

Wellen der Inflation

Das BICEP2-Teleskop am Südpol findet erste Hinweise auf Quantengravitation und eine neue Energieskala.

Am 17. März 2014 hat die BICEP2-Kollaboration eine der mutmaßlich bedeutendsten Entdeckungen der Kosmologie bekannt gegeben: die erstmalige Messung einer B-polarisierten Komponente der kosmischen Mikrowellenstrahlung auf Winkelskalen von einigen Grad [1]. Ursache dafür könnten – so die plausible Interpretation – Gravitationswellen aus der kosmologischen Inflationsphase sein. Dies wäre der erste Hinweis auf ein Phänomen der Quantengravitation und eine Messung der Energieskala kosmologischer Inflation von 10^{16} GeV, die mit der Skala großer vereinheitlichter Theorien übereinstimmt. Sollten andere Experimente dieses Resultat bestätigen, wäre diese Entdeckung von fundamentaler Bedeutung für die gesamte Physik.

1965 entdeckten Arno Penzias und Robert Wilson den kosmischen Mikrowellenhintergrund, also die Reststrahlung des heißen Plasmas, das nach Entstehung der ersten Atome zu einem durchsichtigen Gas wurde. 1992 wies die COBE-Mission der NASA Temperaturfluktuationen in der kosmischen Mikrowellenstrahlung nach. Vor kurzem ermöglichten es Ergebnisse der ESA-Mission Planck, diese Fluktuationen mit höchster Genauigkeit zu vermessen [2]. Die Hintergrundstrahlung ist thermischen Ursprungs und wäre ohne Temperaturfluktuationen völlig unpolarisiert, obwohl der Wirkungsquerschnitt für die letzte Streuung der Photonen an freien

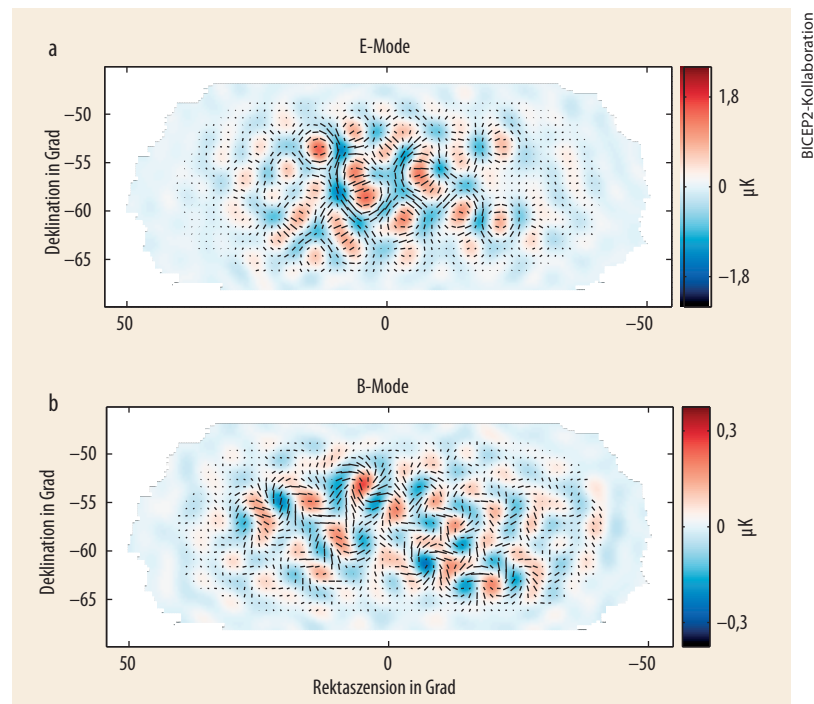


Abb. 1 Das BICEP2-Teleskop hat sowohl die E- als auch die deutlich schwächere B-Mode der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung beobachtet. Das Polarisationsmuster der E-Mode ist sym-

metrisch unter Punktspiegelungen, das Muster der B-Mode antisymmetrisch (dargestellt durch die Orientierung und Länge der schwarzen Striche).

Elektronen, kurz bevor diese in Atomen gebunden werden, von der Polarisation abhängt (Thomson-Streuung). Aufgrund der Fluktuationen der Temperatur und damit der räumlichen Intensität verschwindet das über alle Richtungen gemittelte polarisationsabhängige Signal aber nicht mehr, sodass eine kleine räumlich variierende lineare Polarisation der Mikrowellenstrahlung auftritt.

Polarisation entsteht also durch die von Dichteschwankungen des Plasmas erzeugten Temperaturfluktuationen. Um einen heißen Punkt bildet sich ein Polarisationsmuster, das tangential an konzentrische Kreise um diesen Punkt ist, während die Polarisation um einen kalten Punkt radial ausgerichtet ist (Abb. 1a). Sowohl radiale als auch tangentielle Orientierungen sind invariant unter Spiegelungen. In Analogie zu den Eigenschaften des elektrischen Feldes unter Punktspiegelungen spricht man hier von E-Moden. Das DASI-Experiment

hat es 2002 erstmals erlaubt, die E-Polarisation zu messen [3]. Andere Experimente bestätigten das Ergebnis später. Durch die Ablenkung der Mikrowellenphotonen im Schwerfeld von Dichteschwankungen im Universum wandelt sich ein Teil der E-Moden in B-Moden um, die antisymmetrisch unter Punktspiegelungen sind. Dieser Effekt ist bei kleinen Winkelskalen unter einem Grad am stärksten ausgeprägt, was kürzlich Messungen vom South Pole Telescope [4] und von POLARBEAR [5] bestätigen konnten (durchgezogene rote Linie bei hohen Multipolen in Abb. 2). Das BICEP2-Experiment hat nun B-Polarisation auf deutlich größeren Winkelskalen entdeckt (Abb. 1b und gestrichelte Linie bei niedrigeren Multipolen in Abb. 2), die eine andere Ursache haben muss [1].

Mehrere US-amerikanische Universitäten betreiben das BICEP2-Experiment (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) am Südpol, der aufgrund der

Sonnenuntergang am Südpol, mit dem BICEP2-Teleskop im Vordergrund und dem South Pole Telescope im Hintergrund.



Steffen Richter, Harvard Univ.

extrem geringen Luftfeuchtigkeit ein hervorragender Ort ist, um kosmische Mikrowellenstrahlung zu untersuchen [6]. BICEP2 benutzt einen mit Helium gekühlten Refraktor mit einer Winkelauflösung von einem halben Grad. Das Teleskop lässt sich nicht nur in Elevation und Azimut bewegen, sondern auch um die eigene Achse drehen. Das ermöglicht es, Polarisationsmessungen systematisch zu kontrollieren. Das Teleskop beobachtet den Mikrowellenhimmel bei einer einzigen Frequenz von 150 GHz (nahe dem Maximum der kosmischen Mikrowellenstrahlung) mithilfe von 256 Antennenfeldern (Pixeln).

Über drei Jahre lang untersuchte BICEP2 ab 2010 ein 380 Quadratgrad großes Gebiet. Dieses „südgalaaktische Loch“ eignet sich gut, da es im Vordergrund nur mit besonders wenig galaktischem Staub „kontaminiert“ ist. Dadurch entfällt eine aufwändige Rekonstruktion des kosmischen Signals, wie sie beispielsweise bei Planck für den gesamten Himmel notwendig war. Aus den Messungen wurden Karten der E- und B-Moden erstellt (Abb. 1) und einer Reihe systematischer Tests unterzogen. Schließlich ließ sich die Stärke einer möglichen Vordergrundkontamination aus Modellen abschätzen. Kreuzkorrelationen mit alten Daten des BICEP1-Experiments, das mit seinen Detektoren nur obere Schranken gemessen hatte, erlauben es, den spektralen Index abzuschätzen. Da dieser mit der Annahme eines Schwarzkörperspektrums konsistent ist, lässt sich ausschließen, dass das Signal primär von galaktischem Staub oder Synchrotronstrahlung stammt. Im Leistungsspektrum der B-Moden zeigt die durchgezogene rote Linie das Signal, bei dem die Lichtablenkung verantwortlich war für die Umwandlung von E- in B-Polarisation (Abb. 2). Der Überschuss gegenüber der durchgezogenen roten Linie ist ein $5,9 \sigma$ -Effekt, wenn galaktischer Vordergrund zugelassen ist.

Dem Standardmodell der Kosmologie zufolge ist unser Universum in einer Phase exponentiellen Wachstums – der kosmologischen

Inflation – entstanden. Aus der Untersuchung der Temperaturfluktuationen der Mikrowellenstrahlung wissen wir, dass das Universum keine räumliche Krümmung aufweist, dass diese Fluktuationen kohärent in ihrer Phase sind, ein nahezu skaleninvariantes Spektrum besitzen und normalverteilt sind. All dies steht im Einklang mit Voraussagen von Inflationsmodellen.

Eine weitere Voraussage passt sehr gut mit der Entdeckung von BICEP2 zusammen. Alexei Starobinskii, einer der Väter der Idee der kosmologischen Inflation, hatte 1979 erkannt, dass eine solche Phase exponentieller Ausdehnung Quantenfluktuationen der Raumzeit, im Speziellen auch Gravitationswellen, mit Wellenlängen größer als dem Hubble-Radius einfriert [7]. Nach dem Ende der Inflation wachsen die Wellenlängen dieser Moden langsamer als der Hubble-Radius, sodass diese später als klassische Gravitationswellen durch das Universum laufen. Somit entstehen in der kosmologischen Inflation aus Quantenfluktuationen Gravitationswellen. Deren Leistungsspektrum ist ein direktes Maß für die Energiedichte des Universums bei deren Entstehung.

Gravitationswellen, die per se Quadrupolanisotropie hervorrufen, können eine beliebig ausgerichtete lineare Polarisation und damit ein beliebiges Polarisationsmuster erzeugen – also sowohl die spiegelsymmetrischen E-Moden als auch die unter Spiegelung antisymmetrischen B-Moden [8]. Vektormoden (z. B. Rotation) könnten ebenfalls zu B-Moden führen, diese sind im Rahmen kosmologischer Inflation aber nicht möglich.

B-Moden sind also ein Hinweis auf die Existenz von Gravitationswellen, die während einer Phase kosmologischer Inflation im frühesten Universum entstehen. Darüber hinaus stimmt die Messung gut mit dem Quantenursprung dieser Gravitationswellen überein und legt die Energieskala der kosmologischen Inflation auf die Skala der bislang spekulativen großen vereinheitlichten Theorien fest, nämlich 10^{16} GeV.

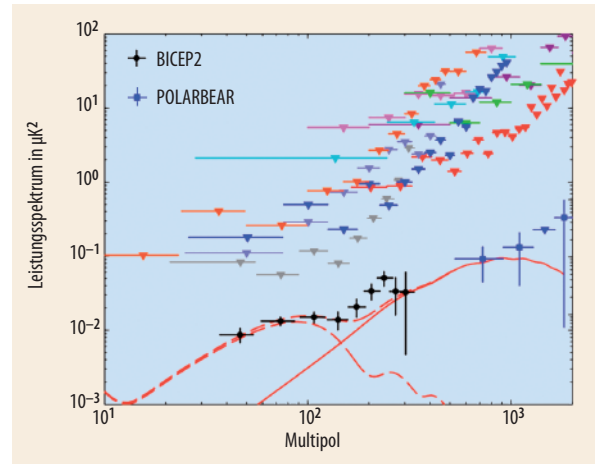


Abb. 2 Im Leistungsspektrum zur Charakterisierung der B-Mode ist ein Signal zu erwarten, das auf Gravitationswellen aus der Inflationsphase des Universums zurückzuführen ist (gestrichelte rote Linie). Dies hat BICEP2 nun bestätigt. Das POLARBEAR-Experiment hatte zuvor ein Signal bei kleineren Winkelskalen (höhere Multipole) beobachtet, dessen Ursache die Ablenkung der Mikrowellenphotonen im Schwerfeld von Dichteschwankungen ist (durchgezogene rote Linie). Frühere Experimente konnten nur obere Schranken angeben (bunte Symbole).

Nun ist es wichtig, diese Beobachtung mit einem anderen Experiment, bei einer anderen Frequenz und in einem anderen Gebiet am Himmel zu bestätigen. Zur Jagd treten verschiedene Experimente an, nämlich ABS, ACTPol, EBEX, POLARBEAR, Spider, das South Pole Telescope und nicht zuletzt Planck.

Sollten sich die Behauptungen von BICEP2 bestätigen, so wurden wir im März zu Zeitzeugen einer revolutionären Entdeckung – des ersten Hinweises auf einen Aspekt von Quantengravitation. Dies wäre ähnlich bedeutend wie der photoelektrische Effekt, mit dem zum ersten Mal ein Quanteneffekt von Licht nachgewiesen wurde.

Dominik Schwarz

- [1] BICEP2 Collaboration, arXiv:1403.3985 (2014)
- [2] D. Schwarz, Physik Journal, Mai 2013, S. 18
- [3] J. M. Kovac et al., Nature **420**, 772 (2002)
- [4] D. Hanson et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 141301 (2013)
- [5] POLARBEAR Collaboration, arXiv:1403.2369 (2014)
- [6] BICEP2 Collaboration, arXiv:1403.4302 (2014)
- [7] A. A. Starobinskii, JETP Letters **30**, 682 (1979)
- [8] A. G. Polnarev, Sov. Astron. **29**, 607 (1985)

Prof. Dr. Dominik Schwarz, Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, Postfach 100131, 33501 Bielefeld