technische universität
dortmund

Die Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes

Yvonne Kasper

11. Januar 2019

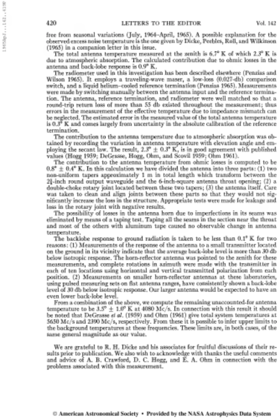
Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

technische universität
dortmund

Das Paper zur Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes

"**A MEASURMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s**" A. A. Penzias und R. W. Wilson in Astrophysical Journal, Vol. 142, p.419-421



"**A MEASURMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s**"
A. A. Penzias und R. W. Wilson, Astrophysical Journal, Volume 142, 1965
"Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and free from seasonal variations (July, 1964-April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue."

2 Theorien zur Entstehung des Universums

Steady State Theory

- Sir James Jeans, 1928
- Sir Fred Hoyle, 1948
- Sir Hermann Bondi, 1948
- Thomas Gold, 1948
- Albert Einstein, 1931

Big Bang Theory

- Alexander Friedmann, 1929
- Georges Lemaître, 1927
- George Gamow 1940er
- Ralph Alpher
- Robert Herman

Steady State Theorie

- bekannt seit dem 13. Jahrhundert
- beruht auf dem (perfekten) kosmologischen Prinzip
  - Universum ist homogen
  - Universum ist isotrop
  - (auch zeitliche homogen)
- Expansion des Universums
- kontinuierliche Erzeugung von Materie ($\propto$ 2 Wasserstoffatome pro m^3 pro 10^9 Jahre)
- Dichte bleibt erhalten

Liefert keine Erklärung zur Existenz des kosmischen Mikrowellenhintergrundes.
$\rightarrow$Die meisten Physiker sind heute von der Urknalltheorie überzeugt.

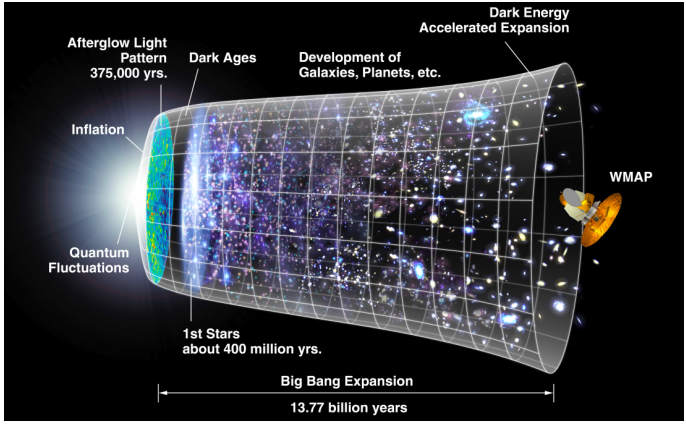


Abbildung 1: Bildrechte: NASA / WMAP Science Team

George Anthony Gamow

- Geboren 4. März 1904 in Odessa
- Studium von 1922 bis 1929 in Leningrad
- unter anderen unter Alexander Friedmann (Leningrad), Max Born (Göttingen) und Nils Bohr (Kopenhagen)
- 1933 endgültige Flucht in die USA

Abbildung 2: Bildrechte: Serge Lachinov

Gamow's Fireball

"The Elements were cooked in less time than it takes to boil an egg."
-George Gamow

- 99 % der Elemente im interstellarem Raum sind Wasserstoff (75%) und Helium(24%)
- Gamow beschäftigt sich 1946 mit der Frage woher die Elemente kommen
- Seine Idee: Das frühe Universum war eine heiße, dichte "Suppe", genannt:
- "YLEM":
  - Protonen
  - Neutronen
  - Elektronen
  - thermale Strahlung

Kochrezept

- Rezept für Helium:
  1. $p + n \rightarrow$ Deuterium + Strahlung
     - T $< 10^9$K notwendig
  2. $d + n \rightarrow {}^3\text{H} + p \rightarrow$Helium
     $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + n \rightarrow$Helium
     - T $> 10^7$K notwendig
  3. für schwerere Elemente: weitere Protonen und Neutronen hinzufügen
- Problem: Alle Protonen und Neutronen würden zu Deuterium werden
- Lösung: Variation der Dichte des Universums
  - Universum dehnt sich aus
  - “Suppe verdünnt sich”
  - Prozess stoppt

Zusammengefasst:

- Temperaturen bis zu 100mal heißer als die der Sonne
- Dichte fast 20fach so gering wie die der Sonne
- Strahungsdominant

- Frage: Was passierte mit dem Feuerball?
- Antwort:
  1. Ausdehnung um $a^3 = \frac{V_0}{V_1} = \frac{\rho_0}{\rho_1}$
  2. Kühlung auf $T_1 = \frac{10^9\mathrm{K}}{a} = 5\mathrm{K}$

Das 1948 von Alpher, Bethe und Gamow veröffentliche Paper findet keine Aufmerksamkeit.

Entdeckung durch Robert W. Wilson und Arno A. Penzias

Robert Woodrow Wilson

- geboren am 10. Januar 1936 in Houston
- studierte an der Rice University und dem California Institute of Technology
- unter anderen bei Sir Fred Hoyle
- Mitarbeit an der Konstruktion eines Interferometers
- Doktorarbeit über die Helligkeit der Milchstraße mittels Interferometrie (31 cm)
- ab 1963 bei Bell Laboratories in Holmdel, New Jersey

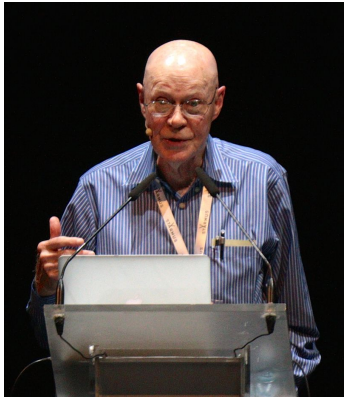


Abbildung 4: Bildrechte: Victor R. Ruiz

Arno Allen Penzias

- geboren am 26. April 1933 in München
- 1940 flieht die Familie in die USA, New York City
- studierte ab 1951 am City College of New York, zunächst mit Hauptfach Chemie, später Wechsel zu Physik
- Doktorarbeit über das Vorkommen von Wasserstoff in der Milchstraße
- ab 1962 bei Bell Laboratories

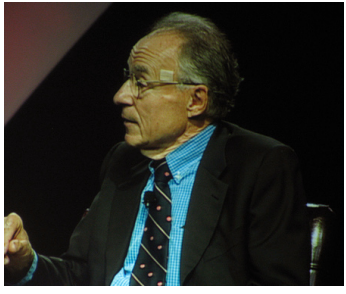


Abbildung 5: Bildrechte: Kartik Jayan

Bell Laboratories

- 1925 gegründet als Forschungs- und Entwicklungseinheit von Western Electric
- Arbeiten für Bell Telephone Company, die US Regierung und Grundlagenforschung
- seit dem 9 Nobelpreise

Meilensteine:

- Nachweis von Beugung von Elektronen an Kristallen
- Entdeckung von Radiostrahlung aus der Mitte unserer Galaxie
- Entwicklung des ersten Bipolartransistors
- erster Helium-Neon-Laser
- Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes
- Entwicklung von CCD-Sensoren
- Ursprung der Programmiersprache C und C++

Ziele

1. Vermessung von CasA bei 4080 Mc/s
2. Verbesserung der Untergrundrate bei der Vermessung der Milchstraße
3. Suche nach atomarem Wasserstoff in galaktischen Clustern

Technik

- Horn-Reflektorantenne aus Aluminium
- 15 m lang
- 6m x 6m Antennenapertur
- Seitenwände bilden gute Abschirmung
- ideal für Messung schwacher Signale

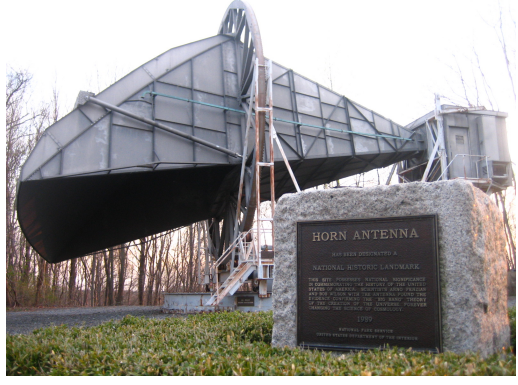


Abbildung 6: Bildrechte: Fabio J.

Technik

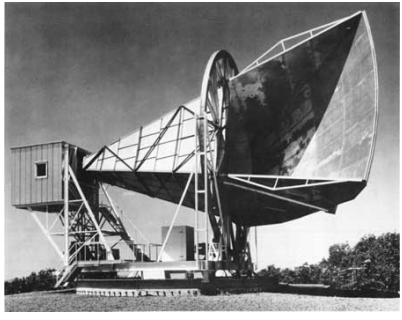


Abbildung 7: Bildrechte: NASA

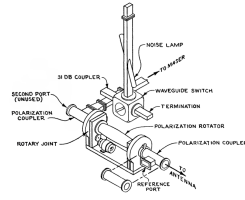


Abbildung 8: Measurement of the Flux Density of CAS a at 4080 Mc/s., Penzias, A. A. and Wilson, R. W., in Astrophysical Journal, vol. 142, p.1149

Messergebnisse

- erste Messergebnisse waren enttäuschend
- Antennen Temperatur lag 3,5 K über dem erwarteten Wert
- ohne Erklärung
- Neun Monate Verbesserungsarbeiten am Empfängersystem
- 3,5 K blieben bestehen

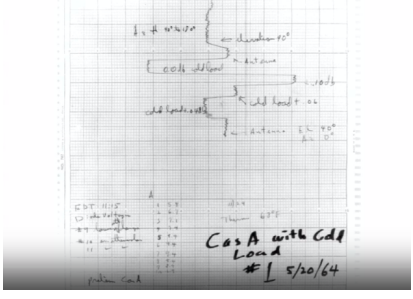


Abbildung 9: Bildrechte: R. W. Wilson

Ausgeschlossene Quellen:

- Strahlung aus der Atmosphäre
- Störsignale von NYC
- Tauben in der Antenne
- Atombombentest
- und viele mehr

Tauben und Atombomben

Anekdoten zur Lösung der Probleme im Video von Robert Wilson. (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics: 50 Years After the Discovery of the Big Bang!) ab 41:10
https://www.youtube.com/watch?v=V6rUi65qLqc

Identifikation

- Penzias führt Telefonat mit Bernard Burke
- Burke empfiehlt Robert Henry Dicke aus Princeton
- Penzias spricht mit Dicke
- “Boys, we’ve been scooped”
- Treffen initiiert
- zwei eigenständige Paper
- Nobelpreis für Penzias und Wilson in 1978
- “for their discovery of cosmic microwave background radiation”

Abbildung 10: Bildrechte: National Academies Press

Nachfolgende Messungen

- homogene, isotrope, unpolarisierte Strahlung gefunden bei 3,5 K
- theoretische Berechnungen von Sachs und Wolf (1967) sagen Anisotropien voraus

Die Entdeckung stieß eine Reihe an weiteren Experimenten zur Untersuchung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes los:

- weitere Untersuchungen mit erdgebundenen Instrumenten
  - Hinweis auf Schwarzkörperspektrum
  - Problem: Atmosphärische Absorption
- Satellitengebundene Messungen
  - COBE
  - (W)MAP
  - Planck
- Ballongebunde Instrumente
  - BOOMERanG
  - MAXIMA

COBE

- The **Co**smic **B**ackground **E**xplorer
- von 1989 bis 1993

Ziele:

- Messung der hohen Frequenzen des Spektrums
- Messung der Anisotropien
- Messung von diffuser Infrarotstrahlung

Drei Instrumente:

- **F**ar **I**nfra**R**ed **A**bsolute **S**pectrophometer
- **D**ifferential **M**icrowave **R**adiometer
- **D**iffuse **I**nfra**R**ed **B**ackground **E**xperiment

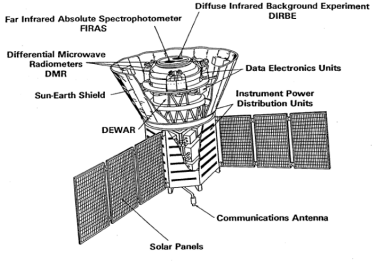


Abbildung 11: aus Boggess et al. (1992)

Far InfraRed Absolute Spectrophometer

Ziel:

- Vermessung des Schwarzkörperspektrums
- Wellenlängenbereich 0,1 mm - 10 mm

Ergebnis:

- perfektes Schwarzkörperspektrum

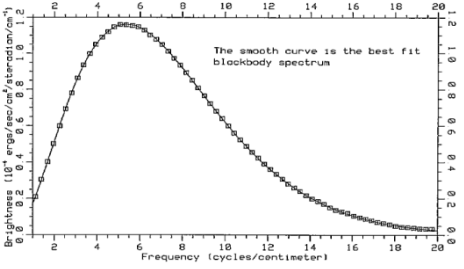


Abbildung 12: aus Mather et al. 1990

Differential Microwave Radiometer

Ziel:

- Suche nach Anisotropien
- Wellenlängen: 3 mm, 6 mm, 10 mm
- Winkelauflösung von 7°

Ergebnis:

- T=2,728 K
- Temperaturfluktuationen von Größenordnung 10^{-5}

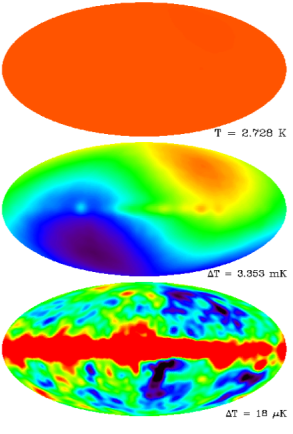


Abbildung 13: aus Smoot et al. 1992

Nobelpreis in 2006
“for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation”

Abbildung 14: George Smoot, Bildrechte: Michael Höfner

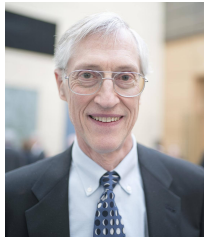


Abbildung 15: John Mather, Bildrechte: Christopher Michel

BOOMERanG

- **B**alloon **O**bservations **O**f **M**illimetric **E**xtragalactic **R**adiation **an**d **G**eophysics
- von 1998 bis 2003

- 1998 Start von McMurdo Station in der Antarktis
- 42000 m hoch
- kosten günstiger als Satellit
- Polarwirbel sorgt für Rückkehr zum Startpunkt

Abbildung 16: Bildrechte: BOOMERanG collaboration

Ergebnisse:

- Vermessung der Anisotropien mit höherer Genauigkeit
- Geometrie des Universums ist flach

Abbildung 17: Bildrechte: BOOMERanG collaboration

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- zufällige Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes von Penzias und Wilson in 1964
- Beweis der Urknalltheorie
- präzise Vermessung

Ausblick:

- theoretische Vorhersage des Neutrinohintergrundes bei 1,9 K
- zeitlich vor dem kosmischen Mikrowellenhintergrund
- Messung schwierig