

Die kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)

Wolfgang Albrecht

Das „Urknallmodell“ war zunächst ein von Einstein (1917), Friedmann (1922) und Lemaître (1927) entwickeltes rein theoretisches Modell. Ein erster Hinweis für dessen Richtigkeit ergab sich durch die Entdeckung der „Galaxienflucht“ (Edwin Hubble – etwa 1930). Trotzdem blieb der größte Teil der Astronomen bei seiner Vorstellung eines ewigen und statischen Universums.

In den vierziger Jahren machte u. a. Gamow die Aussage, dass aus der Anfangszeit des damals noch kleinen und heißen Weltalls eine Strahlung übrig sein müsse, die es nachzuweisen gelte. Genau diese Strahlung wurde 1965 von Penzias und Wilson entdeckt und damit dem „Urknallmodell“ zum Durchbruch verholfen. Durch genauere Analysen ergab sich im neuen Jahrtausend sogar die Möglichkeit, Aussagen über die „Flachheit“ und die Entwicklungsgeschichte des Universums kurz nach dem Urknall zu machen.

I. Die Geschichte der Entdeckung der Hintergrundstrahlung

Im Jahr 1915 veröffentlichte Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie (ART), die in wenigen (aber recht komplizierten) Formeln eine völlig neue Sicht auf das Thema *Gravitation* eröffnete. Ursache dieser Naturkraft ist die Krümmung der Raumzeit durch Massen. Vereinfachend wird das häufig mit dem „Gummituchmodell“ anschaulich gemacht. Einige seiner Differentialgleichungen, die sich in einer einzigen Tensorgleichung zusammenfassen lassen, wurden für das Gesamtuniversum zunächst von Alexander Friedmann, dann kurz danach von George Lemaître gelöst. Beide kamen zu dem Ergebnis, dass das Universum nicht statisch ist, sondern sich ausdehnt.

Einsteins Gleichungen waren zunächst nur in Fachkreisen bekannt, erst als die Periheldrehung des Merkurs und die Lichtablenkung im Schwe-

refeld der Sonne¹ durch seine Theorie erklärbar wurde, erlangte Einstein auch öffentliche Aufmerksamkeit und Anerkennung.

Lässt man nun in Gedanken die Zeit für das sich ausdehnende Universum rückwärts laufen, so wird es immer kleiner und damit auch immer heißer. Es muss also einen sehr kleinen und heißen Anfang gegeben haben, den Fred Hoyle (ein Gegner dieser Vorstellung) einmal spöttisch „Urknall“ nannte. Seitdem, so zeigen Friedmanns und Lemaîtres Lösungen der Einsteinschen Gleichungen, dehnt sich unser Universum stetig aus und kühlt dabei ab. Einstein selbst versuchte 1918 durch Einfügen eines Λ -Terms in seine Gleichungen das statische Universum „zu retten“, später konnte ihn jedoch Lemaître von der Richtigkeit der Ausdehnungshypothese überzeugen und Einstein selbst bezeichnete Λ als „größte Eselei seines Lebens“.

Eine Bestätigung für das sich ausdehnende Weltall gelang Edwin Hubble (1929)². Durch Beobachtungen von Spektrallinien ferner Galaxien stellte er fest, dass sich Galaxien umso schneller von uns fortbewegen, je weiter sie entfernt sind. Im Rahmen seiner Berechnungen ging er allerdings noch davon aus, dass sich die Linienverschiebungen durch den Doppler-Effekt erklären ließen. Heute weiß man, dass diese durch die Ausdehnung des Raumes selbst zustande kommen.

Obwohl es also deutliche Hinweise auf ein sich ständig vergrößerndes All gab, versuchten die Anhänger des statischen Universums ihr Weltbild dadurch zu „retten“, indem sie annahmen, dass permanent neue Materie entstünde, sodass die Gesamtdichte des Raums trotz der Flucht der Galaxien voneinander erhalten bliebe. Diese Theorie nennt man das „**Steady-State-Modell**“, dessen Hauptvertreter der schon erwähnte Fred Hoyle war.

Trotz der Anfeindungen vieler Fachkollegen wurde das „**Urknallmodell**“ insbesondere durch Gamow, Alpher und Hermann in den 40er und 50er Jahren des letzten Jahrhunderts weiterentwickelt. Dabei gelang es, eine Voraussage

zu machen, die im Prinzip durch Beobachtungen zu überprüfen wäre: Wenn das Universum einmal klein und heiß gewesen wäre, so müsste es damals eine Strahlung abgegeben haben, die man noch heute – allerdings wegen der Abkühlung deutlich zu längeren Wellenlängen verschoben – nachweisen könnte.

Bei dieser Strahlung handelt es sich um die Strahlung eines „Schwarzen Körpers“, die jeder von einem glühenden Stück Metall her kennt: Je heißer der Körper ist, desto heller, aber auch weißer leuchtet er. Kühlt er ab, so leuchtet das Metall nur noch rot und dann später spürt man nur noch seine Wärme (Infrarotstrahlung). Das Gesetz, das diesen Vorgang beschreibt, heißt „Wiensches Verschiebungsgesetz“; aus der Wellenlänge bzw. der Frequenz der emittierten Strahlung lässt sich die Temperatur des strahlenden Körpers genau berechnen.³

George Gamow berechnete sowohl die „Ausgangstemperatur“ (etwa 3000 K) als auch die heutige Temperatur dieser Strahlung (etwa 3 K). Es gab allerdings ein Problem: Wie sollte man eine Strahlung messen, die in den Mikrowellenbereich hinein verschoben war?

Bis in die 30er Jahre hinein waren Astronomen auf das „optische Fenster“ angewiesen – jetzt wurde ein neues aufgestoßen: Die amerikanische Telefongesellschaft Bell versuchte schon 1931 Gespräche zwischen Europa und den USA über Funk zu führen; Störgeräuschen sollte Karl Janski auf die Spur kommen. Mit einem primitiven „Radioteleskop“ gelang es ihm, die Quelle des „Rauschens“ ausfindig zu machen: Es war eine Quelle nicht irgendwo auf der Erde, sondern im Weltraum, im Sternbild Sagittarius. Er hatte die erste radioastronomische Beobachtung durchgeführt und festgestellt, dass das Zentrum unserer Milchstraße eine Quelle starker Radiostrahlung darstellt.

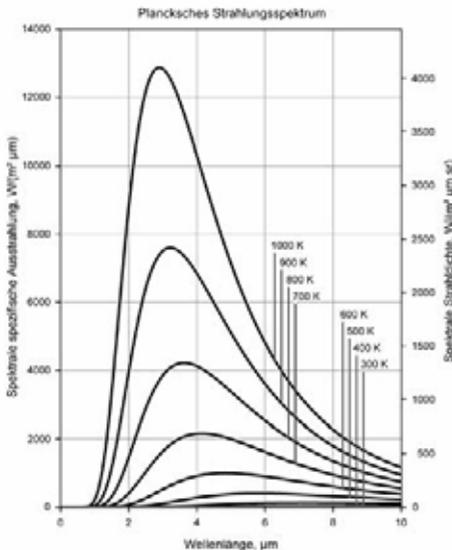


Abb. 1: Wärmestrahlungsintensitäten in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen (Bild aus Wikipedia: CC BY-SA 3.0)

Bedingt durch die Weltwirtschaftskrise in den 30er Jahren stellte Bell Labs für die Intensivierung solcher Beobachtungen kein Geld mehr zur Verfügung; allerdings gelang es Grote Reber mit einem selbstgebauten Gerät (einem echten Vorläufer der heutigen Radioteleskope mit einem Schüsseldurchmesser von 20 m) eine erste Radiokarte des Himmels zu erstellen, bei der drei Quellen deutlich sichtbar waren: Cassiopeia A, Cygnus A und Sagittarius A*.

Im Laufe des zweiten Weltkriegs wurde der Bau von Radarantennen aus militärischen Gründen forciert. Nach dem Ende des Krieges konnten sich Radioastronomen mit diesen Geräten vertraut machen und statt feindlicher Flugzeuge nun den Himmel beobachten. Schon 1948 erschien der „First Cambridge Catalogue of Radio-Sources“ (abgekürzt IC).

Vermutlich auch durch die Kriegswirren (viele Astronomen wurden zur Armee eingezogen) waren inzwischen die Voraussagen (der 3K-Strahlung) von Gamow und seinen Mitarbeitern völlig vergessen worden.

Erst in den 60er Jahren begannen Robert H. Dicke und James (Jim) Peebles die Temperatur der Reststrahlung des Urknalls neu zu berechnen. Sie kamen auf einen Wert von 2,8 K und begannen, einen entsprechenden Mikrowellendetektor zu bauen.

Zur gleichen Zeit arbeiteten nur 50 km entfernt Arno Penzias und Robert Wilson an einer nicht mehr benötigten „Hornantenne“, um weitere Radioquellen am Himmel orten zu können. Ein Jahr lang suchten sie dabei vergeblich nach der Ursache für ein „Zischen“, das aus allen Richtungen zu kommen schien und ihre geplanten Messungen störte. Selbst ein Taubenpaar, das in der Antenne genistet hatte, wurde (wegen des von ihnen hinterlassenen „dielektrischen Materials“) umgesiedelt. Trotz aller Mühen konnten sie einfach keine Ursache für das Störgeräusch finden.



Abb. 2: „Bell Labs“ Hornstrahler-Antenne in Holmdel, New Jersey (USA), wo 1964 zufällig die vorhergesagte Mikrowellenstrahlung als Störsignal empfangen wurde (Bild: GNU Free Documentation Licence)

Nach einem Jahr des Prüfens, Säuberns und Neuverkabelns war der Rauschpegel zwar gesunken – aber irgendetwas strahlte diese nervigen Radiowellen aus, unaufhörlich und aus allen Richtungen. Anfang 1965 hörte nun Penzias durch einen gemeinsamen Bekannten (Bernard Burke) von der Vorhersage Dicke und Peebles’.

Umgehend rief er Dicke an, um ihm mitzuteilen, dass er die gesuchte Hintergrundstrahlung entdeckt habe.

So geschah es, dass im Sommer 1965 im „Astrophysical Journal“ zwei Artikel zum gleichen Thema erschienen: Penzias und Wilson legten in dem einen Artikel nur dar, was sie gefunden hatten – in dem anderen Artikel verknüpften Dicke und sein Team diese Beobachtungen mit der kosmischen Hintergrundstrahlung⁴. Damit waren in den Augen der allermeisten Kosmologen die Würfel für das Urknallmodell und gegen die Steady-State-Theorie gefallen!

2. Die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung

Gemessen wurde die von den Theoretikern vorhergesagte Strahlung damals nur bei einer einzigen Wellenlänge von $\lambda = 7,5$ cm. Eine weitere Messung ein Jahr später erfolgte bei etwa 3,5 cm. Jetzt hatte man schon zwei Punkte der Planck-Kurve; weitere sollten folgen. Für den Wellenlängenbereich $\lambda < 0,1$ cm musste man Höhenballons (wie BOOMERanG) oder Satelliten (wie COBE, WMAP oder PLANCK) einsetzen, um die Absorption der Strahlung durch unsere Atmosphäre zu minimieren.

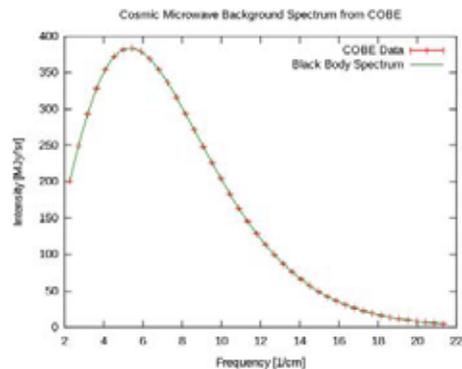


Abb. 3: Durch den Satelliten COBE gemessenes Spektrum (Intensität als Funktion der Wellenzahl) der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, ein Planck-Spektrum mit der Temperatur $T = 2,725$ K. (BILD aus Wikipedia – gemeinfrei)

COBE lieferte ein extrem genaues Bild der Restwärmestrahlung, die zu einer Temperatur von 2,728 K (mit einem Strahlungsmaximum bei 4080 MHz) passt.⁵

Jetzt ist es an der Zeit, etwas über den Ursprung dieser Restwärmestrahlung zu sagen: In einem Zeitalter von weniger als 380.000 Jahren nach dem Urknall (was auch immer das genau ist!) hatte das Universum eine Temperatur von über 3000 K. Die Atomkerne hatten sich bereits in den ersten drei Minuten bilden können, nur mit den zugehörigen Elektronen haperte es: Zur Bildung von Atomen war es einfach zu heiß. Der Wasserstoff und das Helium des Anfangszustandes lag in Plasmaform vor – ein heißer „Brei“ aus Atomkernen sowie Elektronen und Photonen, die ständig miteinander wechselwirkten, was zur Folge hatte, dass das Plasma⁶ undurchsichtig war. Nach 380.000 Jahren hatte sich das Universum so weit ausgedehnt, dass das Plasma auf die Temperatur von etwa 3000 K abgekühlt war, sodass sich Atome bilden konnten. Die Photonen fanden keinen Wechselwirkungspartner mehr⁷ und konnten sich frei im Raum ausdehnen: Das Universum wurde durchsichtig und die uralten Lichtteilchen machten sich auf den Weg, was als Hintergrundstrahlung etwas von der damaligen Zeit (und sogar noch von davor) zu „erzählen“.

Die Strahlung, deren Frequenzverteilung im obigen Bild dargestellt ist, stellte sich als extrem isotrop heraus. Ein Auge, das in diesem Wellenbereich sehen könnte, würde nur eine Einheitsfarbe erkennen – allerdings erst, wenn man von einem Dipoleffekt absieht, der dadurch entsteht, dass sich unsere Erde mitsamt der ganzen Milchstraße mit einer Geschwindigkeit von 370 km/s in eine bestimmte Richtung bewegt.⁸ Warum aber sollte das Plasma so perfekt gleichmäßig sein? Es müsste dort doch „brodeln“ – mit dichten, heißen Bereichen und entsprechend dünneren und kühleren. Man musste lange warten, bis sich 1989 – 1993 im Rahmen der COBE-Mission ein erster Hinweis auf solche Fluktuationen ergab. Erst die späteren Untersuchungen insbesondere durch die Satelliten WMAP und PLANCK zeigten das

genaue Muster der Anisotropien allerdings erst bei einer Auflösung von 1 : 100.000; das bedeutet, das Intensitätsmaximum verschiebt sich bei Änderung des Messortes am Himmel um 0,001% zu kürzeren oder längeren Wellenlängen. Indem man den ganzen Horizont abstastet, misst man nun „Flecken“ am Mikrowellenhimmel, die eine Sehwinkelgröße von maximal etwa 10 haben (zum Vergleich: Vollmond: 0,50).

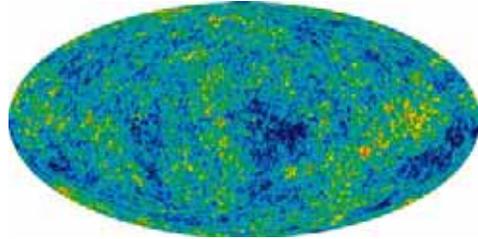


Abb. 4: Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, gemessen durch WMAP. Rot entspricht höheren Temperaturen, blau niedrigeren Temperaturen. (BILD: NASA, gemeinfrei)

Die im Bild nun sichtbar werdenden Temperaturschwankungen entstehen übrigens nicht durch thermische Dichteunterschiede, sondern durch stehende akustische Wellen im frühen Universum (incl. Oberwellen). Wenn man die vorkommenden Sehwinkelgrößen (Fleckengrößen) gegenüber der Häufigkeit ihres Auftauchens im Bild abträgt, so erhält man eine Verteilung mit einem ausgeprägten Maximum bei 10. Eine solche Kurve nennt man Leistungsspektrum:

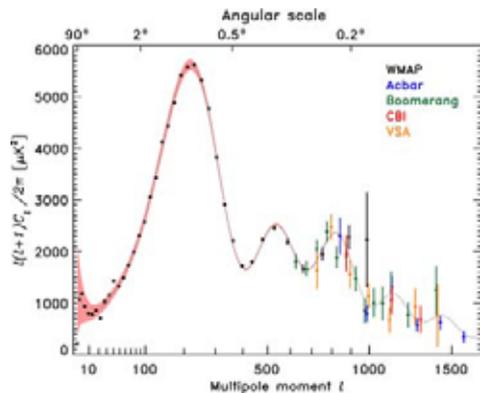


Abb. 5: Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung (Autor: NASA/WMAP Science Team, gemeinfrei)

Die Lage des Maximums beim Sehwinkel von l^0 würde sich allerdings seitlich verschieben, wenn unser Universum eine andere als die „flache“ (euklidische) Geometrie hätte. Simulationsrechnungen haben für „geschlossene“ Universen durchschnittlich größere, für „hyperbolische“ durchschnittlich kleinere Flecken vorausgesagt.

Begriffserläuterung: „Räumliche ‚Flachheit‘ ist ein technischer Begriff aus der Differenzialgeometrie und lässt sich daran festmachen, dass zwei parallele Lichtstrahlen ihren Abstand halten. Ein räumlich gekrümmtes Universum hingegen würde wie eine riesige Linse wirken, durch die die Strukturen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes im Vergleich zu ihrer berechneten Form vergrößert oder verkleinert aussähen. Das ist aber nicht der Fall.“⁹

Hinweis für alle Schülerinnen und Schüler: Ihr könnt also getrost davon ausgehen, dass die Winkelsumme im Dreieck auch in großen Maßstäben 180° beträgt!

Informationen über eine Polarisation der Hintergrundstrahlung haben sich übrigens als übereilt herausgestellt.

Das auch in der Fachliteratur so gerne erwähnte Beispiel der „heißen Hintergrundwand“, die uns den Blick auf den Urknall verweigert, bedarf meiner Meinung nach einer Klarstellung:

Die Hintergrundstrahlung entstand, als das Universum ein „Alter“ von etwa 380.000 Jahren erreichte und zwar bei einer Temperatur von etwa 3000 K. Durch die Abkühlung auf heute 2,72 K ergibt sich eine Rotverschiebung von $z = 1089 \pm 0,1$. (→ Wien-Verschiebung des Maximums der Planck-Kurve eines Schwarzen Körpers) Bei anderen Objekten (z.B. Galaxien) schließt man nun von z auf die Entfernung des Objekts,

das sich mit der sich aus z ergebenden Geschwindigkeit von uns entfernt. Das hat übrigens hier nichts mit dem Doppler-Effekt zu tun; der Raum zwischen uns und den fernen Galaxien dehnt sich aus – nur dadurch entsteht die Wellenlängenänderung und der Effekt, dass sich die Galaxie von uns entfernt¹⁰.

Die 3-K-Hintergrundstrahlung trifft aber aus allen Richtungen bei uns ein, da sie im gesamten Weltall entstanden ist. Hier entfernt sich also kein „Objekt“ von uns, sondern die gemessene Rotverschiebung ist Ergebnis der Abkühlung des expandierenden Universums.

Es lässt sich somit keine „Entfernung“ der Strahlungsquelle angeben – schließlich strahlt das Weltall selbst.

Trotzdem stellt die 3-K-Mikrowellenstrahlung natürlich eine (zeitliche!) Beobachtungsgrenze dar; vor Ablauf der 380.000 Jahre war das Universum undurchsichtig, da es mit heißem Plasma erfüllt war. Erst die (Re-)Kombination der Elektronen mit den Wasserstoff- und Heliumkernen zu Atomen machte es transparent. Die bei der Bildung der Atome freiwerdende Energie wird von uns als Mikrowellenstrahlung registriert.

Die Hoffnungen, doch noch etwas mehr über das Universum zu einer Zeit direkt nach dem Urknall zu erfahren, beruhen auf weiteren Untersuchungen der Anisotropien in der CMB sowie auf völlig neuen Beobachtungsfenstern: Neutrinostrahlung und Gravitationswellen wären hier mögliche Kandidaten.

Anmerkungen:

¹ Sonnenfinsternis 29. Mai 1919 (Beobachtungen koordiniert durch Eddington)

² WIKIPEDIA schreibt dazu: Aufgrund der räumlichen Verteilung anderer Galaxien sowie ihrer im Spektrum u. a. von Milton Humason nachgewiesenen Rotverschiebung postulierte der belgische Priester Georges Lemaître im Juni 1927 die Expansion des Weltalls im Einklang mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Hubble veröffentlichte zwei Jahre später mit zusätzlichen Daten denselben linearen Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und

der Verteilung extragalaktischer Nebel, zog jedoch nicht die physikalische Schlussfolgerung einer Expansion des Weltalls und vermutete ein bisher unentdecktes Naturprinzip hinter der Rotverschiebung. Dennoch wird in der öffentlichen Wahrnehmung diese Entdeckung Lemaitres häufig Hubble zugeschrieben.

- ³ Eine theoretische Berechnung der sich für eine bestimmte Temperatur ergebenden Kurve gelang Max Planck schon um 1900; man spricht in diesem Zusammenhang vom Beginn der „Quantentheorie“.
- ⁴ Man spricht von Hintergrundstrahlung, weil sie von „überall“ herzukommen scheint; englisch: Cosmic Microwave Background (CMB) oder auch Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR)
- ⁵ Den Zusammenhang zwischen dem Maximum der Intensität der Strahlung und der Temperatur liefert das Wiensche Verschiebungsgesetz.
- ⁶ Auch der leuchtende Teil einer Kerzenflamme ist undurchsichtiges Plasma.
- ⁷ Man nennt diesen Vorgang „Rekombination“ – wobei die Vorsilbe „re-“ eigentlich falsch ist!
- ⁸ Bezugssystem ist dabei die Hintergrundstrahlung (als absolutes Bezugssystem).
- ⁹ Alexander Knochel: Neustart des LHC: neue Physik (Springer Spektrum – essentials) – Seite 15 (Anmerkung)
- ¹⁰ Nur für „nahe“ Galaxien liefern die Formeln des Doppler-Effektes ein richtiges Ergebnis!

Sternfreunde intern

Eintritte

Julia Oeding Erdel, Michael Schnabel, Joachim Kirschner, Philipp Schmidtko, Daniel Schulze Wettendorf, Franziska Brüggemann, Jörg Meier, Bernd Lütkenhöner, Dr. Tobias Jogler,

Austritte

Elisabeth Rickers, Josef Rickers, Julian Kirchhoff, Zachari Gueorguiev, Ronja Schlagheck, Anke Schaffrinna, Oliver Schmidt

Lustiges Silbenrätsel

Auflösung

1. Abfolge von Köpfen
Hauptreihe
 2. Wenn einer ein Begrüßungswort falsch schreibt
Halo
 3. Beleuchtungseinheit am nördlichsten oder südlichsten Punkt der Erde
Pollux
 4. Münsterspezifische Fortbewegungsmittel, welche allerdings nicht für tiefere Lagen bestimmt ist
Hoehenraeder
 5. Standpunkt eines chirurgischen Eingriffes
Opposition
 6. Setze „h“ statt „f“ bei heimischer Frucht.
Aphel
 7. Extrabegehung unter Anleitung für einen, der zu spät kam
Nachfuehrung
 8. Hülsenfrucht, die nicht mehr weiter will.
Umkehrlinse
 9. Allererste Austrittsöffnung des Darms.
Uranus
 10. Halber Durchmesser eines komplett sehr dunklen Verkehrszeichens
Schwarzschildradius
 11. „@Luft“ in englisch
Atair
 12. Gruppe von allerbesten Schülern
Groessenklasse
 13. Kleiner flacher runder Gegenstand, der dekliniert wird
Beugungsscheibchen
 14. Ort ohne Ausdehnung, der nicht spät rechts ist
Fruehlingspunkt
- Das Lösungswort lautet:
Polhoehenwiege
- Der glückliche Gewinner:
Daniel Spitzer