoch genug. Solidere Daten

wird wohl erst BICEP3 mit seinen 2560 Detektoren liefern, die ebenfalls bei 100 Gigahertz arbeiten.

Eine andere systematische Fehlerquelle, die sich bei irdischen Messungen nicht ohne Weiteres ausschließen lässt, besteht in einem »Überschwappen« des sehr viel stärkeren E-Signals in die B-Moden. Dieser Effekt ist nicht physikalischer Natur, sondern tritt bei der erwähnten mathematischen Analyse des Messsignals auf, bei der man die unterschiedlichen Moden nach einem komplexen Verfahren voneinander trennt. Er bekommt dann Bedeutung, wenn wie bei BICEP nur ein kleiner Himmelsbereich, hier 380 Quadratgrad, in den Blick genommen wird.

Abhilfe schaffen kann erst der erwähnte Planck-Satellit. Er vermaß die B-Moden über den gesamten Himmel hinweg, hatte aber nicht überall so gute Sicht auf den Mikrowellenhintergrund wie sie vom Südpol aus herrscht, weshalb die schon seit geraumer Zeit stattfindende Datenbereinigung und -analyse aufwändiger ausfällt. Noch in diesem Jahr aber sollen die Ergebnisse veröffentlicht werden. BICEP2 hat den Erwartungsdruck jetzt erheblich gesteigert.

---

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