Der Urknall und die Hintergrundstrahlung

PHYSIK & ENERGIE · GRUNDFRAGEN DER PHYSIK

Richten Sie ein ausreichend empfindliches Radioteleskop auf eine beliebige Stelle am Himmel, auch auf eine, an der kein Stern und keine Galaxie zu sehen ist. Sie werden ein schwaches Rauschen empfangen, aus jeder Richtung fast gleich stark. Es ist Licht, das sich vor langer Zeit auf den Weg gemacht hat, kurz nach dem Anfang des Universums, und seitdem durch den Raum reist. Dass es da ist, gehört zu den stärksten Belegen für den Urknall.

Kaum ein Begriff der Physik ist so bekannt und so missverstanden. Der Urknall war keine Explosion an einem Ort in einem leeren Raum, und er ist auch nicht die Antwort auf die Frage, woher alles kommt. Er ist eine Beschreibung dessen, wie sich das Universum aus einem extrem heißen und dichten Anfangszustand entwickelt hat. Wir erklären, was wir darüber wirklich wissen, wo die Quantenphysik ins Spiel kommt und welche Fragen gerade offen sind.

Das Universum dehnt sich aus

Ende der Zwanzigerjahre stellte der amerikanische Astronom Edwin Hubble fest, dass sich ferne Galaxien von uns entfernen, und zwar umso schneller, je weiter weg sie sind [1]. Der belgische Physiker und Priester Georges Lemaître hatte das kurz zuvor aus Einsteins Gleichungen gefolgert. Das heißt nicht, dass wir im Mittelpunkt sitzen. Von jeder Galaxie aus gesehen fliegen alle anderen davon, so wie die Rosinen in einem aufgehenden Hefeteig auseinanderrücken. Es ist der Raum selbst, der sich dehnt.

Rechnet man diese Bewegung rückwärts, rückt alles immer enger zusammen, und das Universum wird immer heißer und dichter. Nach den Messungen des Satelliten Planck liegt dieser Anfang 13,787 Milliarden Jahre zurück, mit einer Unsicherheit von nur 20 Millionen Jahren [2]. Was genau am allerersten Anfang war, und ob es überhaupt einen Anfang im strengen Sinn gab, kann die heutige Physik nicht sagen. Dafür bräuchte man eine Theorie der Quantengravitation, und die gibt es noch nicht.

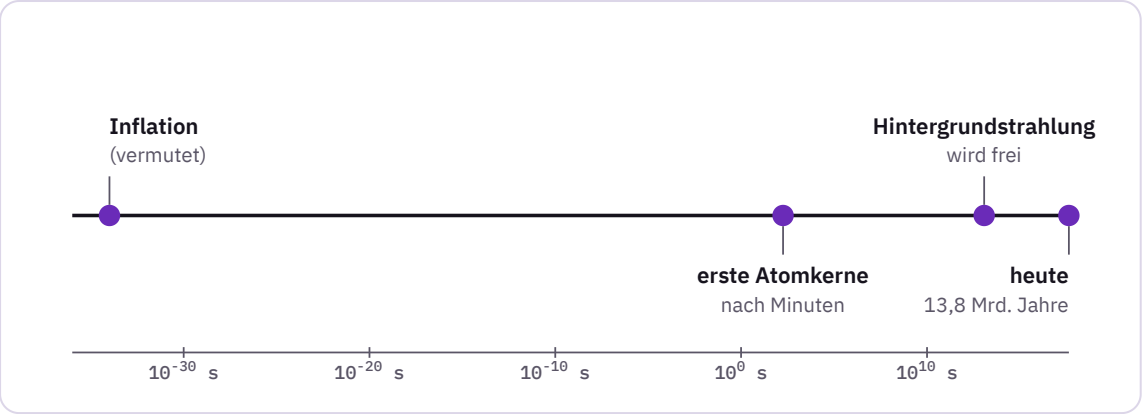


Abb. 1: Einige Stationen der Geschichte des Universums. Jeder Teilstrich steht für einen Faktor zehn Milliarden in der Zeit. Eigene Darstellung nach [2].

Das älteste Licht

1964 kämpften die beiden Radioastronomen Arno Penzias und Robert Wilson in New Jersey mit einem hartnäckigen Rauschen in ihrer Antenne. Es kam aus allen Richtungen gleich stark, zu jeder Tages- und Jahreszeit. Sie verdächtigten sogar Taubendreck in der Antenne. Erst als sie mit einer Gruppe um Robert Dicke in Princeton sprachen, die genau nach so einer Strahlung suchen wollte, wurde klar, was sie gefunden hatten [3],[4].

In den ersten Hunderttausenden Jahren war das Universum so heiß, dass Atomkerne und Elektronen nicht zusammenfanden. Licht konnte sich nicht frei bewegen, es wurde ständig von freien Elektronen abgelenkt, wie in dichtem Nebel. Erst als die Temperatur auf einige Tausend Grad gefallen war, nach knapp 400 000 Jahren, bildeten sich Atome, und das Licht konnte ungehindert fliegen [2]. Seitdem hat die Ausdehnung des Raums es um mehr als den Faktor tausend gestreckt. Heute kommt es als Mikrowellenstrahlung bei uns an, mit einer Temperatur von 2,7255 Kelvin [5], und sein Spektrum entspricht fast perfekt dem eines schwarzen Körpers, wie es Max Planck beschrieben hat.

Auch die ersten Atomkerne entstanden im frühen Universum, schon in den ersten Minuten. Die Theorie sagt voraus, dass dabei etwa ein Viertel der Masse der gewöhnlichen Materie zu Helium wurde, der Rest blieb überwiegend Wasserstoff, und das passt zu den Messungen [2].

Wo die Quantenphysik ins Spiel kommt

Die Hintergrundstrahlung ist fast gleichmäßig, aber eben nur fast. Der Satellit COBE fand 1992 winzige Schwankungen der Temperatur von Richtung zu Richtung, etwa ein Hunderttausendstel [6]. An den etwas dichteren Stellen hat die Schwerkraft später Materie zusammengezogen, und daraus sind Galaxien, Sterne und am Ende auch wir entstanden. Doch woher kamen diese ersten Unregelmäßigkeiten?

Die gängigste Antwort ist eine Quantenantwort. Nach der Inflationstheorie, die Alan Guth 1981 vorschlug, hat sich das Universum in einem winzigen Bruchteil der ersten Sekunde extrem schnell aufgebläht [7]. Im selben Jahr zeigten Wjatscheslaw Muchanow und Gennadi Tschibissow, dass dabei winzige Quantenschwankungen, wie sie nach der Unschärferelation überall auftreten, auf kosmische Größe gestreckt würden [8]. Die Galaxien am Himmel wären demnach vergrößerte Quantenfluktuationen. Das klingt fast unglaublich, aber die Muster in der Hintergrundstrahlung passen sehr gut zu dieser Vorhersage. Bewiesen ist die Inflation trotzdem nicht. Ein eindeutiger Hinweis, etwa eine bestimmte Spur von Gravitationswellen in der Hintergrundstrahlung, wurde noch nicht gefunden.

Was gerade offen ist

Das Standardmodell der Kosmologie beschreibt die Messungen erstaunlich gut, aber es hat Risse, und an zweien wird gerade intensiv gearbeitet.

Der erste heißt Hubble-Spannung. Wie schnell sich das Universum heute ausdehnt, lässt sich auf zwei Wegen bestimmen. Aus der Hintergrundstrahlung und dem Standardmodell folgt ein Wert von 67,4 Kilometern pro Sekunde und Megaparsec, aus direkten Entfernungsmessungen mit Sternen und Supernovae im nahen Universum ein Wert von etwa 73. Die Messungen sind inzwischen so genau, dass der Unterschied mit mehr als fünf Sigma statistisch gesichert ist [9]. Entweder steckt in einer der Methoden ein unentdeckter Fehler, oder dem Standardmodell fehlt etwas.

Der zweite betrifft die Dunkle Energie, die die Ausdehnung des Universums beschleunigt und rund 68 Prozent seines Inhalts ausmacht. Im Standardmodell ist sie über alle Zeiten konstant. Im März 2025 meldete das Experiment DESI, das die Positionen von fast 15 Millionen Galaxien und Quasaren vermessen hat, Hinweise darauf, dass sie mit der Zeit schwächer werden könnte, je nach Kombination der Daten mit 2,8 bis 4,2 Sigma [10]. Eine neue Auswertung vom Juli 2026 rückt allerdings wieder näher an das Standardmodell heran, und die Forscher halten es für möglich, dass die Hinweise verblassen [11]. Hier lohnt es sich, in den nächsten Jahren genau hinzusehen. Mehr über die unsichtbaren Bestandteile des Universums steht in unserem Artikel über Dunkle Materie.

Was der Urknall nicht ist

Zum Schluss noch einmal zurück zum Anfang. Der Urknall war keine Explosion, bei der Materie von einem Punkt aus in einen bereits vorhandenen Raum flog. Raum und Zeit selbst haben sich entwickelt, und der heiße Anfangszustand war überall zugleich. Das sichtbare Universum war damals winzig, das ganze Universum vielleicht schon unendlich groß. Und die Frage, was „vor“ dem Urknall war, ist womöglich nicht einmal sinnvoll gestellt, weil die Zeit dort ihre gewohnte Bedeutung verliert. Ehrlich gesagt: Das ist eine der Stellen, an denen die Physik an ihre Grenze kommt.

Zum Weiterlesen

Eine kurze Geschichte der Zeit

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2025 · ISBN 978-3-608-98895-6

Der Klassiker über Urknall, Zeit und die großen Fragen der Kosmologie, verständlich für alle.

Bei Amazon ansehen*

Kurze Antworten auf große Fragen

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2020 · ISBN 978-3-608-98383-8

Hawkings letztes Buch, mit einem eigenen Kapitel zur Frage, wie alles begann.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. E. Hubble: *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae.* In: Proceedings of the National Academy of Sciences 15 (1929), S. 168–173, doi:10.1073/pnas.15.3.168.
2. Planck Collaboration: *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.* In: Astronomy & Astrophysics 641 (2020), A6, doi:10.1051/0004-6361/201833910.
3. A. A. Penzias, R. W. Wilson: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.* In: The Astrophysical Journal 142 (1965), S. 419–421, doi:10.1086/148307.
4. R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll, D. T. Wilkinson: *Cosmic Black-Body Radiation.* In: The Astrophysical Journal 142 (1965), S. 414–419, doi:10.1086/148306.
5. D. J. Fixsen: *The Temperature of the Cosmic Microwave Background.* In: The Astrophysical Journal 707 (2009), S. 916–920, doi:10.1088/0004-637X/707/2/916.
6. G. F. Smoot u. a.: *Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps.* In: The Astrophysical Journal 396 (1992), S. L1–L5, doi:10.1086/186504.

7. A. H. Guth: *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems.* In: Physical Review D 23 (1981), S. 347–356, doi:10.1103/PhysRevD.23.347.
8. V. F. Mukhanov, G. V. Chibisov: *Quantum fluctuations and a nonsingular universe.* In: JETP Letters 33 (1981), S. 532–535.
9. Dissecting the Hubble tension: Insights from a diverse set of Sound-Horizon-Free H_0 measurements. Preprint, 2026. arXiv:2601.00650.
10. University of Texas at Dallas: *Evidence Mounts for Evolving Dark Energy, DESI Results Find.* 19. März 2025. news.utdallas.edu.
11. DESI Collaboration: *New DESI DR2 Lyman-alpha Results Shed Light on Dark Energy.* 30. Juli 2026. desi.lbl.gov.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Der Urknall und die Hintergrundstrahlung. Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/urknall.html (PDF: https://quanten.de/pdf/urknall.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Dunkle Materie · Quantengravitation · Stephen Hawking · Max Planck

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/urknall.html