

Kosmologie und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, 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 (heute)**
- Supernovae als kosmische Standardkerzen
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- Altersbestimmung des Universums
- Fundamentale Physik und die Sonne

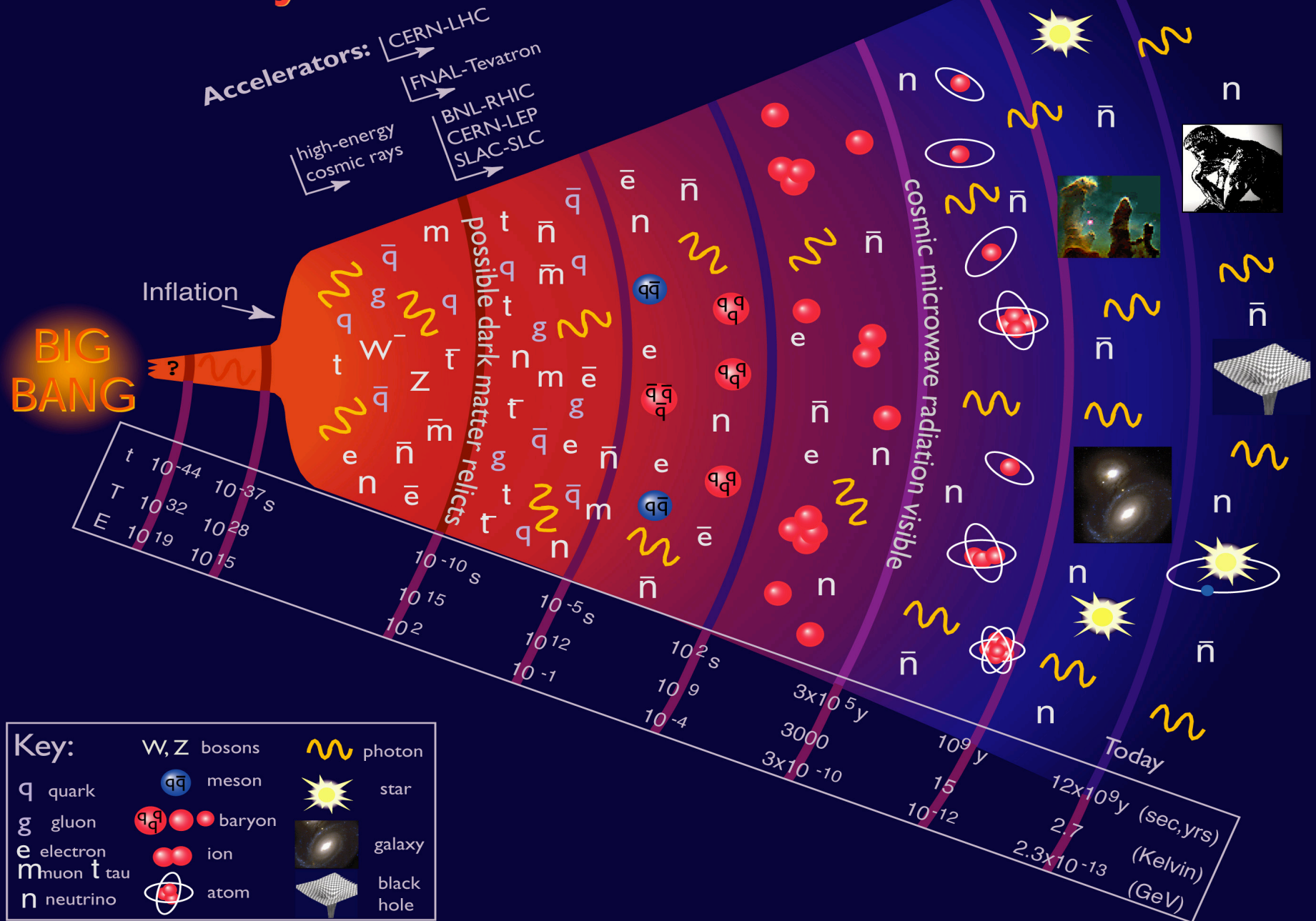
9. Vorlesung, 11.06.2012



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



History of the Universe

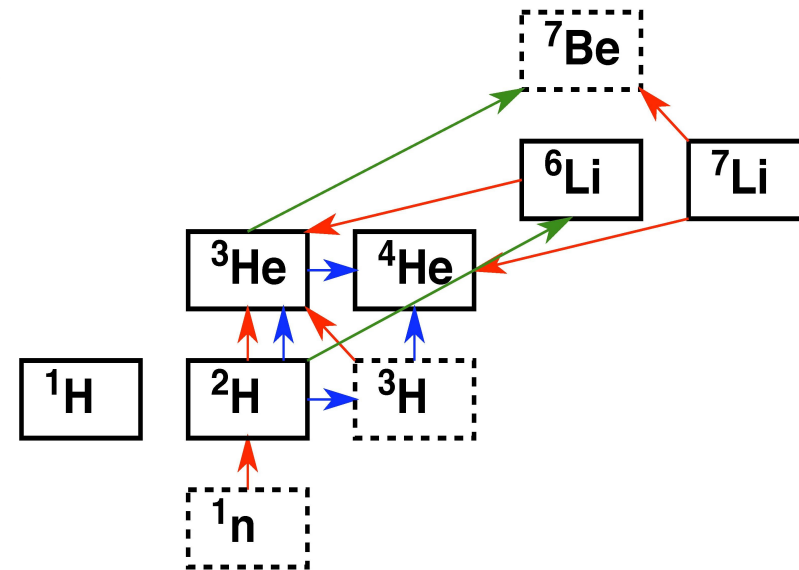


Zusammenfassung vom 14.05.2012

- Die Nuklide ^1H , ^2H , ^3He , ^4He und ^7Li 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.

		6B	7B	8B	9B	10B	11B
		5Be	6Be	7Be	8Be	9Be	10Be
3Li	4Li	5Li	6Li	7Li	8Li	9Li	
	3He	4He	5He	6He	7He	8He	
1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	
	Neutron						

(p, γ)
 (p, α)
 (p, n)
 (d, n)
 (d, p)
 (α, γ)



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 $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{elast}} + \sigma_{\text{inelast}}$

Lebensdauer und Halbwertszeit

- Differentialgleichung des radioaktiven Zerfalls, und ihre Lösung:

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

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

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

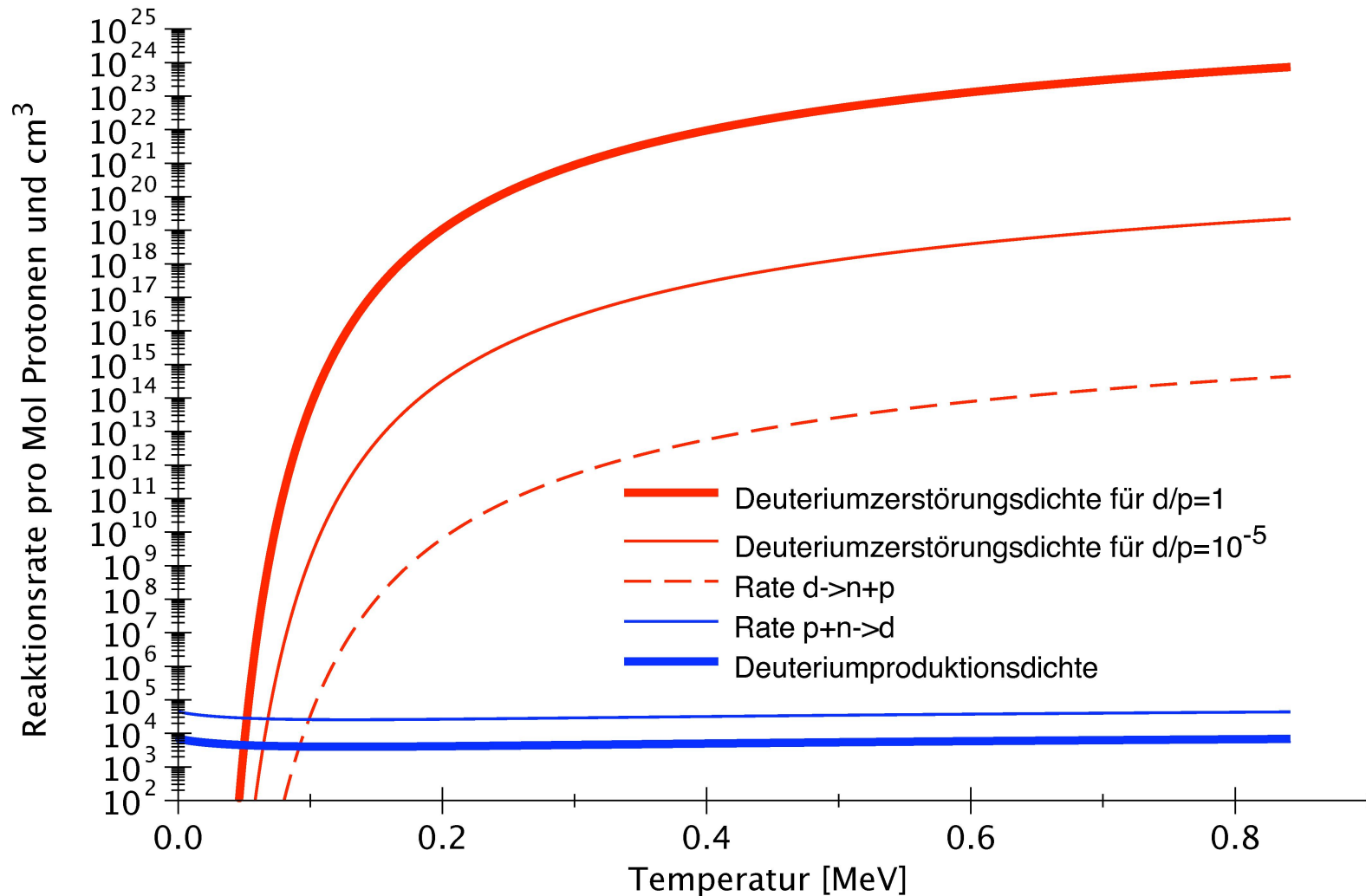
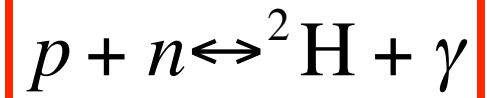
- Bei verschiedenen Zerfallsmöglichkeiten ein- und desselben Kerns addieren sich die $\lambda_{1,2}$:

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

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

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

Gerechnet wird analog (Beispiel Hot-CNO-Zyklus)



- Beim Abkühlen des Kosmos geht das Gleichgewicht zwischen $p+n$ und ^2H verloren

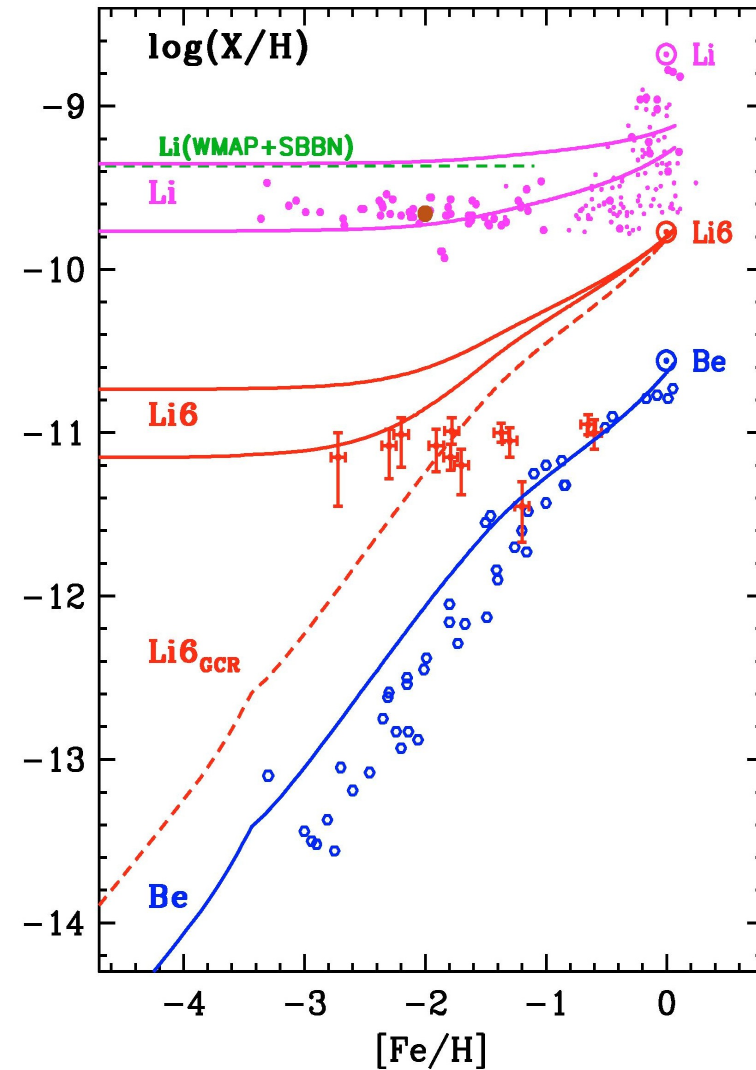
Entstehung von Nukliden durch Spallation: ^9Be , ^{10}Be , ^{10}B , ^{11}B , (^6Li)

- Sukzessive Anreicherung als Funktion der Zeit, hier $[\text{Fe}/\text{H}]$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \left[\left(n_{\text{Fe}} / n_{\text{H}} \right) / \left(n_{\text{Fe,Sonne}} / n_{\text{H,Sonne}} \right) \right]$$

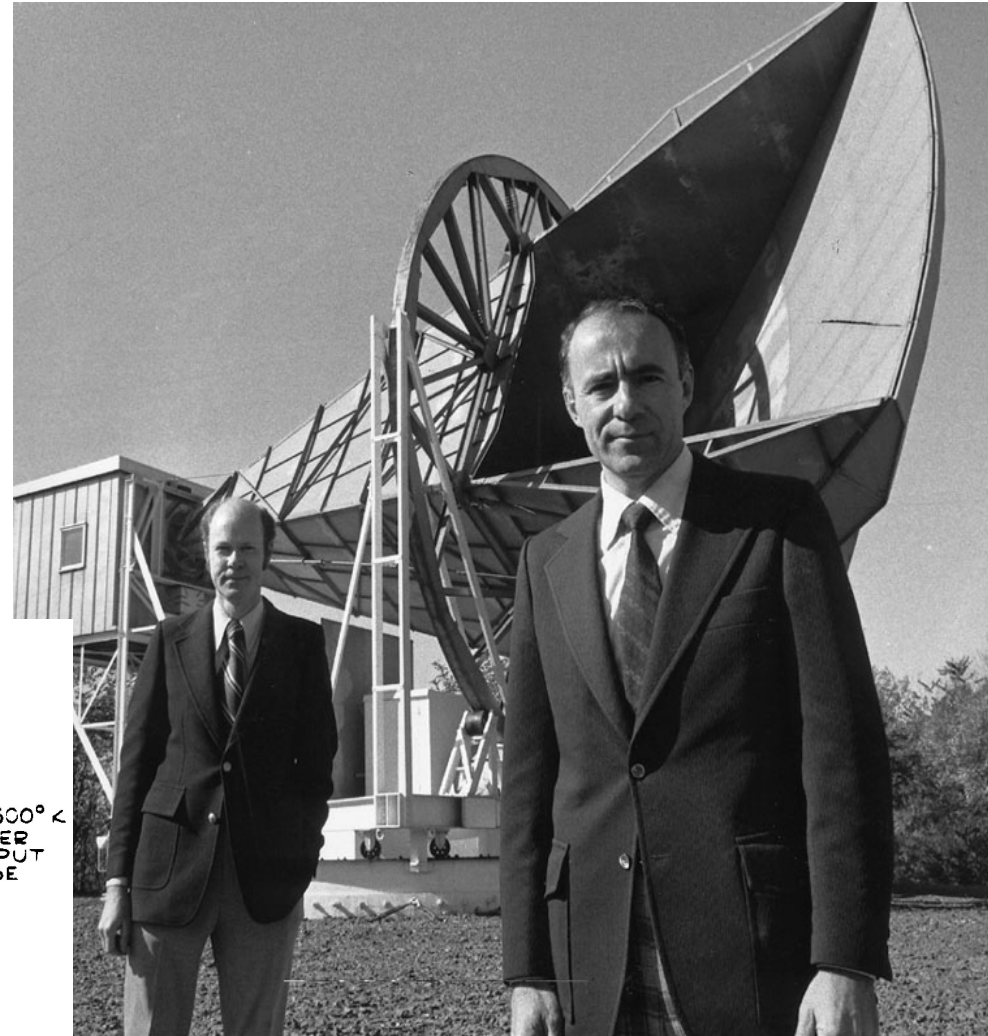
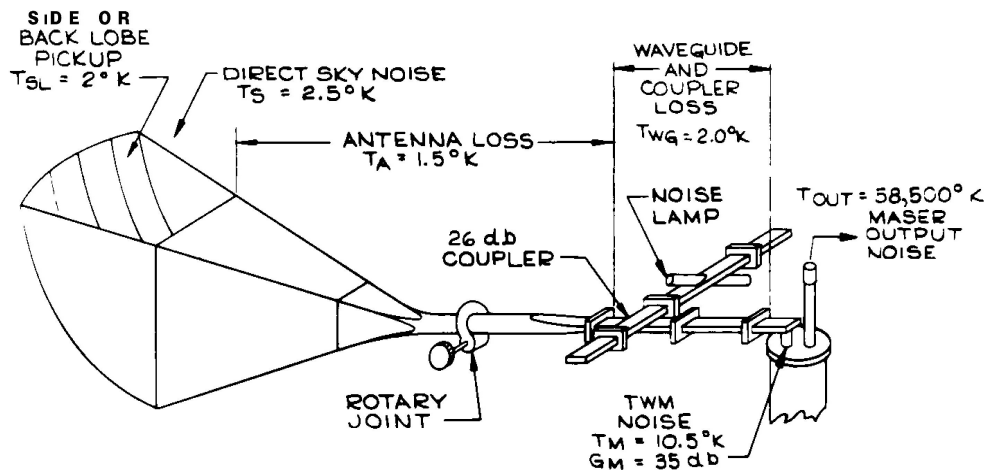
Sonne: $[\text{Fe}/\text{H}] = \log 1 = 0$

- Erklärung: hochenergetische Teilchen ("cosmic rays") stoßen auf interstellare Materie (Spallation)
- Erzeugung von Be, B, (^6Li)
- keine schwereren Elemente



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

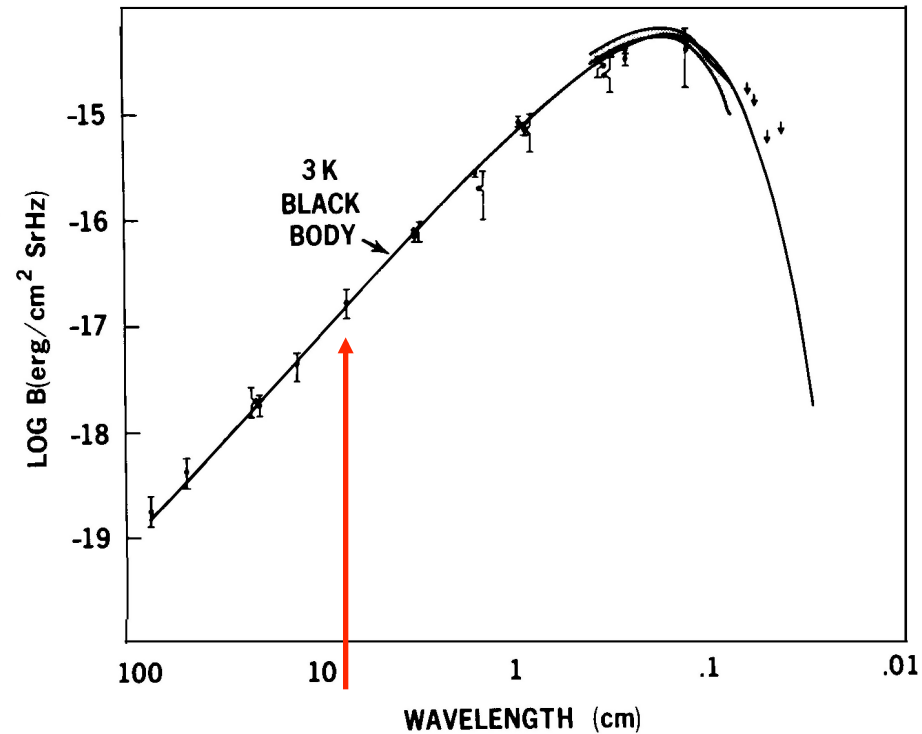
- Radioantenne zur Untersuchung der Mikrowellenemission der Galaxis
- Messung bei $\lambda = 7$ cm
- Nobelpreis 1978



04 Thomson - Brooks/Cole

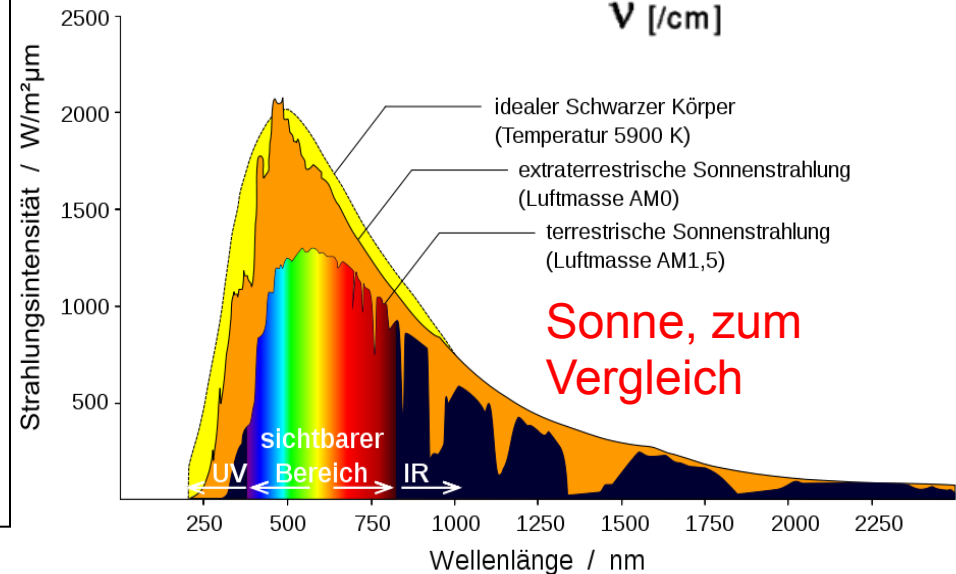
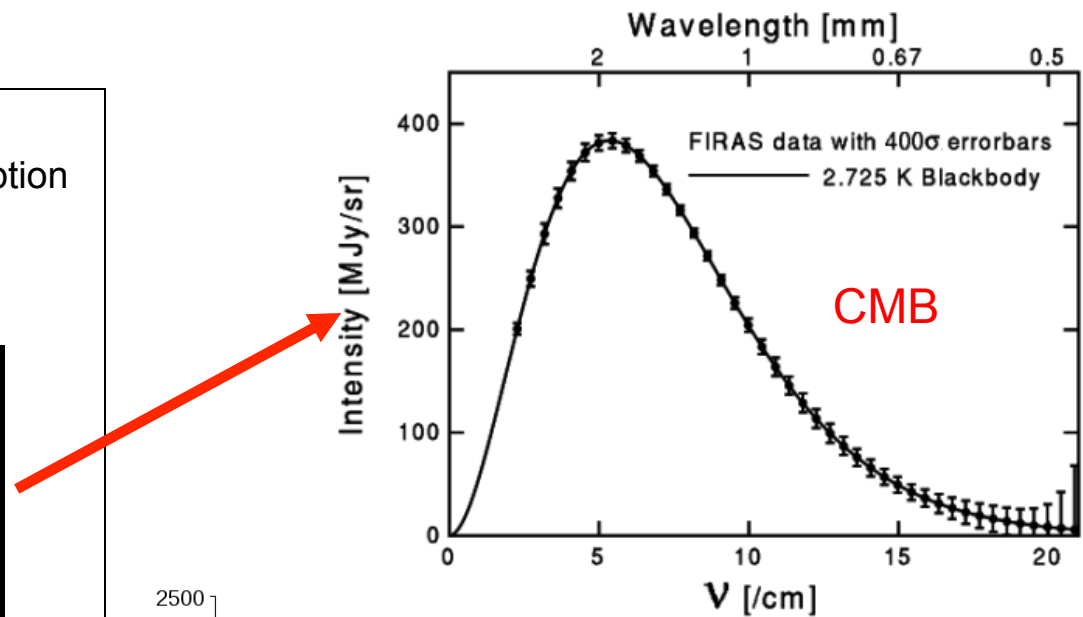
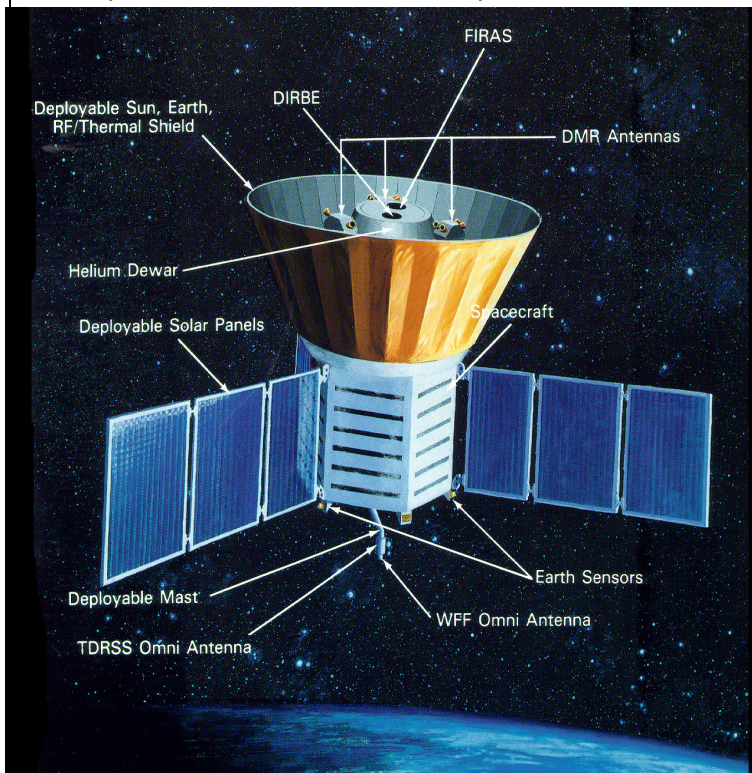
Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung 1965: Penzias, Wilson (2)

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

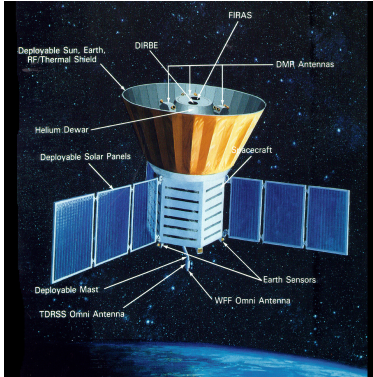


Isotropie und Anisotropie, gesehen mit COBE 1992: Smoot, Mather (1)

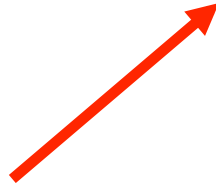
- COBE = COsmic Background Explorer
- Satellit, schaltet atmosphärische Absorption aus
- Perfektes Schwarzkörper-Spektrum (besser als z.B. Sonne)



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

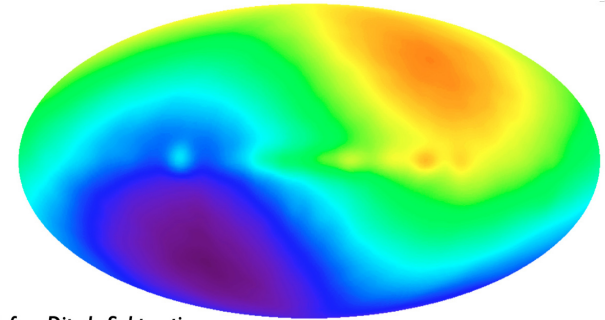


10^{-3} Dipol-Anisotropie

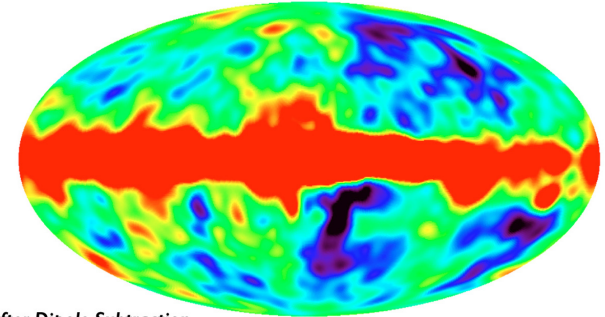


Doppler-Effekt aus der Bewegung von COBE relativ zum Mikrowellen-Hintergrund

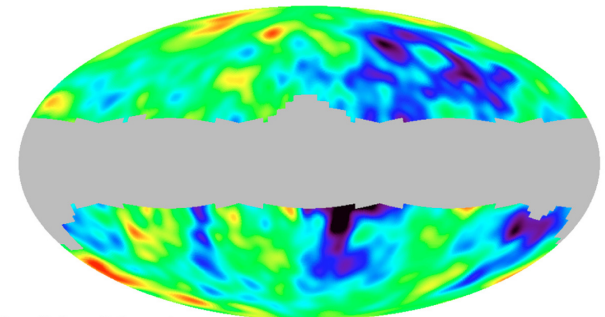
DMR 53 GHz Maps



Before Dipole Subtraction

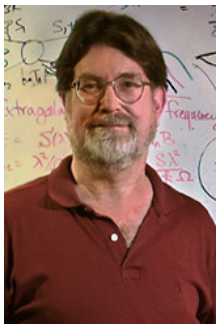


After Dipole Subtraction



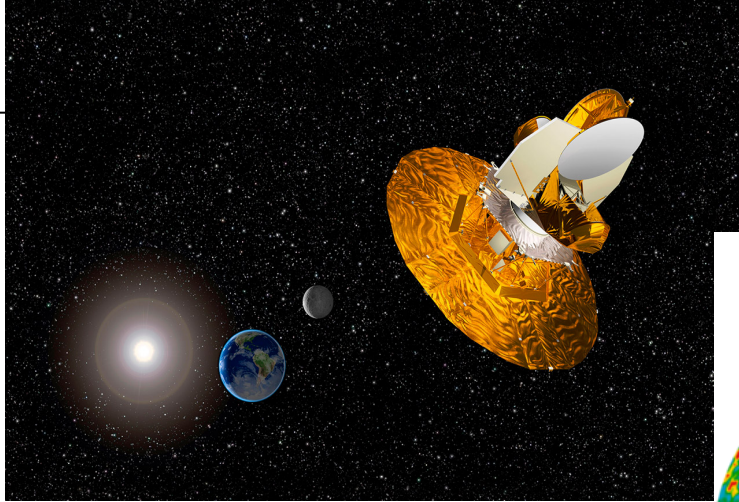
After Galaxy Subtraction

Nobelpreis 2006

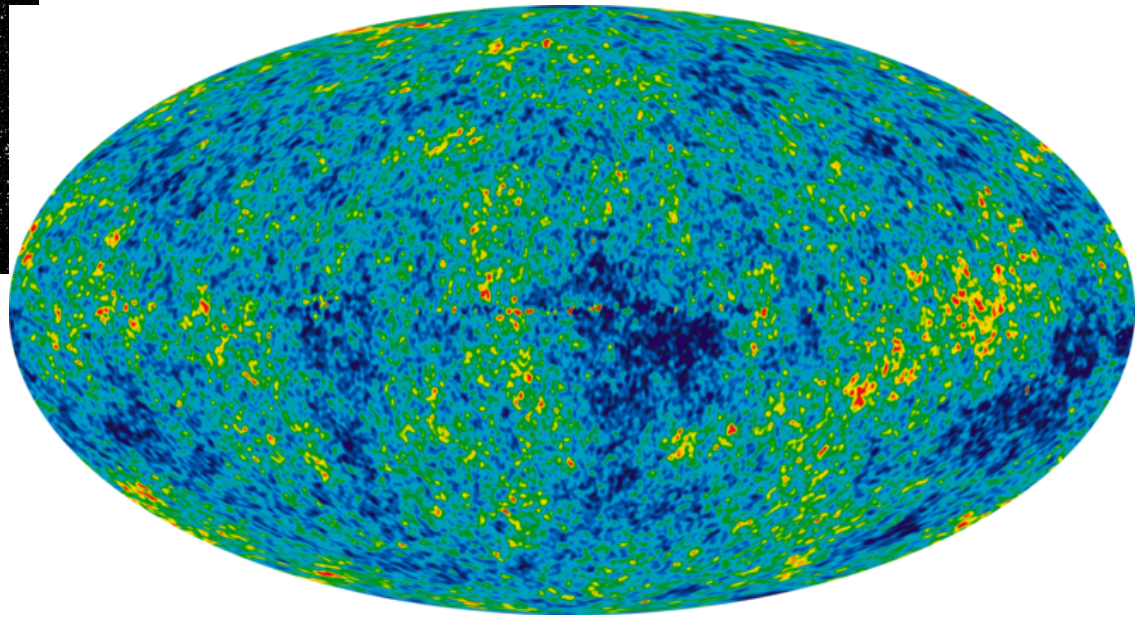


10^{-5} kosmische Anisotropie

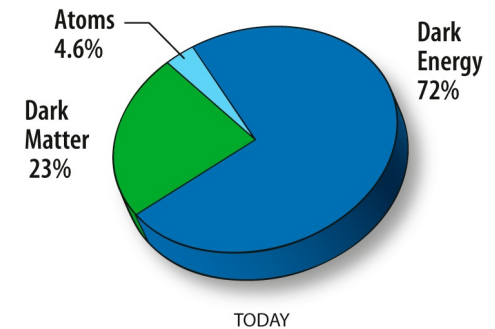
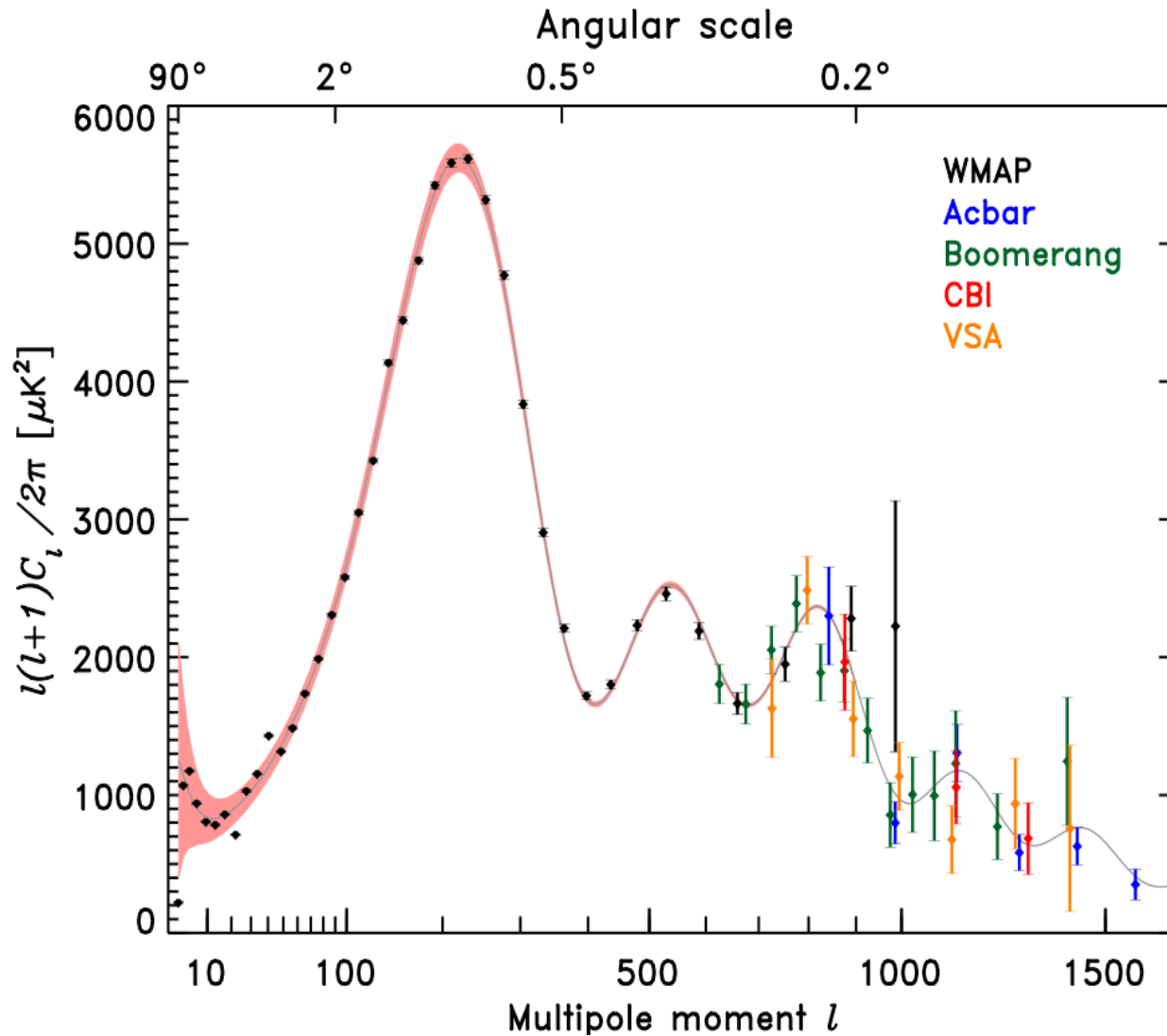
- WMAP = Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
- Orbit um L_2 -Punkt der Sonne
- Verbesserte Winkelauflösung



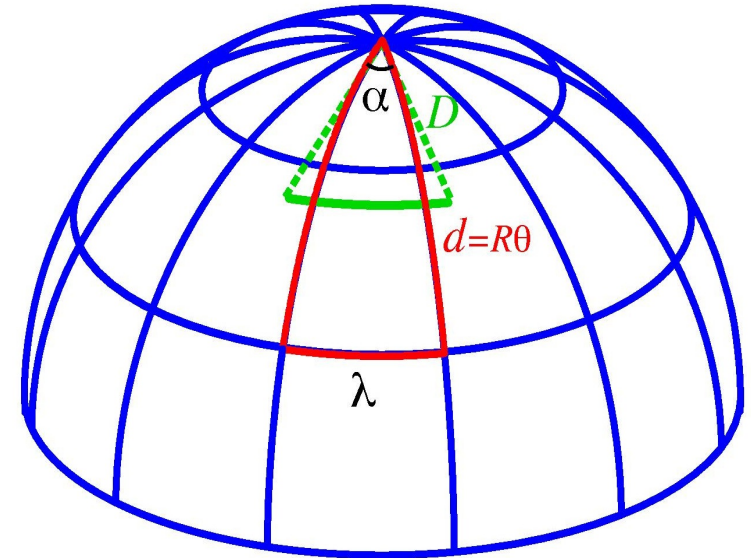
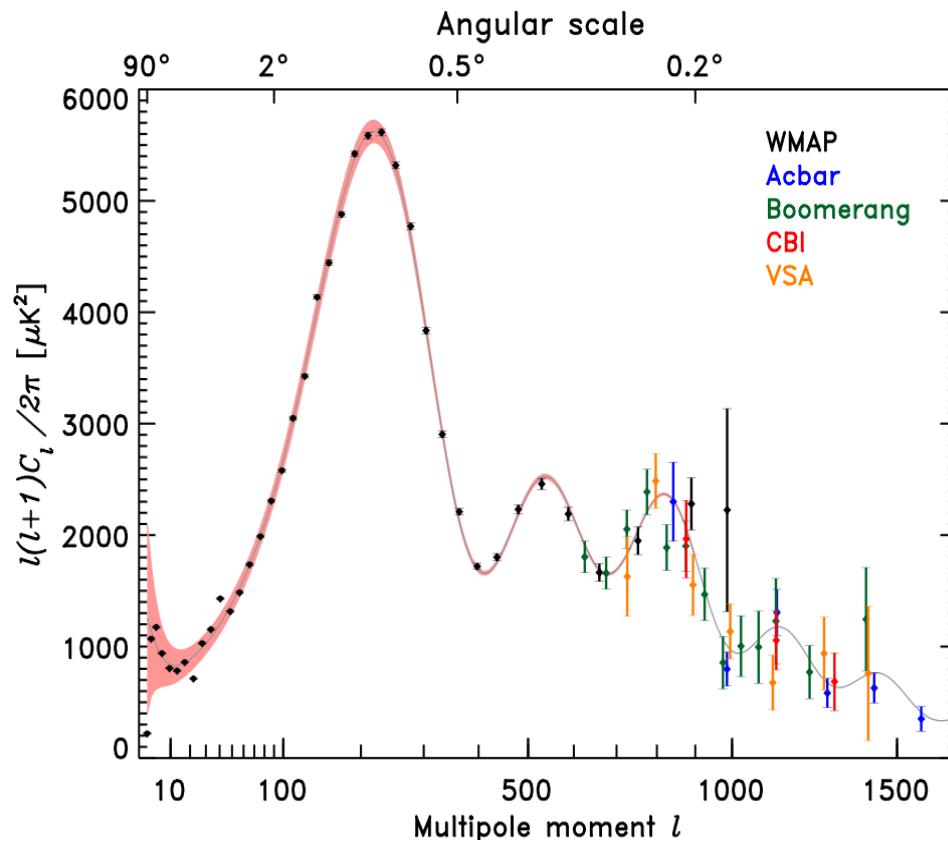
7 Jahre Statistik mit WMAP (2010),
Galaxis und Dipolbewegung
subtrahiert



Power-Spektrum aus WMAP und Ballon-Experimenten



Zur Interpretation des ersten Peaks im Power-Spektrum



Zur Interpretation der weiteren Peaks im Power-Spektrum

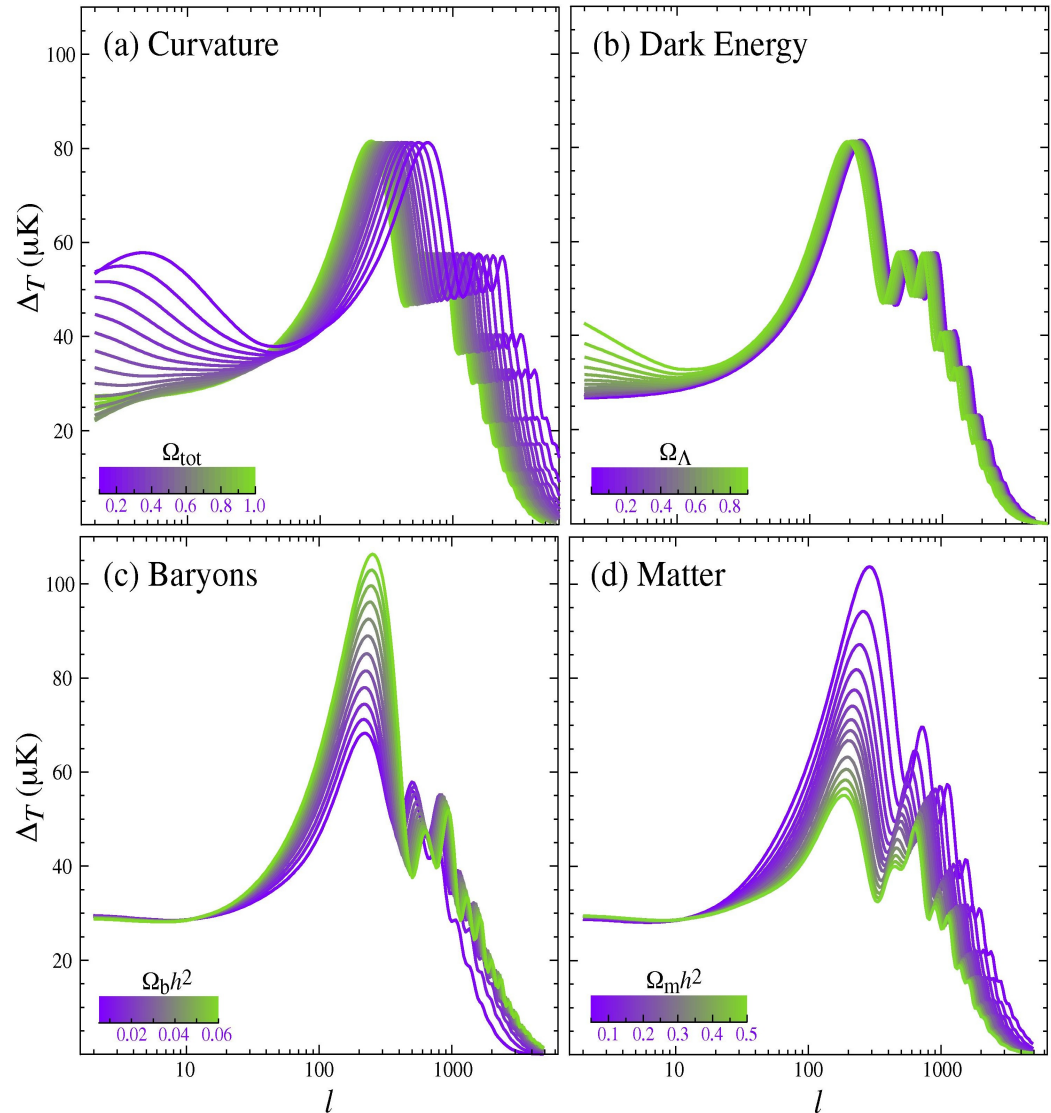
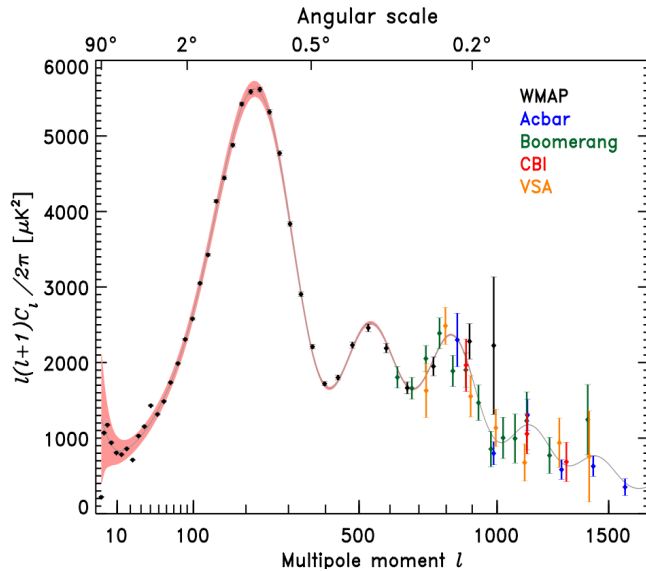
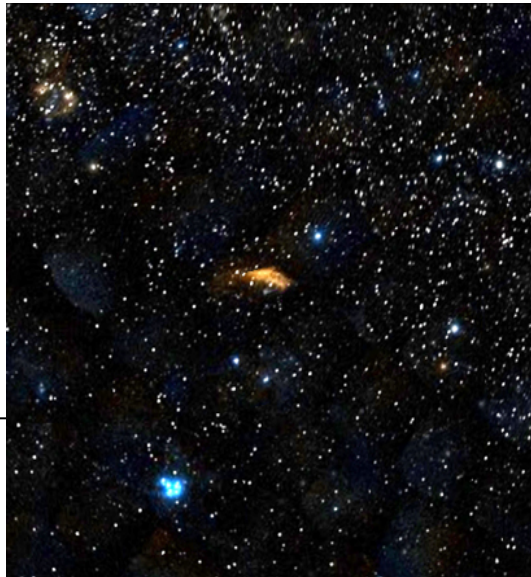
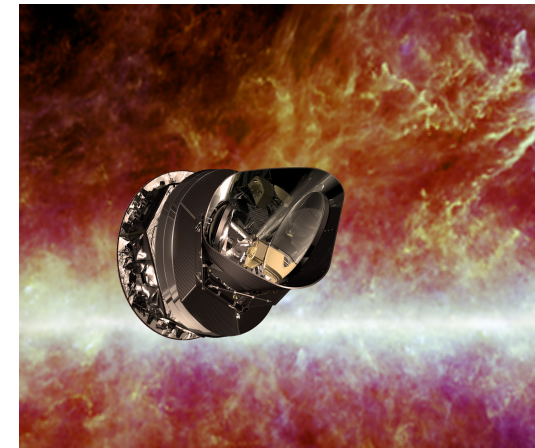
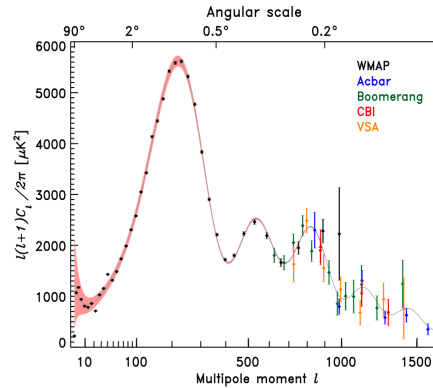


TABLE 1
SUMMARY OF THE COSMOLOGICAL PARAMETERS OF Λ CDM MODEL

Class	Parameter	WMAP 7-year ML ^a	WMAP+BAO+ H_0 ML	WMAP 7-year Mean ^b	WMAP+BAO+ H_0 Mean
Primary	$100\Omega_b h^2$	2.270	2.246	$2.258^{+0.057}_{-0.056}$	2.260 ± 0.053
	$\Omega_c h^2$	0.1107	0.1120	0.1109 ± 0.0056	0.1123 ± 0.0035
	Ω_Λ	0.738	0.728	0.734 ± 0.029	$0.728^{+0.015}_{-0.016}$
	n_s	0.969	0.961	0.963 ± 0.014	0.963 ± 0.012
	τ	0.086	0.087	0.088 ± 0.015	0.087 ± 0.014
	$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0)^c$	2.38×10^{-9}	2.45×10^{-9}	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.441^{+0.088}_{-0.092}) \times 10^{-9}$
Derived	σ_8	0.803	0.807	0.801 ± 0.030	0.809 ± 0.024
	H_0	71.4 km/s/Mpc	70.2 km/s/Mpc	71.0 ± 2.5 km/s/Mpc	$70.4^{+1.3}_{-1.4}$ km/s/Mpc
	Ω_b	0.0445	0.0455	0.0449 ± 0.0028	0.0456 ± 0.0016
	Ω_c	0.217	0.227	0.222 ± 0.026	0.227 ± 0.014
	$\Omega_m h^2$	0.1334	0.1344	$0.1334^{+0.0056}_{-0.0055}$	0.1349 ± 0.0036
	z_{reion}^d	10.3	10.5	10.5 ± 1.2	10.4 ± 1.2
	t_0^e	13.71 Gyr	13.78 Gyr	13.75 ± 0.13 Gyr	13.75 ± 0.11 Gyr

2009 gestartet: Planck-Satellit der ESA

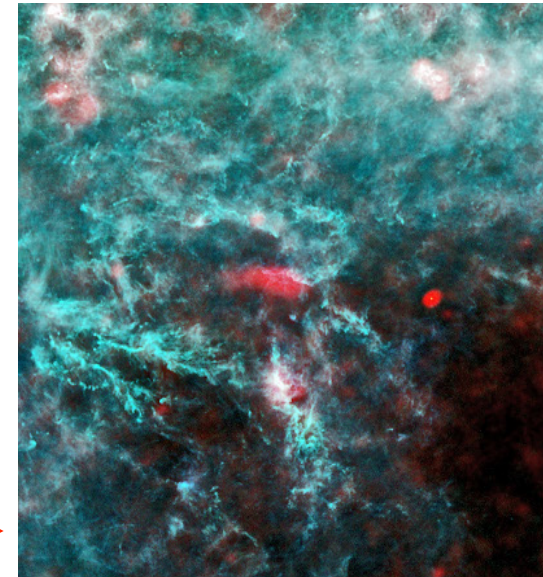
- Bessere Winkelauflösung und Empfindlichkeit als WMAP
- Untersuchung des rechten Teils des Power-Spektrums



Perseus,
Region mit wenig
aktiver Sternbildung

← Sichtbares Licht,
erdgestützte
Teleskope

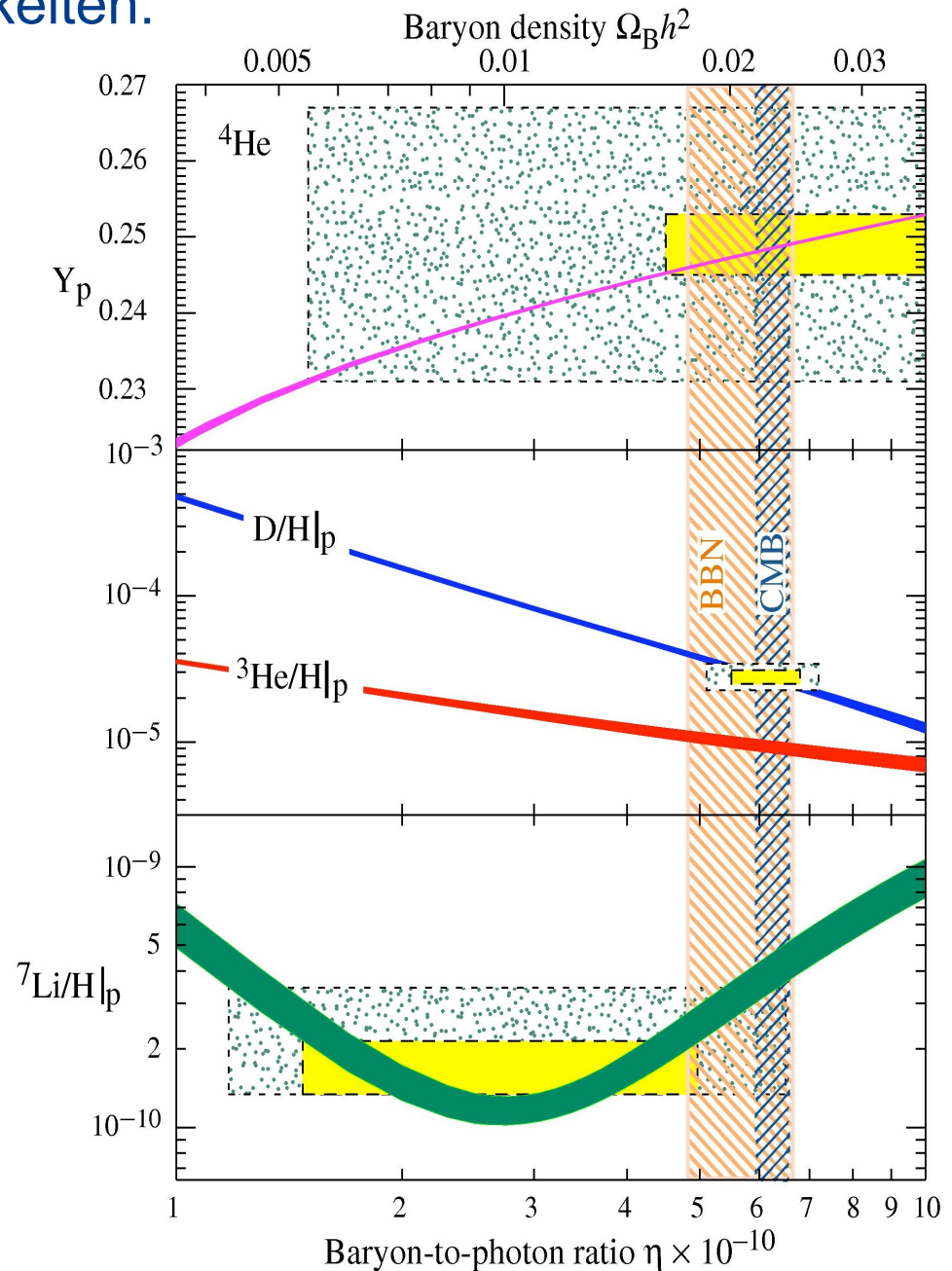
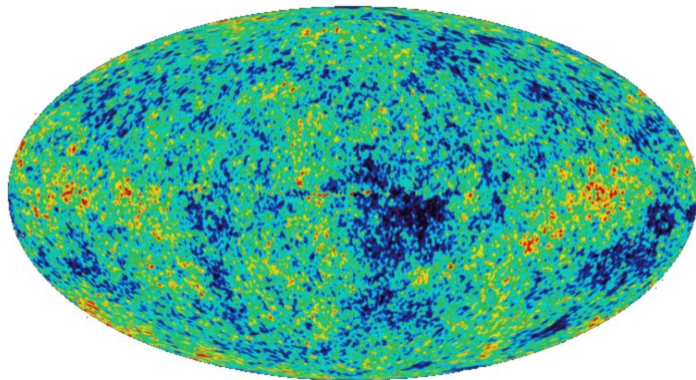
Infrarot, Planck →



Gesamtschau der Nuklidhäufigkeiten:

^4He , ^2H , ^7Li

Vorhersage und Beobachtung stimmen einigermaßen überein für diese drei Nuklide!



- Die chemischen Elemente Beryllium und Bor sowie Lithium-6 entstehen durch Höhenstrahlung.
- Aus dem Universum erreicht uns eine diffuse Hintergrundstrahlung, der kosmische Mikrowellenhintergrund (cosmic microwave background) mit 2.725 K Temperatur.
- Die Hintergrundstrahlung ist auf 10^{-5} homogen und isotrop in einem Bezugssystem, das sich mit 300 km/s Geschwindigkeit relativ zur Erde bewegt .
- Die Auswertung der 10^{-5} Anisotropien erlauben Rückschlüsse auf die Dichte baryonischer und nichtbaryonischer Materie und die gesamte Energiedichte des Universums.