Kosmologie und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, PD Dr. Daniel Bemmerer

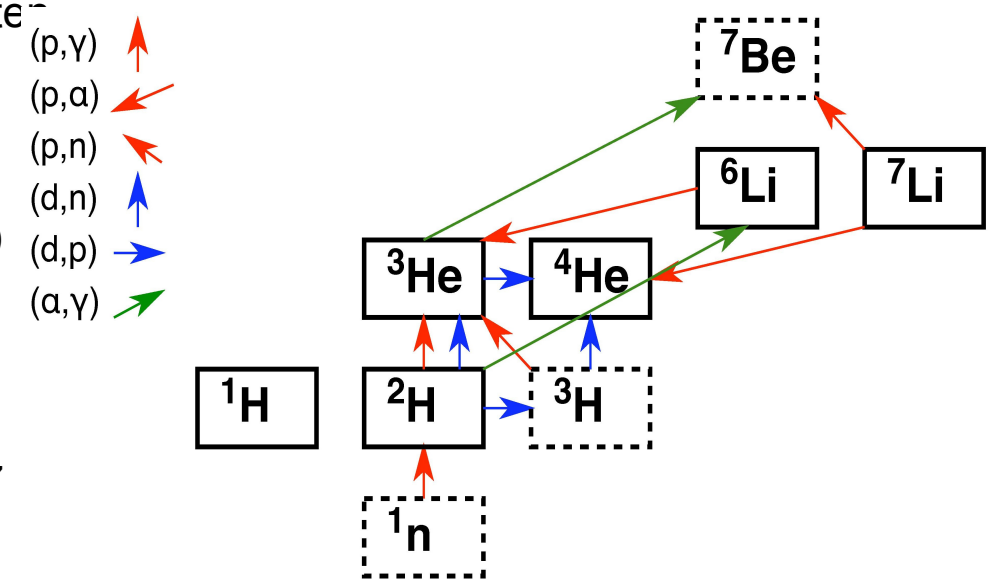
- Einführung in die Kosmologie
- Weltmodelle und kosmologische Inflation
- Thermische Geschichte des Universums
- **Urknall-Nukleosynthese**
- Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- **Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung**
- Supernovae als kosmische Standardkerzen
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- Altersbestimmung des Universums
- Fundamentale Physik und die Sonne

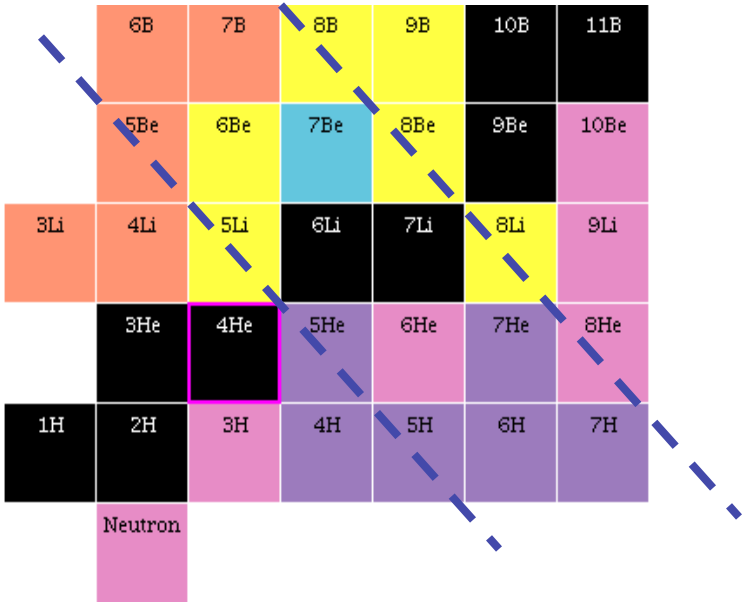
8. Vorlesung, 03.06.2013

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Partner von DRESDEN concept exzellenz-dresden.de
HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Entstehung von ^{2}H, ^{3}He, $^{7}Be \rightarrow ^{7}Li$, vielleicht auch ^{6}Li parallel zu ^{4}He

- Reaktionsnetzwerk bestimmt Häufigkeiten
- Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung von Eingabewerten aus Experiment und Theorie (Mikrokosmos)
- ^{7}Be (Halbwertszeit 53 d) wird zu ^{7}Li
- Keine Entstehung von Kernen mit A > 7

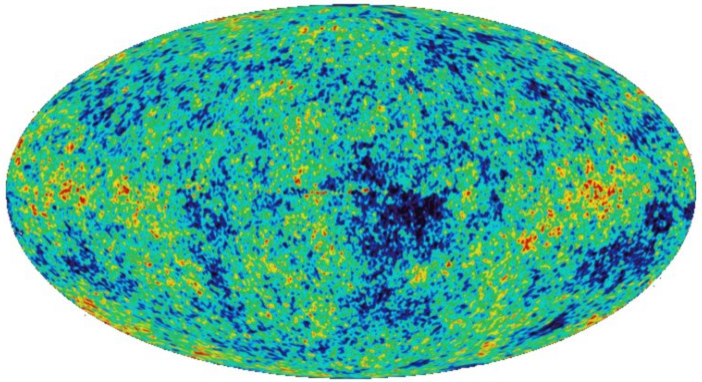


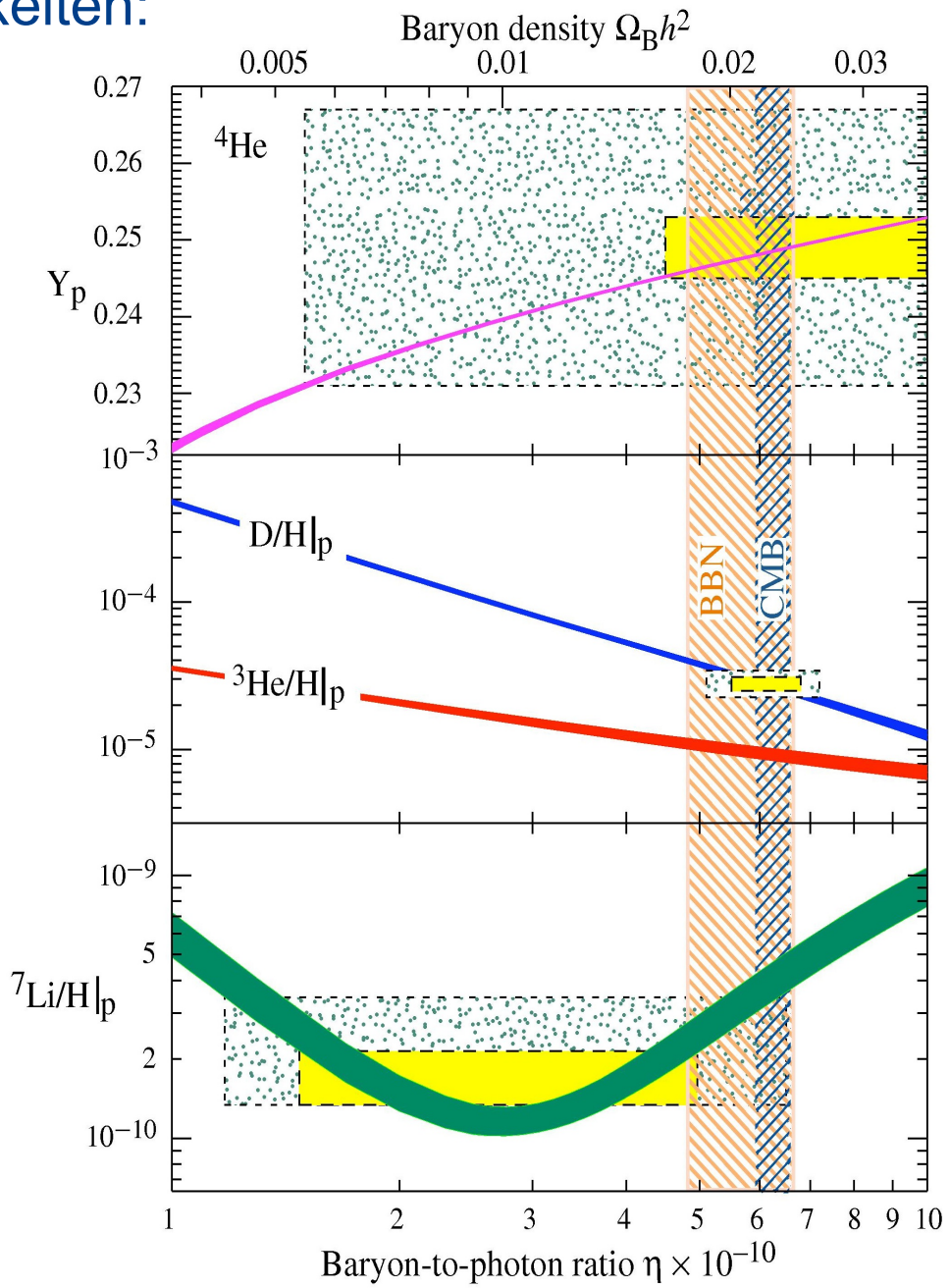


- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in ^{4}He gebunden
- Coulombschwelle ~Z_1Z_2 behindert den Einfang von ^{4}He
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei ^{7}Li

Gesamtschau der Nuklidhäufigkeiten: ^{4}He, ^{2}H, ^{7}Li

Vorhersage und Beobachtung stimmen einigermaßen überein für diese drei Nuklide!



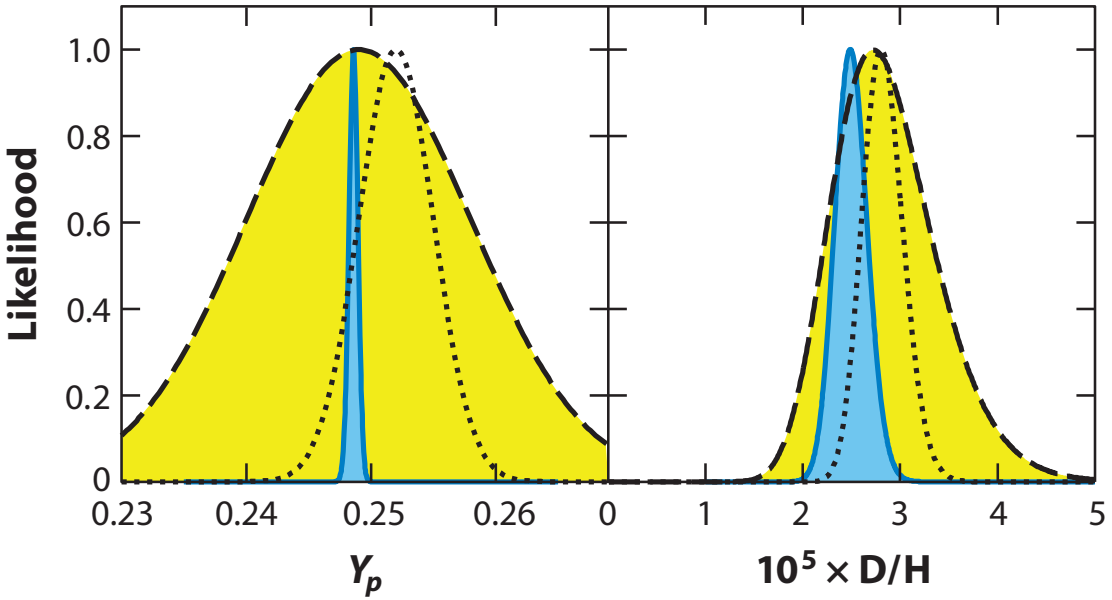


Vorhersage und Messung: ^{4}He, ^{2}H, ^{7}Li

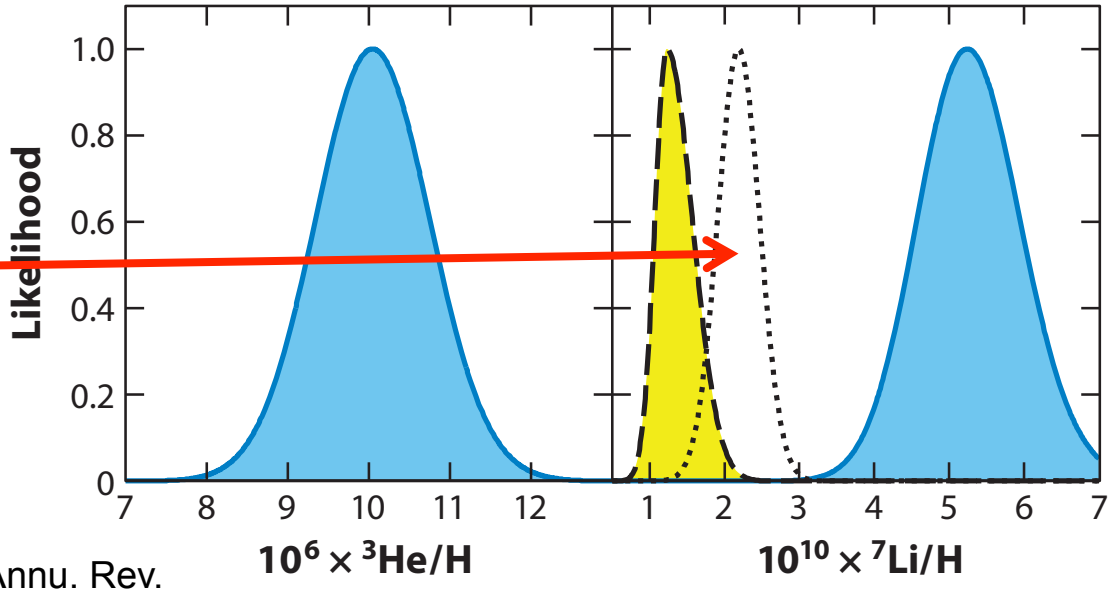
Blau = Vorhersage, basierend auf CMB

Geld = Messung

Gepunktet = Messung, mit anderem Auswerteverfahren

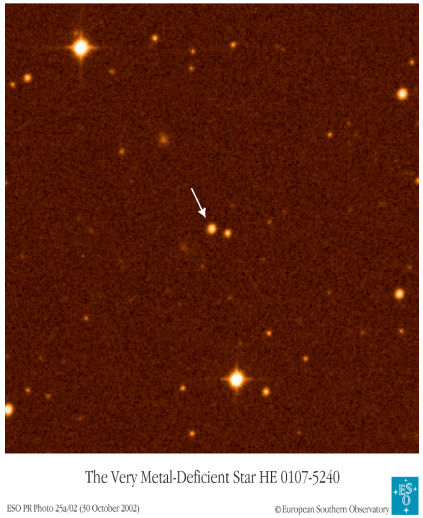


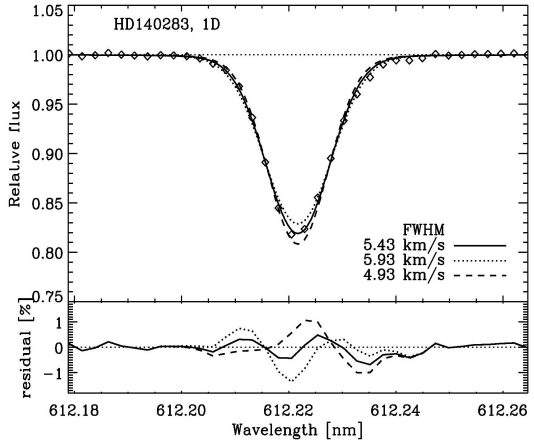
Lithium-(7-) Problem der Kosmologie



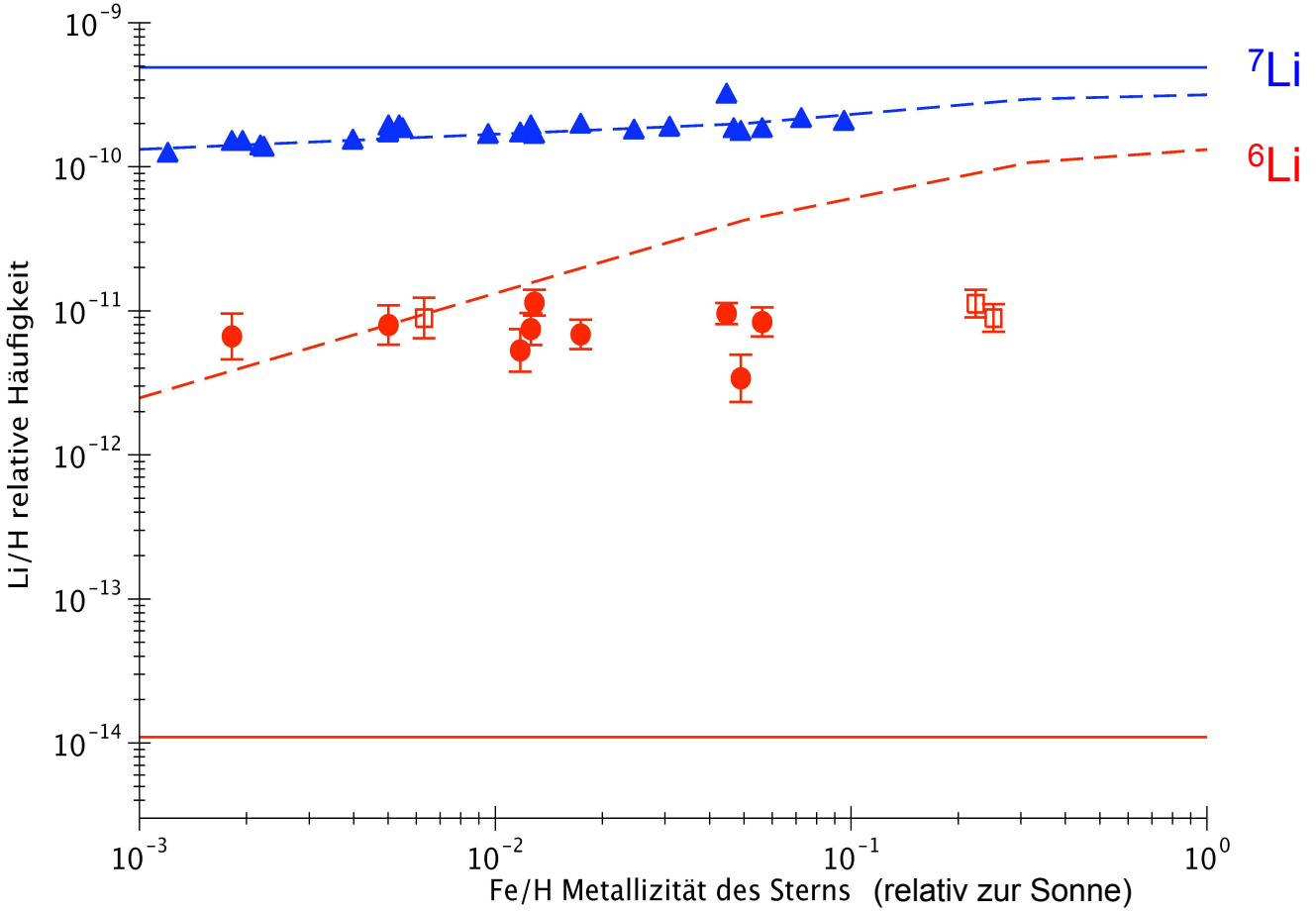
(B. Fields, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2011)

Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-”Plateau”





- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit A>7
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null



Kernreaktionen: Definition des Wirkungsquerschnitts

Reaktion A(a,b)B a= Projektil A = Target

- Geometrische Vorstellung: Immer, wenn ein Projektil die am Target “angeheftete” Fläche σ trifft, findet die Reaktion A(a,b)B statt

$$\frac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}} = \sigma \cdot \text{Targetatome} \frac{\text{Projektile}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

- Praktisch messbar:
  Atommasse

  Targetatome pro Fläche = Dicke * Dichte /

  Projektile pro Zeit = Ionenstrom

$$\sigma = \frac{\frac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}}}{\frac{\text{Targetatome}}{\text{Fläche}} \cdot \frac{\text{Projektile}}{\text{Zeit}}}$$

Besonderheiten:

- Differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$
- Partieller Wirkungsquerschnitt $\sigma_{tot}=\sigma_{elast}+\sigma_{inelast}$

Lebensdauer und Halbwertszeit

- Differentialgleichung des radioaktiven Zerfalls, und ihre Lösung:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$

- Lebensdauer τ, Zerfallskonstante λ und Halbwertszeit $t_{1/2}$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- Bei verschiedenen Zerfallsmöglichkeiten ein- und desselben Kerns addieren sich die $\lambda_{1,2}$:

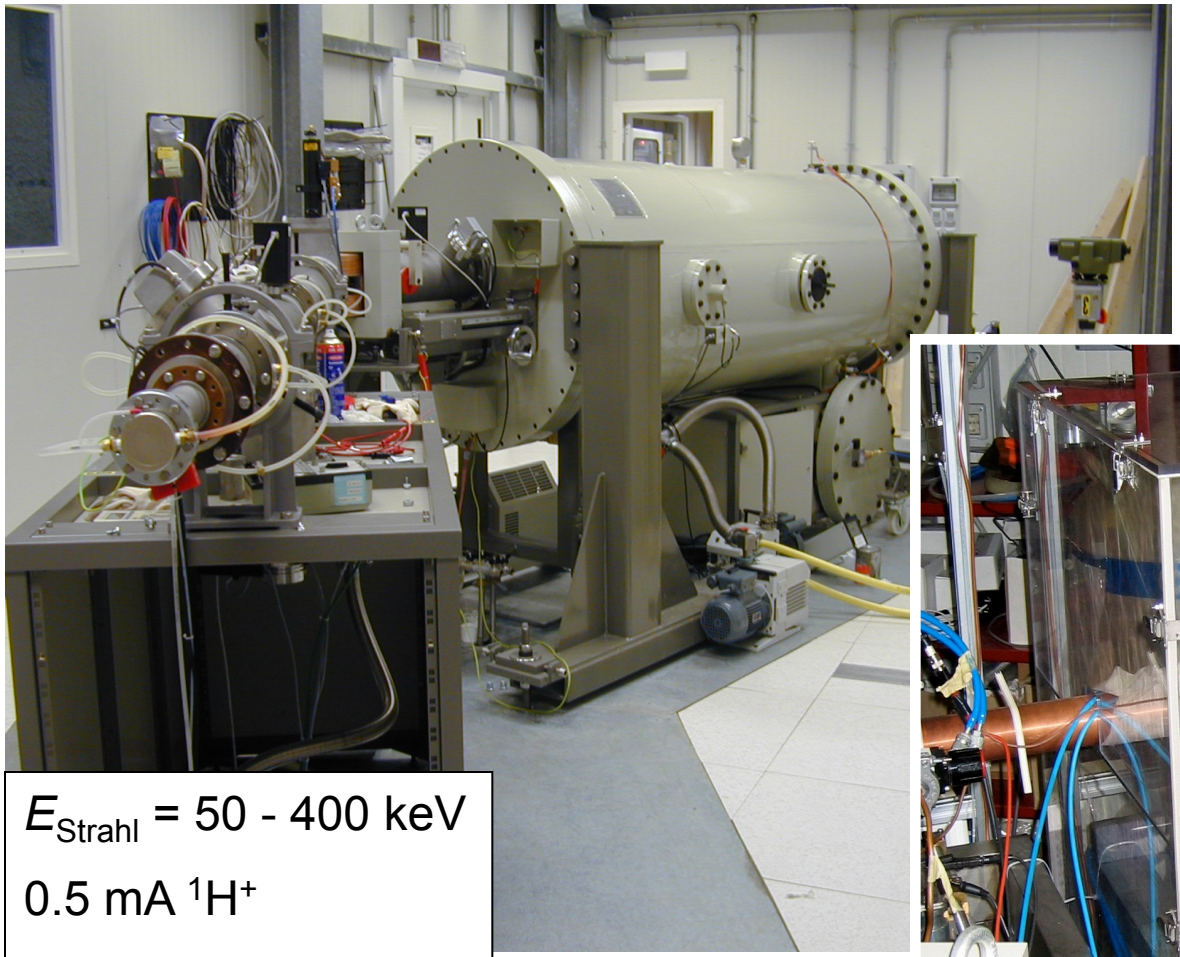
  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \ldots$

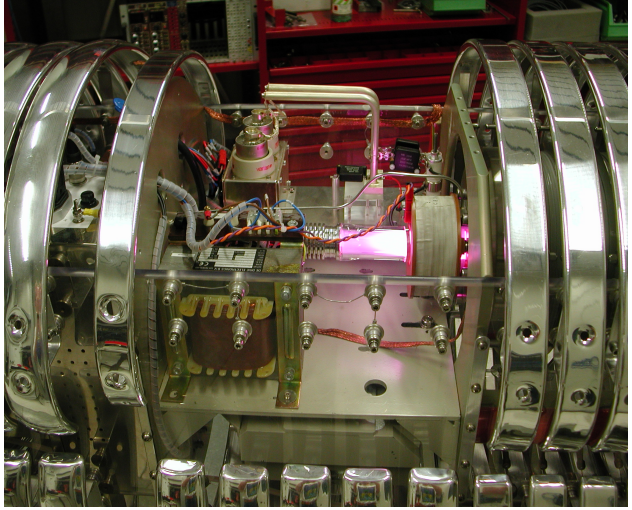
- Es kann auch konkurrierend zu einem radioaktiven Zerfall die Zerstörung desselben Kerns durch eine Kernreaktion auftreten:

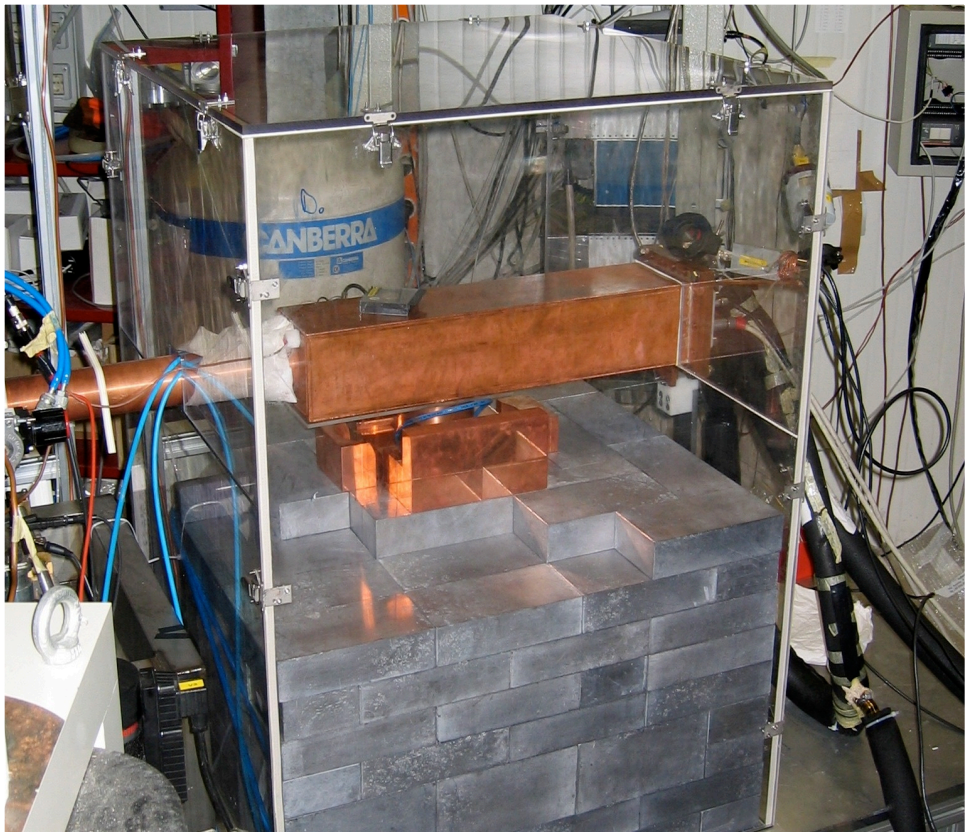
$$\lambda_{\text{Reaktion}} = \sigma \frac{\text{Projektile}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

  Gerechnet wird analog (Beispiel Hot-CNO-Zyklus)

Experiment zu $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$: Der Beschleunigerraum von LUNA





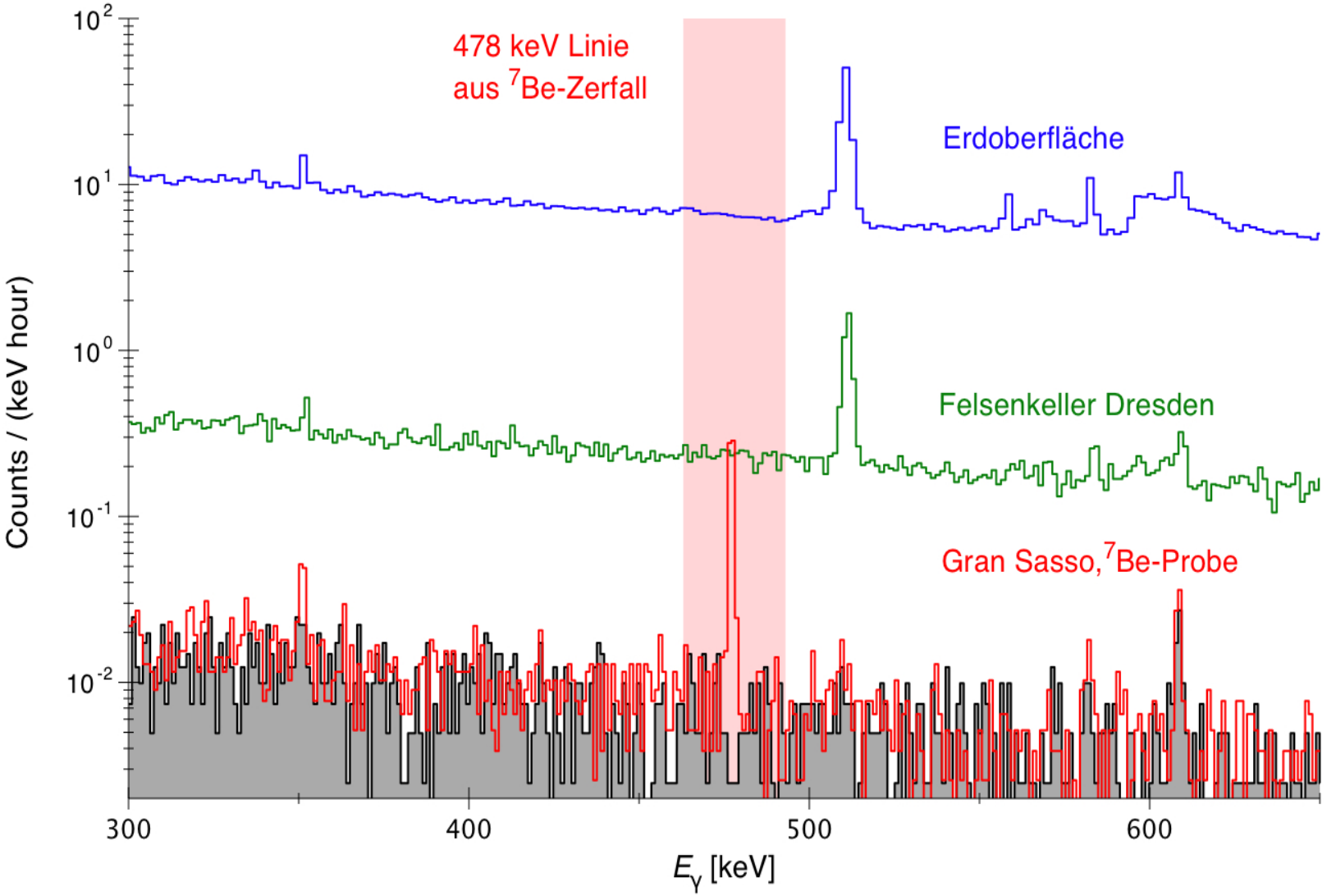


E_{Strahl} = 50 - 400 keV

0.5 mA $^{1}H^{+}$

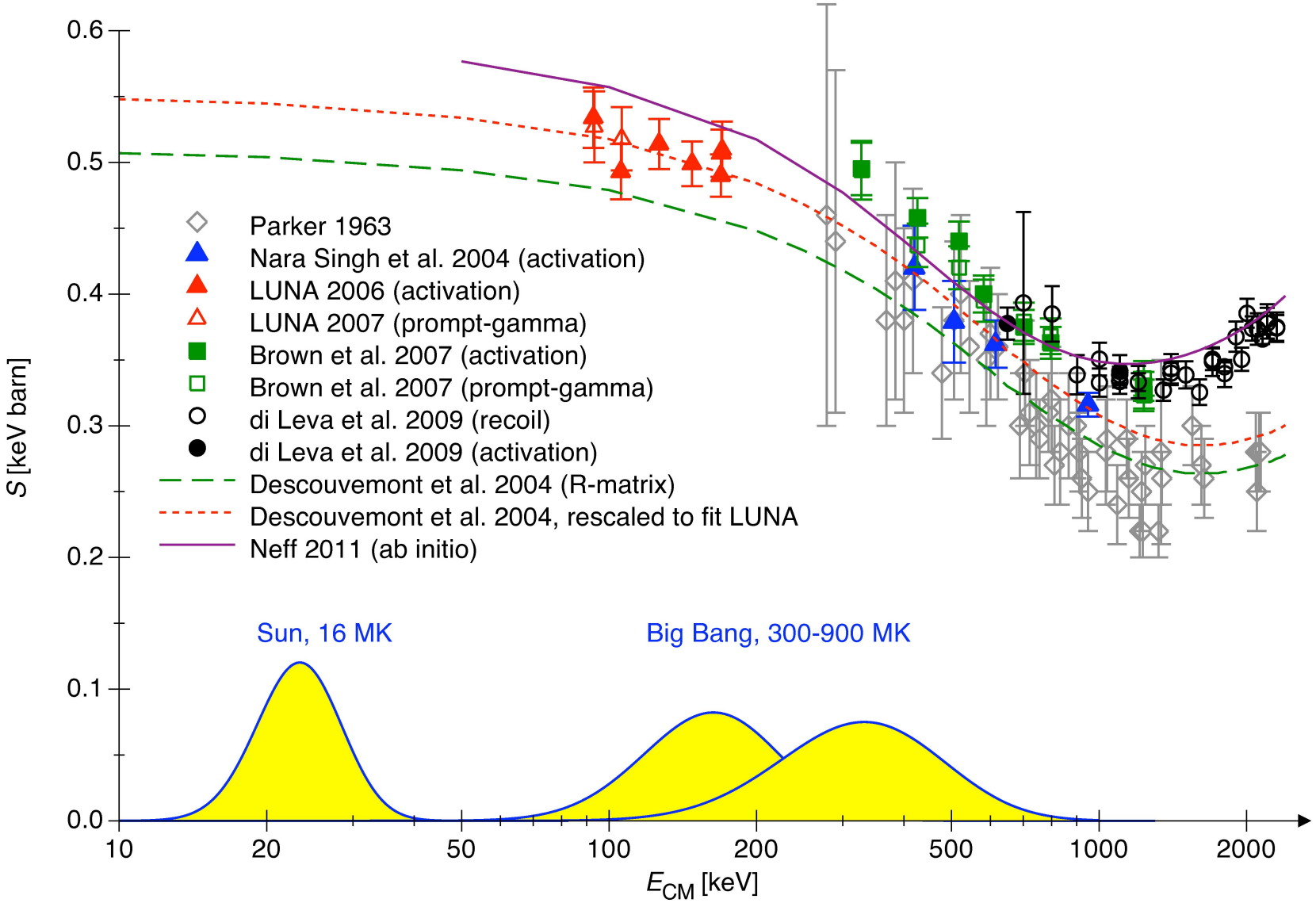
0.3 mA $^{4}He^{+}$

Messung zur Urknall-Nukleosynthese: $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$ an LUNA, ^{7}Be-Spektren



Gemessene ^{7}Be-Aktivität: 0.8 - 600 mBq

$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$-Aktivierungsmessung an LUNA, Ergebnisse



Entstehung von Nukliden durch Spallation: ^{9}Be, ^{10}Be, ^{10}B, ^{11}B, (^{6}Li)

- Sukzessive Anreicherung als Funktion der Zeit, hier [Fe/H]

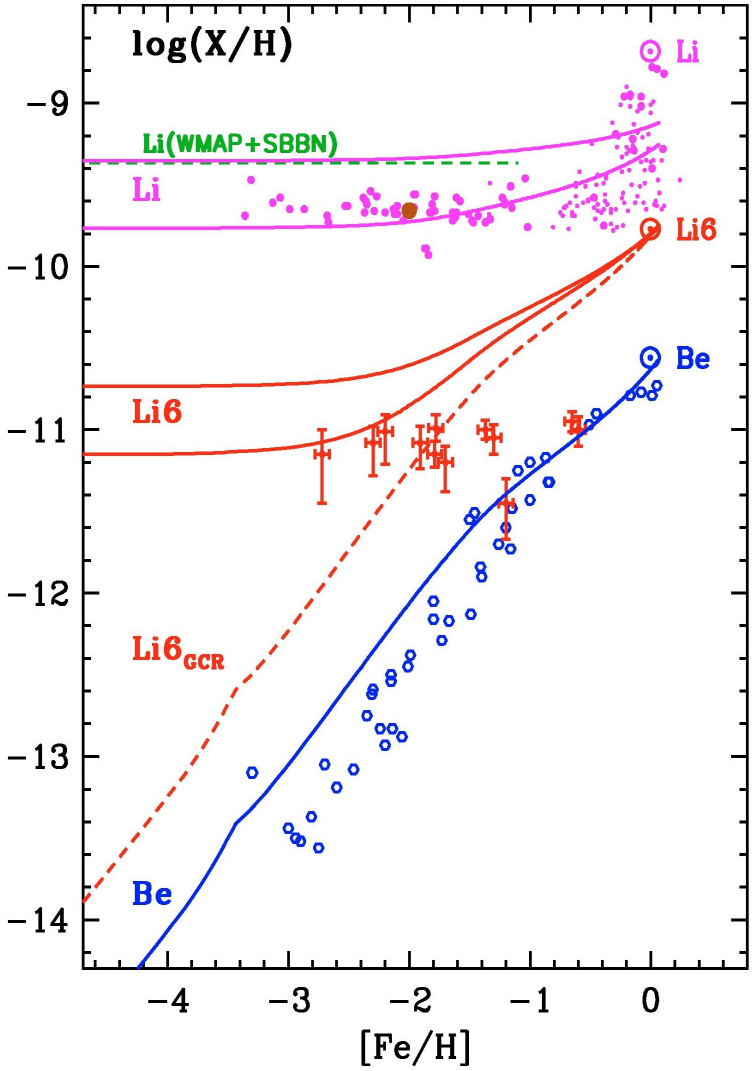
  [Fe/H] = log [(n_{Fe} / n_{H}) / ($n_{Fe,Sonne}$ / $n_{H,Sonne}$)]

  Sonne: [Fe/H] = log 1 = 0

- Erklärung: hochenergetische Teilchen ("cosmic rays") stoßen auf interstellare Materie (Spallation)

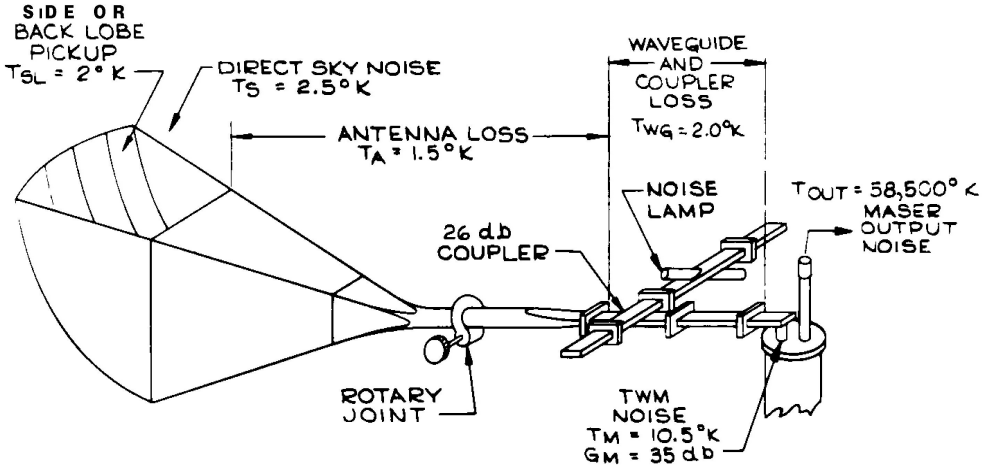
- Erzeugung von Be, B, (^{6}Li)

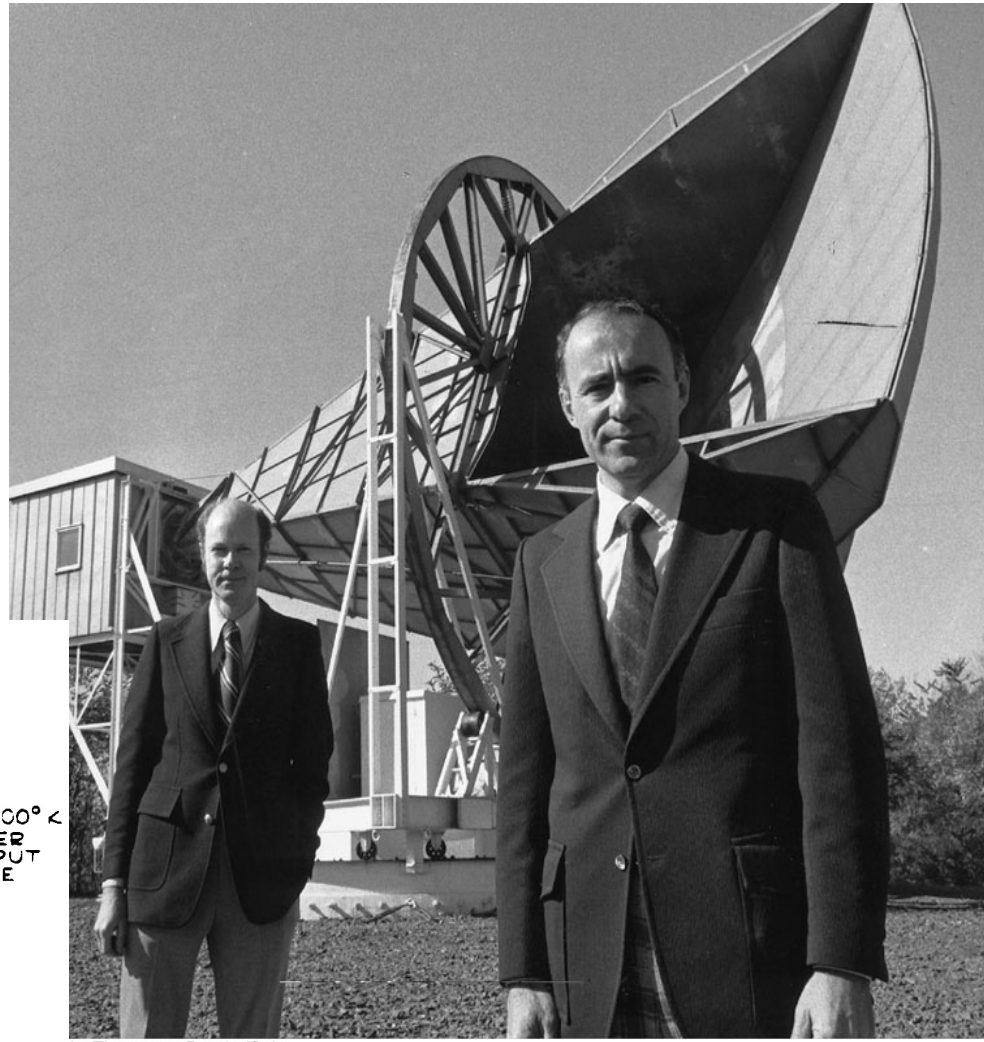
- keine schwereren Elemente



Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung 1965: Penzias, Wilson (1)

- Radioantenne zur Untersuchung der Mikrowellenemission der Galaxis
- Messung bei $\lambda = 7$ cm
- Nobelpreis 1978

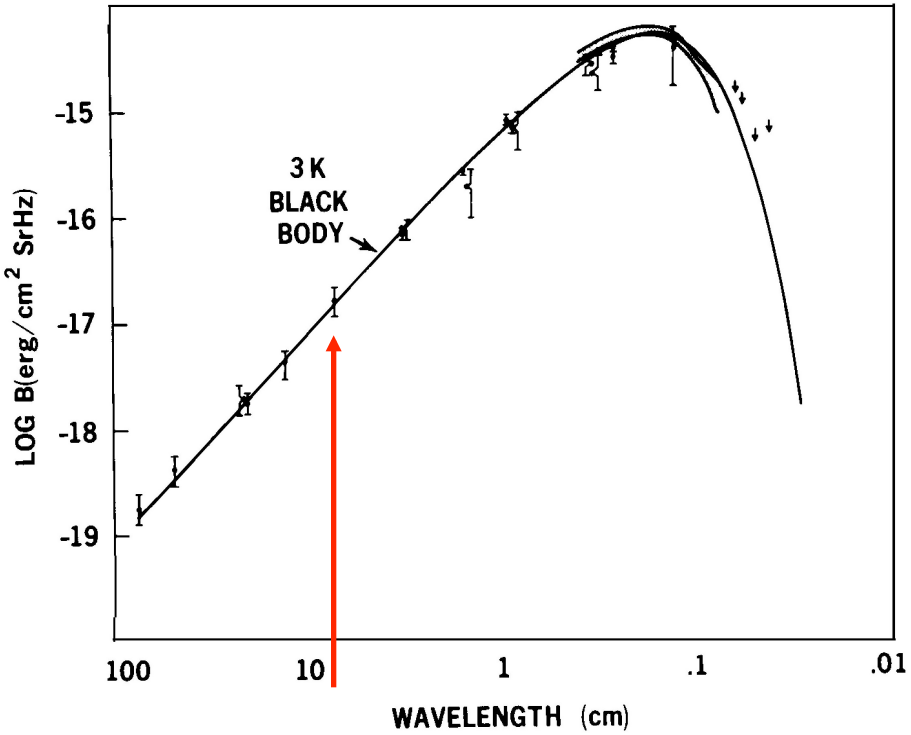




04 Thomson - Brooks/Cole

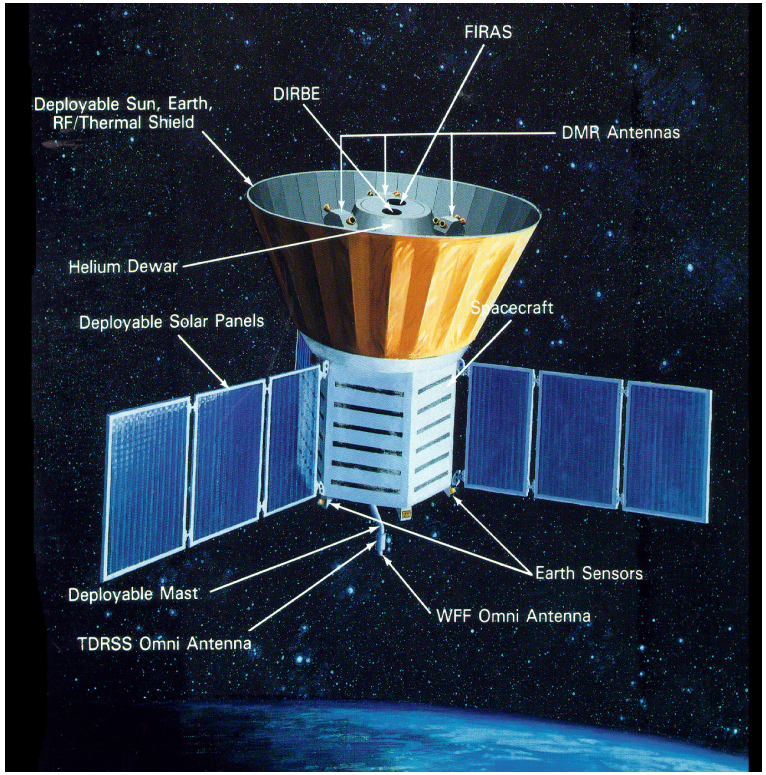
Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung 1965: Penzias, Wilson (2)

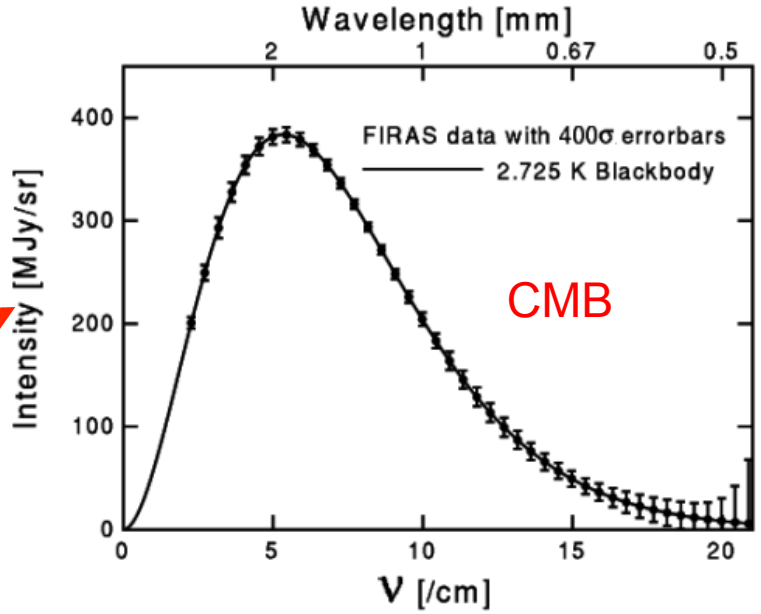
	New Throat		Old Throat
He Temp.	4.22	4.22	
Calculated Contribution from Cold Load Waveguide	.38	.70 ± 0.2	
Attenuator Setting for Balance	2.73	2.40 ± 0.1	
Total C.L.	7.33	7.32 ± 0.3	6.7 ± 0.3
Atmosphere	2.3 ± 0.3		2.3 ± 0.3
Waveguide and Antenna loss	1.8 ± 0.3		.9 ± 0.3
Back lobes	.1 ± 0.1		.1 ± 0.1
Total Ant.	4.2 ± 0.7		3.3 ± 0.7
Background	3.1 ± 1		3.4 ± 1

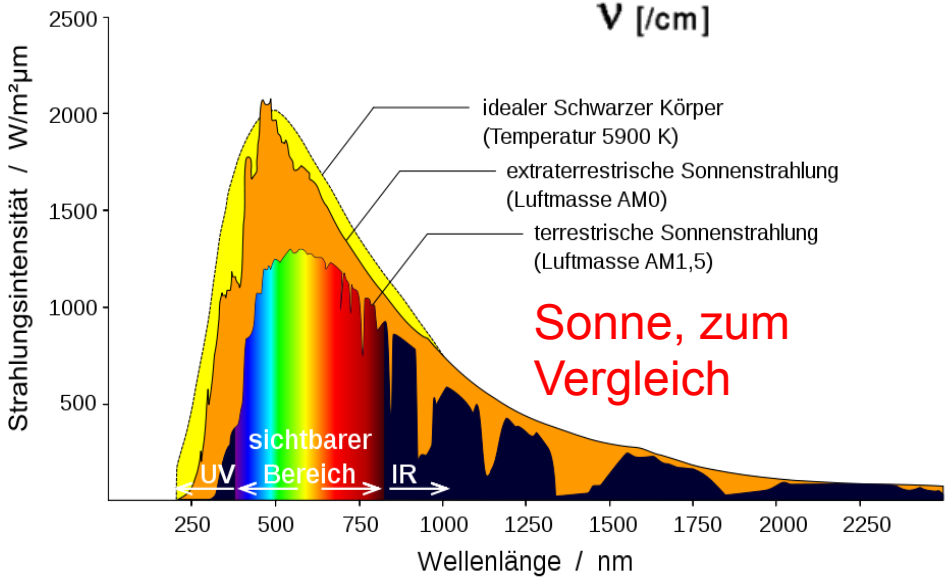


Isotropie und Anisotropie, gesehen mit COBE 1992: Smoot, Mather (1)

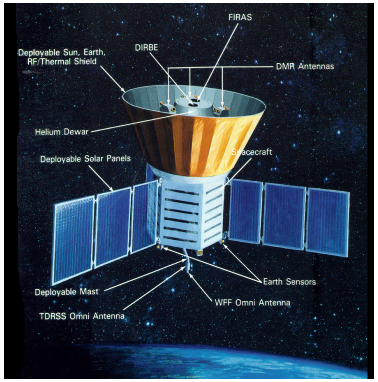
- COBE = COsmic Background Explorer
- Satellit, schaltet atmosphärische Absorption aus
- Perfektes Schwarzkörper-Spektrum (besser als z.B. Sonne)





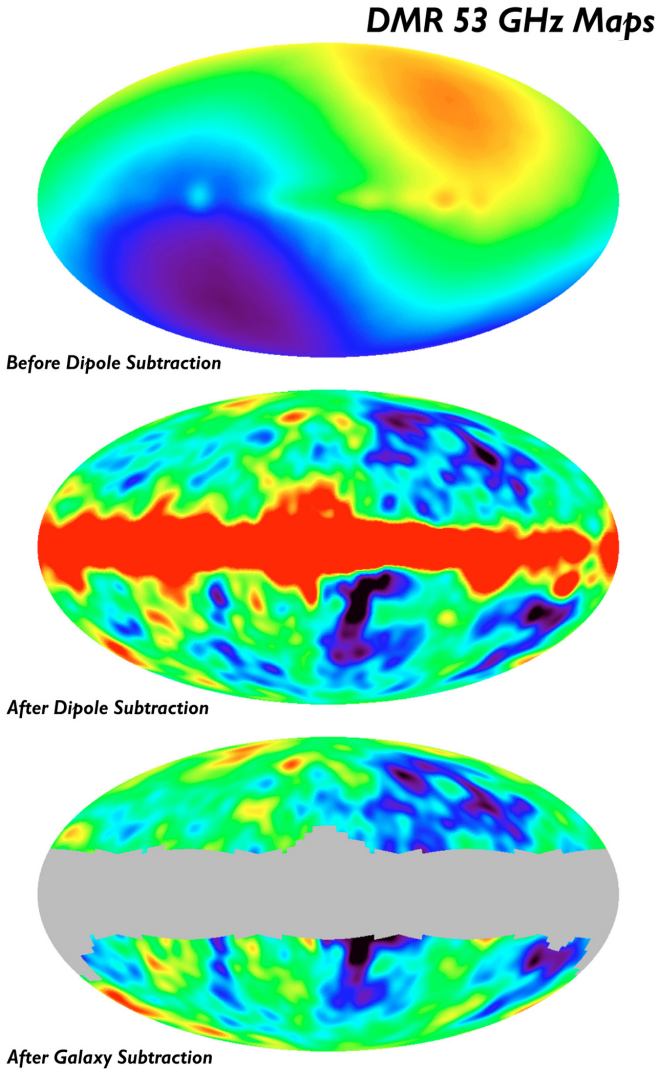


Isotropie und Anisotropie, gesehen mit COBE 1992: Smoot, Mather (2)

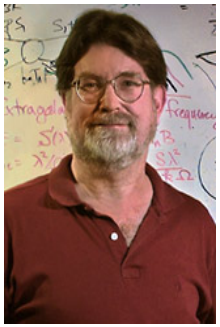


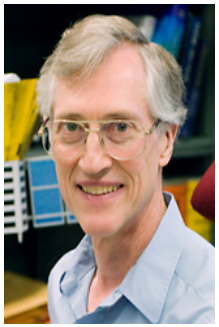
10^{-3} Dipol-Anisotropie

Doppler-Effekt aus der Bewegung von COBE relativ zum Mikrowellen-Hintergrund



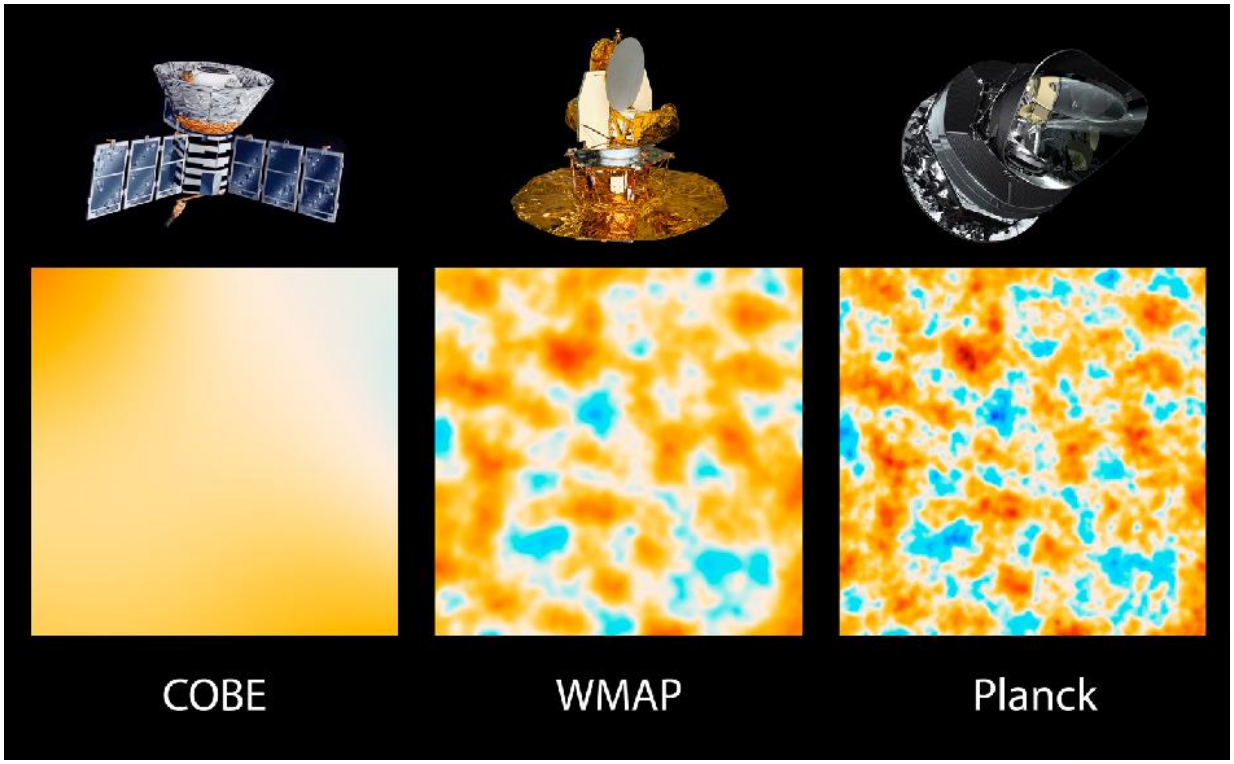
Nobelpreis 2006

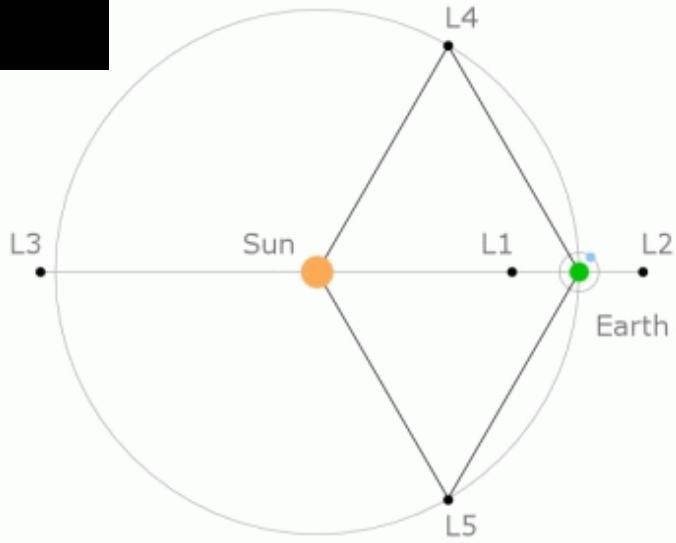




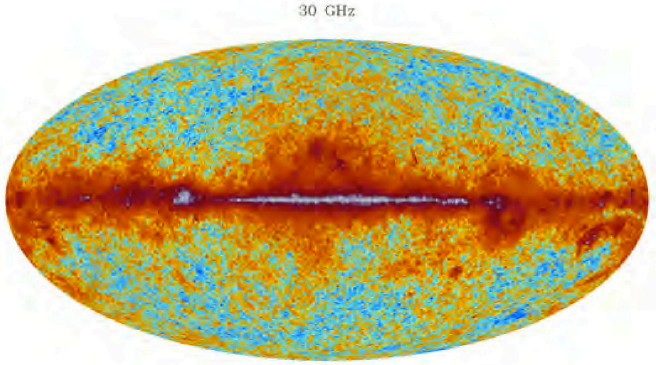
10^{-5} kosmische Anisotropie

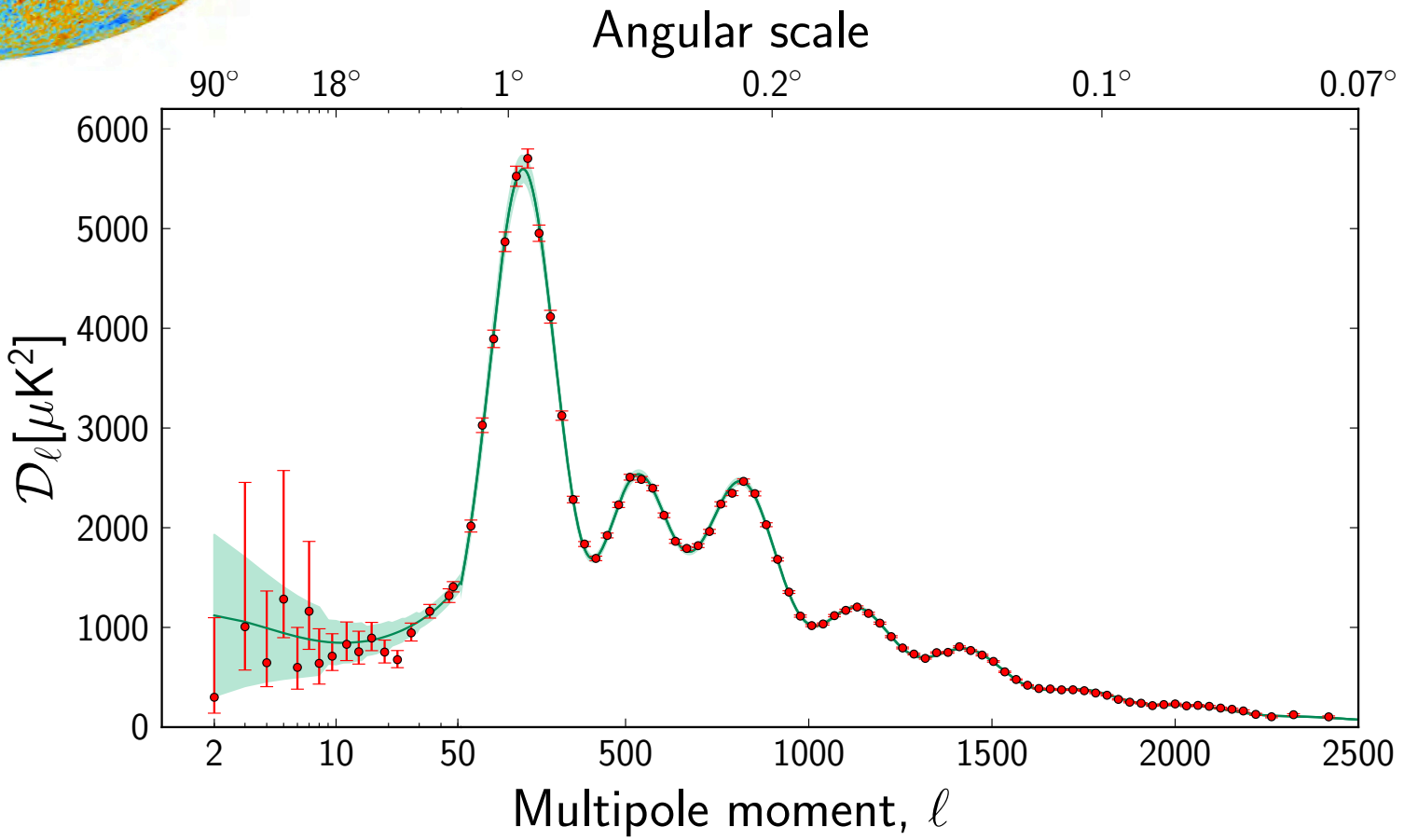
Planck-Satellit 2013: Power-Spektrum des Mikrowellen-Hintergrunds



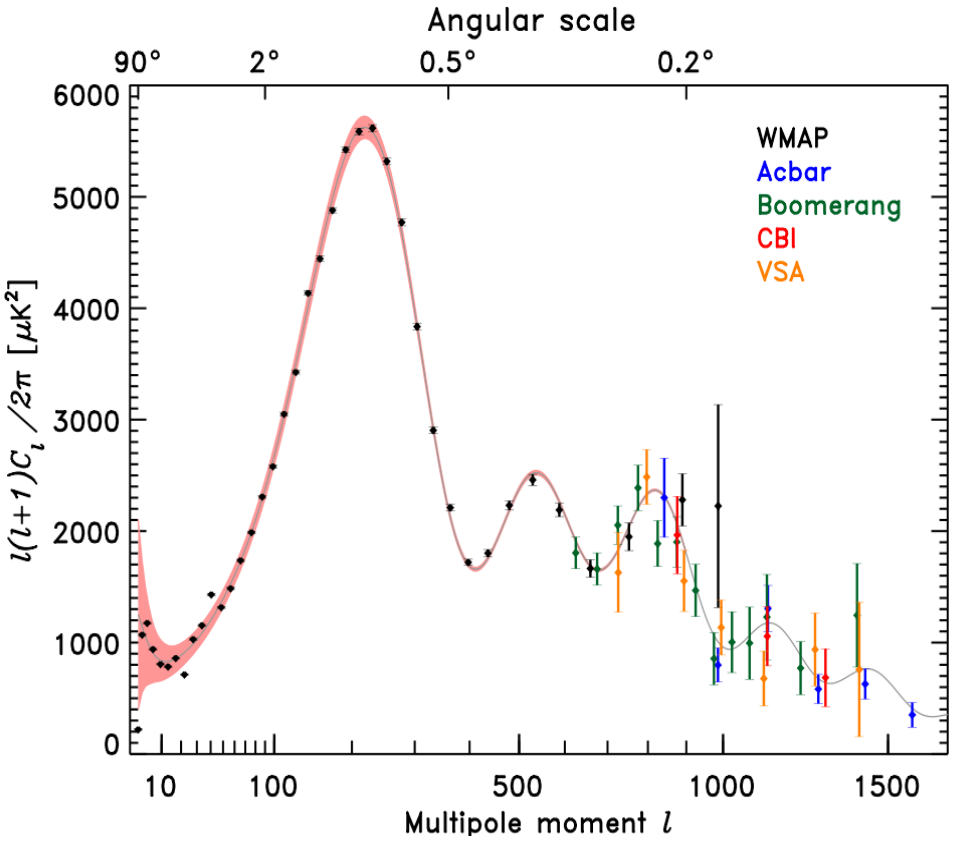


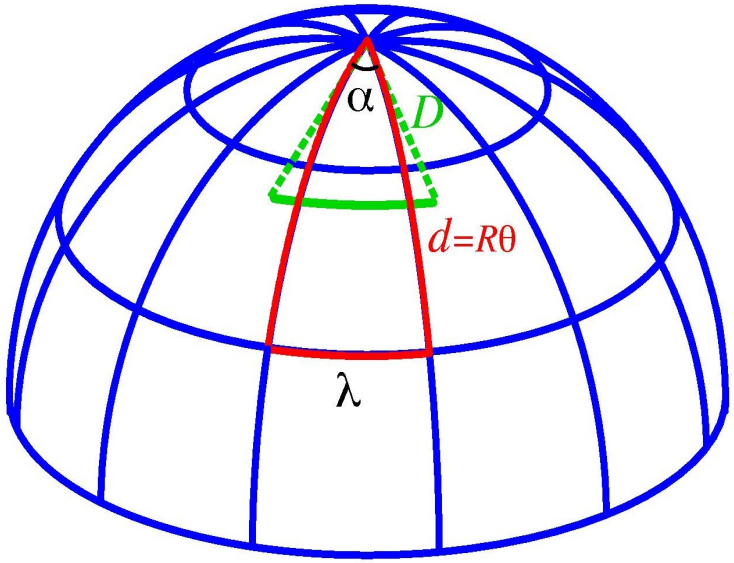
Planck-Satellit 2013: Power-Spektrum des Mikrowellen-Hintergrunds



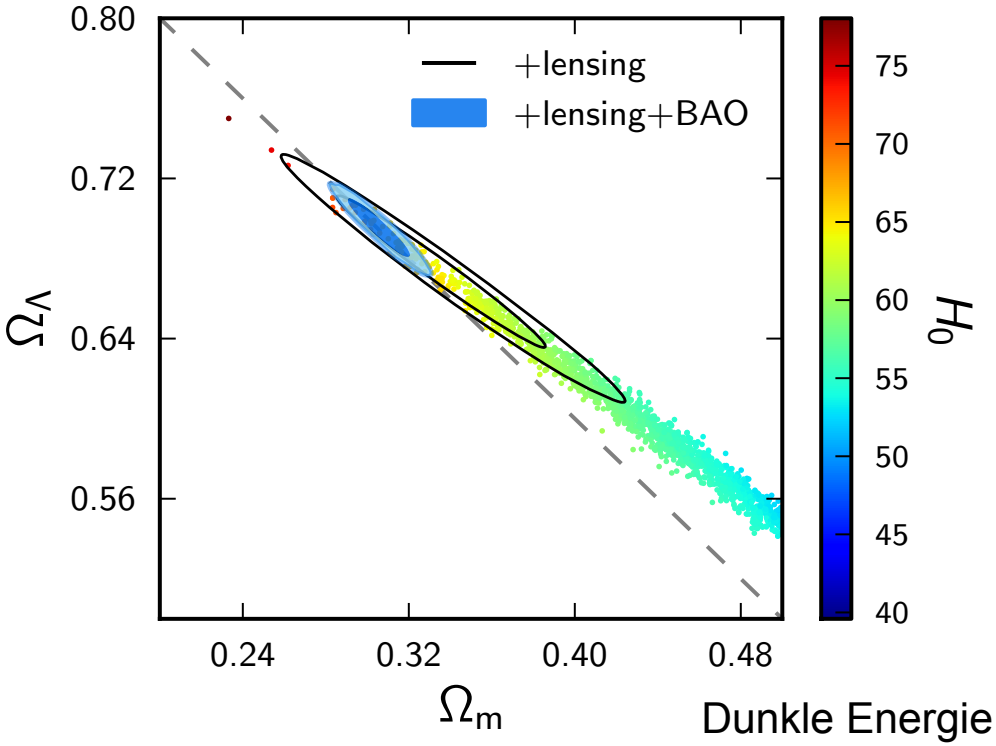


Zur Interpretation des ersten Peaks im Power-Spektrum

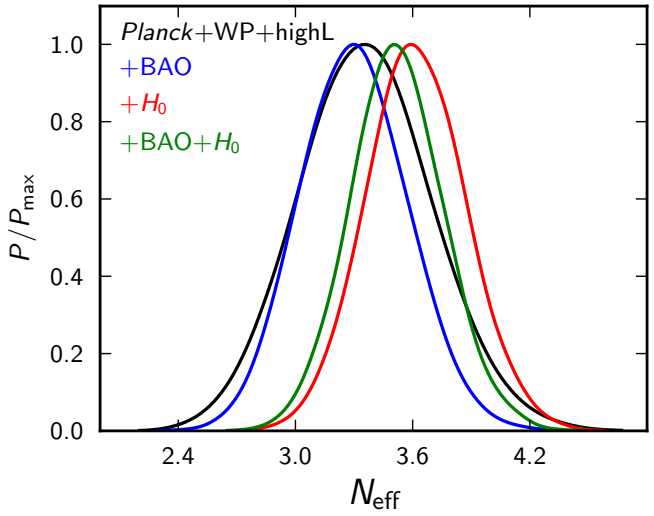




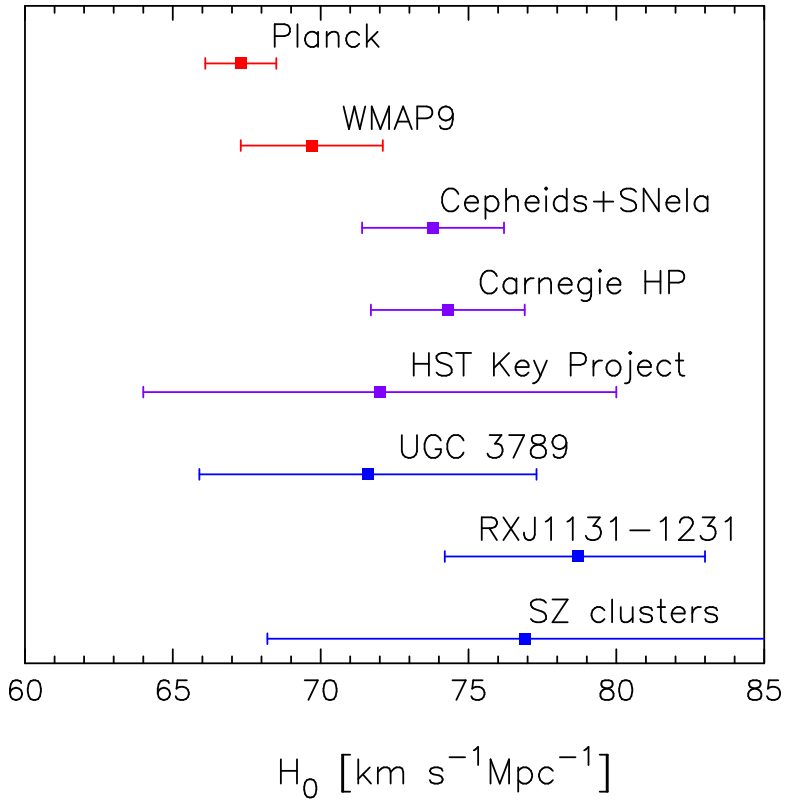
Planck-Satellit 2013: Kosmologische Schlussfolgerungen



Dunkle Energie
Ω_Λ versus
Materie Ω_m



Anzahl der Neutrino-Flavours N_{eff}



Hubble-Konstante H_0

Zusammenfassung

- Die Nuklide ^{1}H, ^{2}H, ^{3}He, ^{4}He und ^{7}Li der drei leichtesten Elemente entstanden in den ersten drei Minuten nach dem Urknall.
- Die makroskopisch beobachtbaren Häufigkeiten der leichten Elemente im Universum sind aufs Engste mit ihren mikroskopischen Eigenschaften verknüpft.
- Die Nuklide ^{9}Be, ^{10}Be, ^{10}B, ^{11}B und wahrscheinlich ^{6}Li entstanden durch Stöße von kosmischer Strahlung mit dem interstellaren Medium ("Spallation").
- Genaue Beobachtungen der Winkelverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung erlauben die Bestimmung des Baryonen-zu-Photonen-Verhältnisses und daraus auf einem zweiten, unabhängigen Weg, die Bestimmung der primordialen Nuklidhäufigkeiten.