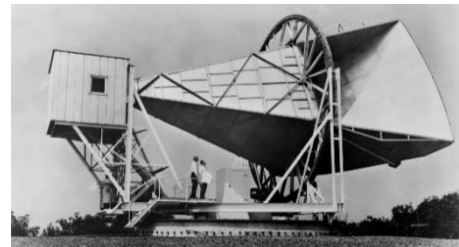


## Der Nachhall des Urknalls

Im Folgenden geht es um die kosmische Hintergrundstrahlung<sup>1</sup>, die auch als kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (englisch: **Cosmic Microwave Background** = CMB) bezeichnet wird. Sie darf nicht mit der Kosmischen Strahlung verwechselt werden, der hochenergetischen Teilchenstrahlung, die von der Sonne, der Milchstraße und fernen Galaxien zu uns gelangt. Demgegenüber ist die Hintergrundstrahlung eine nahezu isotrope Mikrowellenstrahlung, die den gesamten Kosmos erfüllt und bereits kurz nach dem Urknall entstanden ist. Sie gilt als ein wichtiger Beleg für die Urknalltheorie.

Nach dem Standardmodell der Kosmologie sank die Temperatur des nach dem Urknall ungeheuer heißen und dichten Universums in Folge der Expansion innerhalb von etwa 380.000 Jahren auf ca. 3.000 Grad Kelvin. Das führte dazu, dass sich aus den zuvor freien elektrisch geladenen Wasserstoffkernen (Protonen), Heliumkernen (2 Protonen + 2 Neutronen) und Elektronen elektrisch neutrale Moleküle von Wasserstoff und zu etwa 25 % Helium bilden konnten (Rekombination). Die beim Urknall ebenfalls entstandene elektromagnetische Strahlung (Photonen) konnte sich erst ab diesem Zeitpunkt weitgehend ungehindert ausbreiten. Die ursprünglich im sichtbaren Spektrum entstandene Strahlung unterlag in der Folge der allgegenwärtigen weiteren Ausdehnung des Raumes, verbunden mit einer Dehnung der Wellenlänge und damit einer Rotverschiebung. Bis heute hat sich diese Strahlung bis in den Mikrowellenbereich verändert. Dieser Strahlung, die manchmal auch als Nachhall des Urknalls bezeichnet wird, entspricht heute einer Temperatur von etwa 2,7 Grad Kelvin. Durch die anhaltende und seit geraumer Zeit beschleunigte Expansion des Raumes erfüllt sie mit einer sehr hohen Homogenität jeden Winkel des Kosmos. Da der Urknall als eigentliche Ursache ja nicht an einem bestimmten Punkt im Raum stattfand, sondern mit dem gleichzeitigen Entstehen des Raumes selber de facto überall erfolgte, kommt auch heute noch die Strahlung aus jeder Raumrichtung gleichzeitig, auch wenn das für unser Verständnis nur schwer nachvollziehbar ist<sup>2</sup>.

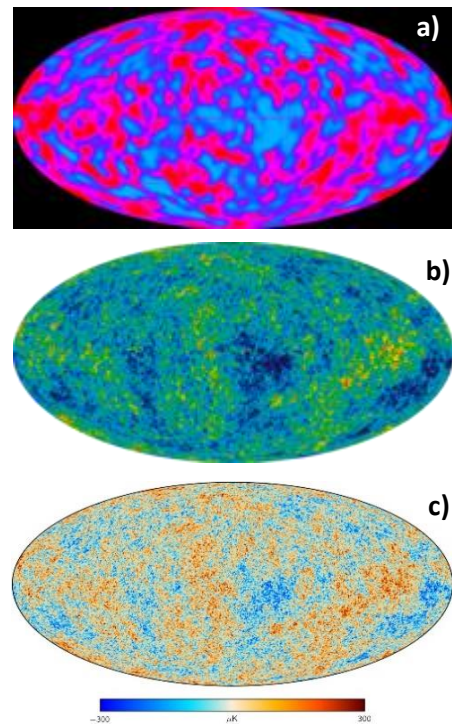
Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde 1964 durch die US-Forscher Penzias und Wilson mehr oder weniger durch Zufall entdeckt, als sie eine neue Radioantenne ausprobierten und unabhängig von der Ausrichtung der Antenne ein störendes Grundrauschen registrierten (**Bild 1**). Trotz monatelanger Suche und selbst nach der Beseitigung von Taubendreck konnten sie die Ursache für diese langwellige „Störung“ nicht finden. Erst als der amerikanische Physiker Dicke von den genannten Versuchen erfuhr, kam Licht in die Angelegenheit. Dicke hatte nämlich mit seinem Team auf Grund seiner Forschungen eine Mikrowellenstrahlung mit einem entsprechenden Temperaturwert von 2,7 Grad Kelvin als Überbleibsel des Urknalls vorhergesagt und war auf der Suche nach einem geeigneten Nachweis. Als er von den Problemen seiner beiden Kollegen erfuhr, erkannte er sofort die Zusammenhänge.



**Bild 1** Hornantenne in Holmdel/New Jersey, mit der Penzias und Wilson 1964 die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckten © NASA<sup>2</sup>

Die Hintergrundstrahlung wurde sehr bald zu einer der wichtigsten Informationsquellen in der Kosmologie. Mit ihrer Hilfe wurden und werden entscheidende Erkenntnisse zur Entstehung und Entwicklung des Universums gewonnen und kosmologische Modelle erstellt und auf ihre Evidenz überprüft. Voraussetzung hierfür war die im Laufe der Zeit immer genauere Vermessung der Hintergrundstrahlung. Da die Absorption durch die Atmosphäre die Beobachtungsmöglichkeiten auf der Erde deutlich einschränken, wurden 1989 Messsysteme im Mikrowellenbereich in 900 km Höhe über der Erdoberfläche mit Hilfe des Satelliten **COBE (Cosmic Background Explorer = Kosmischer**

Hintergrund-Erkunder) platziert. Nach Missionsende folgten mit jeweils verbesserter Messtechnik und Auswertemethodik 2001 **WMAP** (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe = Wilkinson Mikrowellen-Anisotropie-Sonde) und 2009 **Planck**. Der Mikrowellenhintergrund wurde in einem breiten Frequenzband in alle Richtungen vermessen. Um nur die Daten der schwachen Hintergrundstrahlung zu erhalten, musste die Strahlung aller bekannten, teils sehr intensiven Vordergrundquellen, wie Supernova-Überresten, separat erfasst und subtrahiert werden. Die verbleibende Strahlung zeigte ein auffälliges Dipolmuster. In Rotationsrichtung des Sonnensystems in der Milchstraße war sie rotverschoben und in der Gegenrichtung blauverschoben. Diese Abweichung in der Größenordnung von 0,1 % entsteht durch den Dopplereffekt bei der Bewegung des Sonnensystems relativ zum Mikrowellenhintergrund. Aus der Dipolanisotropie wurde die Geschwindigkeit dieser Eigenbewegung mit etwa 369 km/s ermittelt. Nachdem die gemessene Strahlung auch um den Effekt der Dipolanisotropie bereinigt war, erhielt man die in **Bild 2** dargestellten Temperaturverteilungen des kompletten Mikrowellenhintergrundes aus den Messmissionen der drei o.g. Satelliten. Mit verbesserten technischen Möglichkeiten wurde das erhaltene Abbild zunehmend detaillierter. Das fällt besonders beim Vergleich von COBE und WMAP auf. Aber auch mit Planck wurde das Auflösungsvermögen noch einmal verdreifacht.



**Bild 2** Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung nach verschiedenen Quellen:  
a) Satellit COBE (1989 - 1993)<sup>1</sup>  
b) Satellit WMAP (2001 - 2010)<sup>1</sup>  
c) Satellit Planck (2009 - 2013)<sup>2</sup>

Zur richtigen Einordnung der erhaltenen Strahlungsbilder muss man berücksichtigen, dass die nach der beschriebenen Bereinigung verbleibende Anisotropie in der Größenordnung von nur ca. 0,001% liegt. Die Hintergrundstrahlung ist also nahezu homogen. Trotzdem sorgten gerade diese winzigen Abweichungen für einen entscheidenden Durchbruch bei der Erforschung des frühen Universums und dessen Weiterentwicklung. Die beobachtete Anisotropie wird nach den Ursachen in zwei Gruppen aufgeteilt<sup>1</sup>:

- Die primäre Anisotropie durch Effekte zum Zeitpunkt der Entstehung der Strahlung. Dazu gehört z.B. eine Gravitationsrotverschiebung durch überdichtete Regionen, aus denen die Strahlung entwichen ist. Daraus resultiert eine geringfügig niedrigere Temperatur für die entsprechenden Richtungen.
- Die sekundäre Anisotropie resultiert aus Einflüssen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt beim Weg der Photonen durch das All wirken. Beispiele dafür sind die Streuung der Photonen an freien Elektronen im Universum oder die gravitative Beeinflussung beim Durchqueren sogenannter Potentialtöpfe von großräumigen Strukturen wie Galaxien.

Die moderne Kosmologie ist in der Lage, beide Formen der Anisotropie modelltechnisch nachzubilden und zu trennen. Durch Vergleich der Modellergebnisse mit den gemessenen Werten kann man zu den in die Modelle eingesetzten kosmologischen Parametern, durch die die Entwicklung und Struktur des Universums bestimmt wird, zurückrechnen.

Die immer genauere Vermessung des Mikrowellenhintergrundes war ein wesentlicher Baustein für die Entwicklung des  $\Lambda$ CDM-Modells<sup>3</sup>, das mit Hilfe weniger Parameter die Entwicklung des Universums seit dem Urknall beschreibt und wegen seiner guten Übereinstimmung mit kosmologischen

Messungen in Wissenschaftskreisen als Standardmodell der Kosmologie anerkannt ist. Darin steht das  $\Lambda$  (Lambda) für die hypothetische Dunkle Energie, die für die beobachtete beschleunigte Expansion des Kosmos verantwortlich gemacht wird und von der wir im Wesentlichen nur ihre Wirkung kennen. CDM steht für Cold Dark Matter (kalte Dunkle Materie), jene nicht sichtbare, nur gravitativ wechselwirkende Materie, die existieren muss, um z. B. die in den Außenbereichen von Galaxien beobachtete Umlaufgeschwindigkeit von Sternen zu erklären. Die Gravitationskraft der sichtbaren Materie allein wäre dafür zu gering. Auch über die Dunkle Materie ist bisher nur wenig bekannt.

Anhand des  $\Lambda$ CDM-Modells kann eine Vielzahl von Aussagen über das Universum getroffen werden. So wurde z.B. sein Alter auf 13,8 Mrd. Jahre bestimmt und seine Zusammensetzung wie folgt ermittelt:

- ca. 5 % baryonische („gewöhnliche“ sichtbare) Materie
- ca. 25 % Dunkle Materie
- ca. 70 % Dunkle Energie
- ein geringer Anteil an Strahlung (<0,01 %)

Auch wenn wir nur über einen kleinen Bruchteil des Universums mehr oder weniger gut informiert sind, heute noch viele Fragen offen sind und immer wieder neue dazu kommen, so war die Entdeckung und immer genauere Vermessung der Mikrowellenhintergrundstrahlung doch ein wichtiger Schritt auf dem Wege der Erkenntnis.

## Quellen

1	<a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung">https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung</a>
2	<a href="https://www.scinexx.de/dossier/der-urknall/">https://www.scinexx.de/dossier/der-urknall/</a>
3	<a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Lambda-CDM-Modell">https://de.wikipedia.org/wiki/Lambda-CDM-Modell</a>