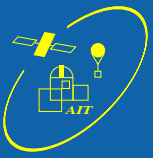


# Grundtatsachen über das Universum

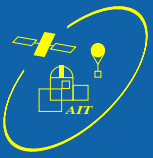
Jörn Wilms  
Department of Physics  
University of Warwick

<http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/cosmo>



## Inhalt

- „Alte“ Kosmologie
  - Raum und Zeit
  - Friedmann-Gleichungen
  - Weltmodelle
- „Moderne“ Kosmologie
  - (Urknall)
  - (Inflation)
  - Kosmologische Konstante
  - Strukturentstehung
- Zusammenfassung



## Alte Kosmologie

Kosmologie beschäftigt sich mit den Fragen über das Universum als Ganzes:

Wie entwickelte sich das Universum zu dem, was es heute ist?

Dazu Annahme von vier Grundtatsachen:

- Das Universum
- expandiert,
  - ist isotrop,
  - und ist homogen.

(„kosmologisches Prinzip“)

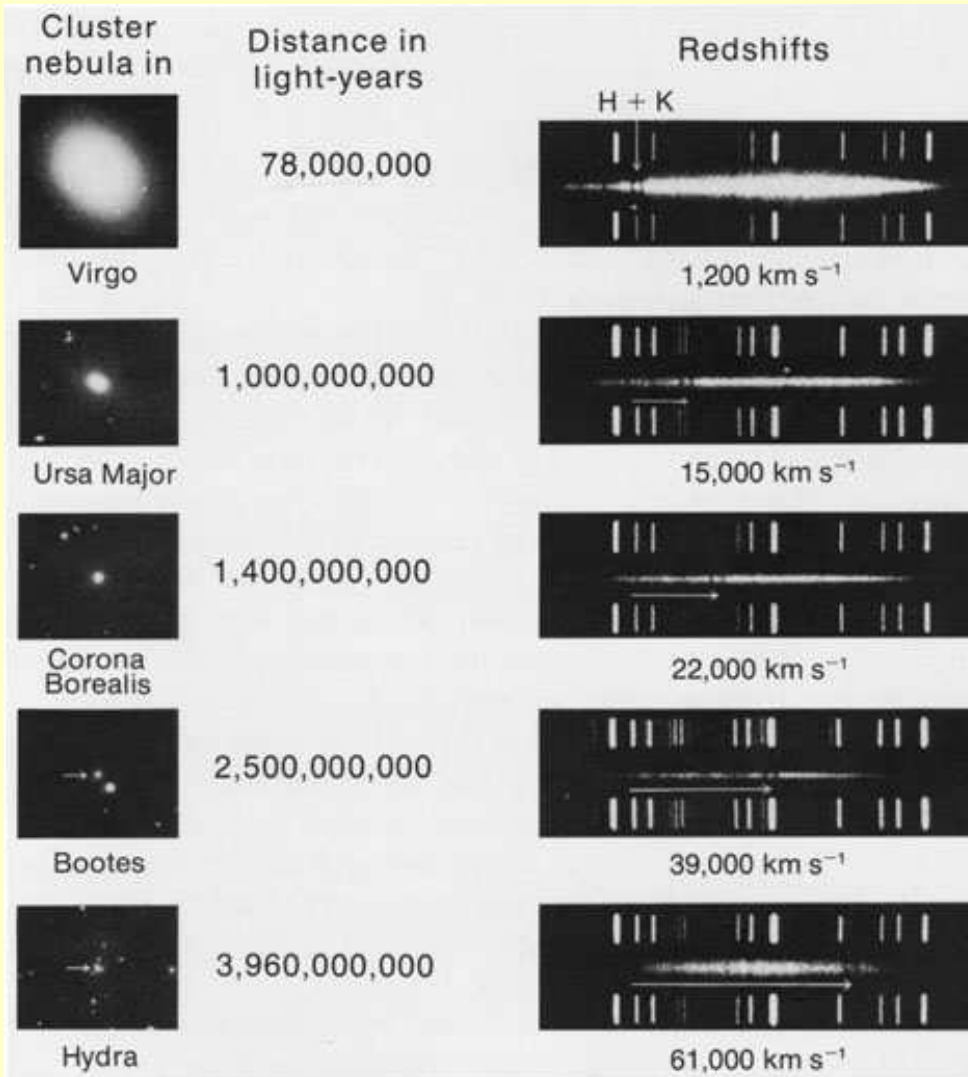
Ferner (für uns) am wichtigsten:

- Das Universum ist für Menschen bewohnbar.

(„anthropologisches Prinzip“)



# Expansion des Universums, I

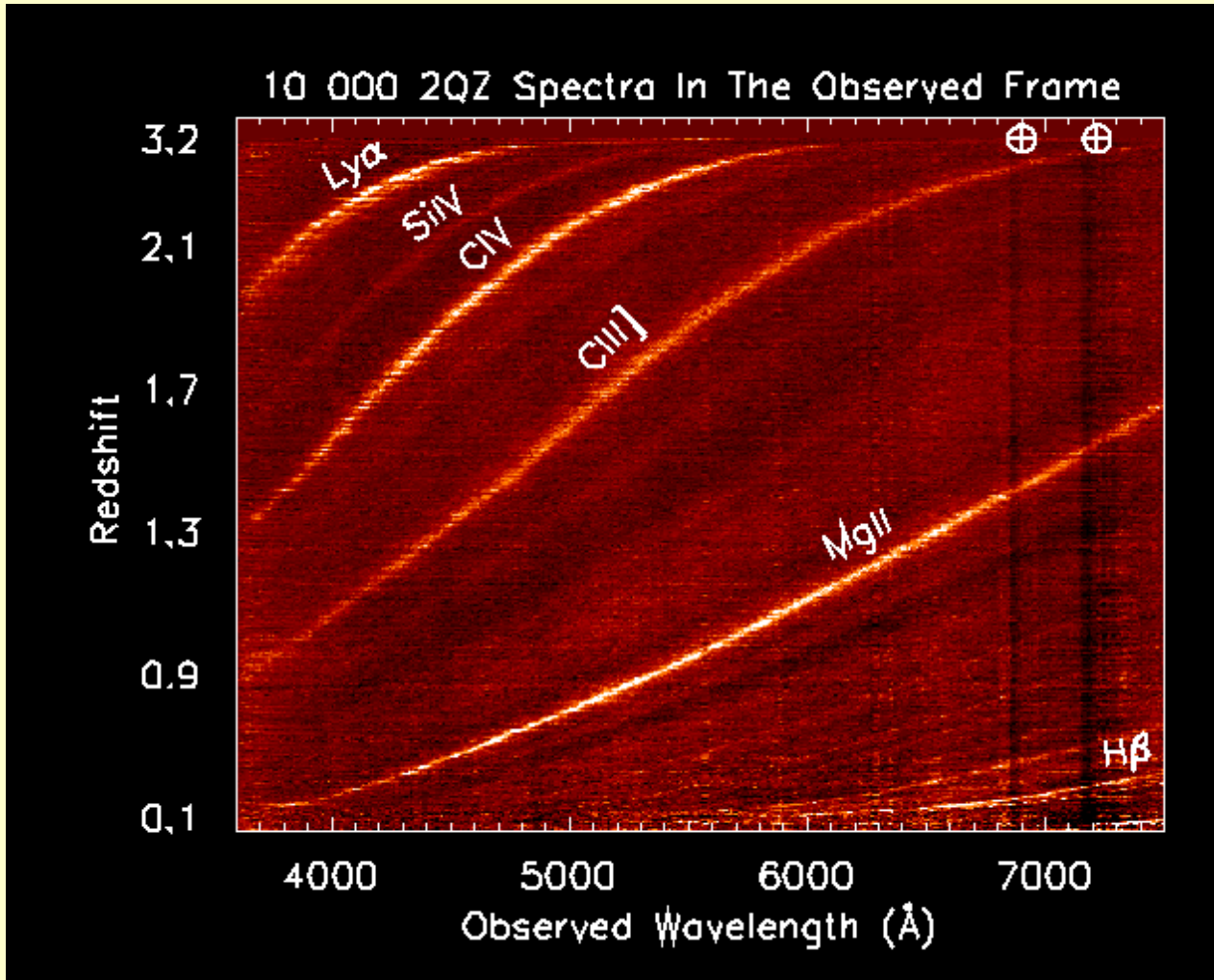


Hubble: Spektrallinien der Galaxien **rotverschoben** in Abhängigkeit von der Entfernung

⇒ “Expansion”



## Expansion des Universums, II



2dF QSO Redshift survey

Rotverschiebung:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

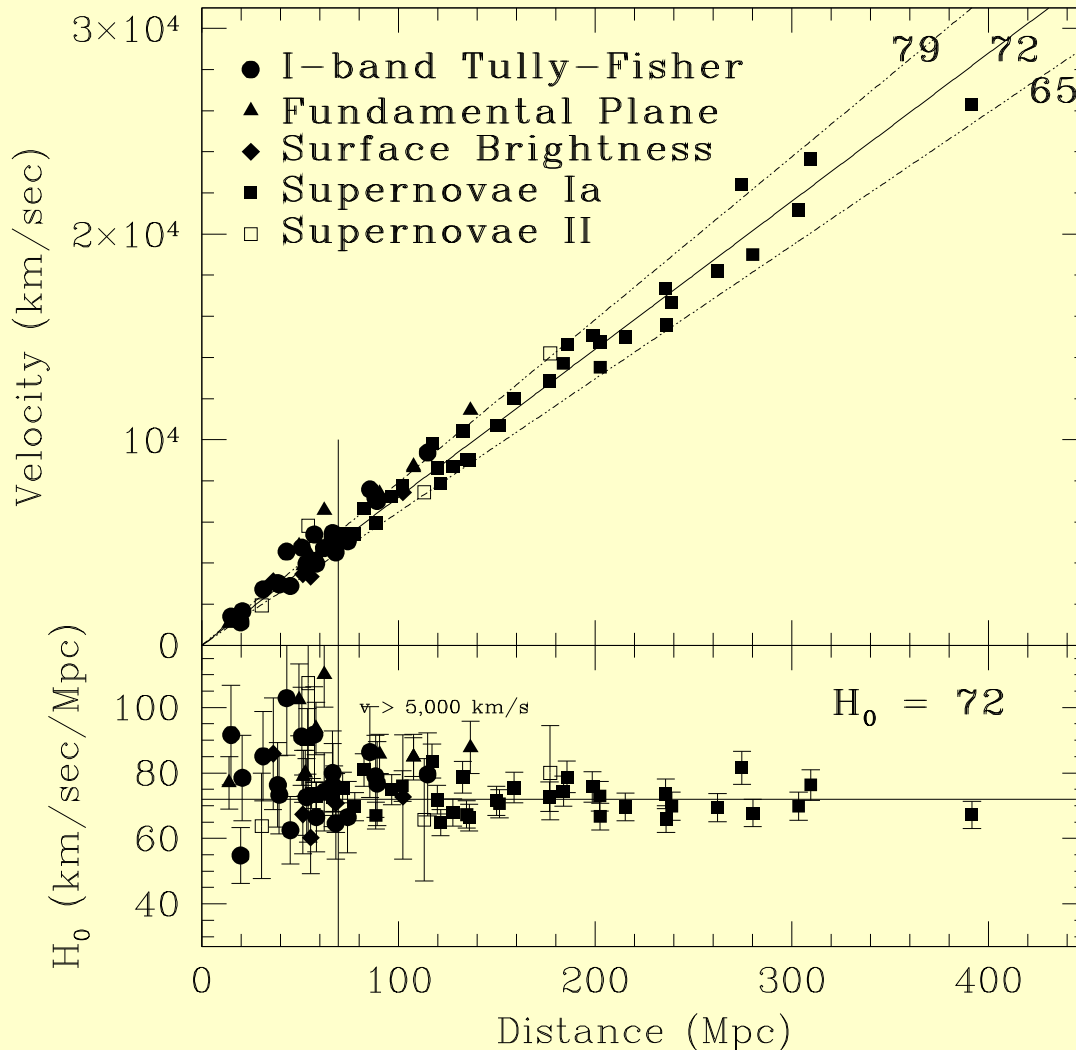
interpretiert als  
Geschwindigkeit:

$$v = cz$$

wo  $c = 300000 \text{ km s}^{-1}$   
(Lichtgeschwindigkeit)



# Expansion des Universums, III



(Freedman, 2001, Fig.4)

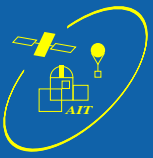
Hubble-Gesetz:

$$v = H_0 d$$

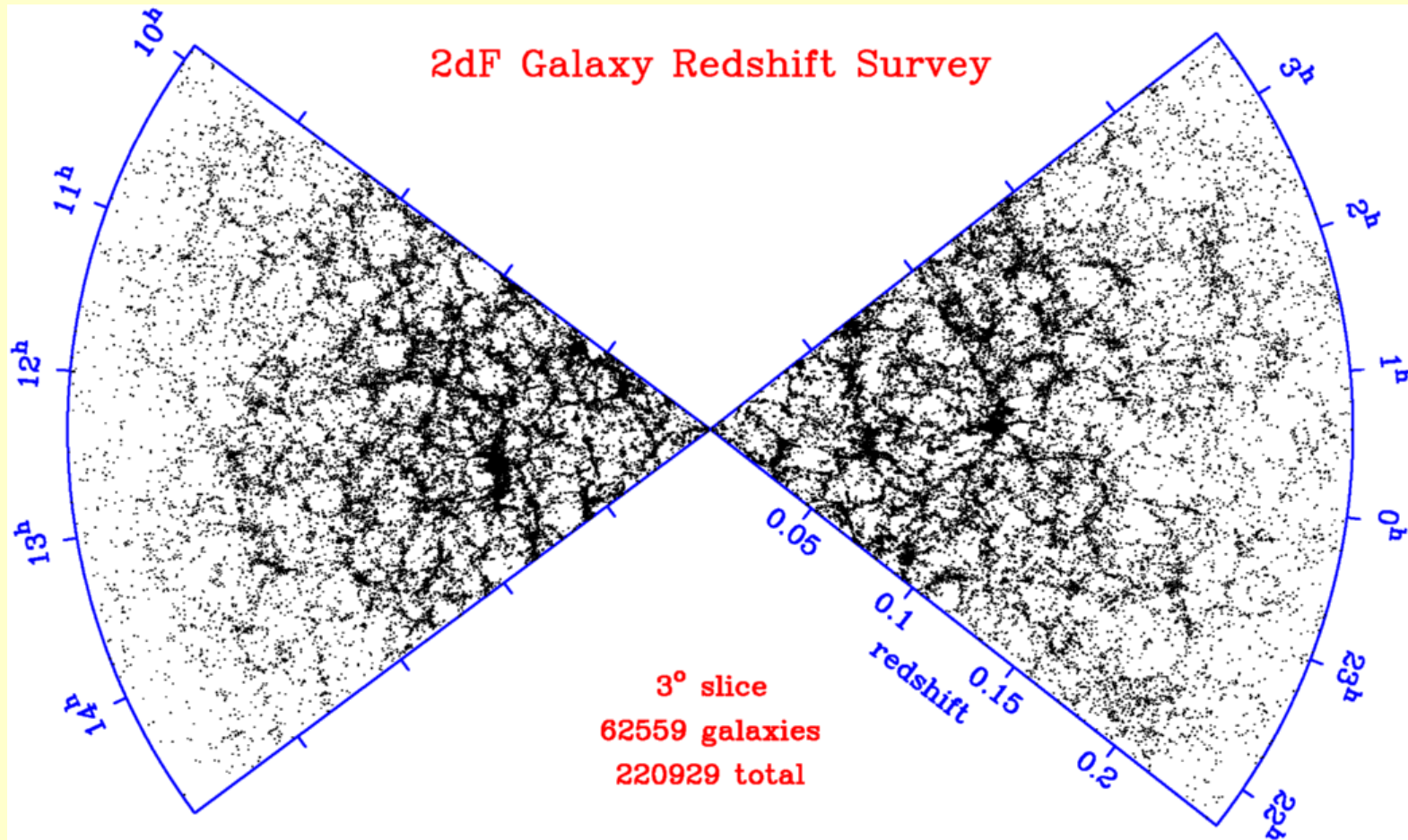
WO

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Langjährige Diskussionen über  $H_0$  sind ausgestanden...



# Homogenität

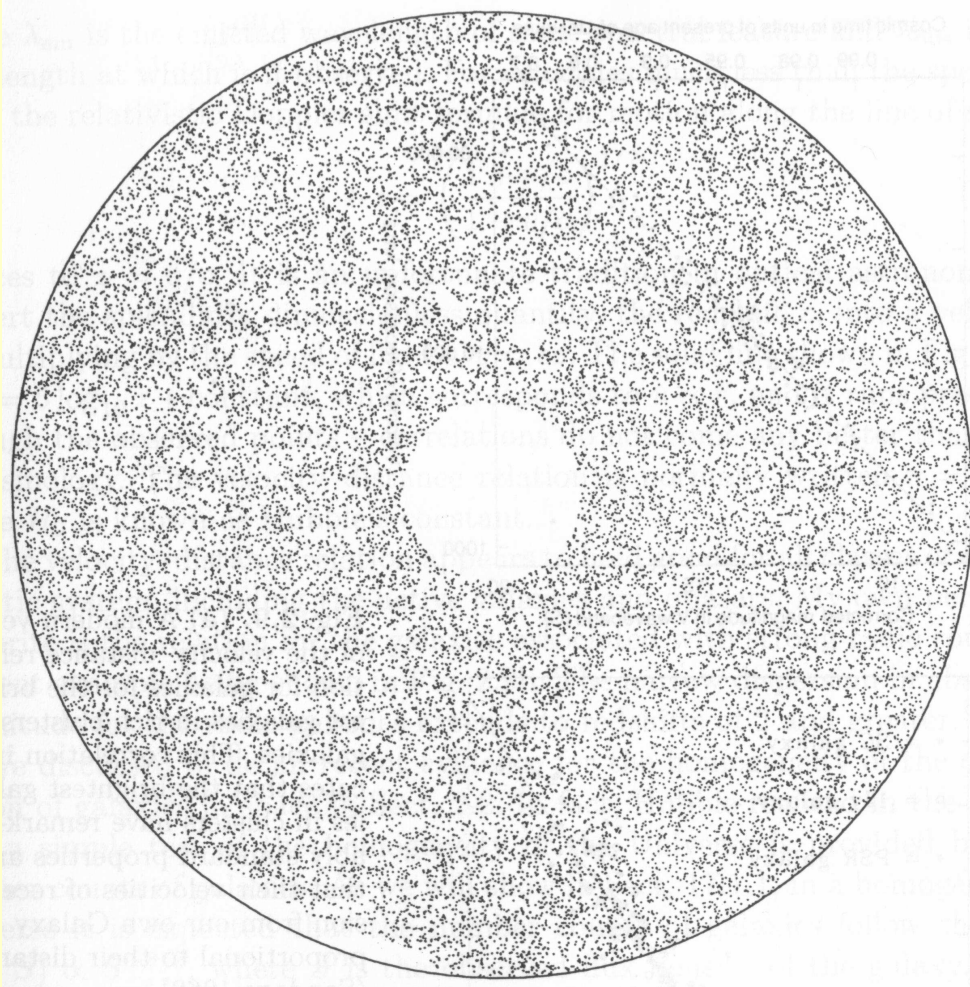


2dF Survey,  $\sim 220000$  galaxies total

**Homogenität:** „Das Universum sieht von jedem Ort aus gleich aus“  
(auf Skalen  $\gg 100$  Mpc).



# Isotropie



Peebles (1993): Verteilung von 31000 Objekten aus dem Greenbank-Katalog ( $\lambda = 6$  cm)

Das Universum ist isotrop  
 $\iff$  Das Universum sieht in  
alle Richtungen gleich aus.

N.B. Homogenität impliziert *keine*  
Isotropie, ebenso wie Isotropie von  
einem Punkt aus Homogenität  
impliziert!





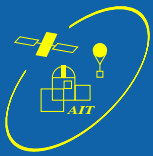
## Friedmann Gleichungen, I



Albert Einstein: Anwesenheit von Massen  
krümmt den Raum (=Gravitation)

⇒ Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

ART ist anwendbar auf Universum als ganzes!



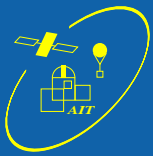
## Friedmann Gleichungen, II



*Theoretische Kosmologie:*

Kombination von

1. Relativitätstheorie



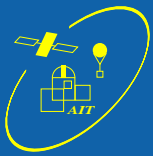
## Friedmann Gleichungen, III



*Theoretische Kosmologie:*

Kombination von

1. Relativitätstheorie
2. Thermodynamik



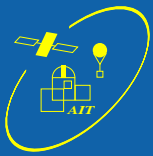
## Friedmann Gleichungen, IV



*Theoretische Kosmologie:*

Kombination von

1. Relativitätstheorie
2. Thermodynamik
3. Quantenmechanik



## Friedmann Gleichungen, V

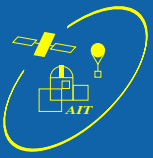


*Theoretische Kosmologie:*

Kombination von

1. Relativitätstheorie
2. Thermodynamik
3. Quantenmechanik

⇒ kompliziert



## Friedmann Gleichungen, VI



*Theoretische Kosmologie:*

Kombination von

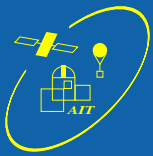
1. Relativitätstheorie
2. Thermodynamik
3. Quantenmechanik

⇒ kompliziert

Normalerweise Rechnung in drei Schritten:

1. Bestimme **Metrik**, die dem kosmologischen Prinzip entspricht
2. Erhalte **Entwicklungsgleichung** aus ART
3. Benutze Thermodynamik und Quantenmechanik für **Zustandsgleichung**

Rest ist dann einfache Rechnung...



## Friedmann Gleichungen, VII

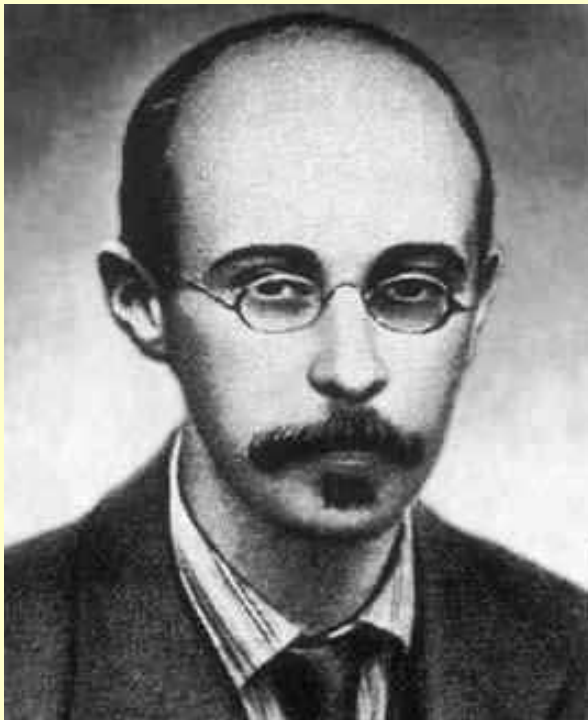
Raum, der dem kosmologischen Prinzip genügt, wird durch Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître Metrik beschrieben:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) [dr^2 + S_k^2(r) d\psi^2]$$

Wichtig: **Skalenfaktor**  $R(t)$  liefert **zeitliche Entwicklung des Universums**, wird erhalten aus Lösung der **Friedmann-Gleichungen**:

$$\begin{aligned}\ddot{R} &= -\frac{4\pi G}{3}R \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \left[ \frac{1}{3}\Lambda R \right] \\ \dot{R}^2 &= +\frac{8\pi G\rho}{3}R^2 - kc^2 + \left[ \frac{1}{3}\Lambda R^2 \right]\end{aligned}$$

( $k$ : Krümmung)



A.A. Friedmann,  
1888–1925



## Hubble Parameter, I

Interpretation der kosmologischen Rotverschiebung:

Raum dehnt sich aus (gemäß Friedmann-Gleichungen),  
Hubble-“Konstante“ ist  $\dot{R}/R$ .

Ferner gilt für Entwicklung des Hubble-Parameters:

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{R^2}{c} \left(\frac{8\pi G}{3}\rho - H^2\right) = k$$

Definiere

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} \quad \text{wo} \quad \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

so daß

- $\Omega > 1 \implies k > 0 \implies$  geschlossenes Universum
- $\Omega < 1 \implies k < 0 \implies$  offenes Universum

Momentan:  $\rho_c \sim 1.67 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$  (3... 10 H-Atome/m<sup>3</sup>).





## Hubble Parameter, II

Was trägt zu  $\Omega$  bei?

- **Gravitierendes Material:**  $\Omega_{\text{matter}}$  ( $= \Omega_{\text{m}}$ )
- **Baryonische Materie:**  $\Omega_{\text{b}}$  (Untermenge von  $\Omega_{\text{m}}$ )
- **Vakuum:**  $\Omega_{\Lambda}$

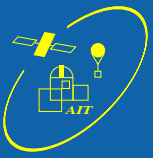
$$\Omega_{\Lambda} = \frac{8\pi G \rho_{\text{V}}}{3H^2} = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$$

Konsequenz aus Quantenfeldtheorie und ähnlichen Theorien.

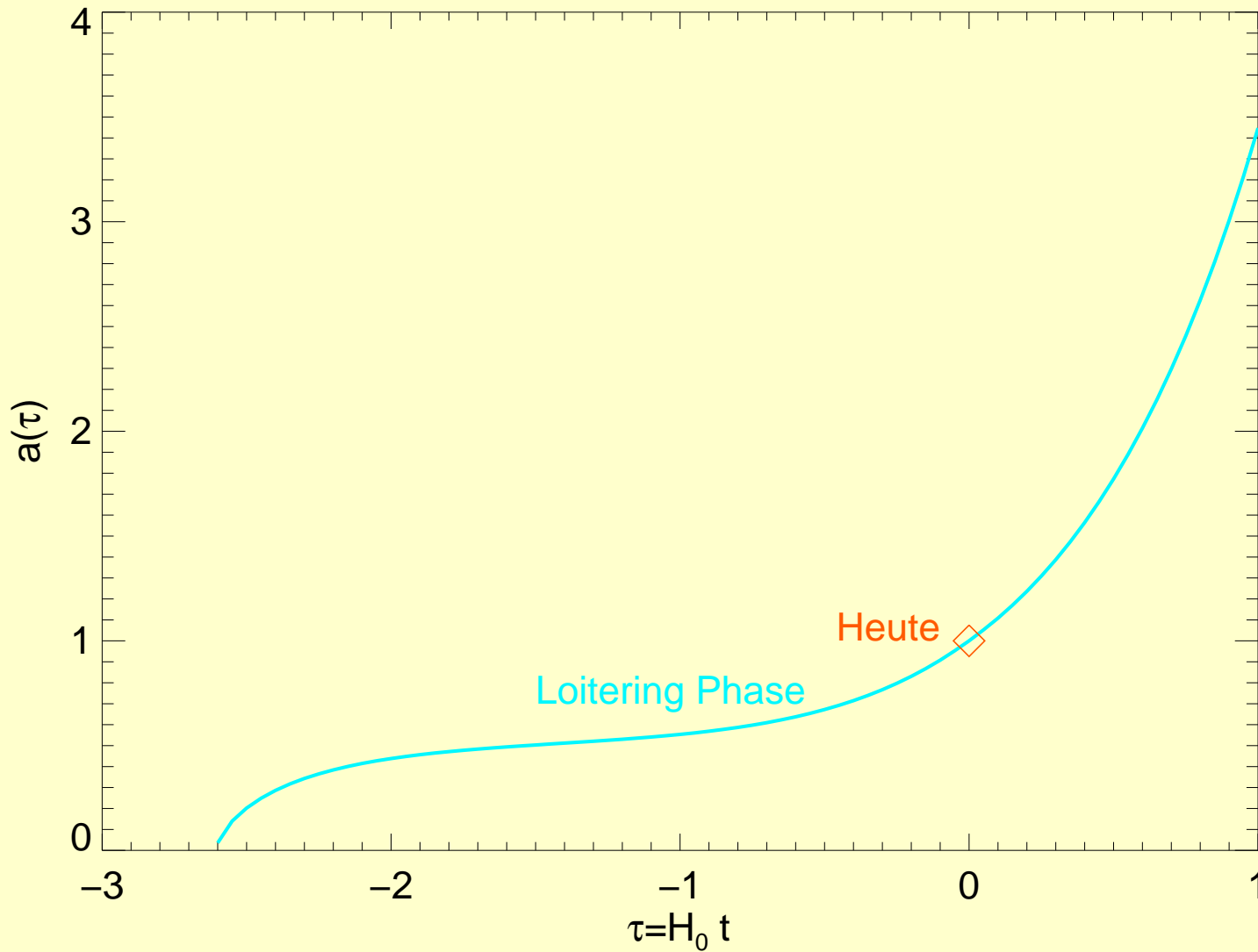
Vorhersage der **Inflationstheorie:**

$$\Omega = \Omega_{\text{m}} + \Omega_{\Lambda} = 1$$

⇒ Muß durch Beobachtungen bestätigt werden...



# Weltmodelle, I



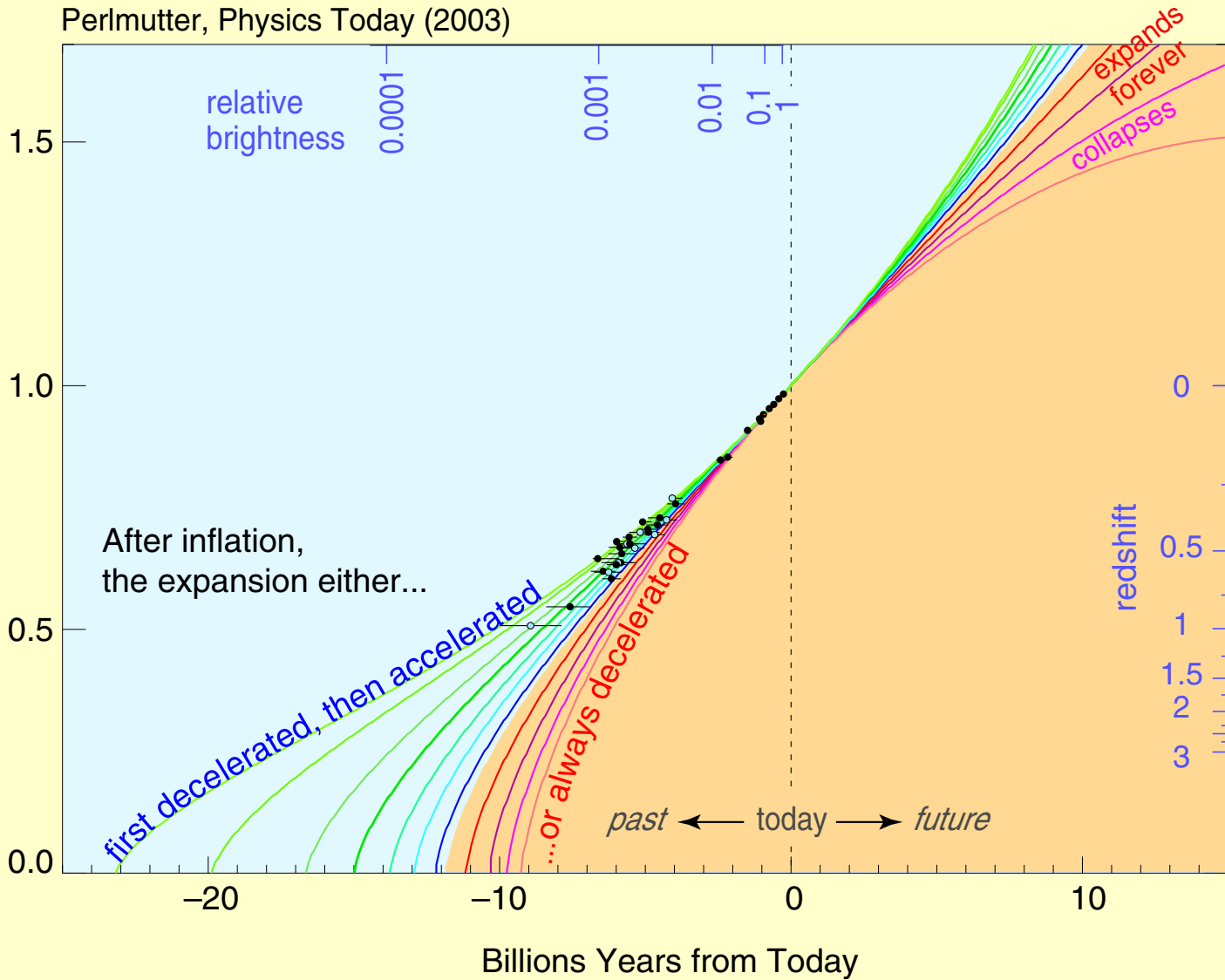
“Loitering universe” mit  $\Omega_m = 0.55$ ,  $\Omega_{\text{Lambda}} = 2.055$

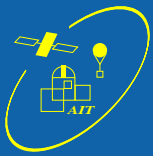


# Weltmodelle, II

## Expansion History of the Universe

Perlmutter, Physics Today (2003)





## Zusammenfassung

Moderne Kosmologie = Bestimmung von  $H_0$ ,  $\Omega$  und  $\Lambda$  aus Beobachtungsdaten und Vergleich mit Theorie

Im folgenden: Beispiele für neue Messungen zur Bestimmung von  $\Omega$  und  $\Lambda$ :

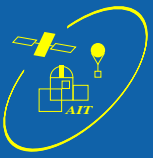
- **Supernova-Beobachtungen** und
- **Kosmischer Mikrowellenhintergrund (WMAP)**.

Allgemeine Hoffnung: Bestätigung von  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ .



SN1994d (HST WFPC)

Supernovae: Leuchtkräfte vergleichbar zu Galaxien:  $\sim 10^{51}$  erg/s in Licht, 100× mehr in Neutrinos.



## Supernovae, II

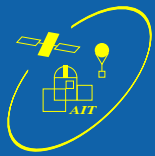
SN Ia = Explosion von CO weißen Zwerg wenn er über Chandrasekhar-Grenze ( $1.4 M_{\odot}$ ) gestoßen wird (via Accretion?).

⇒ Immer ähnlicher physikalischer Prozess

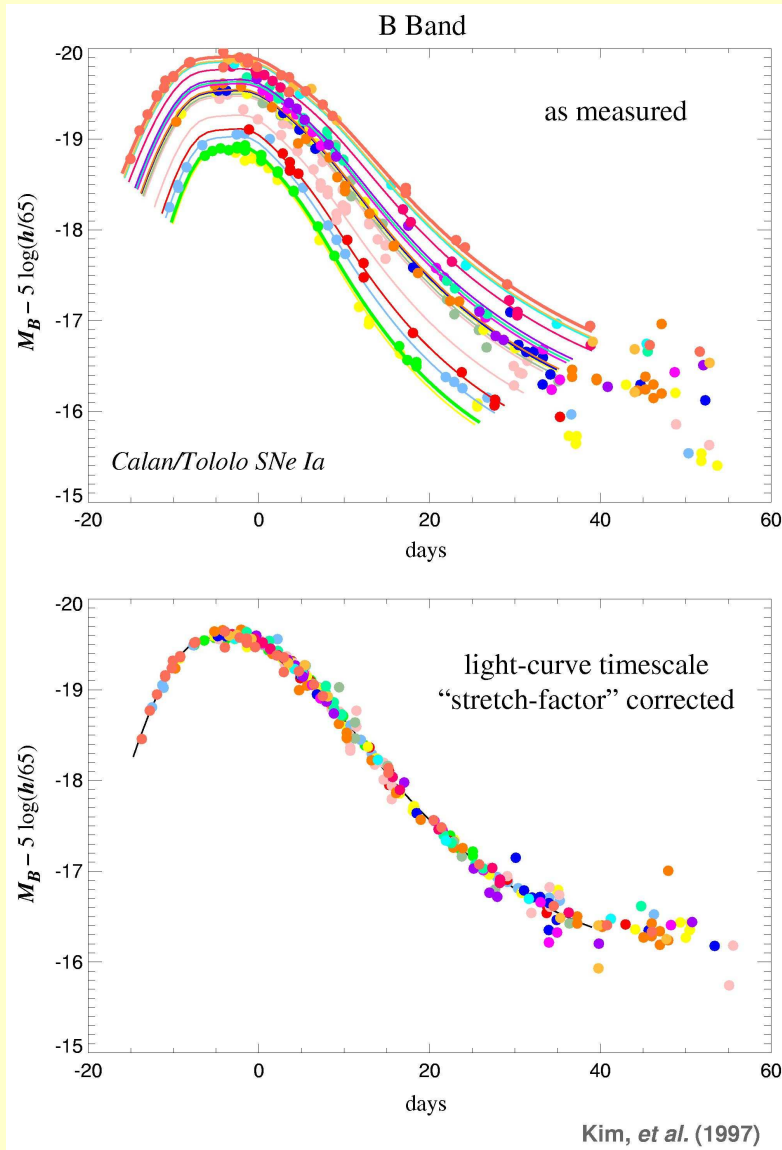
⇒ Sehr **charakteristische Lichtkurven**: **fast rise**, **rapid fall**, **exponential decay** (FRED) mit Halbwertszeit von  $\sim 60$  d.

60 d Skala aus radioaktivem Zerfall  $\text{Ni}^{56} \rightarrow \text{Co}^{56} \rightarrow \text{Fe}^{56}$  ("Selbstkalibration" der Lichtkurve wenn überall gleiche Menge  $\text{Ni}^{56}$  produziert wird.)

Beobachtbar bis zu **Entfernungen von 1 Gpc** ( $L \sim 10^{9...10} L_{\odot}$ ).



# Supernovae, III



Eichung durch Beobachtung naher ( $z < 0.1$ ) SN Ia, generell stimmen Lichtkurven gut überein.  $\implies$  Standardkerze

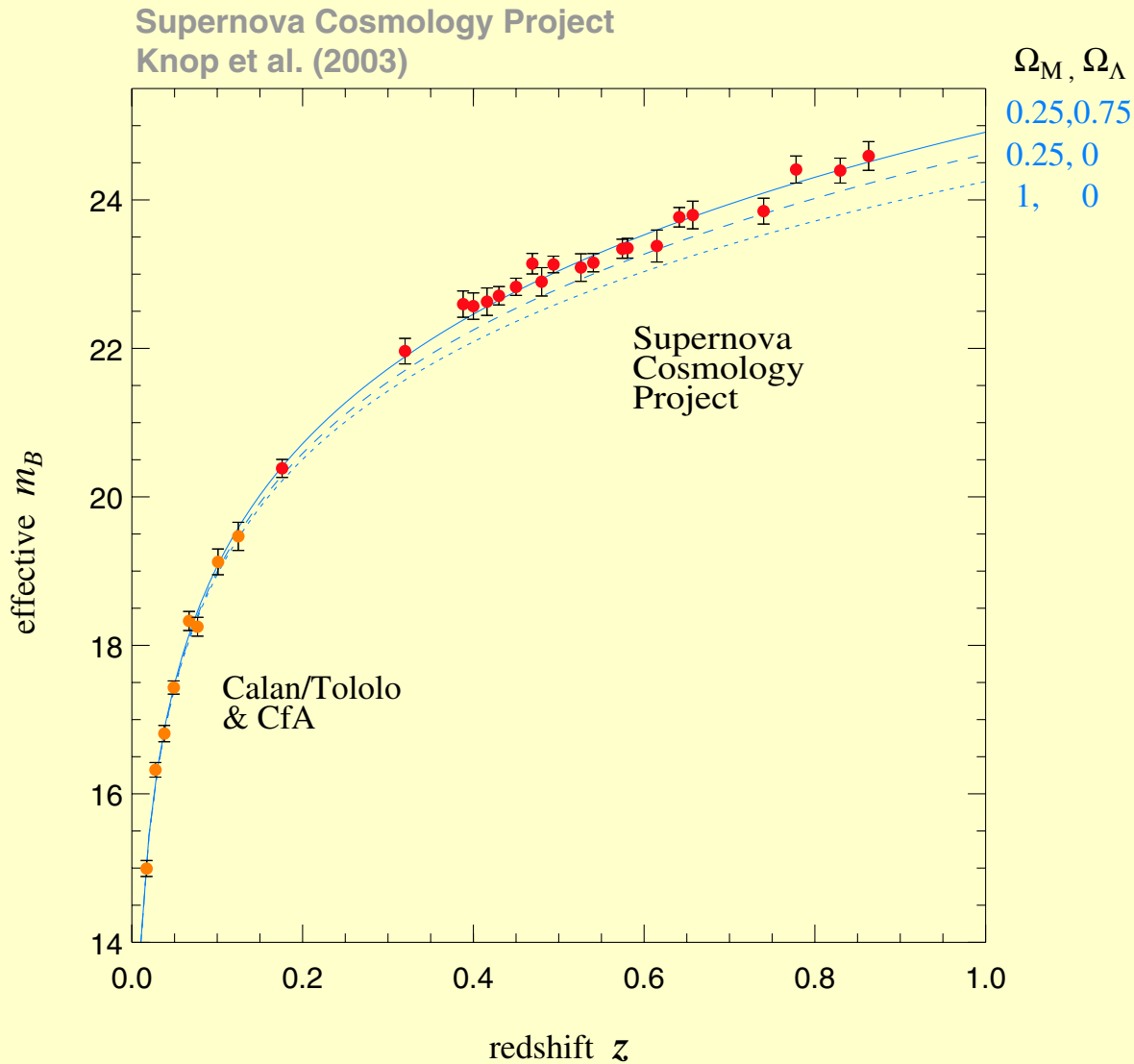
Mögliche Kritikpunkte:

- **Vorgeschichte** des CO-Weißen Zwergs? (Elementhäufigkeiten?)
- **Extinktion** in der Hostgalaxie?
- **Spektroskopische Pekularitäten**
- Verschiedene **Abfallraten** und **Farben** (allerdings gute Korrelation max. Helligkeit und Abfallgeschwindigkeit)

Dennoch momentan beste Methode.



# Supernovae, IV



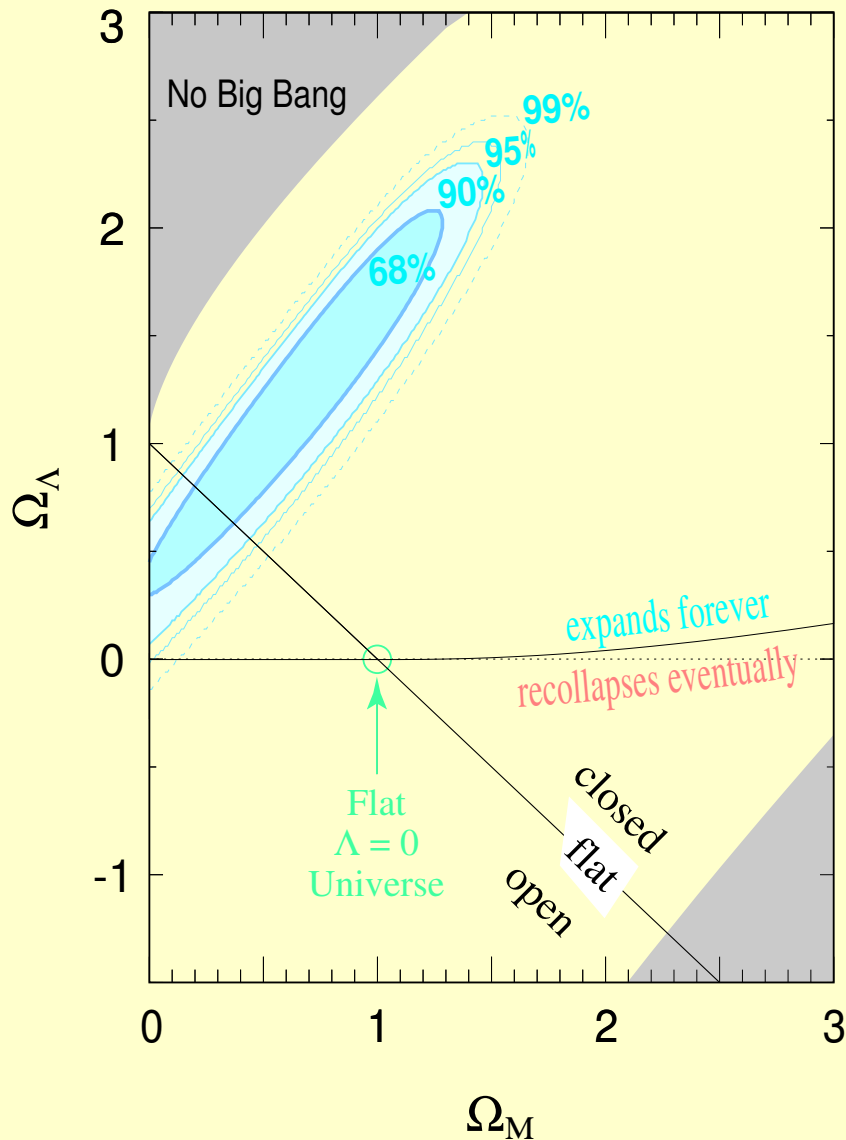
Supernova-Daten werden  
gut durch Modelle mit  
 $\Omega_m = 0.25$  und  $\Omega_\Lambda = 0.75$   
erklärt.

$\Omega_\Lambda = 0$  wird durch Daten  
*ausgeschlossen*.





# Supernovae, V

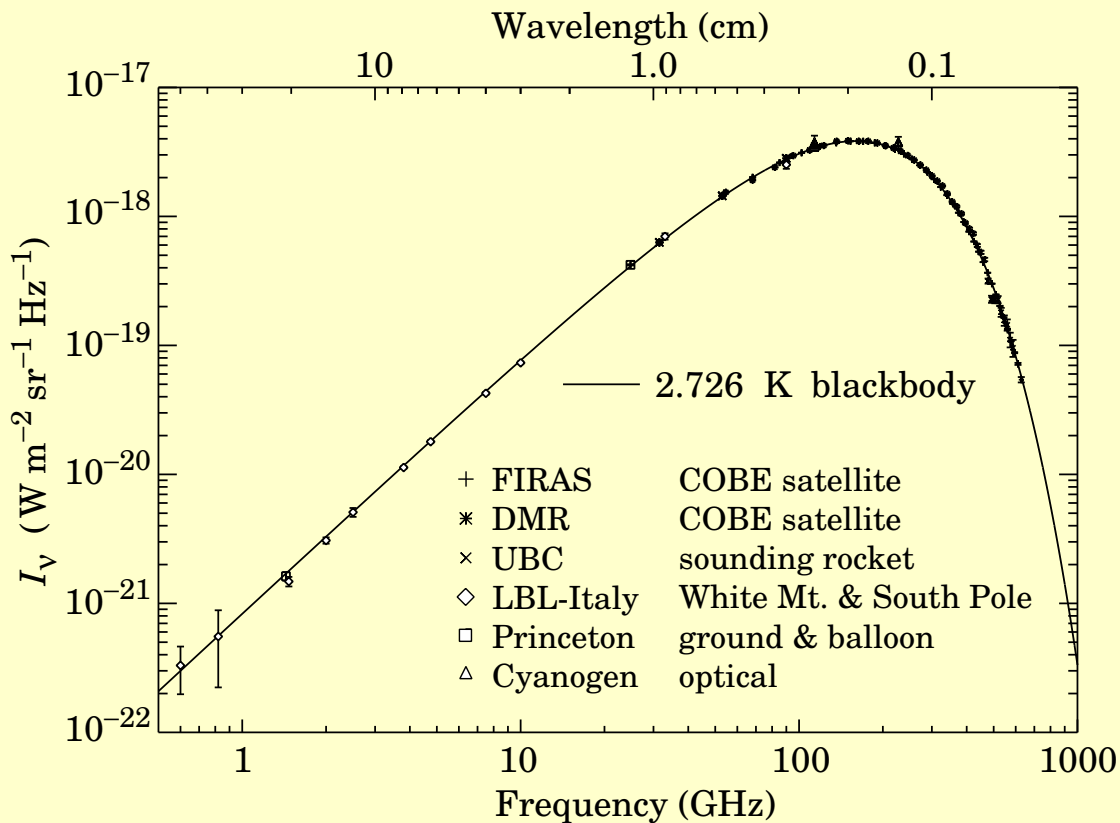


Konfidenzbereiche für  $\Omega_\Lambda$  und  $\Omega_m$   
(Perlmutter et al., 1999).

dunkle Bereiche: 68% Konfidenz, außen: 90%



# Mikrowellen-Hintergrund, I



(Smoot et al., 1997, Fig. 1)

Penzias & Wilson (1965):  
“Measurement of Excess  
Antenna Temperature at  
4080 Mc/s”  $\implies$  **Kosmischer  
Mikrowellenhintergrund**  
(Cosmic Microwave  
Background; CMBR):

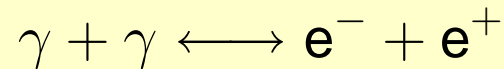
CMB Spektrum konsistent  
mit Planck'schem  
Spektrum mit Temperatur  
 $T_{\text{CMBR}} = 2.728 \pm 0.004 \text{ K.}$

$\implies$  **Relikt des Big Bang.**

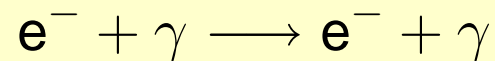


## Mikrowellen-Hintergrund, II

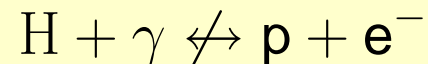
Entstehung der Hintergrundstrahlung: Frühes Universum war **heiß und dicht**  
⇒ Gleichgewicht zwischen **Strahlung** und **Materie**:



oder durch Comptonstreuung:



Fällt Temperatur unter Ionisationstemperatur für Wasserstoff,

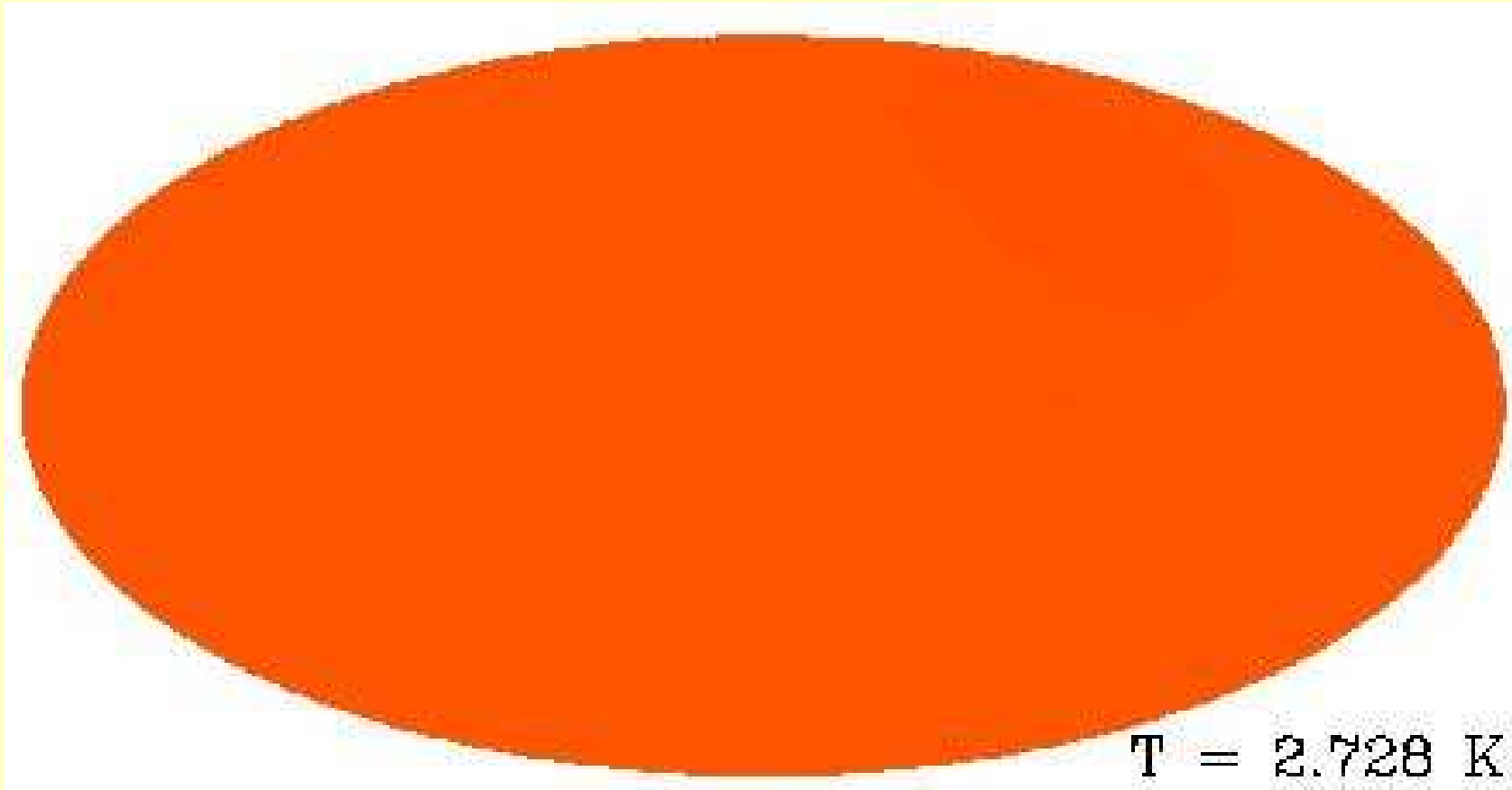


dann **Entkopplung von Strahlung und Materie**, Photonen kühlen sich seither adiabatisch ab.

Entkopplung hängt ab vom Zustand des Universums am Ort der Entkopplung.

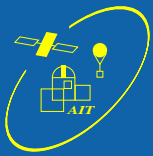


## Mikrowellen-Hintergrund, III

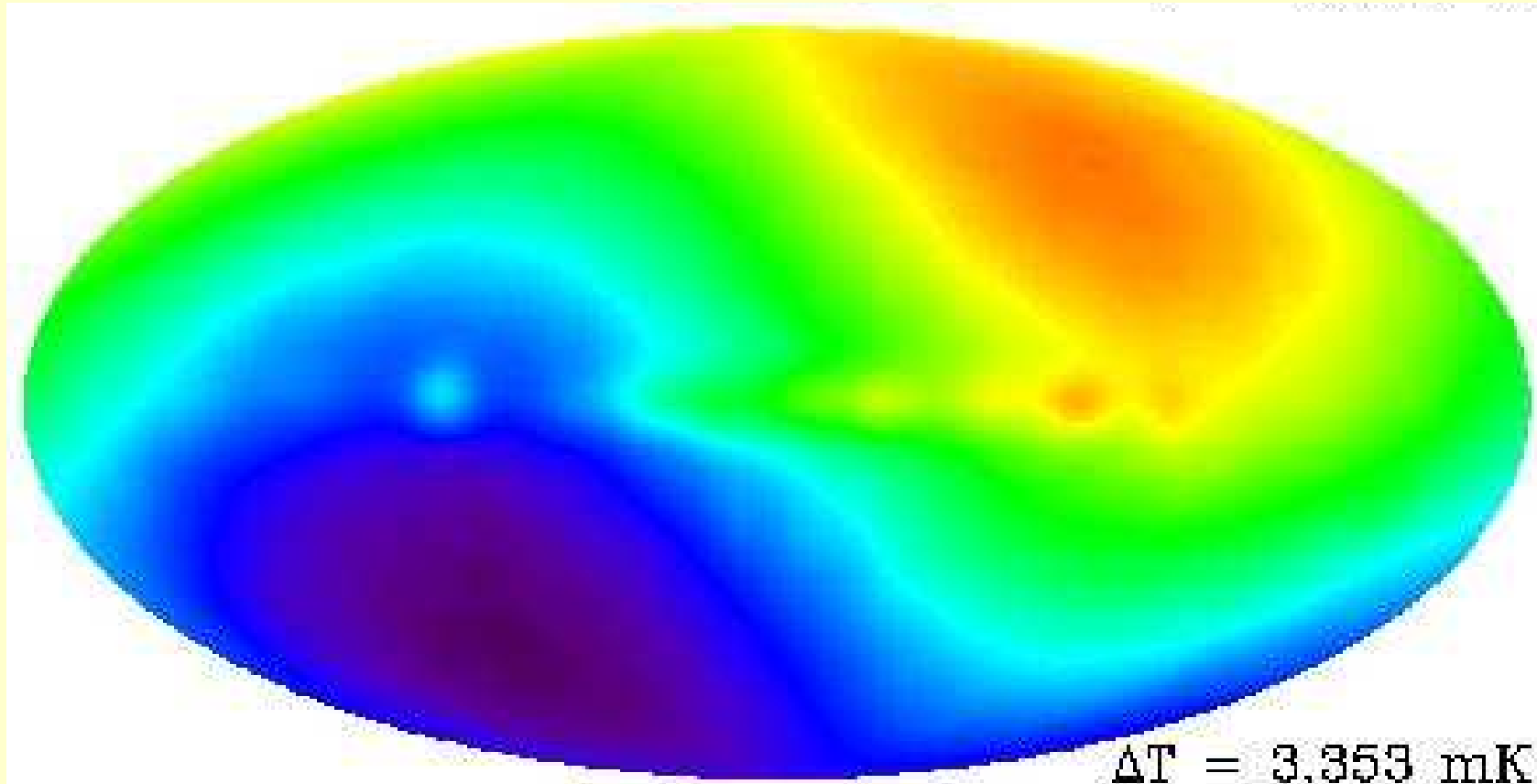


COBE (1992): Erste Karte der 3K-Hintergrundstrahlung

$T = 2.728 \text{ K}$

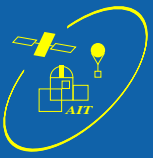


## Mikrowellen-Hintergrund, IV

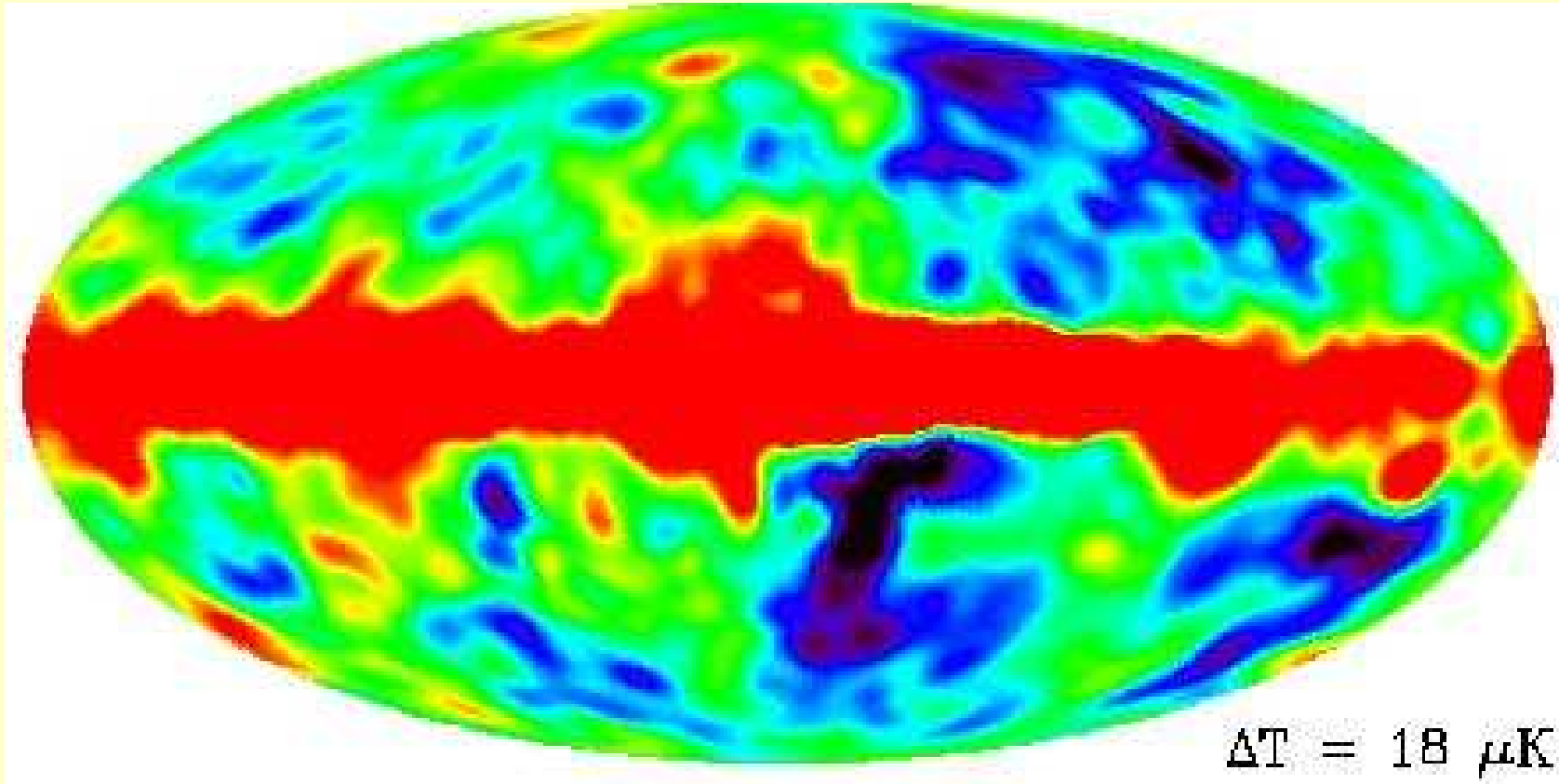


Überlagert: **Dipol Anisotropie** durch Bewegung des Sonnensystems

$$\Delta T/T \sim 10^{-4}$$



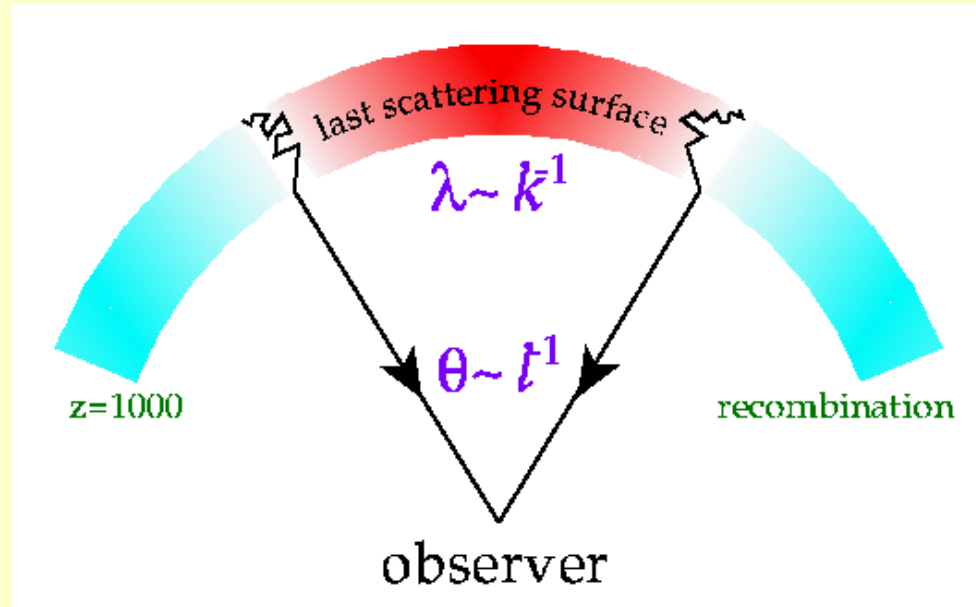
## Mikrowellen-Hintergrund, V



Auf Niveau von  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ : **Strukturen** aufgrund von Form der Fläche der letzten Streuung.



## Strukturentstehung



courtesy Wayne Hu

Kopplung Strahlung und Materie  $\implies$  Hohe Dichte = hohe Photonendichte

Photonen aus überdichten Regionen: **Gravitationsrotverschiebung**  $\implies$   
beobachtbar (**Sachs Wolfe Effect**)

CMBR Fluktuationen = Gravitationspotential bei  $z \sim 1100!$



## Strukturentstehung

Beschreibe Temperaturvariation am Himmel mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{\ell, m} a_{\ell, m} Y_{\ell, m}(\theta, \phi)$$

Da rotationssymmetrisch (Isotropie)

⇒ Einfachere Darstellung mit **Multipolkoeffizienten**,  $C_\ell$ :

$$\left\langle \frac{\Delta T}{T} \right\rangle = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} |a_{\ell, m}| P_{\ell}(\cos \theta) =: \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} (2\ell + 1) C_{\ell} P_{\ell}(\cos \theta)$$

(gemittelt über alle  $\phi$ ).

Plot von  $C_\ell$  als Funktion von  $\ell$ : **Power Spektrum**





## Strukturentstehung

Was wird erwartet?

$\ell$  **klein:** große Skalen ( $>$  Horizont beim Decoupling): flach („Sachs-Wolfe Effekt“)

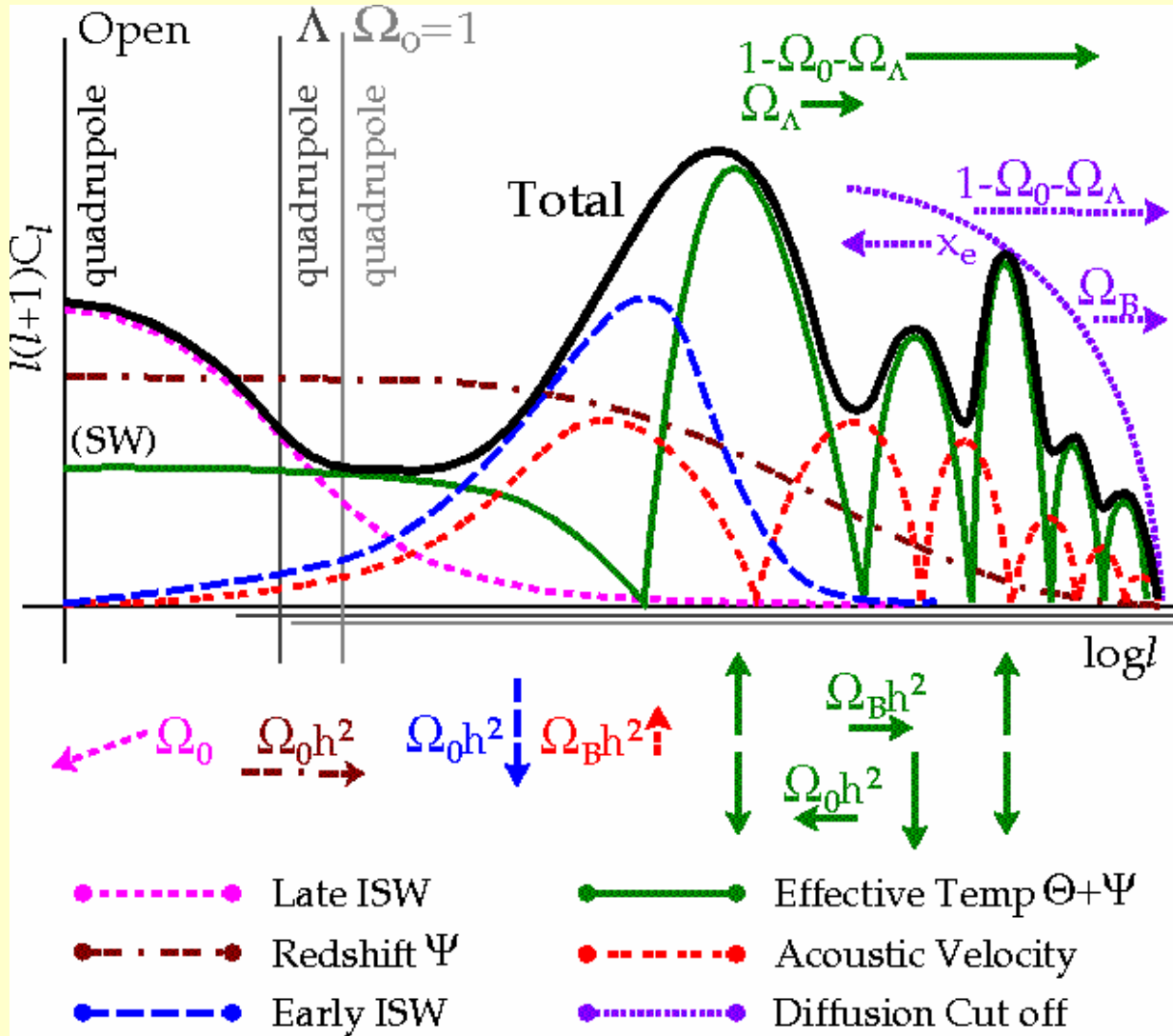
$\ell$  **groß:** kleine Skalen: **Akustische Peaks:** Modifikation wegen Strukturbildung:

- Materie fällt in Minimum des Gravitationspotentials („Struktur“)
- Druck baut sich auf
- Oszillationen
- Wechselwirkung Materie-Strahlung
- „**Akustische Peaks**“

Dämpfung mancher Oszillationen durch Compton-Streuung, Photonendiffusion (Silk-Effekt, nach J. Silk).



# Strukturentstehung



Hu, Sugiyama, & Silk (1995)

Theorie: Position der Peaks hängt ab von

$$\Omega_b \quad H_0 \quad \Omega_0$$

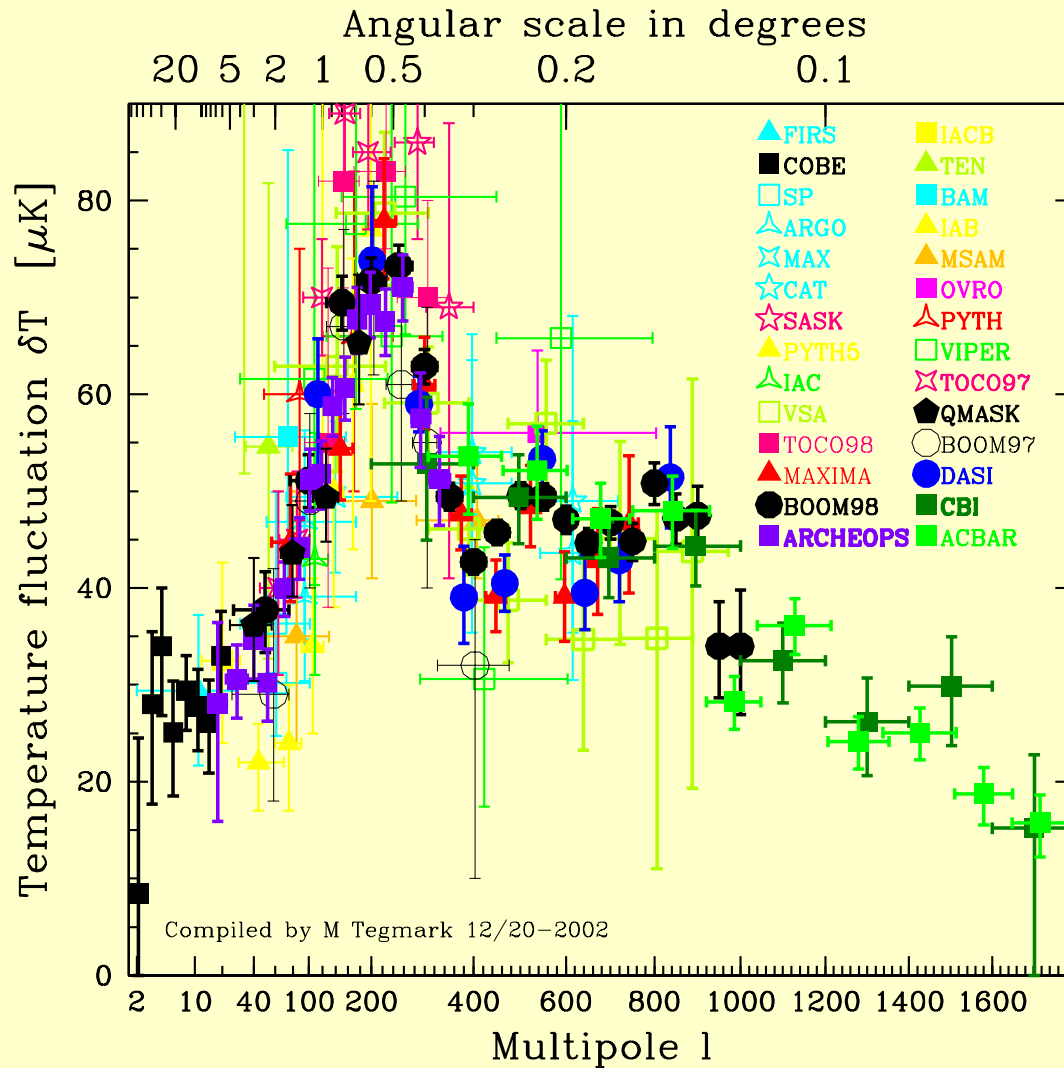
COBE: 1. akustischer Peak bei Skalen  $< 7^\circ$ .



BOOMERANG (1998 Dec/1999 Jan); courtesy BOOMERANG team



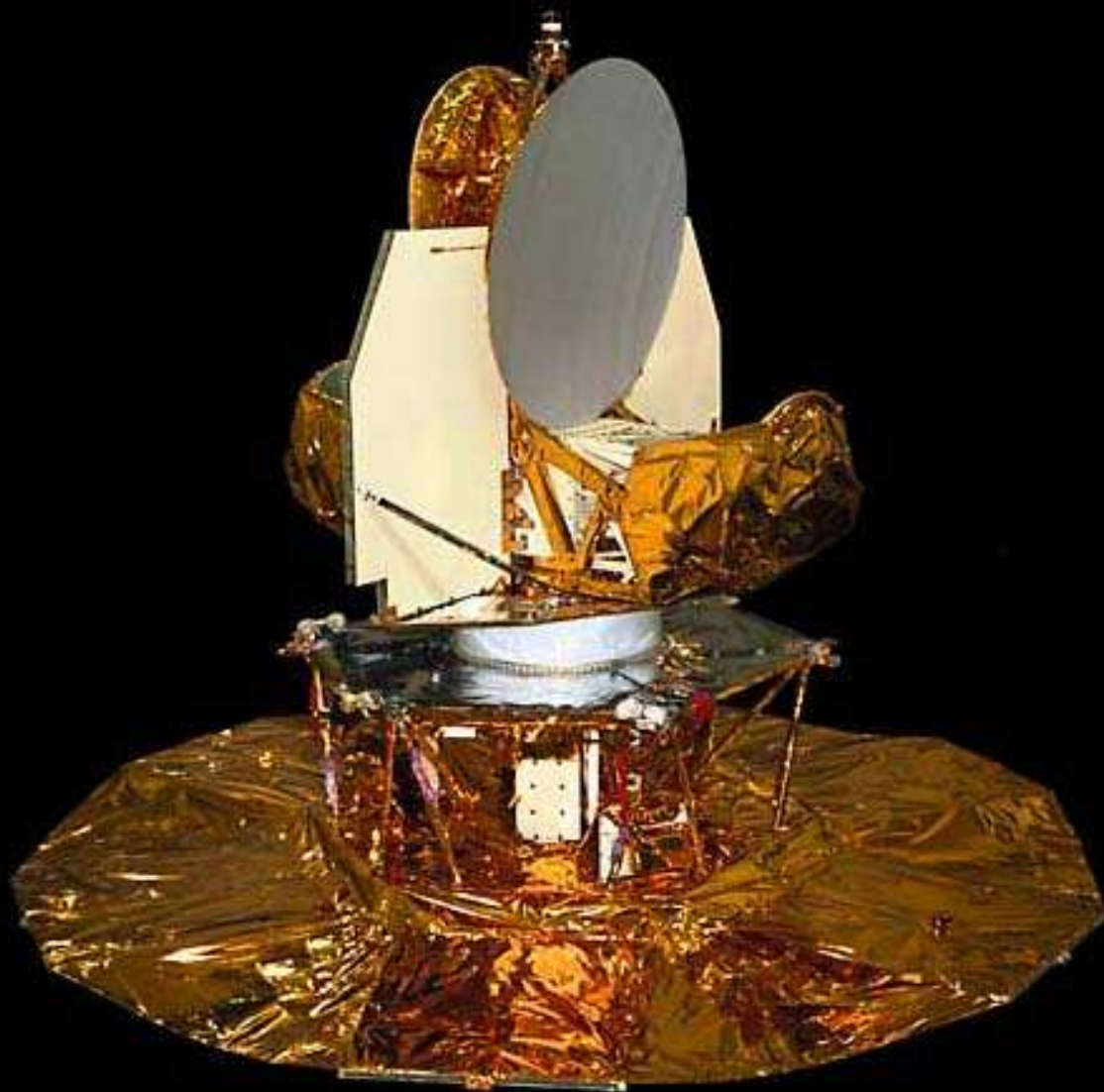
# Strukturentstehung



Courtesy M. Tegmark

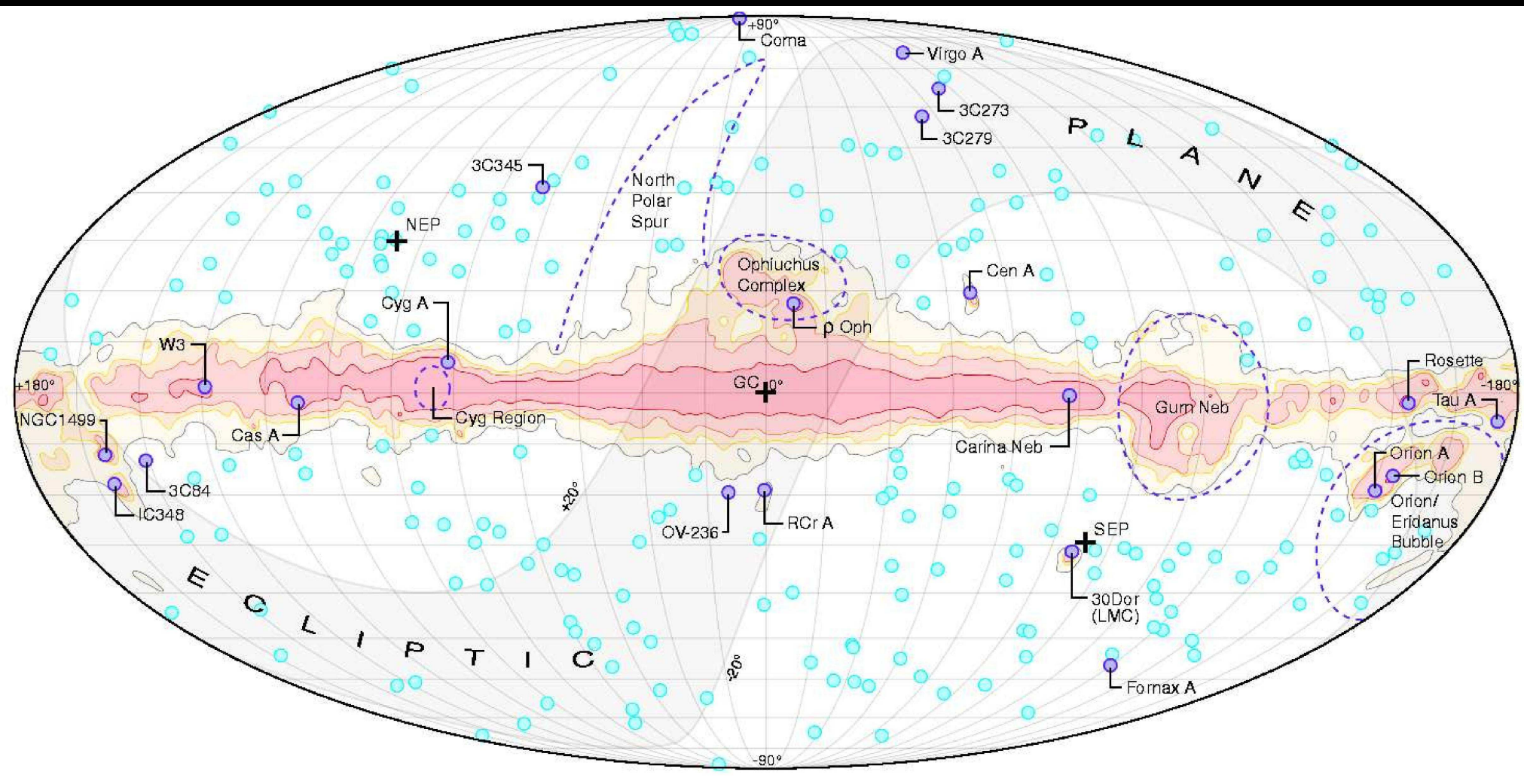
1. akustischer Peak von  
BOOMERANG 1999  
gefunden

...seither von vielen Experi-  
menten bestätigt.

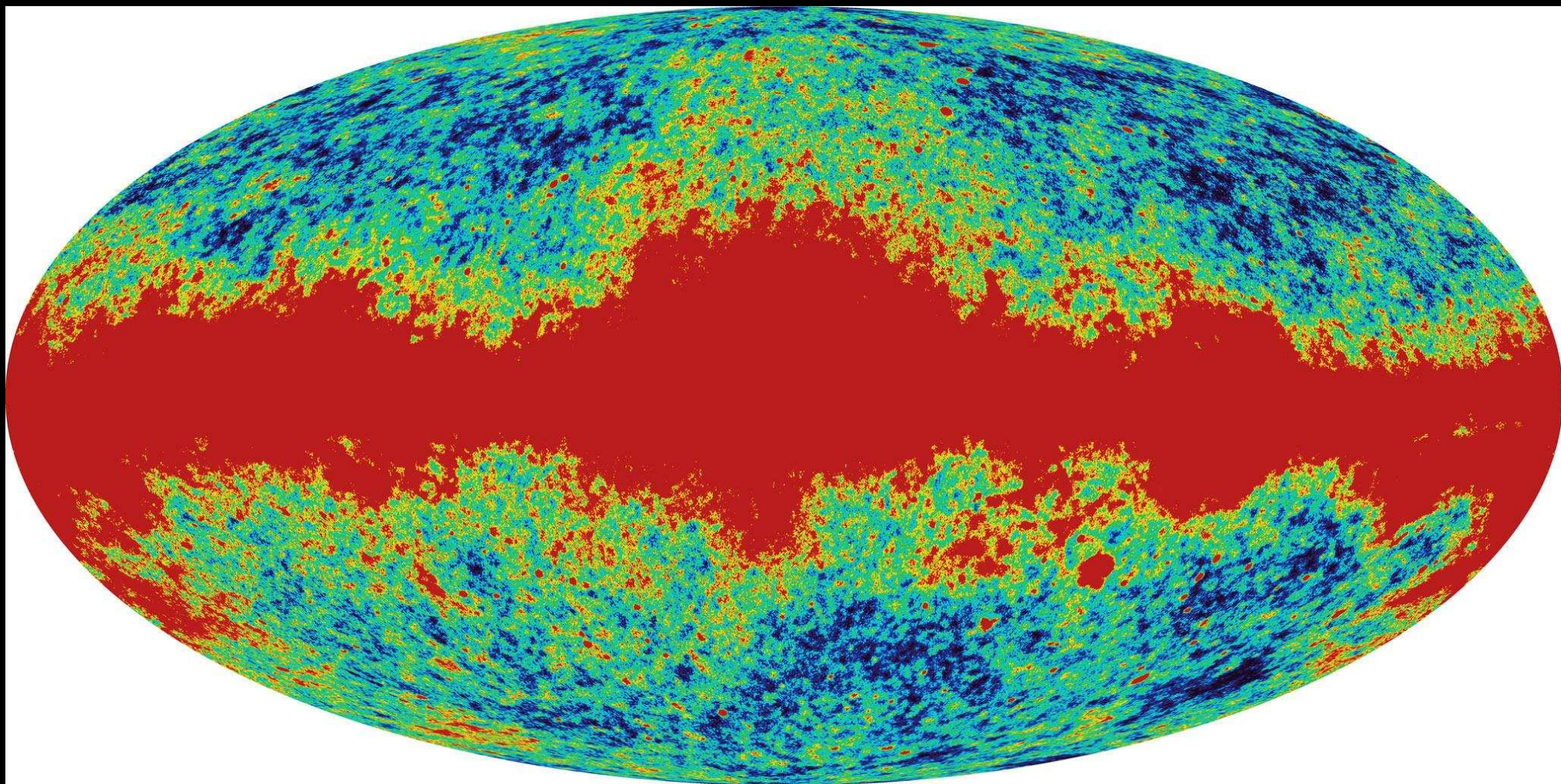


Wilkinson Microwave Anisotropy  
Probe (WMAP): Start 2001 Juni  
30, erste Veröffentlichungen 2003  
Februar

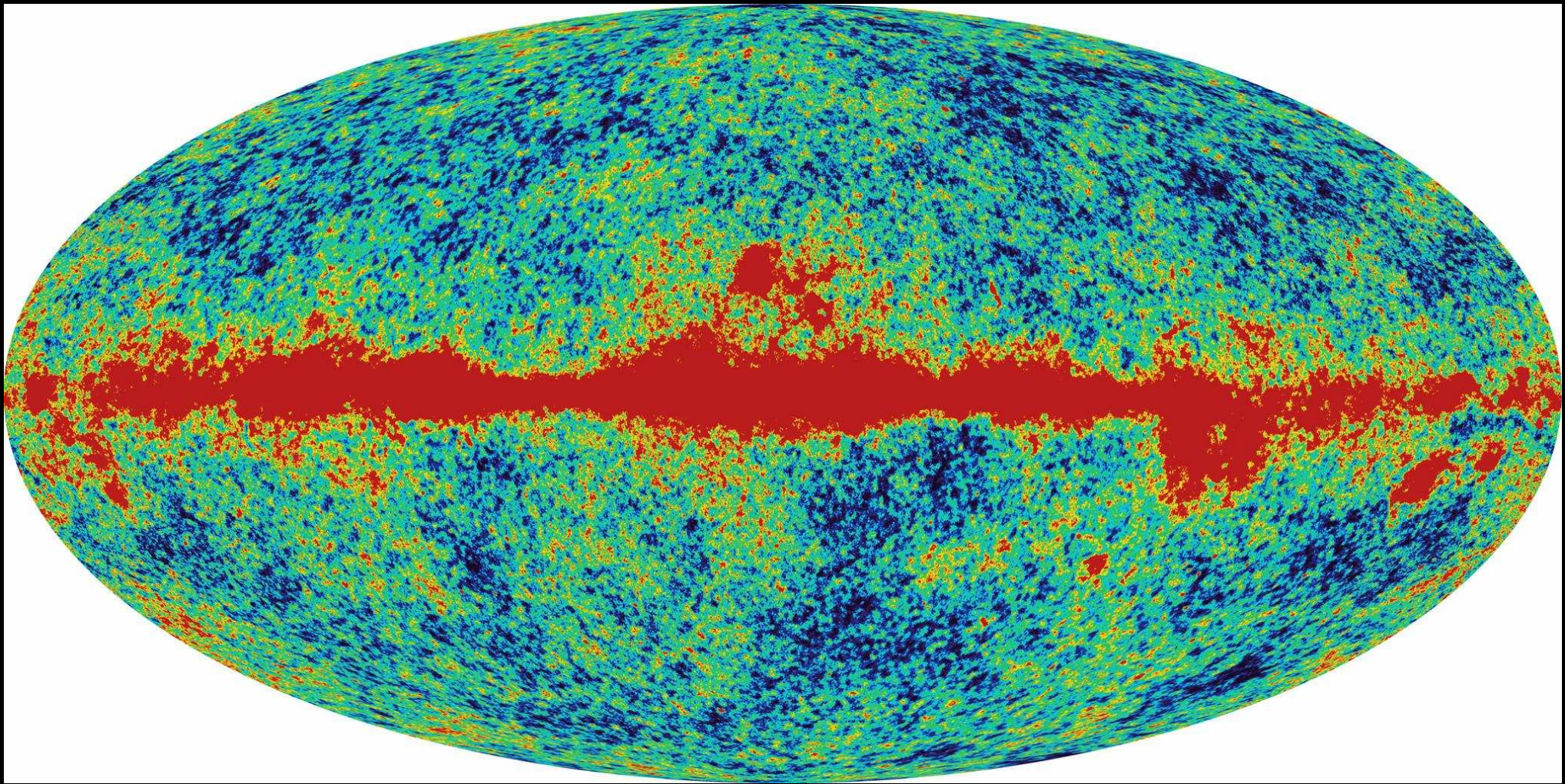
MAP990389



Vordergrundfeatures im Mikrowellenhimmel

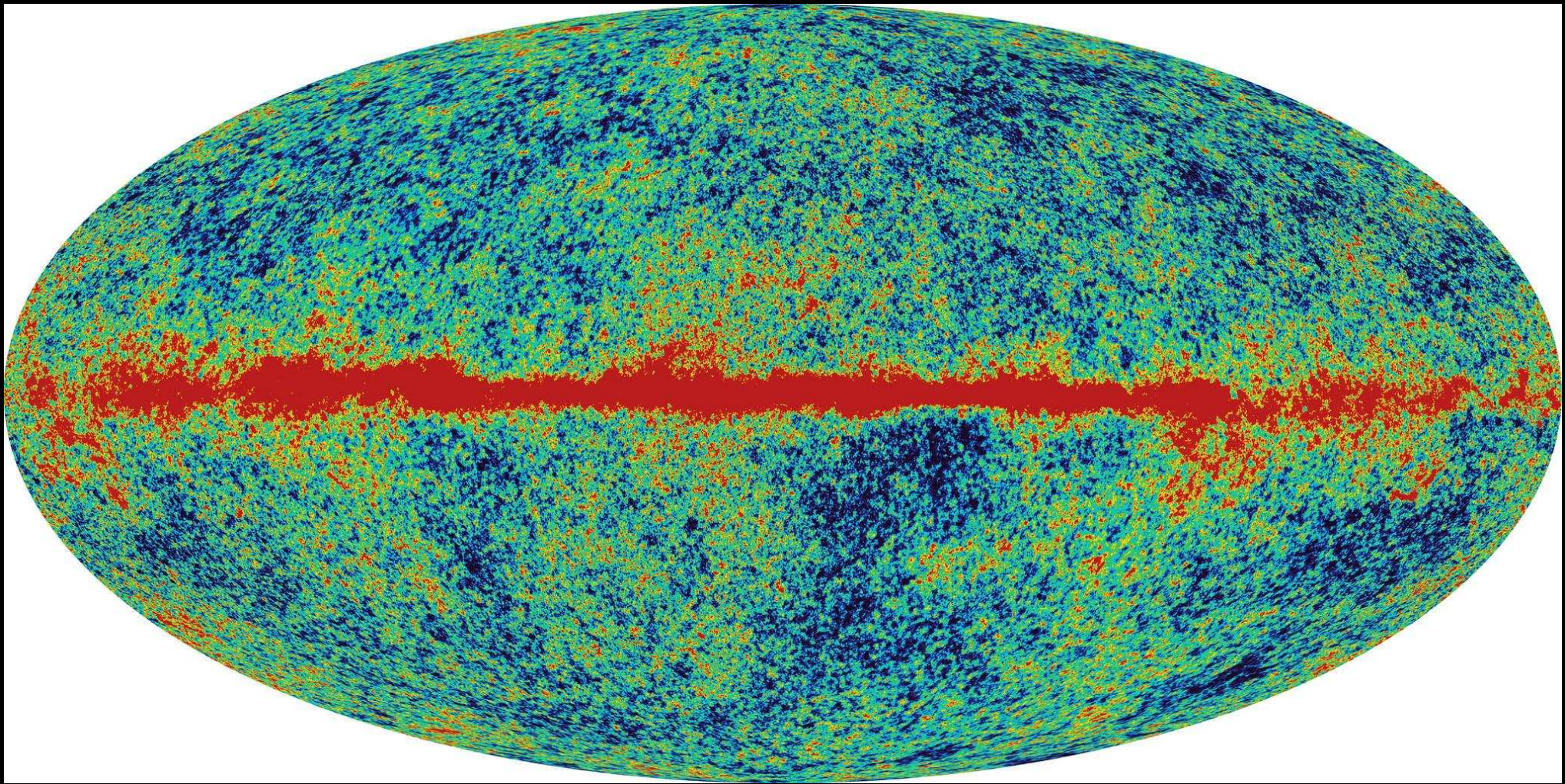


WMAP, K-Band,  $\lambda = 13 \text{ mm}$ ,  $\nu = 22.8 \text{ GHz}$ ,  $\theta = 0.83^\circ$  FWHM



WMAP, Q-Band,  $\lambda = 7.3 \text{ mm}$ ,  $\nu = 40.7 \text{ GHz}$ ,  $\theta = 0.49^\circ$  FWHM

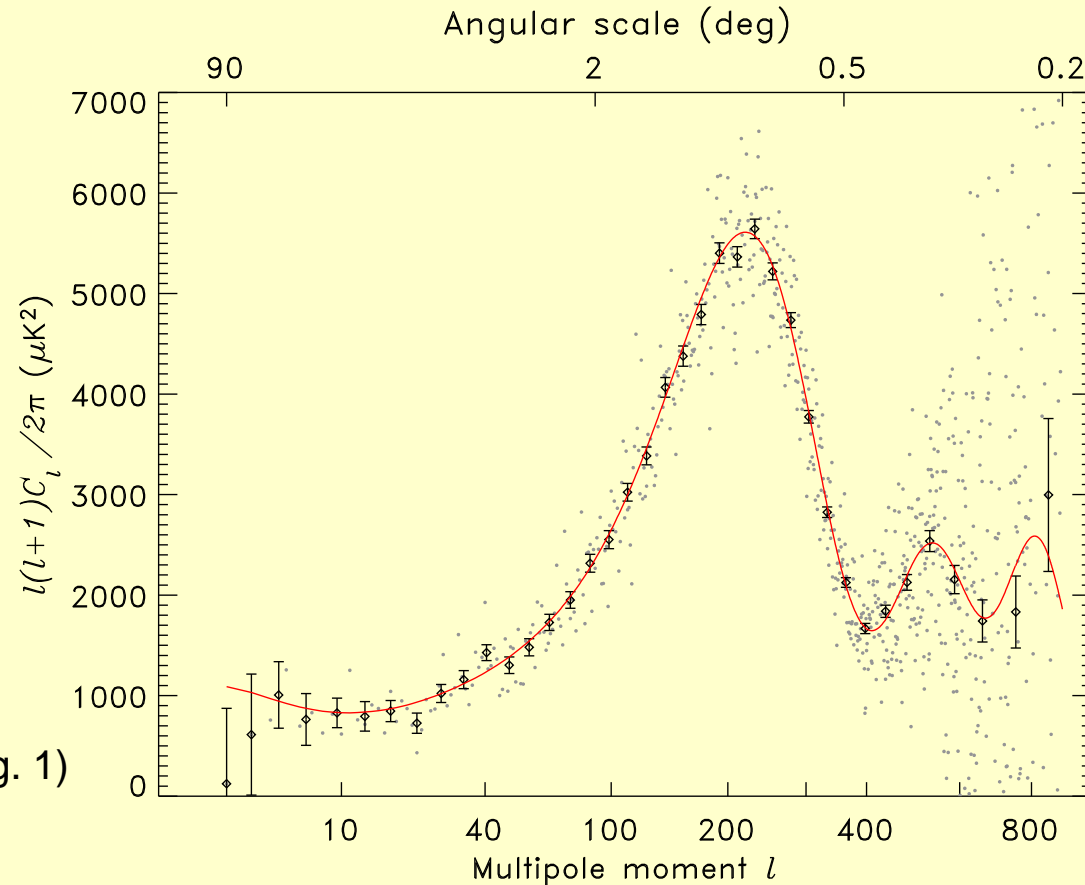




WMAP, W-Band,  $\lambda = 3.2 \text{ mm}$ ,  $\nu = 93.5 \text{ GHz}$ ,  $\theta = 0.21^\circ$  FWHM



# Strukturentstehung



Spergel et al. (2003, Fig. 1)

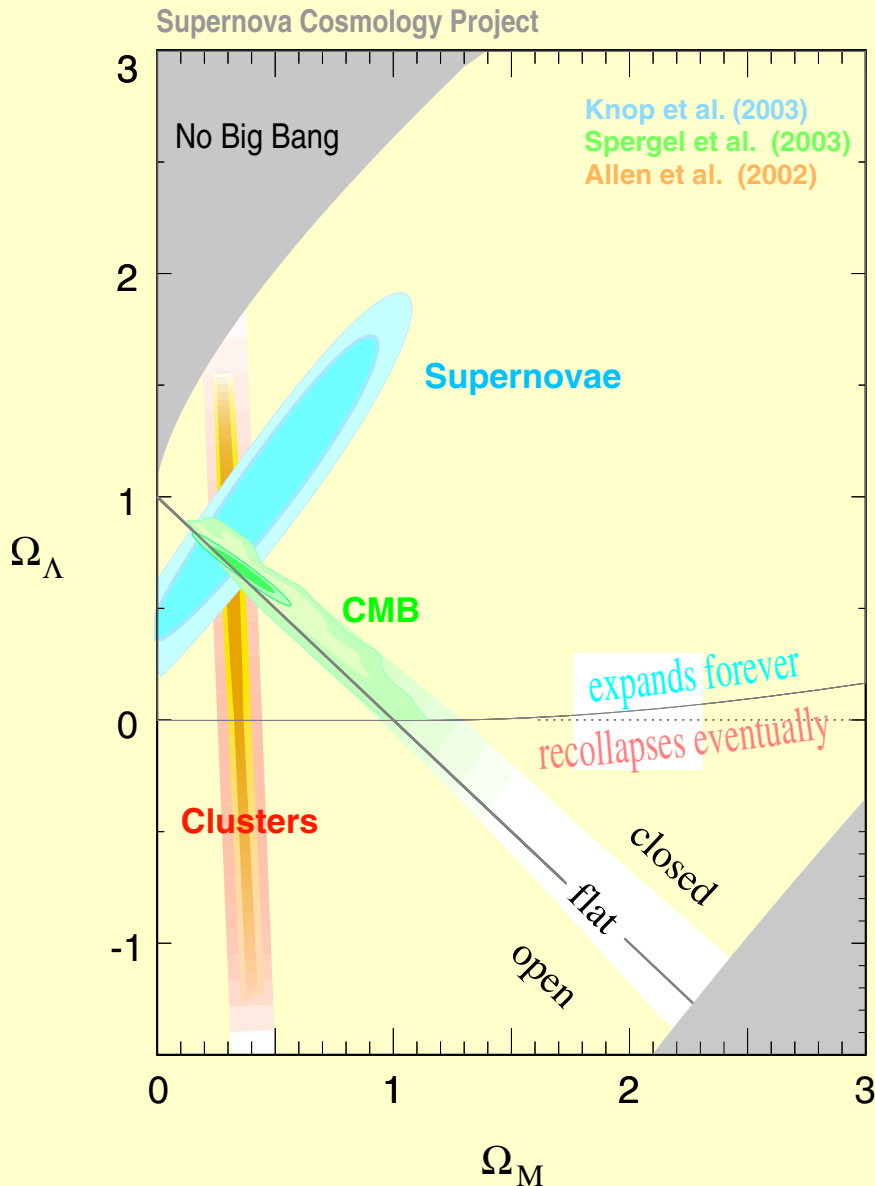
WMAP best fit Parameter (Annahme:  $\Omega = 1$ ,  $H_0 =: h \cdot 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ):

$$h = 0.72 \pm 0.05 \quad \Omega_m h^2 = 0.14 \pm 0.02 \quad \Omega_b h^2 = 0.024 \pm 0.01$$

(für  $h = 0.72$ :  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_b = 0.05$ )



# Zusammenfassung



## Konfidenzbereiche für $\Omega_\Lambda$ und $\Omega_m$ .

dunkle Bereiche: 68% Konfidenz, außen: 90%

Region unten rechts: Universen sind älter als älteste schwere Elemente.

$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$

$$\Omega_m = 0.14 \dots 0.3$$

$$H_0 = 72 \pm 5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$