

Astroteilchenphysik - I

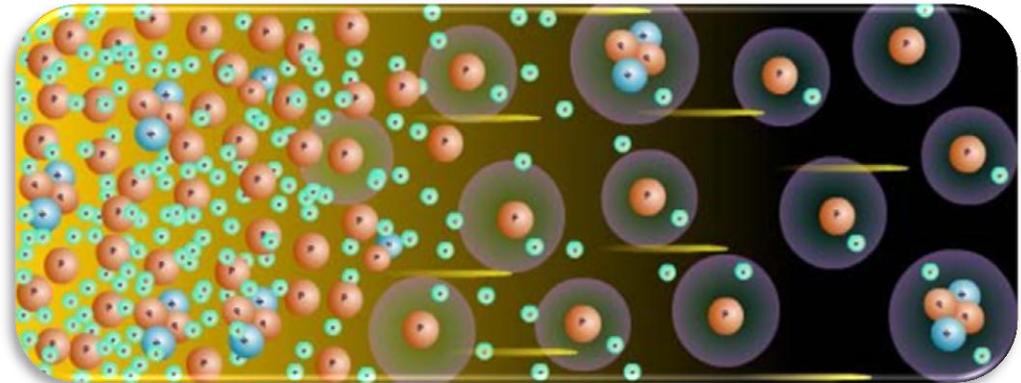
WS 2012/2013

Vorlesung # 04, 15.11.2012

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Big Bang Nukleosynthese:

- Messmethoden für Kosmologie:
 - Helium-4
 - Deuterium
 - Lithium-7
- Neutrino-generationen
& BBN



BIG BANG ONLINE

Expansion des Universums

- für homogenes, isotropes Universum:

Friedmann-Lemaître Expansionsgleichungen

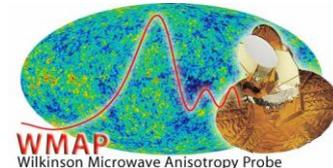
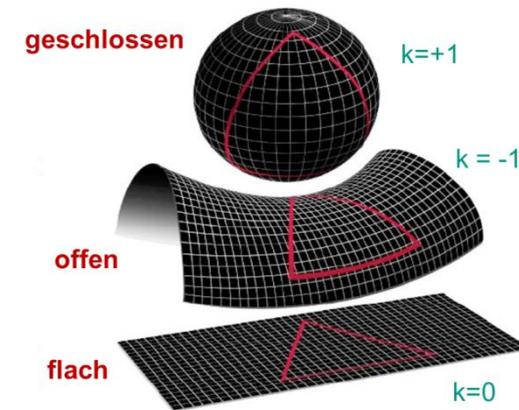
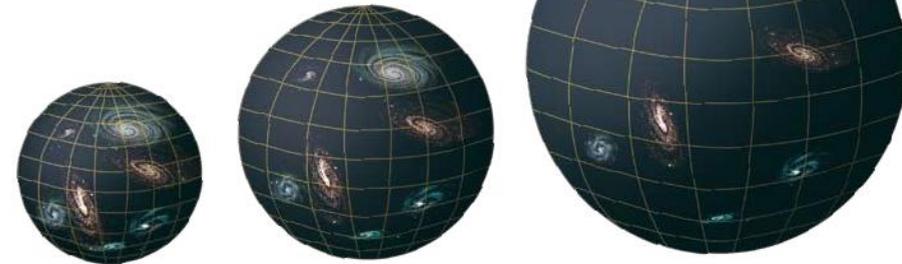
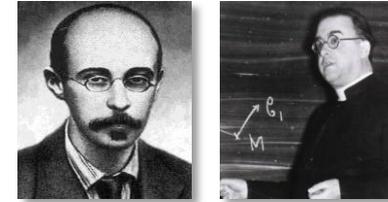
$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho(t) - \frac{k}{a^2(t)} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4}{3} \pi G \left(\rho(t) + \frac{3P}{c^2} \right) + \frac{\Lambda}{3}$$

- Topologie des Universums:

Krümmung	Energie	Topologie
hyperbolisch	$E_{\text{tot}} > 0$	offen
euklidisch	$E_{\text{tot}} = 0$	flach
sphärisch	$E_{\text{tot}} < 0$	geschlossen

- kritische Dichte $\rho_c = 5.1 \text{ GeV} / \text{m}^3$ (d.h. ~ 5 Protonen pro m^3)



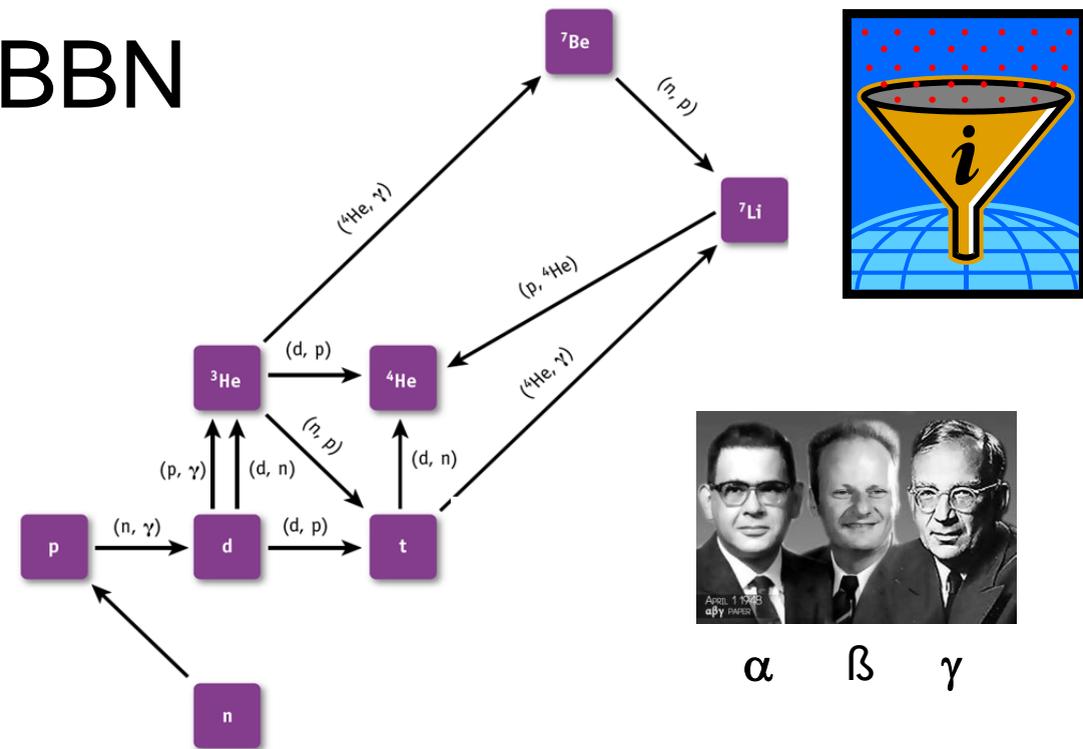
Big Bang Nukleosynthese – BBN

■ **BBN:** in den ersten 3 Minuten entstehen aus p und n die leichten Kerne ^2H , ^3He , ^4He , ^7Li und ^7Be

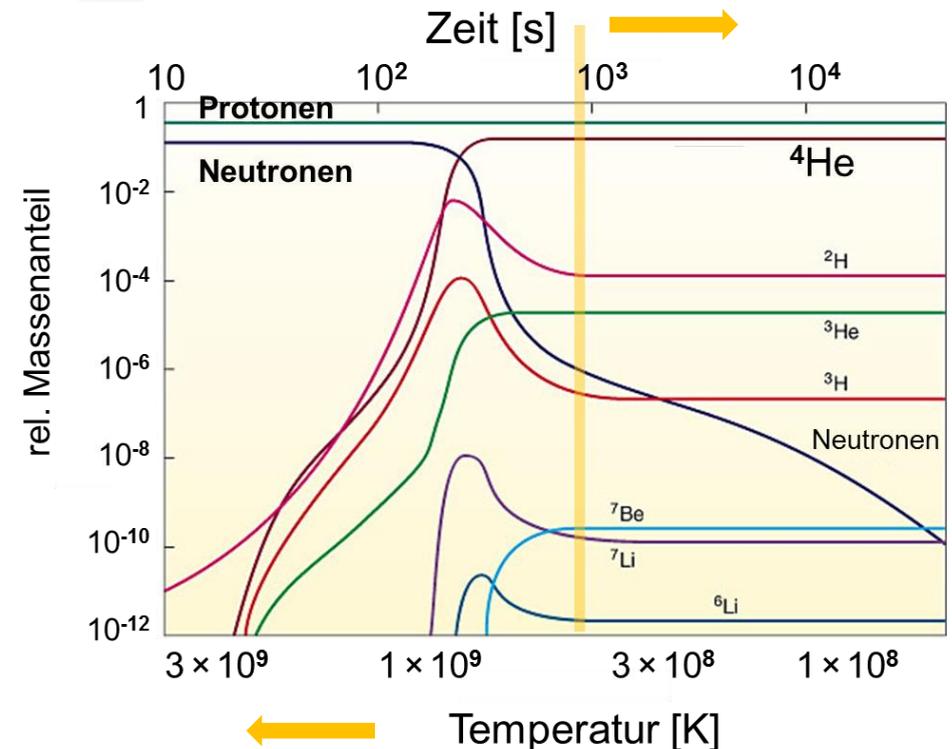
■ **4 Phasen der BBN:**

- 1 – thermisches Gleichgewicht
($T = 10^{11} \text{ K}$, $t = 0.01 \text{ s}$)
- 2 – Ausfrieren der schwachen Ww.
($T = 10^{10} \text{ K}$, $t = 1 \text{ s}$)
- 3 – Neutronenzerfall
($T > 10^9 \text{ K}$, $t = 1 \text{ s} - 1 \text{ min}$)
- 4 – Fusionsreaktion
($T \sim 10^9 \text{ K}$, $t = 1 - 10 \text{ min}$)

■ **BBN:** 12 Hauptreaktionspfade

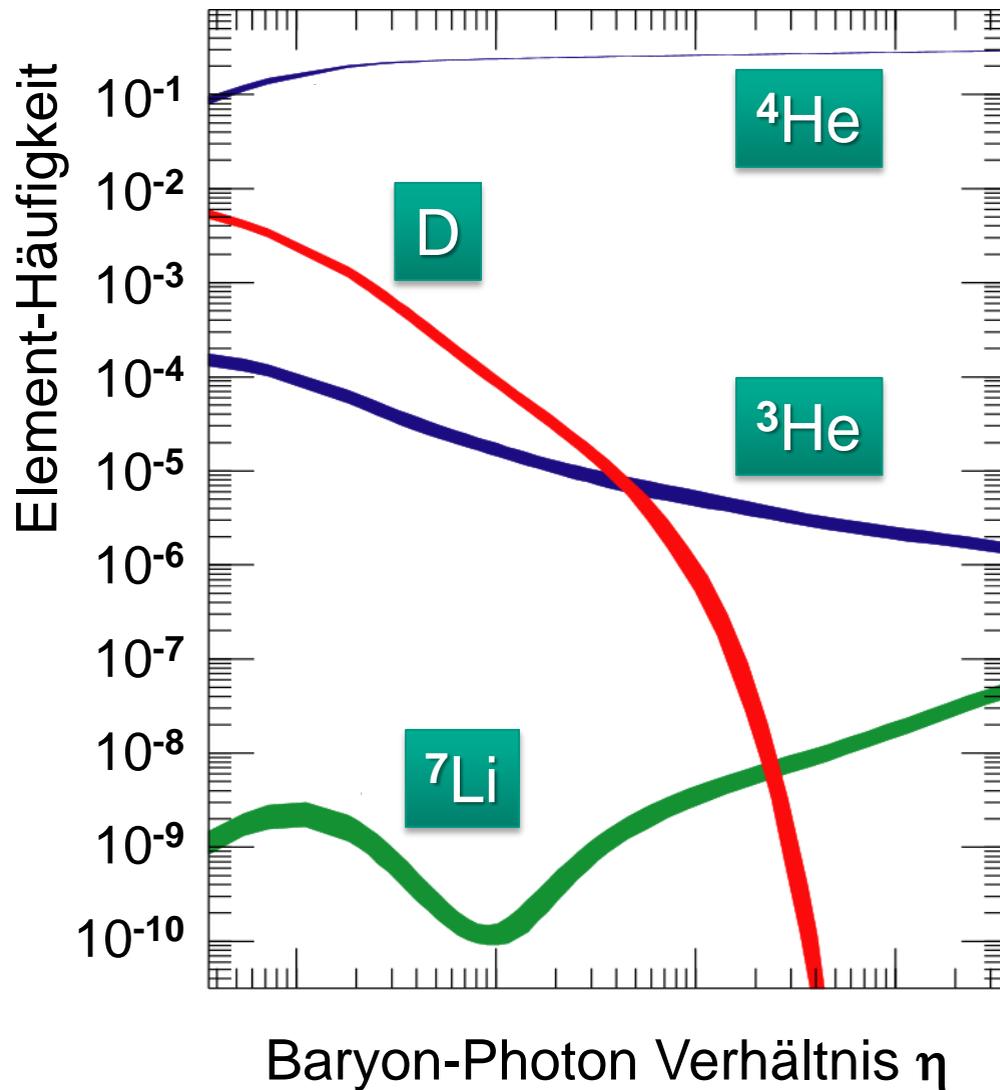


α β γ



Nukleosynthese – Modellrechnungen

- wichtigster BBN-Parameter : **Baryon-Photon-Verhältnis η**



■ Definition

$$\eta = \frac{n_{\text{Baryonen}}}{n_{\text{Photonen}}} = \frac{\text{n,p}}{\text{CMB}} \sim 10^{-10}$$

- aus der Analyse der CMBR (T_{CMBR}) ist n_{Photonen} genau bekannt!

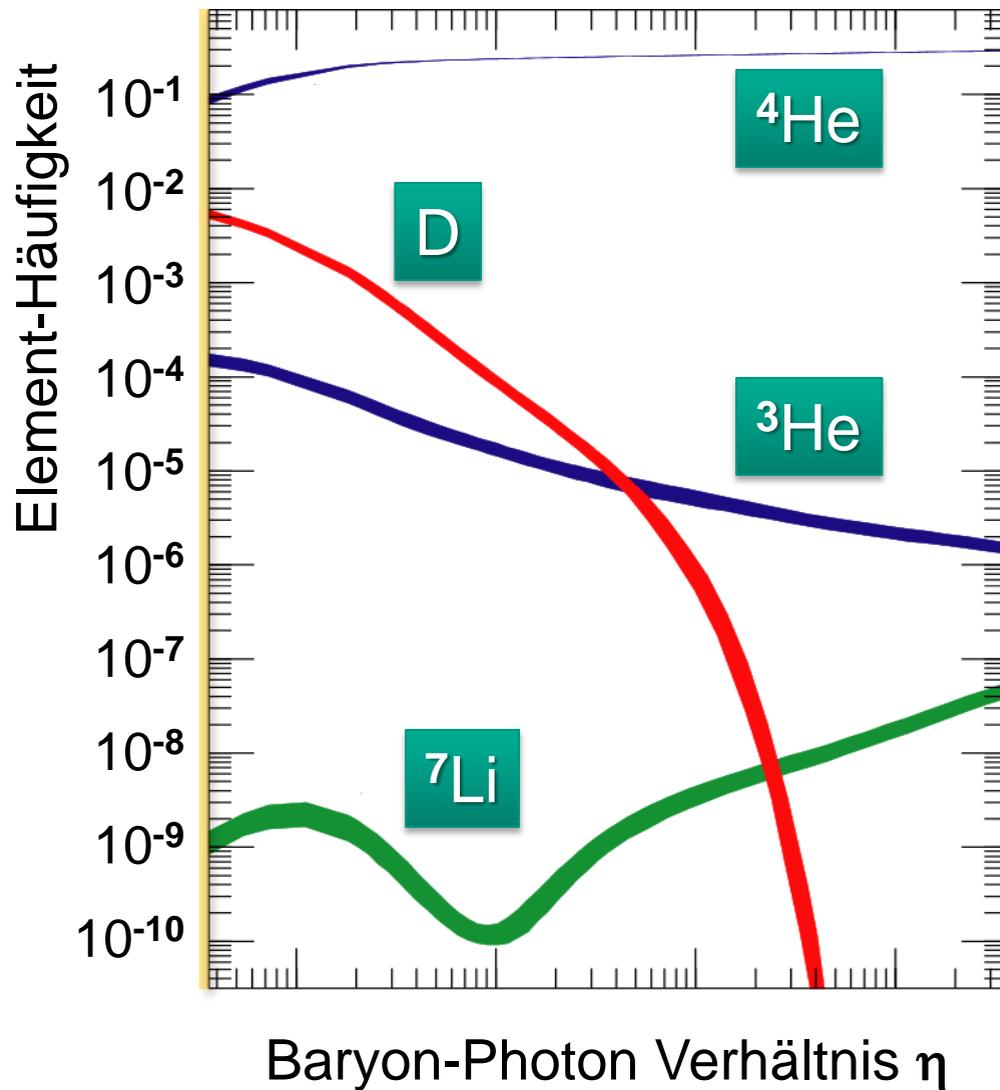
$$n_{\text{Photonen}} = (412 \pm 2) / \text{cm}^3$$

- η aus BBN erlaubt daher Bestimmung von n_{Baryonen} !

übliche Darstellung: $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$

Nukleosynthese – Modellrechnungen

- Abhängigkeit der Elementhäufigkeiten von der Baryonenzahl



Helium-4

größeres η : höhere T_{BBN} , größeres n/p – Verhältnis \rightarrow mehr Helium-4 wird erzeugt

Deuterium

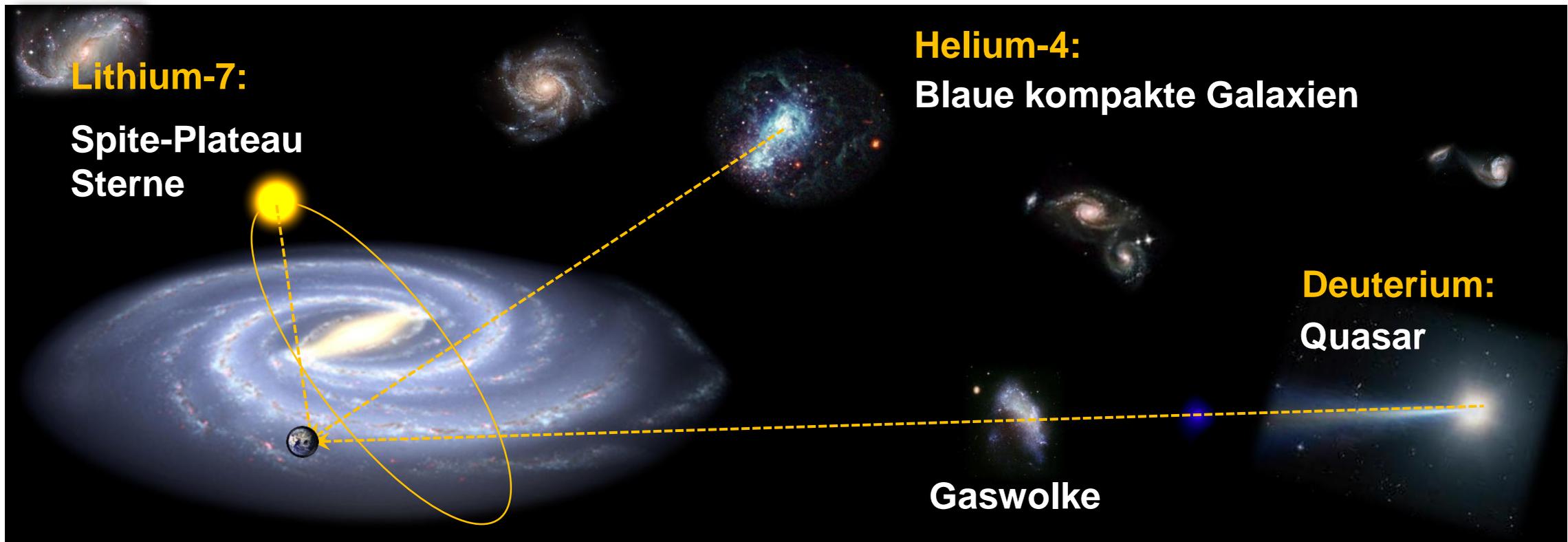
größeres η : mehr Material wird fusioniert \rightarrow weniger Deuterium bleibt übrig

Lithium-7

größeres η : ${}^4\text{He}({}^3\text{H},\gamma){}^7\text{Be}$ dominant
kleineres η : ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ dominant

Bestimmung der Elementhäufigkeiten

- ^4He :** galaktische HII-Regionen und blaue kompakte Galaxien – Beobachtung der **He^+ Rekombination**
- ^2H :** Quasar-Absorptionslinien von ^2H (**Ly- α Linien**) in extragalakt. Wolken
- ^7Li :** Spektroskopie von Atmosphären von Halo-Sternen (Spite-Plateau)



Helium-4 Häufigkeit

■ Objekte:

- Blue Compact Dwarf (BCD) Galaxien**
- metallarme, gasreiche Galaxien mit großen Sternentstehungsgebieten
 - ↳ UV-Licht massereicher Sterne,
 - H-II Regionen: Ionisation des interstellaren Mediums (**He-I**)

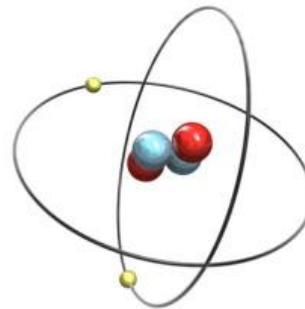
■ Beobachtung:

Emissionslinien durch die Rekombination von interstellarem He-I

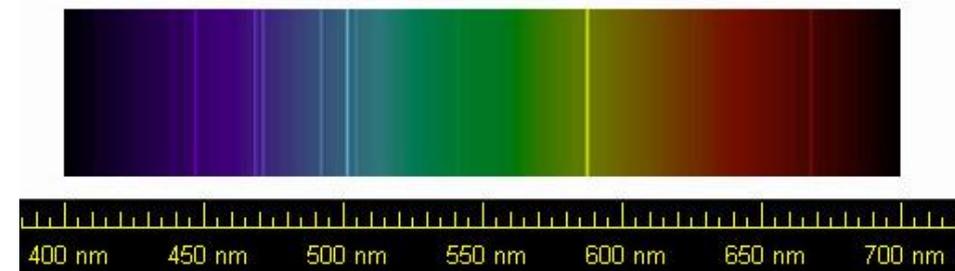
- bester Übergang:

$1s\ 3d\ (23.07\ \text{eV}) \rightarrow 1s\ 2p\ (20.96\ \text{eV})$:

$\Delta E = 2.11\ \text{eV}$ ($\lambda = 587.6\ \text{nm}$, gelb)



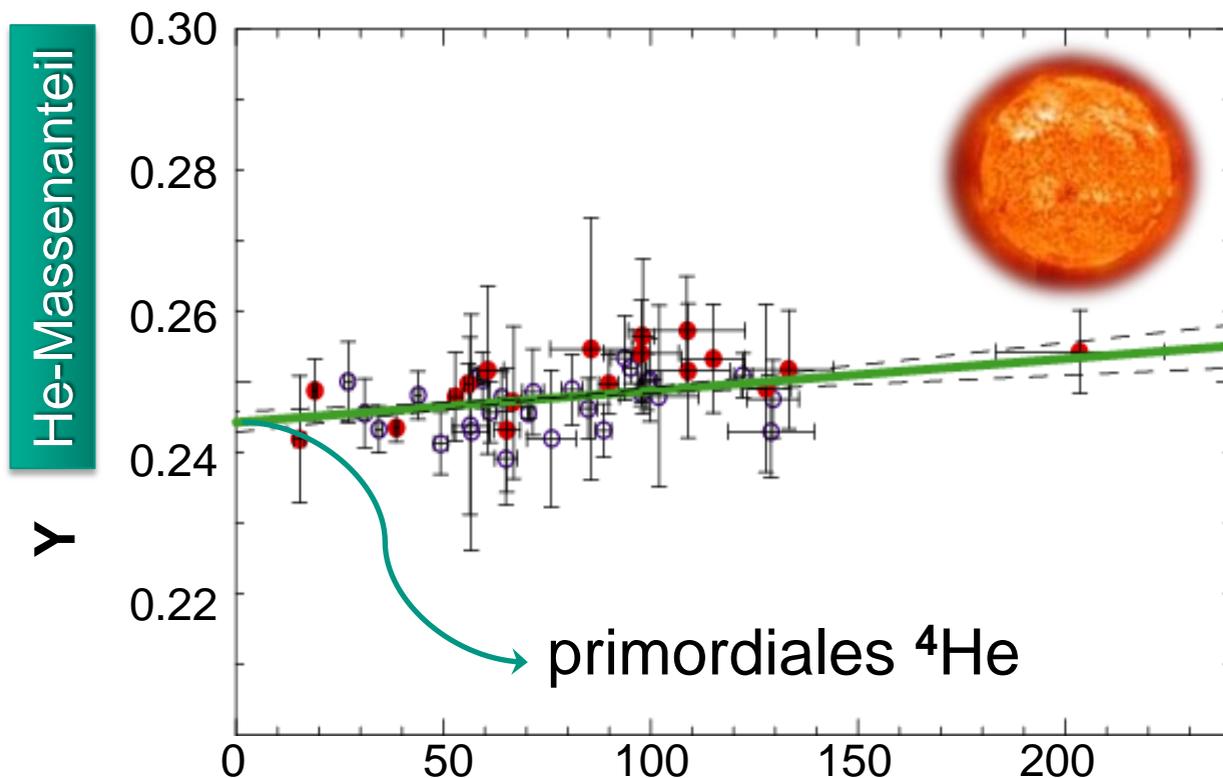
$\lambda = 587.6\ \text{nm}$



Helium-4 Häufigkeit: Messungen

- **Systematik:** der primordiale Helium-4 Massenanteil Y wird durch die Kernfusionsreaktionen in Sternen ($4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e$) erhöht, ↪ Suche nach **metallarmen Sternen** (Metallizität: Sauerstoff O / Wasserstoff H)

- **Analyse:** Auftragung von Y als Funktion der Metallizität O/H, dann wird extrapoliert zu O/H = 0 (keine Metalle, d.h. primordialer BBN-Anteil)



$$Y_p = \frac{2(n/p)}{1+n/p} \cong 0.25$$

- heutiger Wert [PDG 2012]:
Particle Data Group

$$Y_p = 0.249 \pm 0.009$$

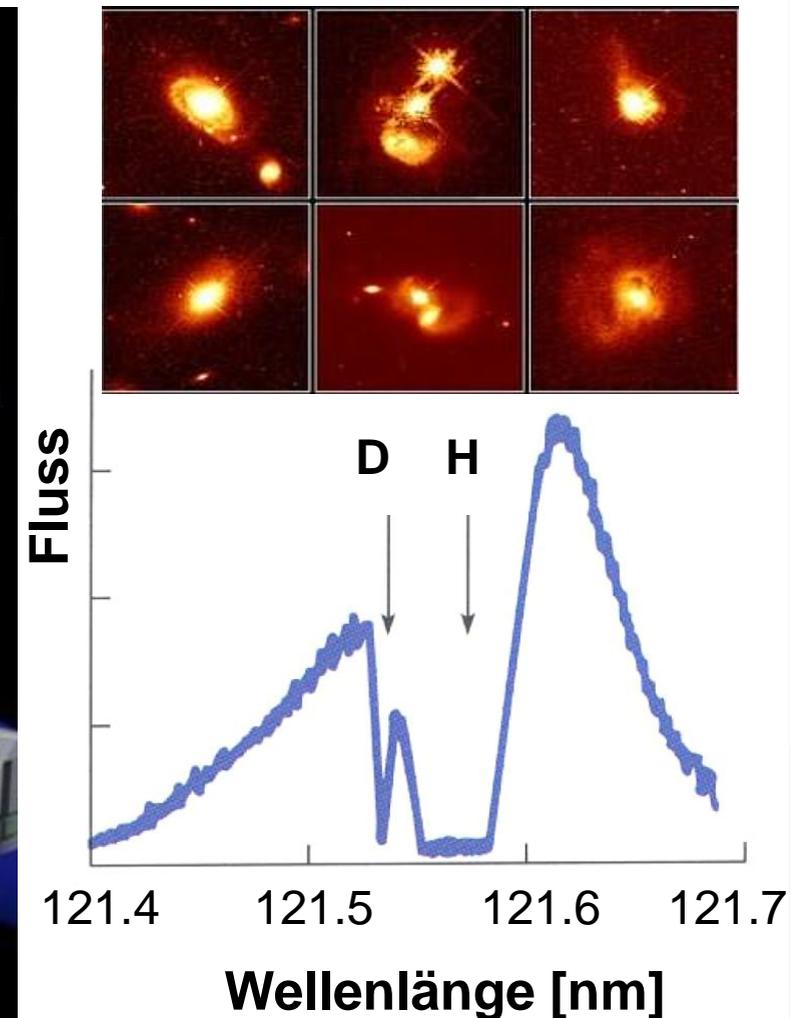
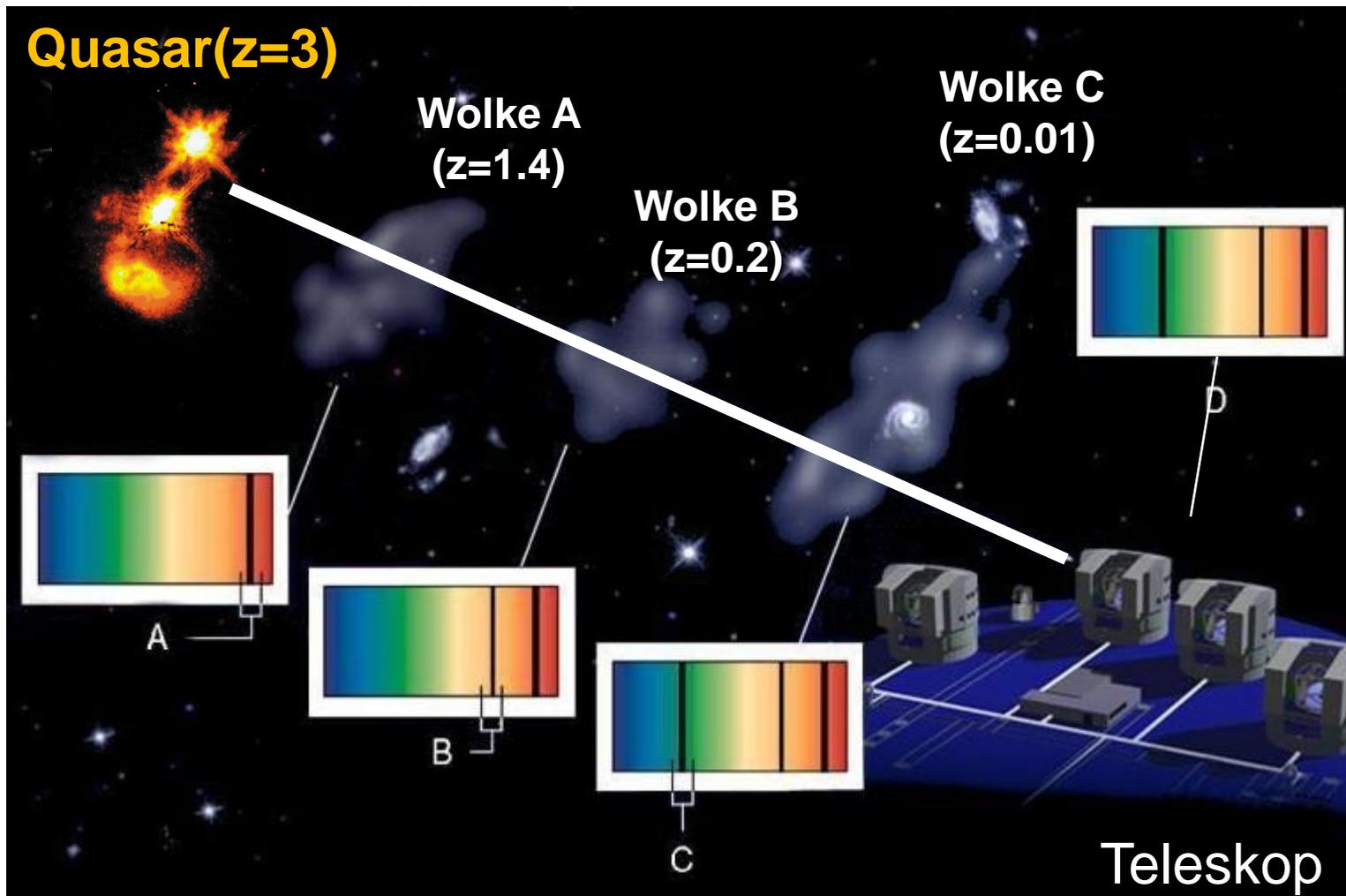
BAZINGA!

Metallizität $[10^6 \cdot (O/H)]$



Deuterium – Häufigkeit

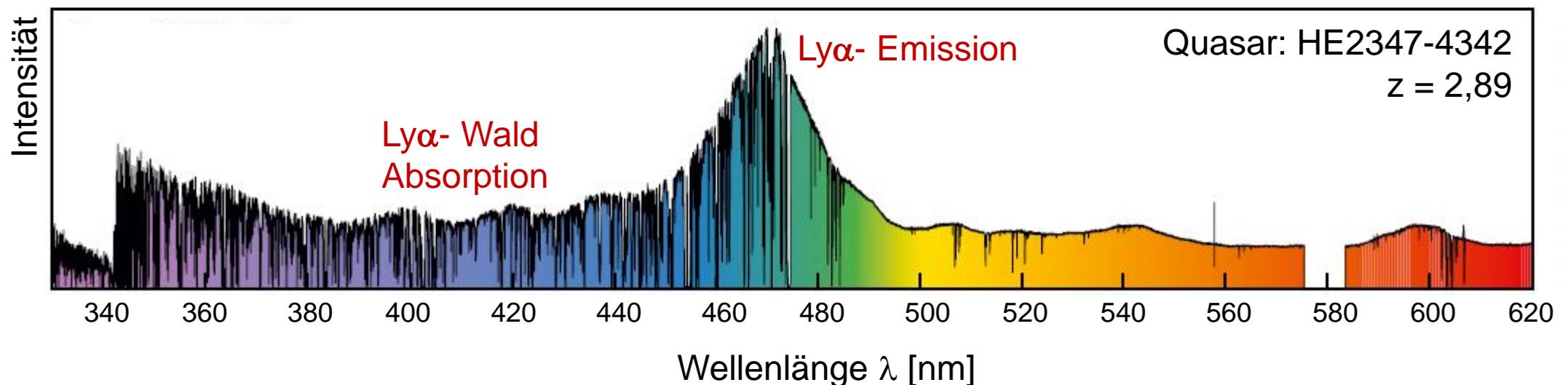
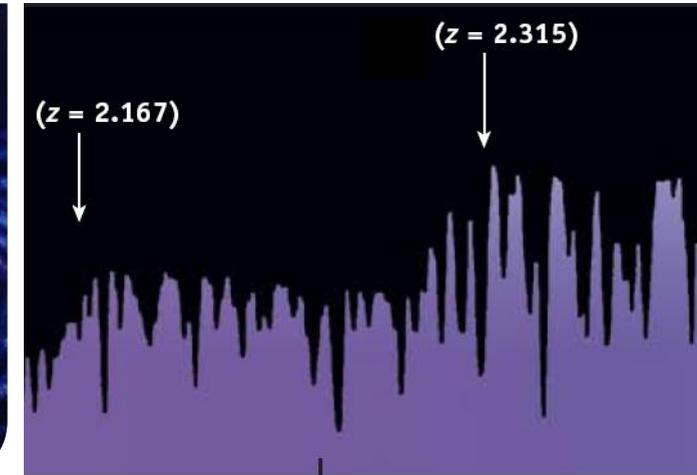
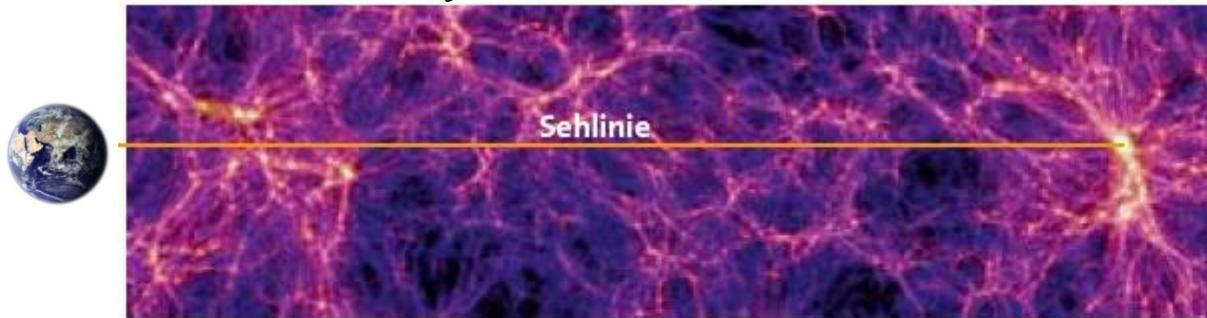
- **Beobachtung:** Lyman α – Absorptionslinien von neutralem Wasserstoffgas bei $\lambda_i = 121.6 \times (1+z)$ nm gegen ferne Quasare (breite Emission)
Problem: spektroskopische Trennung der Ly α -Linien von ^1H und ^2H



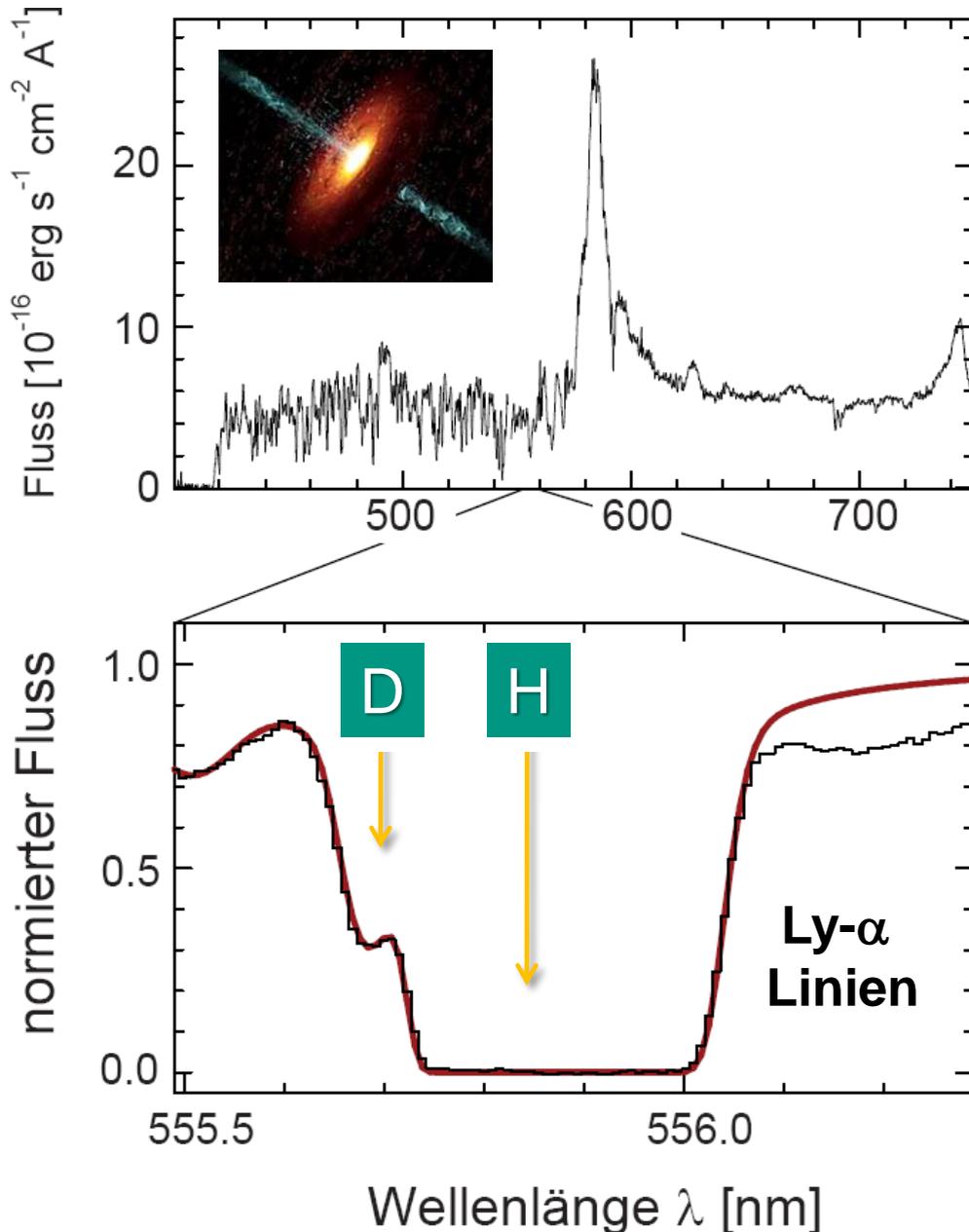
Deuteriumhäufigkeit: der Lyman α -Wald

- Deuterium wird in Sternen fusioniert (zerstört), daher Suche nach alten Objekten, \rightarrow **größter experiment. Wert definiert D-Häufigkeit**
Beispiel: Quasar HE2347-4342 ($z = 2.89$) Lyman α - Absorption sichtbar

Lyman - α Wald



Deuteriumhäufigkeit: Ly- α Linienprofile



■ Probleme bei der Datenanalyse:

- Dopplerverbreiterung** der Absorptionslinien (Rotationseffekte in der Wolke)
- Sättigung** der H Ly- α -Linie, sobald die Ly- α Linie von D sichtbar ist (Intensitätsverhältnis $10^5:1$)
- minimale Unterschiede** der Ly- α -Linien von H und D : $\Delta E/E = 2.7 \times 10^{-4}$
reduzierte Masse $m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$

■ heutiger Wert für D [Particle Data Group]:

$$\frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}} = (2.82 \pm 0.21) \times 10^{-5}$$

stat. + syst. Fehler

Lithium-7 Häufigkeit

Objekte:

metall-arme, sehr alte Population-II Sterne im galaktischen Halo mit dünner Konvektionszone

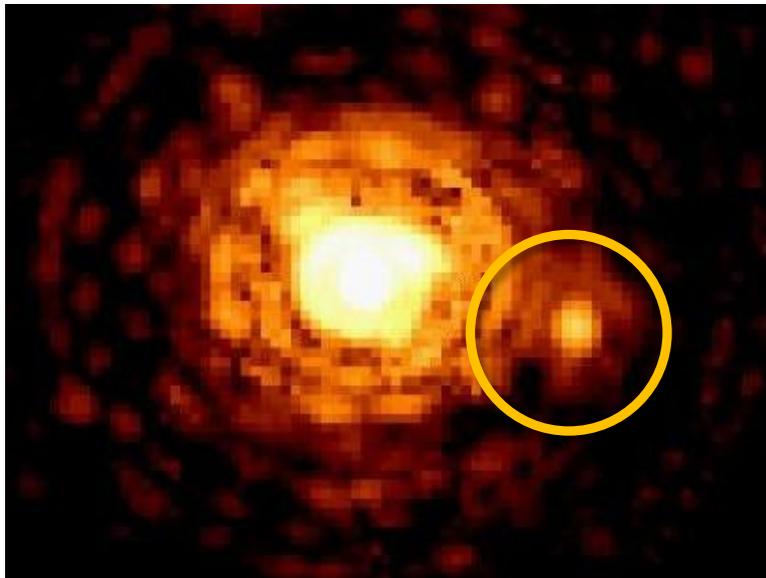
Oberflächen-Temperatur $T > 5500 \text{ K}$ *'halo dwarves'*

Methode:

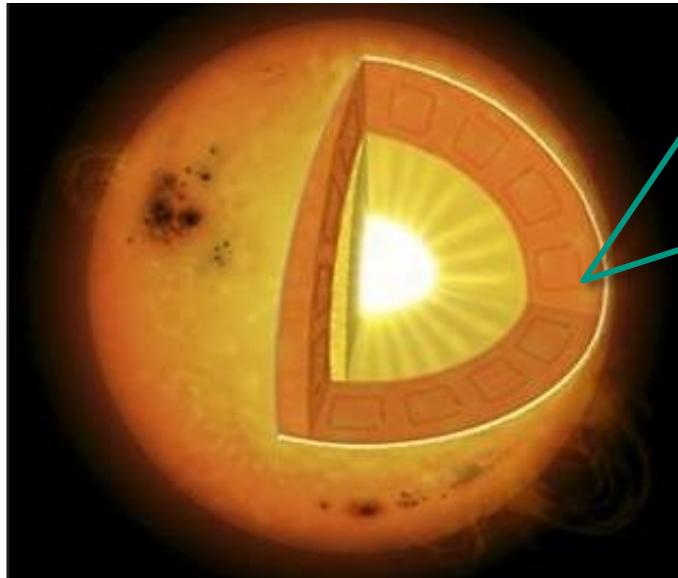
Spektroskopie der Sternatmosphäre: Beobachtung von ${}^7\text{Li}$ -Resonanz-Absorptions-Doublets bei $\lambda = 670.7 \text{ nm}$

Systematik:

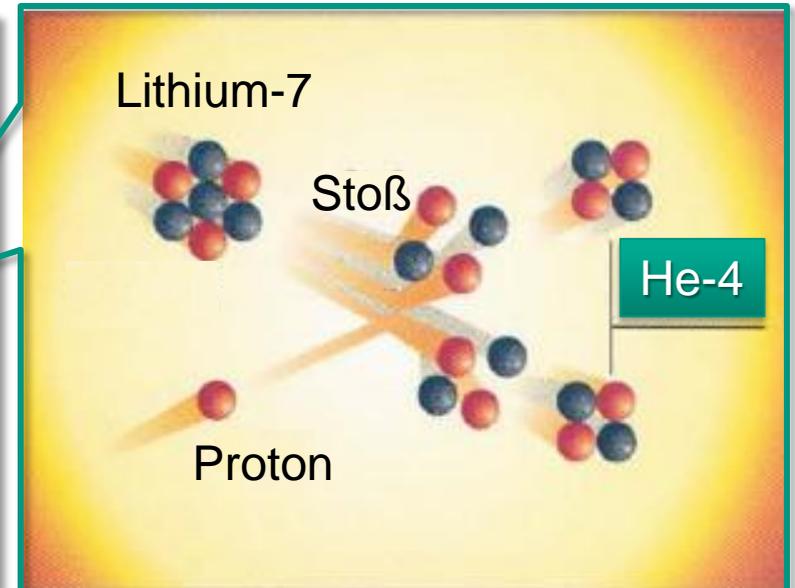
${}^7\text{Li}$ wird bei $T > 2,5 \cdot 10^6 \text{ K}$ zerstört (*tiefe Konvektionszone!*)



Zwergstern Gliese 623b (d=8 pc)
G623b: $L \sim 2 \times 10^{-5} L_{\odot}$ $m \sim 0.1 m_{\odot}$



Konvektionszone: ${}^7\text{Li}$ wird sofort verbrannt bei hohem T



${}^7\text{Li}$ -Brennen in Sternen:
 ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$

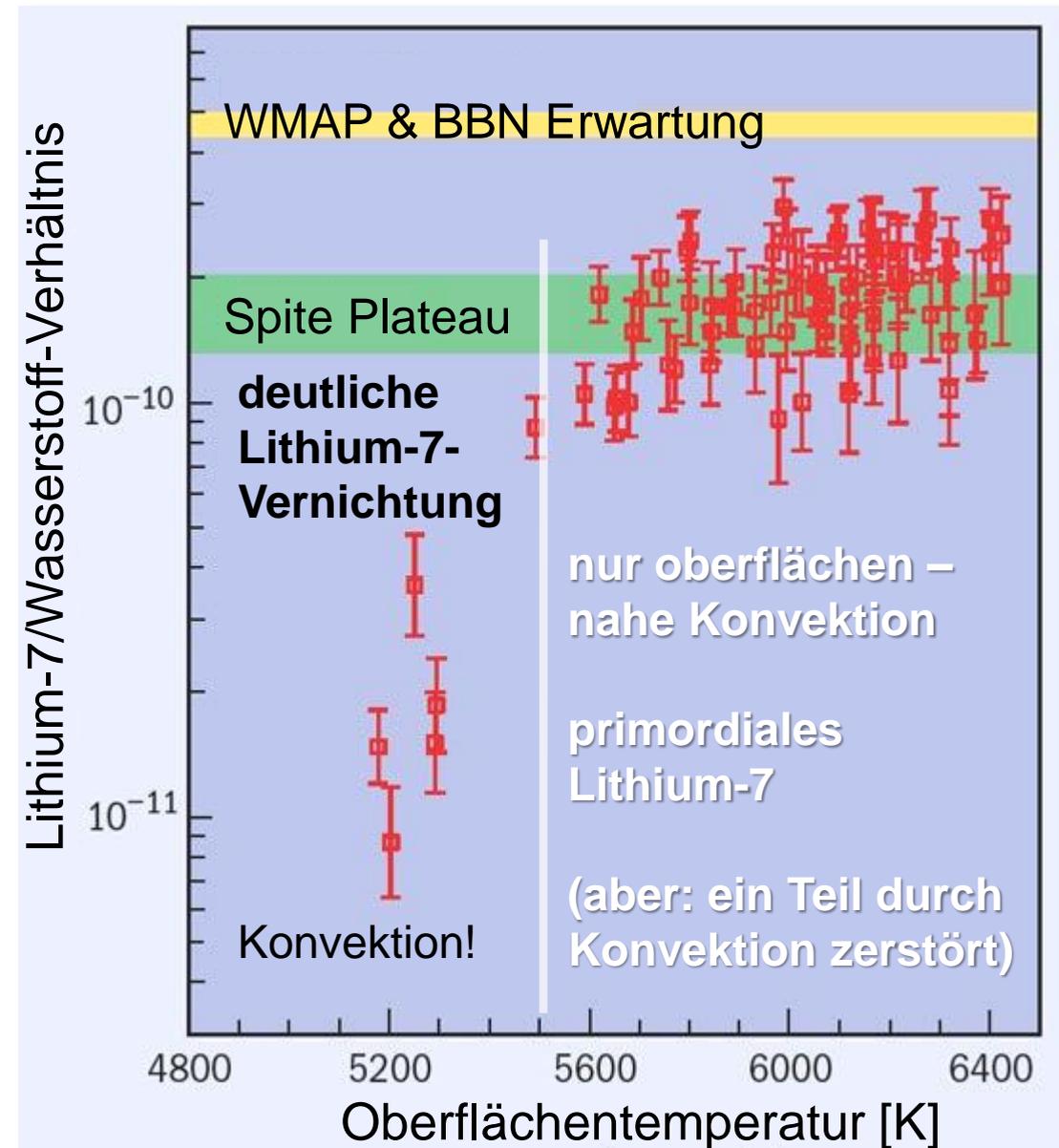
Lithium-7 Häufigkeit (Li-Anomalie)

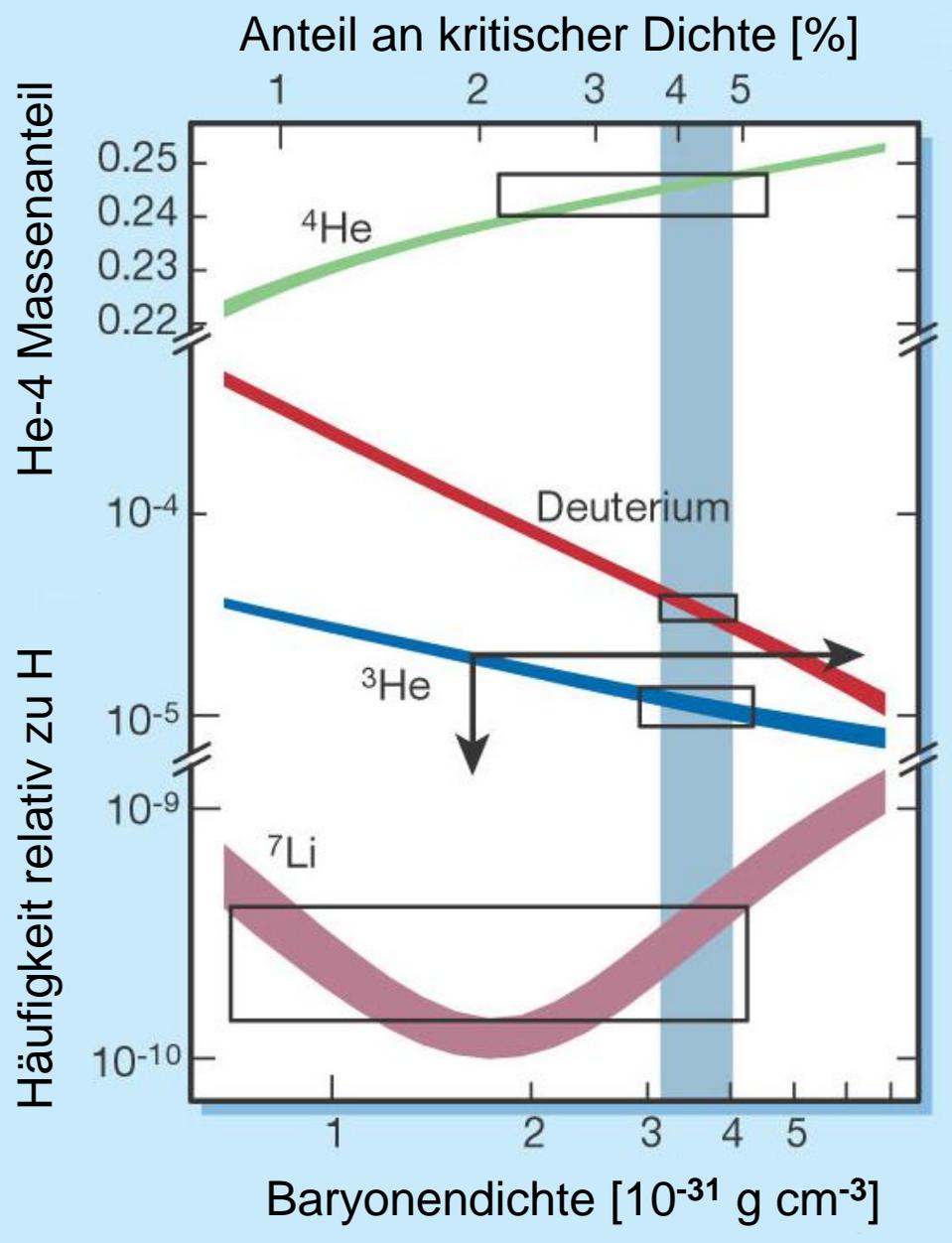
- heutiger Wert für Li-7 [Particle Data Group 2012]:

$$\frac{{}^7\text{Li}}{{}^1\text{H}} = (1.7 \pm 0.06 \pm 0.44) \times 10^{-10}$$



- 2005: Li-7 Analysen in metallarmen Kugelsternhaufen zeigen **systematische Konvektionseffekte** (Li-7 wird verbrannt)





- **Kombination experiment. Resultate** von D, ³He, ⁴He & ⁷Li ergibt im Rahmen der systematischen Fehler konsistente Resultate (Konkordanz) [PDG 2012] :

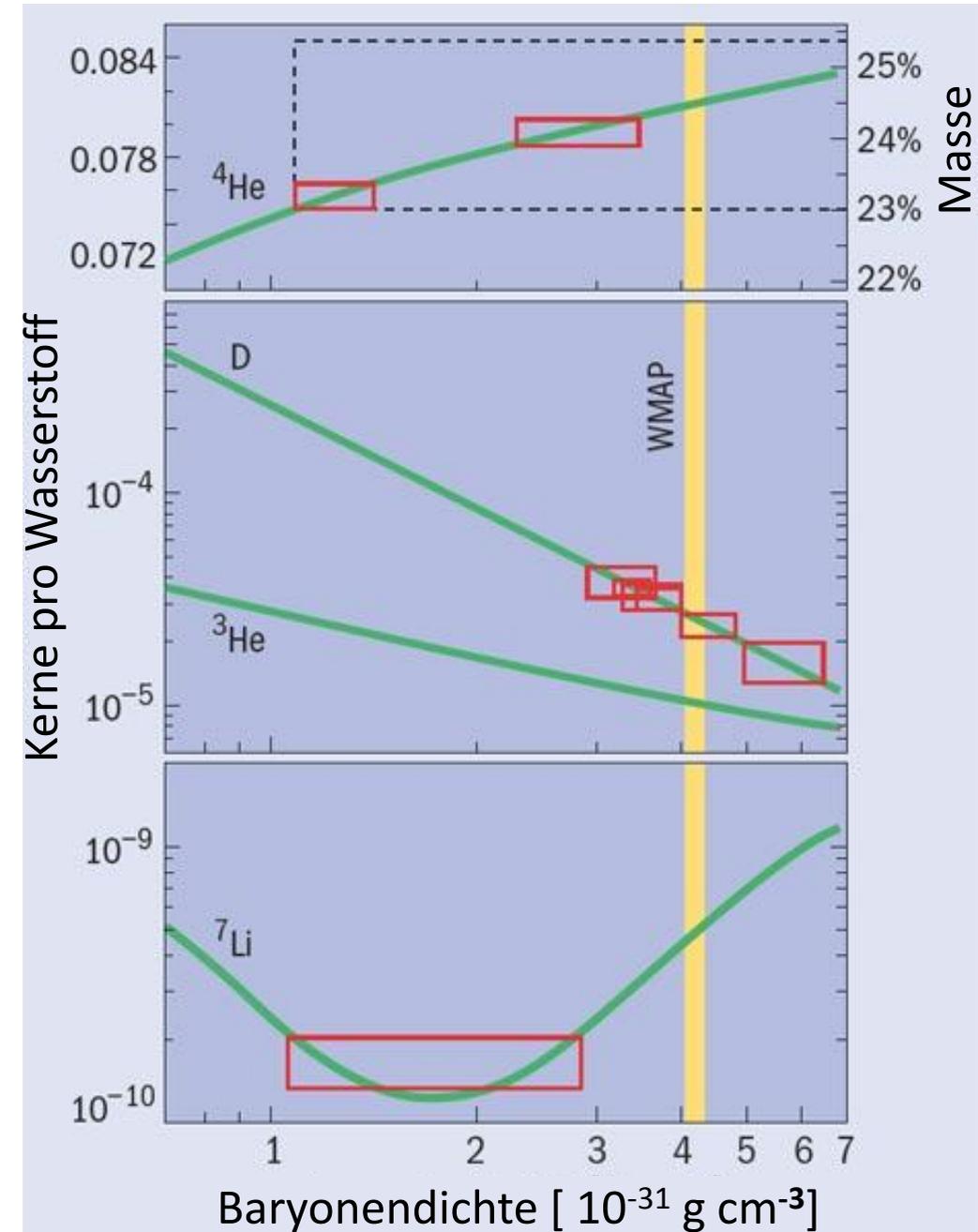
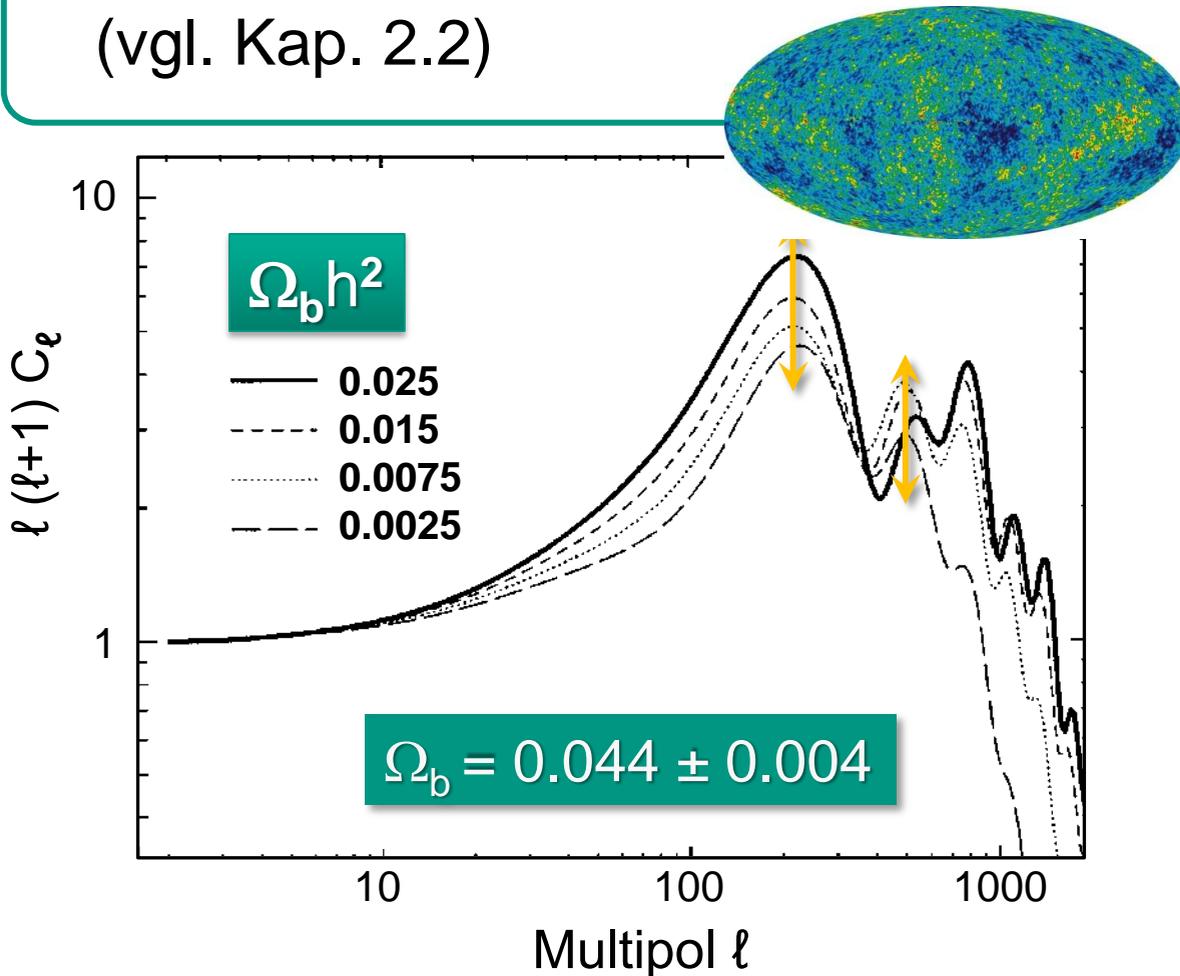
$$5.1 \leq \eta_{10} \leq 6.5 \quad (95\% \text{ CL})$$

- $N(\gamma)$ ist bekannt aus CMB (vgl. Kap. 2.2)
 \Rightarrow mit $\eta_{10} = 273.9 \cdot \Omega_b h^2$ ergibt sich für **Baryonendichte Ω_b** :

$$0.019 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024 \quad (95\% \text{ CL})$$

- $h^2 = 0.5 \Leftrightarrow$ Baryonendichte $\Omega_b \sim 3-5 \%$ aber: leuchtende baryonische Materie $\Omega_{b,lum} \sim 0.3\%$, $\sim 90\%$ nichtleuchtende baryonische Materie (**heißes Clustergas**)

■ **kosmische Hintergrundstrahlung:**
 erlaubt eine genaue Bestimmung von Ω_b aus der **Analyse der akustischen Peaks** des Multipolspektrums
 (vgl. Kap. 2.2)



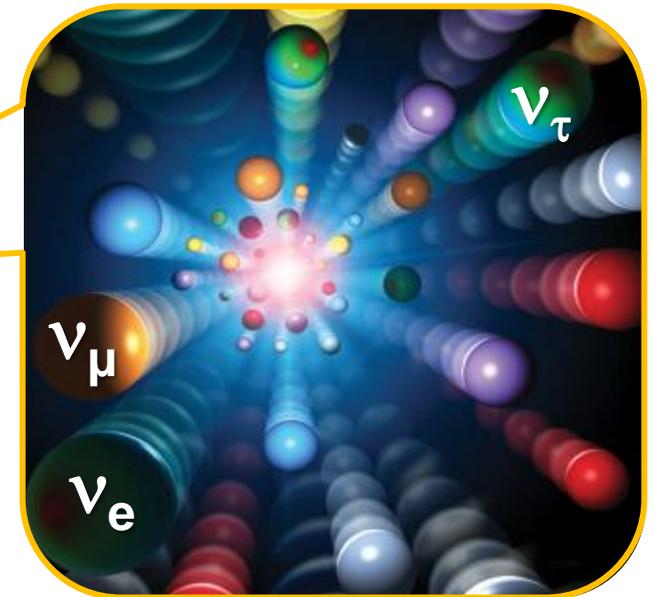
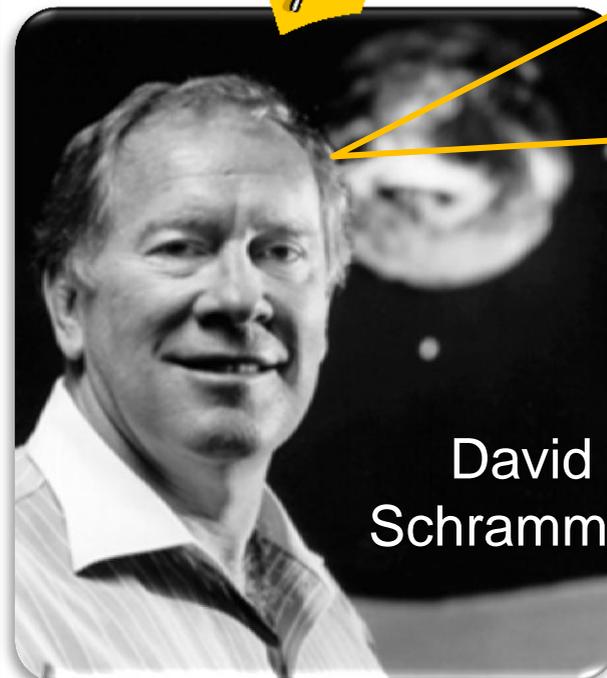
■ BBN erlaubt Tests fundamentaler Physik

- falls Baryonzahl genau bekannt (z.B. durch D oder ${}^7\text{Li}$), erlaubt ${}^4\text{He}$ -Rate Schlüsse auf die Anzahl N der Teilchengenerationen, d.h. gilt $N = 3, 4 \dots$?
- *Schramm et al.* leiten aus BBN (${}^4\text{He}$ -Rate) erste Obergrenzen ab für **N_ν (Anzahl der ν -Generationen)** – 1977: $N_\nu < 7$, 1980: $N_\nu < 4$

■ grundlegende Idee:

${}^4\text{He}$ -Rate in der BBN abhängig von der Expansionsrate des Universums bei $T = 1 \text{ MeV}$, d.h. von der Energiedichte aller relativistischen Teilchen:

- Photonen
- Elektronen (Positronen)
- **Neutrinos**



BBN & Anzahl der ν -Generationen N_ν

- Zeit und Ort: strahlungsdominiertes Universum vor Beginn der BBN ($t = 1\text{s}$)
T = 1 MeV – Phase II (Ausfrieren schwache Wechselwirkung)

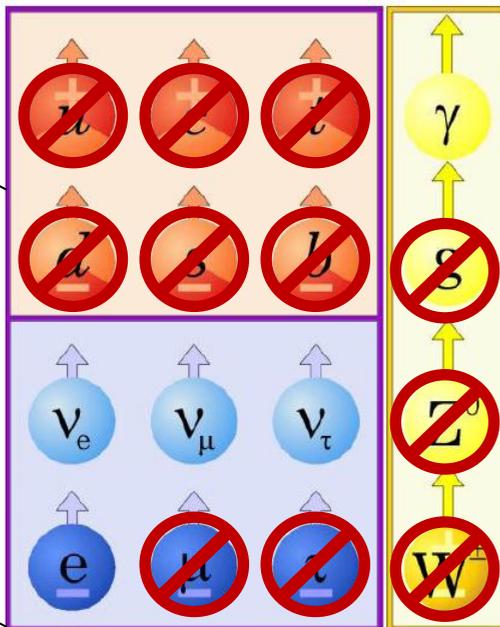
Beiträge zur Energiedichte
 $\rho_{tot}(t)$ nur durch
relativistische Teilchen



Expansionsrate:

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho_{tot}(t)$$

alle Quarks in
 nichtrelativ. n,p



γ 's (CMB)

e^-/e^+

3 ν 's

μ, τ sind
 zerfallen

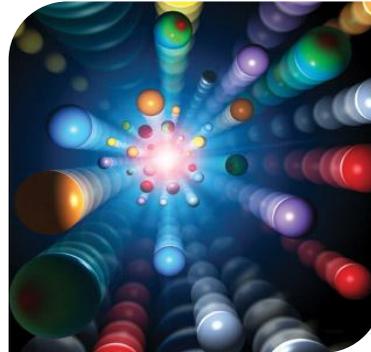


$$\rho_{tot}(t) = \rho_\gamma(t) + \rho_{e^-,e^+}(t) + 3 \cdot \rho_\nu(t)$$

BBN & Anzahl der ν -Generationen N_ν

- Zusätzliche Neutrino-Generationen erhöhen die Expansionsrate im frühen Universum, pro Neutrino-Generation um $7/43 = 16\%$

kleine, wichtige Ergänzung:
Photonen sind Bosonen,
Elektronen & Neutrinos
sind Fermionen



$$\rho_{tot}(t) = \left[1 + \frac{7}{8} \cdot (2 + 3) \right] \cdot \rho_\gamma(t)$$
$$= (43/8) \cdot \rho_\gamma(t)$$

statistische Gewichtung:
Bosonen [=1]
Fermionen [=7/8]



Expansionsrate:

$$\left(\frac{\dot{H}(t)}{H(t)} \right)^2 \sim 1 + \frac{7\Delta N_\nu}{43}$$

ΔN_ν : zusätzliche
Neutrino-Generation(en)

BBN & Anzahl der ν -Generationen N_ν

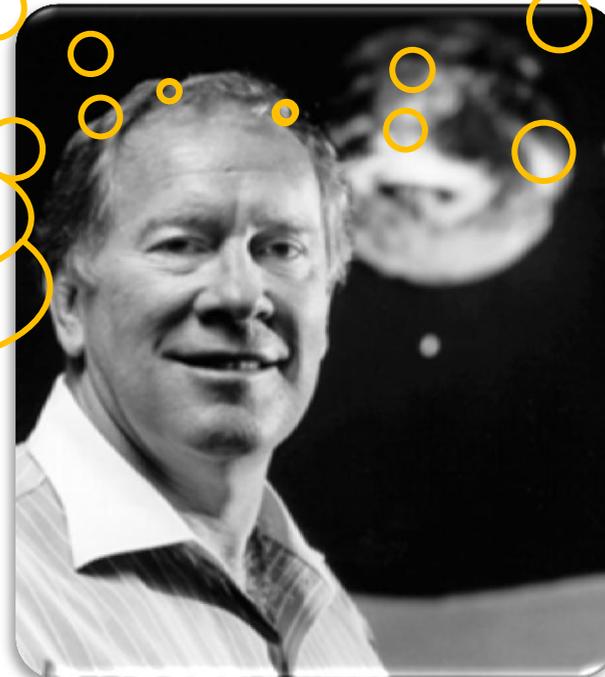
- Argumentationskette: **frühere** Entkopplung der schwachen Ww. \Rightarrow mehr Neutronen verfügbar (vgl. S. 3 Bild rechts unten) \Rightarrow mehr ^4He erzeugt

ansteigende Ausfrier-
temperatur T_F



^4He -Rate ist abhängig
von n/p Verhältnis

mehr Neutronen
stehen zur Verfügung !



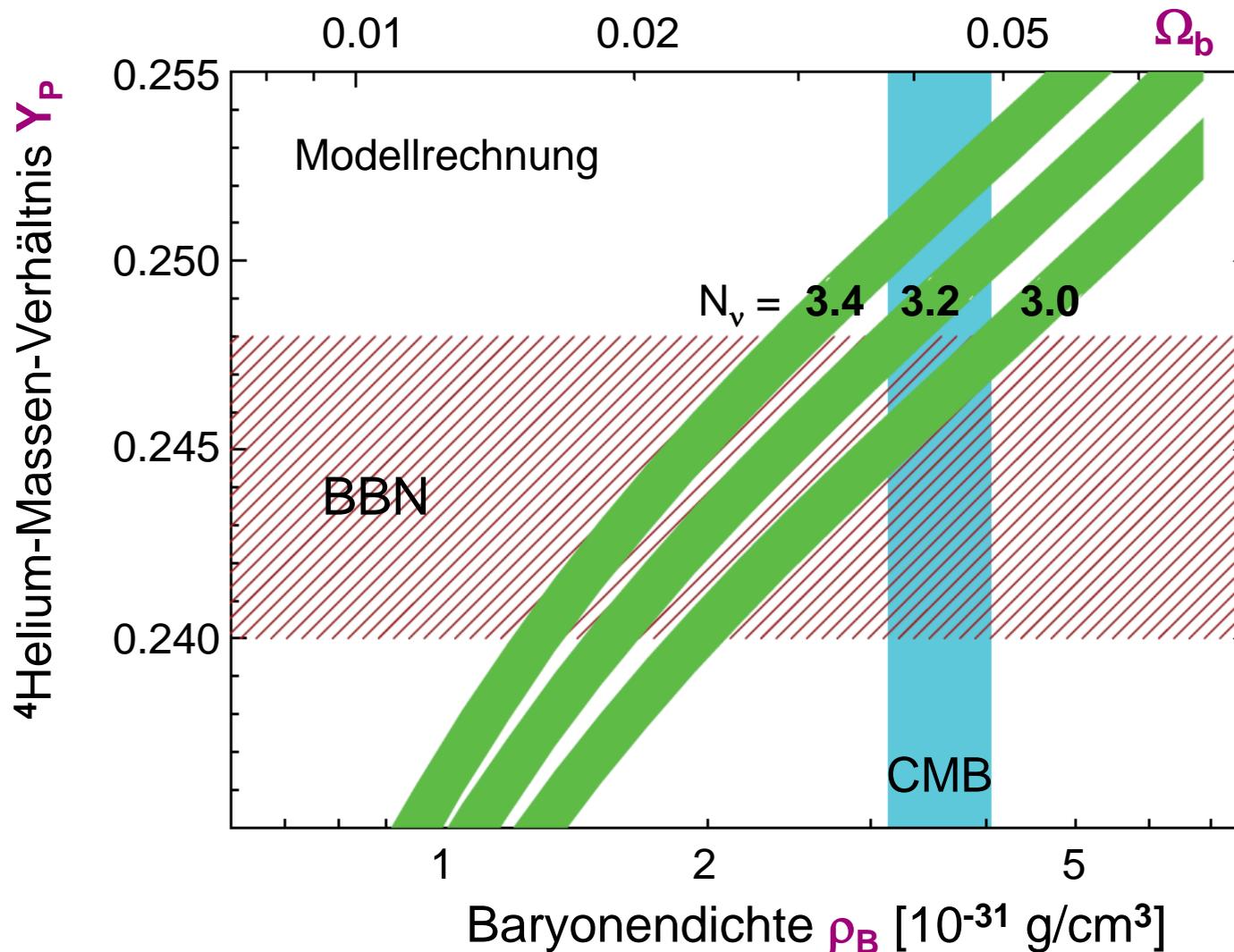
^4He -Rate steigt an

$$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau \quad \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$$

man erwartet für das
Standardmodell
 $N_\nu = 3.046$

BBN & Anzahl der ν -Generationen N_ν

- aus der Analyse der BBN ergibt sich klare Präferenz für $N_\nu > 3$ (95%CL.), dies könnte auf leichte sterile ν 's mit keV-Massen hindeuten (vgl. Kap. 4.4)



↓

$\eta_{10} = 5.1 \dots 6.5$

↓

$\Omega_b h^2 = 0.019 \dots 0.024$

↓

N_ν (BBN) < 4.2 (95%Cl.)

N_ν : Anzahl leichter ν -Generationen mit Masse $M < 1$ MeV

aktuelle BBN-Werte (2010)
 $N_\nu = 3.7 \pm 0.7$ (2σ)