

# Kerne und Teilchen

**Moderne Experimentalphysik III**  
**Vorlesung 20**

MICHAEL FEINDT  
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

## Das frühe Universum

# Expansion der Universums

- ca.  $10^{23}$  Galaxien; zwischen  $10^7$  und  $10^{13}$  Sonnenmassen/Galaxie
- **Doppler – Verschiebung** atomarer Spektrallinien ( $\rightarrow$  **rot**):
  - alle Galaxien entfernen sich von der Milchstraße
  - in allen Richtungen
  - je schneller, desto weiter entfernt

$$v = H_0 \cdot d$$

↑
↑
↑

**Fluchtgeschwindigkeit**      **Hubble - Konstante**  $H_0 = 50 \dots 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} / \text{MPa}$       **Entfernung** (aus Helligkeitsmessungen, jetzt Supernova)

(1 Pa = 3.3 Lichtjahre)

$\Rightarrow$  **isotrope Expansion des Universums** (der Raum wird größer)

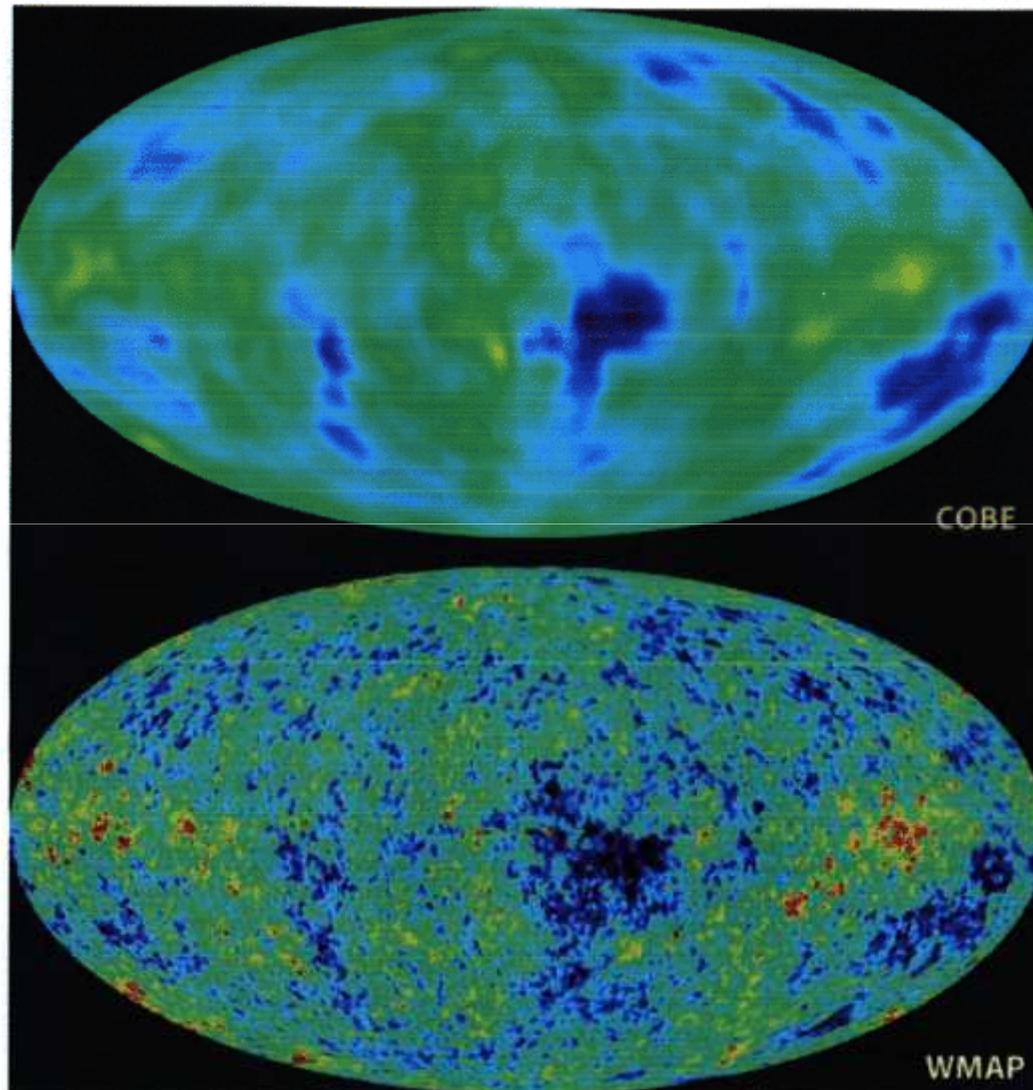
# Kosmische Hintergrundstrahlung

Urknalltheorie:

- anfänglich heißes Plasma: extrem kurzwellige e.m. Strahlung
  - ⇒ Abkühlung durch Expansion
  - ⇒ **langwelliger**

heute:

- Strahlung im **Mikrowellenbereich**  
Entdeckung 1965: Penzias + Wilson (Nobelpreis)
  - ⇒ Spektrum eines schwarzen Körpers der Temperatur 2.7 K
- **Außerordentlich isotrop** in alle Richtungen
$$\delta T/T \approx 10^{-5}$$
- COBE in '90er Jahren, WMAP in '00er Jahren:  
Satellitenexperimente haben sehr kleine Fluktuationen der Hintergrundstrahlungstemperatur aufgedeckt
  - ⇒ **Quantenfluktuationen des frühen Universums**



# Friedmann – Modell des Universums

- allg. Relativitätstheorie und Hubble – Gesetz  $\Rightarrow$  **Alter** (Größe)

- **Dichte  $\rho$ :**

$$\rho \begin{cases} > \rho_{crit.} & \Rightarrow \text{geschlossenes Universum, kollabierendes Universum} \\ = \rho_{crit.} & \Rightarrow \text{flaches Universum, asymptotischer Radius} \\ < \rho_{crit.} & \Rightarrow \text{offenes Universum, ewige Expansion} \end{cases}$$

- optische Methoden:  $\rho < \rho_{crit.}$   
 Man vermutet jedoch, dass es neben der sichtbaren Materie (ca. 4%) noch sehr viel dunkle Materie (ca. 27%) gibt.
- Insgesamt:  $\rho \approx \rho_{crit.}$
- Alter des Universums (für unterkritische Dichte)

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = 10 - 20 \text{ Milliarden Jahre}$$

# Die ersten 3 Minuten...

- Anfang:** **thermodyn. Gleichgewicht** zwischen allen Teilchen, Antiteilchen und Eichbosonen. Große Vereinheitlichung, kein Unterschied zwischen Quarks und Leptonen, **alle WW gleich stark.**
- $t > 10^{-35}$  s:** **Abkühlung durch Expansion**, Phasenübergang: **Abkopplung der starken WW von der elektroschwachen**, keine WW mehr zwischen Quarks und Leptonen. Hier wurde das Verhältnis Quarks/Photonen  $\approx 10^{-9}$  festgelegt, das auch heute noch gültig ist.
- $t > 10^{-6}$  s:**  $kT \approx 100$  MeV  $\Rightarrow$  Quarks bilden **Baryonen und Mesonen** (vorher Quark-Gluon – Plasma ). Protonen und Neutronen stehen durch schwache Prozesse im Gleichgewicht.
- $t > 1$  s:**  $kT \approx 1$  MeV (p,n – Massendifferenz): Neutrinos zu energiearm, um p-n – Gleichgewicht aufrecht zu erhalten.  **$\nu$  entkoppeln** und bewegen sich frei.  $N_p/N_n$  wächst auf ca.7 an.

# ... und danach

$t \geq 3 \text{ min}$ :  $kT \approx 100 \text{ keV}$

Energie der Photonen reicht nicht mehr aus, um die in Fusionsreaktionen entstehenden leichten Kerne wieder zu dissoziieren  
 $\Rightarrow$  Urknall – Nukleosynthese von **Deuterium, Helium, Lithium**

$t \geq 30\,000 \text{ Jahre}$ :

Elektronen werden von Kernen eingefangen und bilden **Atome**, kein Plasma mehr, **Photonen können sich frei bewegen**.

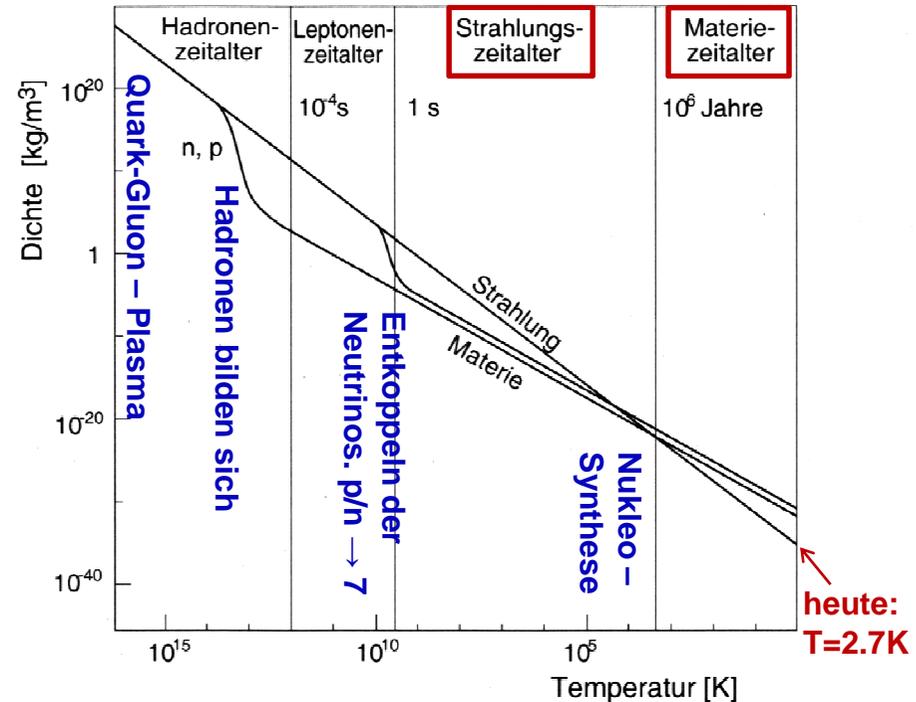


Abbildung 19.9. Entwicklung der Energiedichte im Universum als Funktion der Temperatur ab dem elektroschwachen Phasenübergang ( $T \approx 10^{15} \text{ K}$ ). In der frühen Entwicklungsphase des Universum war die Strahlung mit Materie und Antimaterie im thermischen Gleichgewicht. Nach und nach entkoppelt die Materie von der Strahlung und Materie- und Strahlungsenergiedichte entwickeln unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten, so dass das Universum letztendlich materiedominiert wird.

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

# Materie-Antimaterie – Asymmetrie

- **Urknall:**  $N(q) = N(\bar{q})$      $N(\text{Baryonen}) = N(\text{Antibaryonen})$
- **heute:** **nur Materie**, keine Evidenz für Strukturen aus Antimaterie
  - $N_B/N_\gamma \approx 3 \cdot 10^{-10}$
  - Wenn alle Photonen aus  $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$  Zerstrahlung kämen, wäre,  $q-\bar{q}$  – Asymmetrie von  $\Delta q = (q-\bar{q})/(q+\bar{q}) \approx 3 \cdot 10^{-10}$  ausreichend, um Materie – Antimaterie – Asymmetrie zu erklären.

- Benötigte: C P – Verletzung, Baryon-Zahl – Verletzung, thermodynamisches Ungleichgewicht
- Grand – Unified – Theories erlauben solche Bedingungen in den ersten  $10^{-35}$  s des Universums.
- X-Bosonen mit Masse  $\approx 10^{-14}$  GeV erlauben Quark-Lepton – Übergänge. C P – Verletzung  $X \rightarrow q l$      $X \rightarrow \bar{q} \bar{l}$

# Phasenübergänge

**Elektroschwacher Phasenübergang:**  $t > 10^{-35}$  s,  $kT \approx 100$  GeV

vorher: elektroschwache Vereinheitlichung

- ⇒ e.m. und schwache WW nicht unterscheidbar
- $\gamma$ , W, Z ähnliche Eigenschaften

**Phasenübergang** durch **spontane Symmetriebrechung** (Higgs-Mechanismus):

- ⇒ e.m. und schwache WW unterscheidbar

**Bildung von Hadronen:**  $t \approx 1$   $\mu$ s,  $kT \approx 100$  MeV

vorher: Quark-Gluon – Plasma

nachher: Hadronen

- wg.  $m_u \approx m_d$  gilt ungefähr  $n_p = n_n$
- T zu hoch, um Kerne zu bilden ( $E_B \approx 7$  MeV) ⇒ freie p, n
- $\bar{\nu}_e p \rightleftharpoons e^+ n$  **thermisches Gleichgewicht**

weitere Abkühlung:  $\sigma(\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n) \ll \sigma(e^+ n \rightarrow \bar{\nu}_e p)$   
 $m_n > m_p \Rightarrow n/p$  – Verhältnis sinkt.



# Sternentwicklung und Elementsynthese

- Sterne entstehen durch Kontraktion von interstellarem Gas und Staub, fast nur aus primordialem Wasserstoff und Helium.
- Durch Kontraktion: **Erhitzung** im Zentrum
  - T,p groß genug  $\Rightarrow$  **Fusion von Kernen** beginnt
  - Strahlung verhindert weitere Kontraktion
  - Temperaturgefälle im Stern nach Virialsatz:  $\langle E_{\min}(r) \rangle = \frac{1}{2} \langle E_{\text{pot}}(r) \rangle$
- Im Zentrum erzeugte Energie wird vorwiegend durch Strahlung an die Oberfläche transportiert:
  - **Photonen: sehr viele Stöße**, viele tausend Jahre bis zur Oberfläche.
  - **Neutrinos: Transport direkt mit  $\approx c$ .**
- Chemische Zusammensetzung ändert sich im Wesentlichen nur im Zentrum der Sterne.

# Fusionsreaktionen

- Gleichgewicht:
  - abgestrahlte Energie = durch Fusion produzierte Energie**
- besonders effektiv: Fusion von H zu He (7.07 MeV Bindungsenergie)
  - Voraussetzung: T hoch genug, um Coulomb – Barriere zu überwinden
  - Analog zum  $\alpha$ -Zerfall: Tunnelwahrscheinlichkeit  $e^{-2G}$   
 mit Gamov-Faktor  $G = \frac{\pi \alpha Z_1 Z_2}{v/c}$  (nicht nötig, dass  $E > E_{\text{Coul.}}$ )
  - Reaktionsrate pro Volumen:

$$\dot{N} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$$

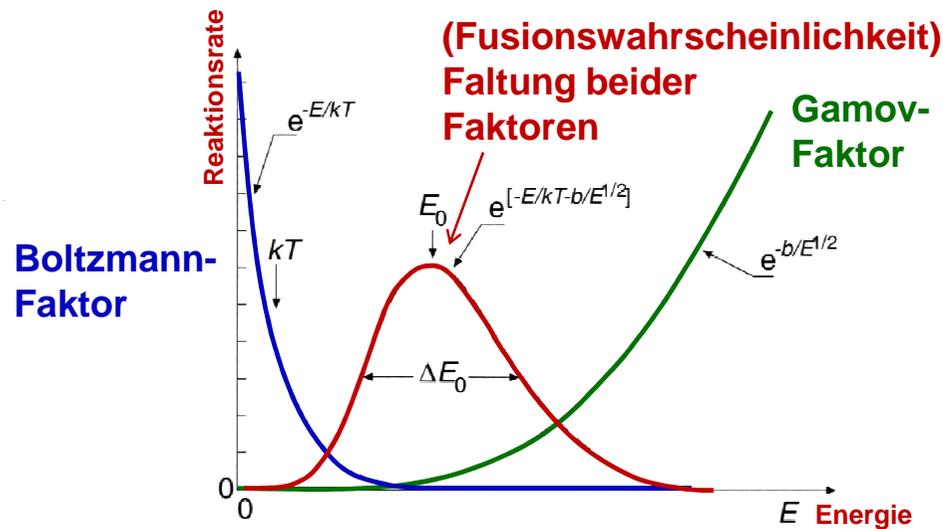
$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \downarrow$   
 Dichten    WQ    Geschwindigkeit

- Geschwindigkeitsverteilung im Plasma der Temperatur T:

**Maxwell-Boltzmann – Verteilung**

$$n(v) \propto e^{-\frac{mv^2}{2kT}} = e^{-\frac{E}{kT}}$$

# Fusionsreaktionen



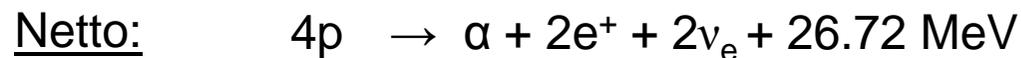
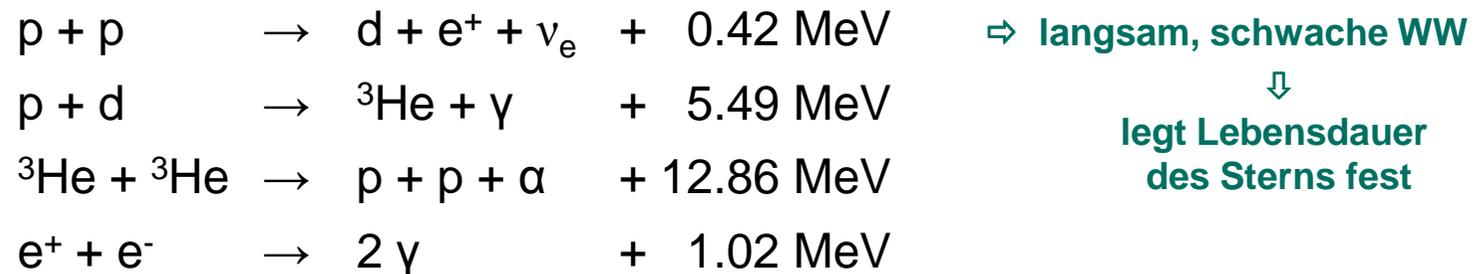
**Abbildung 19.10.** Schematische Darstellung der Faltung der Maxwell-Verteilung  $\exp\{-E/kT\}$  und des Gamov-Faktors  $\exp\{-b/E^{1/2}\}$  zur Berechnung der Rate von Fusionsreaktionen. Das Produkt dieser Kurven ist proportional zur Fusionswahrscheinlichkeit (*gestrichelte Kurve*). Die Fusion spielt sich im Wesentlichen in einem recht schmalen Energieintervall der Breite  $\Delta E_0$  ab. Das Integral über diese Kurve ist proportional zur gesamten Reaktionsrate.

- Je höher  $Z$ , desto höher muss  $T$  sein, damit Fusion möglich ist:  
**zuerst H-Fusion, dann He-Fusion**, erst später Fusion schwerer Kerne
- Schwere Sterne: Druck und Dichte höher im Zentrum  
⇒ Reaktionsrate größer ⇒ schwere Sterne kurzlebiger als leichte

# Wasserstoffverbrennung

- Sterne mit  $> 1/10$  Sonnenmasse erreichen  $T > 10^7$  K und zünden Wasserstoff – Fusion:

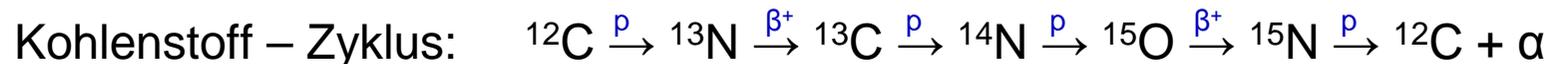
## Proton – Proton – Zyklus:



- Solange Wasserstoff – Vorrat reicht, brennt Stern stabil:

Sonne: ca.  $10^{10}$  Jahre

$1/2$  davon bereits vergangen



netto auch:  $4p \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e + 26.72 \text{ MeV}$  aber höhere Coulomb–Barriere  
 (T muss höher sein)

**C = Katalysator ; sehr viel schneller als pp – Zyklus**

# Heliumverbrennung

- Nach Ausschöpfung des H – Vorrats  $\Rightarrow$  Kollaps des He – Sterns durch Gravitation. Sehr kleine Sterne: keine weitere Fusion, Kollaps bis zum **weißen Zwerg** (Fermi-Druck des Elektronengases stoppt Kollaps).
- Schwere Sterne heizen bis  $T \approx 10^8$  K und  $\rho \approx 10^8$  kg/m<sup>3</sup> auf
  - $\Rightarrow$  Heliumverbrennung setzt ein. H in Schale heizt auf und fusioniert
  - $\Rightarrow$  Ausdehnung durch Strahlungsdruck, niedrige Temperatur an Oberfläche  $\Rightarrow$  Rotverschiebung  $\Rightarrow$  **Roter Riese**.
- Synthetisierung schwererer Kerne als <sup>4</sup>He nicht möglich? (denn für A=5, A=8 gibt es keine stabilen Kerne...)
 

Salpeter 1952:  $T = 10^8$  K :  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightleftharpoons {}^8\text{Be}$  (therm. Gleichgewicht)

$\rho = 10^8$  kg/m<sup>3</sup> : Gleichgewicht von 1 <sup>8</sup>Be zu  $10^9$  <sup>4</sup>He

  - $\Rightarrow$  reicht für  ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}^*$  (resonanter 0<sup>++</sup> – angeregter Zustand)
  - $\Rightarrow$   **$\approx 1\%$  aller Kerne** im Universum **schwerer als Helium**, fast alle durch diesen Prozess erzeugt

# Verbrennung zu Eisen

- Wenn H – Vorrat verbraucht, bestehen Sterne **hauptsächlich aus  $^{12}\text{C}$** .  
Sterne im Massenbereich der Sonne werden zu weißen Zwergen.
- Massivere Sterne:
  - Fusion von  $\alpha$  mit  $^{12}\text{C}$  zu  $^{16}\text{O}$  und weiter zu  $^{20}\text{Ne}$  etc.  
oder direkte Fusion  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha + 4.62 \text{ MeV}$  etc.
  - $\Rightarrow$  Elemente zwischen C und Fe werden bevölkert.
  - Zwiebelschalenförmig: **Fe in Zentrum  $\rightarrow$  H außen.**
  - letzte Phase (Silizium zu Eisen) dauert nur wenige Tage:
    - $\Rightarrow$  keine Energiequelle mehr vorhanden ( $E_B$  von Fe ist maximal).  
Strahlungsdruck fällt weg, Stern kollabiert. Gewaltige Implosion  $\Rightarrow$  Materie im Zentrum gewaltiges T und p  $\Rightarrow$  enorme Explosion. Schlagartige Emission von mehr Energie als zuvor im ganzen Leben (**Supernova**). Schleudert Sternmaterie in interstellaren Raum, später Baumaterial für neue Sterne.
  - Im Zentrum entsteht bei:
 

$m < m_{\text{Sonne}}$	$\Rightarrow$	<b>weißer Zwerg</b>
$m_{\text{Sonne}} < m < 2m_{\text{Sonne}}$	$\Rightarrow$	<b>Neutronenstern</b>
$m > 2m_{\text{Sonne}}$	$\Rightarrow$	<b>schwarzes Loch</b>

# Synthese schwerer Kerne ( $>Fe$ )

- durch Anlagerung von langsamen Neutronen

## s – Prozess (langsamer Prozess):

- in Sternen
- Neutron – Einfang  $\rightarrow$   $\beta$ -Zerfall
- $\Leftrightarrow$  Synthese verläuft entlang des Stabilitätstals
- Grenze: Blei, alle Kerne  $>Pb$  sind  $\alpha$  – instabil

## r – Prozess (schneller Prozess):

- Während Supernova – Explosion mit enormen Neutron – Flüssen
- Neutronen – Anlagerung viel schneller als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall
- auch Elemente  $>Pb$
- obere Grenze bei Transuranen durch spontane Spaltung gegeben