

Astroteilchenphysik - I

WS 2011/2012 Vorlesung # 05, 22.11.2011

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Big Bang Nukleosynthese:

- stellare Nukleosynthese

kosmische Hintergrundstrahlung:

- Historie & Grundlagen
- strahlungsdominiertes Universum
- Schwarzkörperstrahlung
- COBE: FIRAS & DMR
- Signal & Störquellen



Wellenzahl [cm⁻¹]

www.kit.edu

Baryonendichte - BBN und CMB





Baryon-Photon-Verhältnis
 5.1 ≤ η₁₀ ≤ 6.5 (95% CL)
 BBN- Baryonendichte
 0.019 ≤ Ω_b h² ≤ 0.024
 BBN und N_v





weitere Generationen N_v: ∜ T_F steigt an ∜ mehr ⁴He (N_v > 3 (95%CL)

ATP aktuell



Pristine relics of the Big Bang spotted



An artist's impression of an ancient cloud forming into a star

For the first time, astronomers have discovered two distant clouds of gas that seem to be pure relics from the Big Bang. Neither cloud contains any detectable elements forged by stars; instead, each consists only of the light elements that arose in the Big Bang some 14 billion years ago. Furthermore, the relatively high abundance of deuterium seen in one of the clouds agrees with predictions of Big Bang theory.

Just after the Big Bang, nuclear reactions created the three lightest elements – hydrogen, helium, and a tiny bit of lithium. Stars then converted some of this material into the heavy elements such as carbon and oxygen that pepper the cosmos today.

But no-one has ever seen a star or gas cloud made solely of these three Big Bang elements. Instead, all known stars and gas clouds harbour at least some "metals", the term astronomers use to describe any element, even carbon and oxygen, that is heavier than helium.

Minutes after the Big Bang

2 Ly-α-Wolken ohne Metalle!

physicsworld.com

Leo-Wolke (z = 3.10): < 1/6000 der solaren Metallizität

Ursa Major-Wolke (z = 3.41): < 1/16000 der solaren Metallizität

D/H Verhältnis in Übereinstimmung mit BBN Theorie

LEP & Anzahl aktiver v–Generationen



Teilchenphysik: Bestimmung der Anzahl der v–Generationen aus der unsichtbaren Zerfallsbreite des Z⁰ - Bosons am LEP- e⁻e⁺ - Speicherring: $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ unsichtbare Breite: $\Gamma_{inv} (Z^0 \rightarrow v v) = N_v \times (174 \pm 11)$ MeV



BBN - keine schweren Elemente



- **BBN**: keine schwereren Elemente als ⁷Li und ⁹Be, da die
 - Coulomb-Barriere Vc rasch anwächst
 - Elemente mit A = 5 8 extrem instabil sind (⁸Be)
 - He-Dichte für die Tripel-Alpha-Reaktion $3\alpha \rightarrow {}^{12}C^*$ (s.u.) nicht mehr hoch genug ist (Hubble-Expansion!)

Solution were a service of the servi









BBN - keine schweren Elemente



vgl. Kap. 6

Fusionsprozesse in Sternen / Supernovae:

- pp-Fusion & CNO-Fusion: Hauptreihe
- Tripel- α -Reaktion & Kernschalenbrennen: Riesenast / AGB
- s-Prozess (slow, wenige n)
- r-Prozess (*rapid*, viele n)
- v-Prozess (Neutrinos)





Nukleosynthese – Urknall, Sterne & SNae



Nukleosynthesereaktionen: von der BBN zur stellaren Fusion & SNae



Nukleosynthese – Urknall, Sterne & SNae





2.2 kosmische Hintergrundstrahlung





CMB – Einordnung & Querverbindungen





Kosmische Hintergrundstrahlung – Historie



- **1941:** Beobachtung der Anregung von interstellaren CN Molekülen (Rotationsbanden) aus Richtung ζ Ophiuchi
- **1946:** Gamov, Alpher, Herman heißer Urknall erzeugt Mikrowellenhintergrund mit heutiger T ~ 5 K
- 1965: A. Penzias & R. Wilson Entdeckung der CMB in Holmdel bei λ =7cm (Nobelpreis 1978)
- **1989:** Start des NASA Satelliten COBE Messung der spektralen Form mit FIRAS (Mather)
- **1992:** Nachweis von Fluktuationen der CMB mit DMR (Smoot)
- 1998: Ballonexperimente messen Fluktuationen auf kleinen Winkelskalen
- 2001: Start der WMAP Satellitenmission, DASI sieht Polarisation
- **2003:** erste WMAP Datenanalyse Präzisionszeitalter der Kosmologie
- 2006: Nobelpreis für Mather & Smoot
- 2009: erste Messungen von Planck

CMB – Entdeckung durch Penzias & Wilson







Radioastronomen A. Penzias & R. Wilson

Nobelpreis 1978

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

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

No. 1, 1965

LETTERS TO THE EDITOR

421

Note added in proof.—The highest frequency at which the background temperature of the sky had been measured previously was 404 Mc/s (Pauliny-Toth and Shakeshaft 1962), where a minimum temperature of 16° K was observed. Combining this value with our result, we find that the average spectrum of the background radiation over this frequency range can be no steeper than $\lambda^{0.7}$. This clearly eliminates the possibility that the radiation we observe is due to radio sources of types known to exist, since in this event, the spectrum would have to be very much steeper.

A. A. PENZIAS R. W. WILSON

May 13, 1965 Bell Telephone Laboratories, Inc Crawford Hill, Holmdel, New Jersey

Schwarzkörperstrahlung I - Grundlagen

- CMB-Photonen sind im frühen Universum (T < 380.000 Jahre) in thermodynamischen Gleichgewicht mit Materie (Plasma)
 - Wechselwirkung über Thomson-Streuung an freien Elektronen
- Eigenschaften eines idealen schwarzen Strahlers
 - Planck´sche Verteilung besitzt nur einen freien Parameter:

absolute Temperatur T







Schwarzkörperstrahlung II - Grundlagen



Heutige Temperatur der CMB: T = 2.725 K damit ergibt sich unter Nutzung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:



Schwarzkörperstrahlung III – Expansion







Ursprung der Asymmetrie



unter welchen Bedingungen entsteht eine Materie-Antimaterie Asymmetrie, damit Baryonen übrig bleiben?



- keine Antimaterie im Universum sorry AMS-02 (vgl. Kap. 4.3)





Ursprung der Asymmetrie



nur wenn die 3 Sacharov-Kriterien erfüllt sind gelingt die Baryogenese

CP- und C-verletzende Prozesse

verschiedene intrinsische Eigenschaften von Materie und Antimaterie (z.B. unterschiedliche Zerfallsamplituden von Kaonen / Neutrinos)

2 kein thermodynamisches Gleichgewicht

sonst ist die Teilchendichte nur abhängig von ihrer Masse (CPT-Theorem!) und der Temperatur kT des Kosmos

3 B – verletzende Prozesse

Verletzung von B (Baryonenzahlerhaltung) und L (Leptonenzahlerhaltung) ist möglich in GUTs, aber die Größe (B–L) bleibt erhalten! \Rightarrow daher: zunächst Leptogenese mit L \neq 0?

L-verletzender Zerfall schwerer Majorana-v´s



CMB: Übergang Strahlungs-Materiekosmos





CMB: Übergang Plasma – neutrales Gas



CMB-Photonen sind über Thomson-Streuung in thermodynamischem Gleichgewicht mit Materie

hohe Temperaturen: Materie ist vollständig ionisiert

$$\gamma + H \rightarrow p + e^- (E_{\gamma} > 13.6 \text{ eV})$$

fallende Temperaturen: Übergang zu neutralen Atomen (T ~ 3000 K)

nach der Rekombination der Atome (H und He): CMB-Photonen propagieren ohne weitere Wechselwirkung durch das Universum

 - ideale Boten aus dem frühen Universum zum Zeitpunkt der letzten Streuung (Rekombination der Materie)



Plasn

Photon-Hintergrundstrahlungen



IR

COBE-

DIRBE

Infrarot-, optischer, Röntgen- & γ-Hintergrund basieren auf zahlreichen Einzelquellen: nicht kosmologischer Ursprung (vgl. ATP-II)



COBE – Cosmic Background Explorer



Erste NASA-Satelliten Mission (1989-93) mit 3 dezidierten Instrumenten zur Erforschung der CMB: Schwarzkörper? – Fluktuationen? – IR-Quellen?



KIT-IEKP

FIRAS – Far Infrared Absolute Spectrophotometer

Ziel: Messung der spektralen Form der Hintergrundstrahlung ($\lambda = 0.1-10$ mm) Methode: Michelson-Interferometer - Vergleich von CMB mit einem Referenz-Schwarzstrahler, externe Quelle zur Kalibration



DMR – Differential Microwave Radiometers

- Karlsruhe Institute of Technology
- Ziel: Nachweis von Anisotropien (Temperaturfluktuationen) in der CMB zum Test kosmologischer Modelle der Strukturbildung (vgl. Kap. 3)
 Methode: Messung der Temperaturdifferenz von 2 Hornantennen (Winkel 60°) Umschalter (100 Hz Oszillator) zwischen den beiden Kanälen (Dicke-*swichting*)





FIRAS – Resultate (Mather et al.)







$T_{\gamma} = (2.725 \pm 0.001) \text{K}$

daraus folgt mit der Relation

$$N_{\gamma} = \frac{2.404}{\pi^2} \left(\frac{kT}{\hbar c^3}\right)^3$$

für die Anzahl N_γ der CMB Photonen heute:

$$N_{\gamma} = (411 \pm 2) / cm^3$$



Galaktische Koordinaten



Mollweide-Projektion Ν galaktische Ebene galaktische Ebene S

Milchstraße im IR-Licht

COBE: K Skala







COBE: mK Skala





Dipolanisotropie

COBE: µK Skala





Fluktuationen

COBE: Dipolanisotropie

Dipolanisotropie

dominante Anisotropie auf großen Skalen $\Delta T_{max} = (3.365 \pm 0.0275) \text{ mK}$ Dopplereffekt durch Bewegung der Sonne relativ zum CMB-Hintergrund

Dipolterm und Bewegung des Beobachters

$$\Delta T(\theta) = T_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

 v = 368 km/s relativ zum CMB Bezugssystem
 (Rotation um galaktisches Zentrum & Fluss der lokalen Gruppe zum Shapley-Cluster)

- CMB bildet ein absolutes Referenzsystem für Beobachter, ist aber kein relativistisch herausgehobenes Bezugssystem

D)







COBE – Resultate bei 31.5 / 53 / 90 GHz





- konsistente Temperaturfluktuationen in den drei Frequenzen 31.5/53/90 GHz
 - aber: deutliches nichtkosmologisches
 Störsignal in der galaktischen Ebene
 - Signal & Störeffekte sind beide (unterschiedlich) frequenzabhängig



CMB Signal und Untergrund





COBE – Temperaturskalen





- homogenes & isotropes Universum mit Robertson-Walker Metrik
- kosmologischer Ursprung der CMB
- Ursache der Isotropie? (Horizontproblem)
- Dopplereffekt durch Bewegung mit
 v = 370 km/s relativ zum CMB-System
- CMB kein relativistisch ausgezeichnetes Bezugssystem
- primordiale Dichtefluktuationen als Saatkerne der Strukturbildung
- Stärke ~10⁻⁵ entspricht Vorhersage der Inflationstheorie (aber heute $<\Delta\rho/\rho> ~1!$)
- skaleninvariante Temperaturfluktuationen

Ballonexperimente / Südpolexperimente



seit 1998: verschiedene Experimente mit partieller Himmelsabdeckung Ziele: Fluktuationen auf kleinen Winkelskalen & Nachweis der Polarisation

BOOMERANG, MAXIMA

1-10 Tage (h > 30 km)

Ballonexperimente: Flugdauer:

Zielsetzung:

Südpolexperimente:

nature

Background to a flat Universe

Messdauer: Zielsetzung:

22.11.20

35



mehrere Südwinter

1. Nachweis von Polarisation





Ballon-Mission: BOOMERanG



Ballon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics

Start am Mt. Erebus (Antarktis)





Dezember 1998: erster 10-tägiger Flug in der Stratosphäre

Abdeckungsgrad: ~3% der gesamten Himmelsfläche

Resultate:

Temperaturfluktuationen mit $\delta \theta \sim 10'$ flaches Euklidisches Universum mit $\Omega_{tot}=1$!



