

Kosmische Felder im Labor

In einem Bose-Einstein-Kondensat gelang es, die Dynamik von Quantenfeldern im expandierenden Universum zu simulieren.

Ralf Schützhold

Quantenfelder beschreiben drei der vier fundamentalen Kräfte der Natur, nämlich die elektromagnetische, die starke sowie die schwache Wechselwirkung. Die Quantisierung der Gravitation ist trotz vieler Bemühungen noch nicht vollständig verstanden und birgt viele ungelöste Probleme. Als konservativer Zugang dient daher eine effektive Theorie von Quantenfeldern, die auf dem Hintergrund einer klassischen gekrümmten Raumzeit propagieren. Auch wenn dieser Zugang wohl nicht alle Probleme lösen kann, erlaubt er es, faszinierende Phänomene vorherzusagen wie die Hawking-Strahlung und kosmologische Teilchenerzeugung. In beiden Fällen werden die Quantenfluktuationen des Vakuumzustands auseinander gerissen und dadurch in reale Teilchenpaare umgewandelt. Bei der Hawking-Strahlung geschieht dies durch das Gravitationsfeld eines Schwarzen Loches, bei der kosmologischen Teilchenerzeugung durch die inflationäre Expansion des Universums. Nach unserem Verständnis der

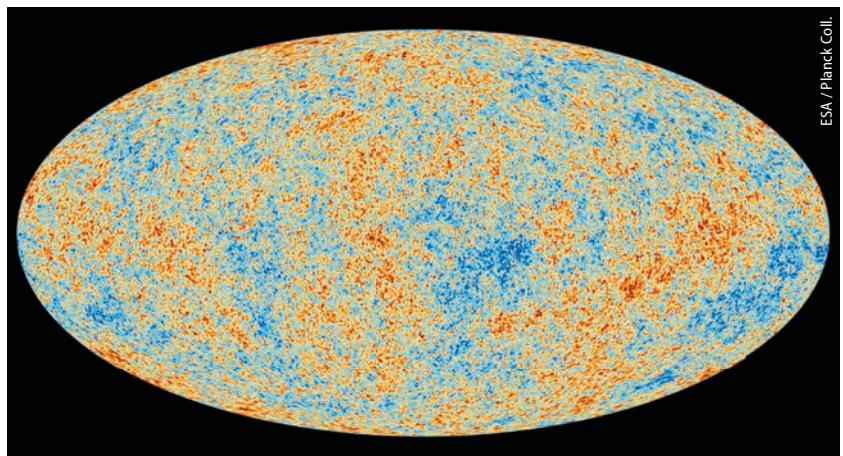


Abb. 1 Der Planck-Satellit der ESA hat die Inhomogenitäten bzw. Anisotropien der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung gemessen.

kosmischen Evolution waren derartige Effekte verantwortlich für die Entstehung der Keime für Strukturbildung in der Frühphase unseres Universums, also letztlich für unsere Existenz. Signaturen dieser Prozesse finden sich noch heute in den Inhomogenitäten der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (**Abb. 1**).

Phänomene wie kosmologische Teilchenerzeugung und Hawking-Strahlung sind also wichtig für unser Verständnis der Vergangenheit und der Zukunft des Universums. Doch sind diese Effekte leider nicht direkt experimentell zugänglich. Einen Ausweg zeigte William G. Unruh auf [1]. Er betrachtete die Propagation von Schallwellen in Fluiden und entdeckte, dass deren Bewegungsgleichungen unter gewissen Annahmen dieselbe Form aufweisen wie die von relativistischen Quantenfeldern in gekrümmten Raumzeiten. Als Konsequenz sollten Hawking-Strahlung sowie kosmologische Teilchenerzeugung als Analogien im Prinzip auch in Fluiden auftreten. Inzwischen gelang es, diese quantitative Analogie auch auf andere Systeme zu erweitern, etwa Ionenfallen, Wasserwellen oder Photonen in speziellen dielektrischen

Medien. Dadurch etablierte sich das Forschungsfeld „Analogue Gravity“.

Neben vielen theoretischen Arbeiten gibt es auch experimentelle Fortschritte. So wurden am Technion in Haifa das Analogon eines vereinfachten Schwarzen Loches in einem Bose-Einstein-Kondensat realisiert und Signaturen der erzeugten Hawking-Strahlung nachgewiesen [2]. Auch wenn die Resultate nicht unumstritten sind und es noch offene Fragen gibt, könnte hierbei der experimentelle Nachweis von Hawkings Vorhersage über die Analogie gelungen sein.

An der Universität Heidelberg ist es einem Forschungsteam nun gelungen, das Analogon der kosmologischen Teilchenerzeugung zu realisieren [3]. Dazu betrachteten die Forschenden Schallwellen in einem effektiv zweidimensionalen Bose-Einstein-Kondensat aus ultrakalten Kalium-39-Atomen. Wie in der Relativitätstheorie, wo physikalische Abstände durch Lichtlaufzeiten bestimmt sind, entsprechen in diesem Analogon die Abstände den Laufzeiten der Schallwellen. Durch Variation der Schallgeschwindigkeit kann man daher diese effektiven Abstände verzerren und damit gekrümmte Raumzeiten simulieren.

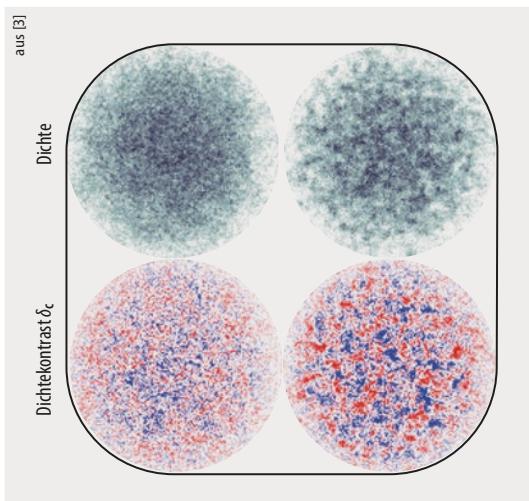


Abb. 2 Durch den Vergleich der Dichte (oben) und Dichtefluktuationen (unten) im Bose-Einstein-Kondensat vor der effektiven Expansion des Universums (links) und danach (rechts) werden die erzeugten Phononenpaare nachgewiesen. aus [3]

Die räumliche Variation der Schallgeschwindigkeit aufgrund der inhomogenen Dichteverteilung des Kondensats entspricht der räumlichen Krümmung des Universums. Wie Wasserwellen, die sich im flachen Wasser nahe eines Seufers verlangsamen, geschieht dies auch bei Schallwellen zum Rand des Kondensats hin. Dies entspricht effektiv einer hyperbolischen Geometrie.

Die kosmische Expansion lässt sich durch die Zeitabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit simulieren. Das Verringern der Schallgeschwindigkeit verlängert die Laufzeit der Schallwellen und vergrößert somit die effektiven Abstände. Dies wiederum entspricht einer Expansion des Universums. Möglich ist das durch die extern einstellbare Wechselwirkungsstärke zwischen den Atomen. Dadurch lassen sich Expansionsmodelle mit verschiedenen Potenzgesetzen des Skalenfaktors (beschleunigte oder sich verlangsamtende Ausdehnung) untersuchen und miteinander vergleichen.

In quantitativer Analogie zur kosmischen Expansion wandeln sich durch die Zeitabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit initiale Quantenfluktuationen innerhalb des Kondensats in Paare von Phononen um. Korrelationen der Dichtefluktuationen an zwei verschiedenen Orten dienen dazu, diese Photonenpaare nachzuweisen (**Abb. 2**). Für das Analogon der sich verlangsamen Ausdehnung zeigt sich beispielsweise eine signifikante Anti-Korrelation bei einem Abstand von etwa 5 Mikrometer (**Abb. 3**), was gut mit der theoretischen Vorhersage übereinstimmt. Als Funktion der Wartezeit nach der Expansion bewegen sich diese Korrelationen auseinander, was aufgrund der finalen Schallgeschwindigkeit von 1,2 mm/s zu erwarten ist. Die genaue Analyse der Abhängigkeit von der Wartezeit erlaubt sogar die Beobachtung von Sacharow-Oszillationen. Das sind Manifestationen der Interferenz der erzeugten Schallwellen, die (auf ganz anderen Skalen) für die Struktur der Inhomogenitäten der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (**Abb. 1**) verantwortlich sind. Aus den Sacharow-Oszillationen ließ sich so-

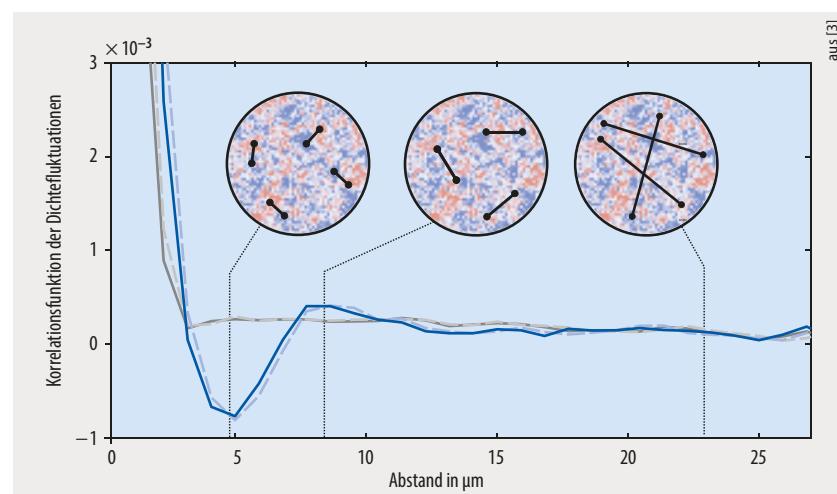


Abb. 3 Korrelationsfunktion der Dichtefluktuationen als Funktion des Abstands vor der effektiven Expansion des Universums (grau) und danach (blau). Bei einem Abstand von 5 μm zeigt sich eine deutliche Anti-Korrelation.

gar die Phase der Paarerzeugungsamplitude der einzelnen Phononenmoden extrahieren, was die hohe Kohärenz der Evolution zeigt.

Insgesamt existiert damit ein Simulator für ein Quantenfeld in einer gekrümmten Raumzeit, die näherungsweise einem expandierenden Universum in 2 räumlichen und 1 zeitlichen Dimensionen entspricht. Auch wenn einige Fragen offen bleiben, etwa die genaue Charakterisierung des Anfangszustands betreffend, so stellt dieser Simulator ohne Zweifel einen deutlichen Fortschritt im Vergleich zu vorherigen Experimenten (z. B. [4]) dar.

Natürlich ist es trotzdem erlaubt, nach dem Mehrwert eines solchen Simulators zu fragen, da die beobachteten Effekte ja bereits theoretisch bekannt sind. Eine erste Antwort liefert ein Zitat von Johann Wolfgang von Goethe: „Grau, teurer Freund, ist alle Theorie.“ Besonders wenn wir in neue Bereiche – etwa extrem schwache Quanteneffekte – vorstoßen, ist es wichtig, unser theoretisches Verständnis durch Experimente zu untermauern. Zudem beruhen theoretische Vorhersagen auf Idealisierungen, sodass die Frage naheliegt, wie robust diese Vorhersagen gegenüber kleinen Abweichungen sind. So können Quantencomputer zwar theoretisch große Zahlen in ihre Primfaktoren zerlegen. Doch bereits winzige Störungen beeinflussen das Endergebnis der Rechnung stark.

Nicht zuletzt weist die theoretische Herleitung von Hawking-Strahlung sowie kosmologischer Teilchenerzeugung auch konzeptionelle Probleme auf: Verfolgt man die erzeugten Teilchenpaare in der Zeit zurück, zeigt sich, dass ihr Ursprung in Quantenfluktuationen liegt, deren Wellenlänge kürzer als die Planck-Länge ist (trans-Plancksches Problem). Auf diesen Skalen spielen vermutlich Effekte der Quantengravitation eine Rolle. Auch wenn Quantensimulatoren diese Probleme sicher nicht alle lösen können, erlauben sie es, die Robustheit dieser Effekte zu untersuchen. Das Heidelberg Experiment [3] macht einen wichtigen Schritt in diese Richtung.

- [1] W. G. Unruh, Phys. Rev. Lett. **46**, 1351 (1981)
- [2] J. Steinhauer, Nat. Phys. **12**, 959 (2016)
- [3] C. Viermann et al., Nature **611**, 260 (2022)
- [4] S. Eckel et al., Phys. Rev. X **8**, 021021 (2018)

Der Autor

Prof. Dr. Ralf Schützhold, Institut für Theoretische Physik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden; Institut für Theoretische Physik, TU Dresden, 01062 Dresden