

Der Inflation auf der Spur I

Indizien für primordiale Gravitationswellen gefunden

Erstmals registrierten Astronomen Signale aus der Zeit unmittelbar nach dem Urknall: Das Experiment BICEP2 am Südpol hat in der kosmischen Hintergrundstrahlung die Strukturen von Gravitationswellen beobachtet, die aus der Frühphase des Universums stammen. Dies könnte das kosmologische Modell der Inflation bestätigen.

Von Uwe Reichert

Erstmals liegen Messdaten vor, die ein bislang nur theoretisches Konstrukt des Urknallmodells unterstützen, das der inflationären Phase. Die bedeutende Neuigkeit gaben Wissenschaftler der Universität Harvard bekannt, die mit ihrem internationalen Team und einem Experiment namens BICEP2 nach Signalen aus der frühesten Zeit des Universums fahnden. Mit keinem anderen Forschungsprojekt war es

bisher gelungen, Hinweise aus dieser Ära zu erhalten, die fast 14 Milliarden Jahre zurückliegt.

Nach gegenwärtiger Auffassung entstand das Universum vor 13,8 Milliarden Jahren in einem Prozess, den wir Urknall nennen. Raum, Zeit, Energie und die Vorläufer der heute vorhandenen materiellen Teilchen waren damals auf einen winzigen Bereich komprimiert; Temperatur und Dichte erreichten unvorstellbar hohe Werte. Seit dem Urknall dehnt sich das Universum aus und kühlt sich dabei ab. Eine wichtige Zwischenphase in der Entwicklung des frühen Universums war etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall erreicht: Temperatur und Dichte waren so weit gesunken, dass die zuvor noch frei umher-schwirrenden Elektronen und Protonen sich zu stabilen Atomen vereinen konnten. Das hatte eine wichtige Konsequenz für die ebenfalls vorhandene Strahlung: Sie wurde nun nicht mehr ständig durch die materiellen Teilchen wie in einem dichten Nebel gestreut, sondern konnte sich ungehindert von der Materie ausbreiten. Das Universum war gewissermaßen durchsichtig geworden.

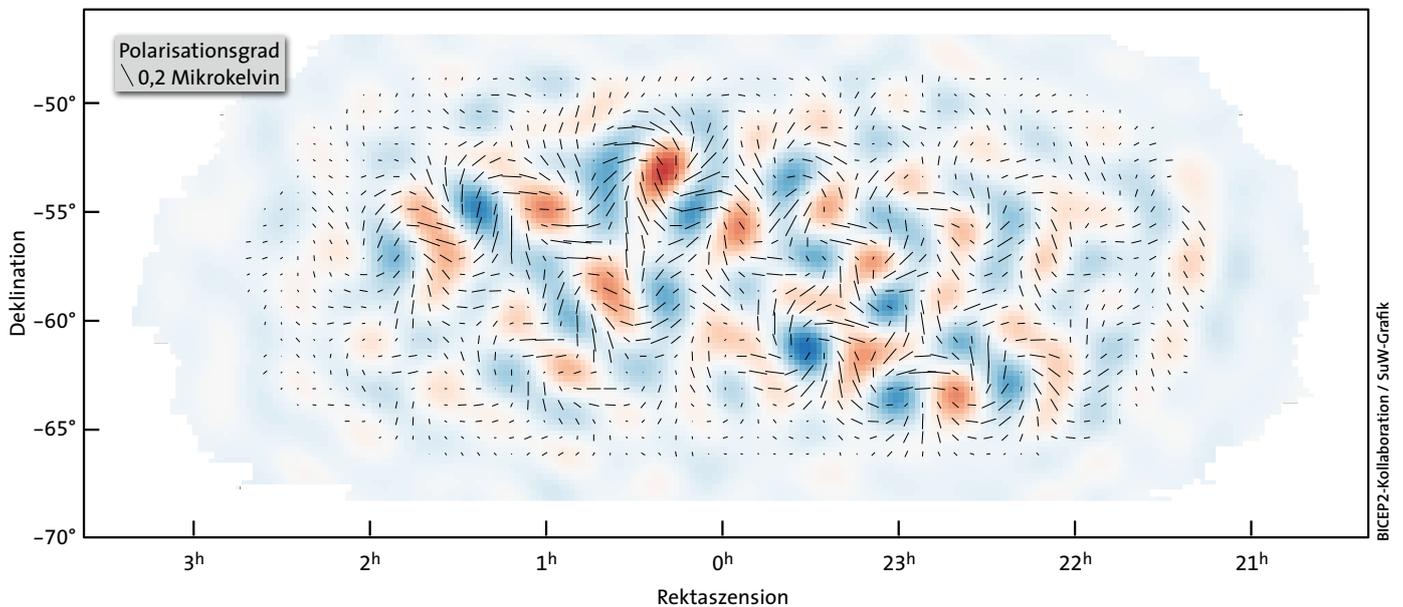
Ein Relikt des Urknalls

Die Strahlung, die damals freigesetzt wurde, durchquert unser Weltall noch immer. Allerdings ist aus dem anfangs strahlenden Leuchten inzwischen ein schwaches Glimmen geworden. Denn infolge der Expansion des Universums hat die Strahlung an Energie eingebüßt: Ihre Wellenlänge wurde erheblich gedehnt, und zwar um rund das Tausendfache. Größere Wellenlängen bedeuten niedrigere Frequenzen und somit auch geringere Temperaturen. Die heiße Wärmestrahlung von einst hat heute Frequenzen, die im Bereich der Mikrowellen liegen, und ihre Temperatur beträgt nur noch knapp drei Kelvin. Als Hintergrundstrahlung erfüllt sie gleichmäßig das gesamte Universum. In jedem Kubikmeter Volumen unseres Weltalls finden wir 400 Millionen Photonen dieses Mikrowellenhintergrunds (aber weniger als ein Atom Materie).

Es ist genau 50 Jahre her, dass diese kosmische Mikrowellenstrahlung entdeckt wurde (siehe Kasten S. 33). Arno A. Penzias und Robert W. Wilson testeten 1964 eine Radioantenne für ein neues Forschungsprojekt und fanden dabei ein Störsignal,

IN KÜRZE

- Das Experiment BICEP2 maß drei Jahre lang die Polarisation der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung.
- In den Messdaten konnten so genannte B-Moden der Polarisation nachgewiesen werden – ein messtechnischer Erfolg.
- Solche B-Moden werden auch von dem Modell eines sich nach dem Urknall inflationär ausdehnenden Universums vorhergesagt.



das aus allen Richtungen des Himmels zu kommen schien und einer Strahlung mit der Temperatur von drei Kelvin entsprach. Bald wurde klar, dass diese »Drei-Kelvin-Strahlung« als Beleg für das lange Zeit umstrittene Urknallmodell und die Expansion des Kosmos zu interpretieren war. Es handelt sich eben um die kosmische Hintergrundstrahlung, die dem Modell zufolge 380 000 Jahre nach dem Urknall entstand.

Finale Wand und Inflationsphase

Inzwischen wurde die kosmische Hintergrundstrahlung äußerst präzise vermessen, und zwar insbesondere mit den Satelliten COBE, WMAP und Planck. Die ersten Ergebnisse des ESA-Satelliten Planck wurden im Frühjahr 2013 vorgelegt (siehe SuW 5/2013, S. 26). Die daraus abgeleitete Himmelskarte zeigt winzige Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung, in der sich Dichteunterschiede im frühen Kosmos widerspiegeln, wie sie 380 000 Jahre nach dem Urknall existierten und damit die Grundlage für die spätere großräumige Struktur aus Galaxien und Galaxienhaufen legten. Diese Karte wird auch »finale Wand« genannt, weil es keine Möglichkeit gibt, mit Hilfe von elektromagnetischer Strahlung noch frühere Phasen des Universums zu erblicken – da Strahlung und Materie in den früheren Zeiten zu einem undurchdringlichen Brei vermengt waren.

Damit blieben die Vorgänge zwischen Urknall und finaler Wand 380 000 Jahre später lange Zeit nur Gegenstand theoretischer Überlegungen. Die gegenwärtig

akzeptierte Variante des Urknallmodells besagt, dass es in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall eine Phase gegeben haben muss, in dem sich das Universum exponentiell schnell aufblähte. Diese Inflationsphase wurde aus theoretischen Gründen eingeführt, um einige der Unzulänglichkeiten des ursprünglichen Urknallmodells zu beseitigen (siehe SuW 1/2011, S. 46). Wie aber lässt sich die Theorie überprüfen, wenn man nicht hinter die finale Wand schauen kann?

Interessanterweise gibt es doch eine Möglichkeit, den Schleier der finalen Wand etwas zu lüften. Theoretischen Überlegungen zufolge könnten sich nämlich einige Vorgänge im frühesten Universum in Form bestimmter Strukturen der kosmischen Hintergrundstrahlung aufgeprägt haben. Hierzu schauen sich die Forscher die Polarisation der kosmischen Mikrowellenstrahlung an. Als Polarisation bezeichnen die Physiker die Eigenschaft des Lichts (oder anderer elektromagnetischer Wellen wie zum Beispiel Radio- oder Mikrowellenstrahlung), bevorzugt in einer bestimmten Ebene zu schwingen. Und die Polarisation hängt unter anderem davon ab, wie die Strahlung an Materie reflektiert oder gestreut wird. Auch aus der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen sich also Informationen über die Materieverteilung im frühen Universum gewinnen.

Und nicht nur das: Die Polarisation sollte auch durch Gravitationswellen beeinflusst werden. Solche Gravitationswellen waren zunächst eine Folge aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie.

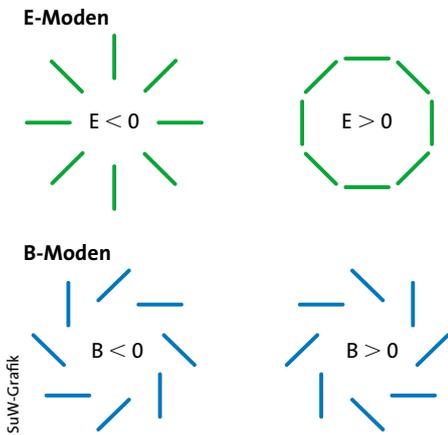
Gravitationswellen aus der Inflationsphase des gerade entstandenen Universums erzeugen eine äußerst schwache, jedoch charakteristische Verwirbelung der Polarisationsrichtungen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, die sogenannten B-Moden. Die Grafik zeigt diese Polarisation. Sie wurde mit dem Teleskop BICEP 2 am Südpol in der Antarktis aufgenommen. Rote Bereiche stehen für Verwirbelung im Uhrzeigersinn, blaue für den Gegenurzeigersinn der B-Moden-Muster. Das dargestellte Feld liegt in den südlichen Sternbildern Pendeluhr, Tukan und Indus.

Sie sollten immer dann entstehen, wenn kompakte Massen beschleunigt werden – bei der Explosion einer Supernova etwa, bei der Kollision von Neutronensternen oder beim Verschmelzen von Schwarzen Löchern. Oder eben bei der inflationären Phase unmittelbar nach dem Urknall. Und die Theorie vom inflationären Universum sagt vorher, wie sich Gravitationswellen, die sich als Erschütterungen der Raumzeit in alle Richtungen ausbreiten, in der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung bemerkbar machen sollten.

Der Schlüssel: B-Moden in der Polarisation

Wie unterscheidet sich nun die Polarisation, die durch Dichteunterschiede erzeugt wurde, von jener, die auf den Einfluss von Gravitationswellen zurückzuführen ist?

Dazu müssen wir berücksichtigen, dass es – grob gesagt – zwei unterschiedliche Moden der Polarisation gibt: E-Moden



und B-Moden. Die Messung dieser beiden Moden gibt Auskunft über die jeweilige Polarisationsursache. E-Moden rühren von Unterschieden in der Dichte der Materie her; erstmals gemessen wurden sie im Jahr 2002. Weit schwieriger zu registrieren sind B-Moden, die infolge von Veränderungen im Raumzeit-Gewebe entstehen. Erstmals gelang das im Sommer 2013 mit Hilfe des South Pole Telescope in der Antarktis. Die gemessenen B-Moden waren in diesem Fall auf den Gravitationslinseneffekt zurückzuführen, wie er bei der Beobachtung ferner Galaxien eine Rolle spielt: Die gewaltigen Massen von Galaxienhaufen krümmen die Raumzeit, wodurch das Licht noch fernerer Galaxien wie durch eine Linse abgelenkt wird.

Die Mitglieder des BICEP2-Teams waren nun auf der Suche nach B-Moden in der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung, die von Gravitationswellen aus der inflationären Phase des Universums herrührten. Diese Gravitationswellen sollten dem kosmischen Hintergrund eine wirbelartige Struktur der Polarisation aufgeprägt haben. In Veröffentlichungen vom 17. März legten Sie die ersten Belege für einen solchen Nachweis vor.

Das BICEP-Experiment

Für ihre Messungen nutzten die Wissenschaftler das BICEP-Experiment. BICEP steht für Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization und bezeichnet eine Serie von Experimenten zur Messung der Polarisation der Strahlung im kosmischen Mikrowellenhintergrund. Speziell wird in den Messungen nach den B-Moden der Polarisation gesucht.

Durchgeführt wird die Beobachtungskampagne BICEP an der Amundsen-Scott-Forschungsstation am Südpol mit einem relativ kleinen Teleskop, das ein Areal um den südlichen Himmelpol herum erfasst.

Die kosmische Hintergrundstrahlung sollte auf verschiedene Weise polarisiert sein, je nachdem, welche Ursache die Polarisation hat. Dichteschwankungen in der Ursuppe machen sich als E-Moden bemerkbar. Dort ist die Polarisation entweder radial oder kreisförmig ausgerichtet. Liegt die Ursache der Polarisation in Gravitationswellen, die sich in der Ursuppe ausgebreitet haben, so sollte die Polarisation wirbelförmige Ausrichtungen zeigen, B-Moden genannt.

Die Höhe der Station von 2800 Metern über dem Meeresspiegel und die trockene Luft in der Antarktis bieten gute Voraussetzungen, um von der Erde aus die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zu erforschen.

Das Experiment ist in drei aufeinander folgende Stufen geteilt: BICEP1 war ein Prototyp-Instrument mit 98 Detektoren, das von Anfang 2006 bis Ende 2008 ein Areal in der Nähe des Himmelssüdpols beobachtete. BICEP2 war eine Weiterentwicklung, in der man das Teleskop mit 512 Detektoren bestückte. Die Messfrequenz lag bei 150 Gigahertz. Die Ergebnisse der dreijährigen Messkampagne (von Anfang 2010 bis Ende 2012) liegen nun vor; in ihnen haben die Wissenschaftler der BICEP2-Kollaboration die durch Gravitationswellen aufgeprägten Signale aus der Frühphase des Universums in Form der B-Moden gefunden. BICEP3 wird gegenwärtig installiert; das Instrument wird dann 2560 Detektoren enthalten, die bei der Frequenz von 100 Gigahertz arbeiten.

Wie die Sprecher des BICEP2-Teams auf einer Pressekonferenz am 17. März sagten, haben sie ihre Daten mehrere Jahre lang sorgfältig analysiert, um mögliche Fehlerquellen und andere Ursachen auszuschließen. Nach eigenen Angaben waren sie überrascht über die Stärke des aufgetretenen Signals. Ihre Ergebnisse hätten sie aber noch ein Jahr zurückgehalten und sich erst zur Veröffentlichung entschlossen, als eines der Nachfolgeexperimente von BICEP2, das Keck-Array, die gleichen Resultate zu liefern begann (siehe den nachfolgenden Beitrag von Robert Schwarz, S. 34).

In der Tat müssen zu einem endgültigen Nachweis der »primordialen B-Moden« die Daten durch andere Experimente bestätigt werden. Und die Konkurrenz

auf diesem Gebiet ist durchaus groß. Neben einigen Experimenten, die ebenfalls von US-amerikanischen Forschergruppen betrieben werden, sind es vor allem die noch nicht veröffentlichten Polarisationsdaten des Planck-Satelliten der ESA, die den Befund bestätigen oder widerlegen können.

Die Planck-Daten werden vermutlich auch helfen, einen der bisher stärksten Kritikpunkte an den BICEP2-Ergebnissen zu beseitigen. Noch ist nämlich die Frage nicht ausreichend geklärt, inwieweit Vordergrundobjekte die Befunde verfälscht haben könnten. BICEP2 schaut zwar in ein Himmelsareal, in dem recht wenige Vordergrundobjekte vorhanden sind. Doch erst die Daten von Planck, der den gesamten Himmel vermessen hat, werden zeigen, ob die BICEP2-Kollaboration die Störsignale ausreichend in der Auswertung berücksichtigt hat.

Auch wenn die Mitglieder des BICEP2-Teams bereits vom Nobelpreis träumen: Erst die Bestätigung durch ein unabhängiges Experiment wird die Wissenschaftlergemeinschaft überzeugen. Was aber auf jeden Fall bereits jetzt Anerkennung verdient, ist die messtechnische Leistung des Teams. ☺

UWE REICHERT ist Chefredakteur von *Sterne und Weltraum*.

Literaturhinweise

BICEP2 Collaboration: BICEP2 I: Detection of B-mode Polarization at Degree Angular Scales. arxiv.org/pdf/1403.3985.pdf

BICEP2 Collaboration: BICEP2 II: Experiment and Three-Year Data Set. arxiv.org/pdf/1403.4302.pdf

Enßlin, T.; Weller, J.: Weltraumteleskop Planck: erste Ergebnisse. In: *Sterne und Weltraum* 5/2013, S. 26–27

Niemeyer, J.; Schwarz, D. J.: Inflation – der Auftakt zum Urknall. In: *Sterne und Weltraum* 1/2011, S. 46–57

Nussbaumer, H.: Achtzig Jahre Urknall. In: *Sterne und Weltraum* 5/2011, S. 46–50

Wolf, C.: Urknall oder nicht? In: *Sterne und Weltraum* 2/2014, S. 28–34

Dieser Artikel und weitere Weblinks zum Thema im Internet:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1274437