

12. Teilchenphysik und Kosmologie

- **Kosmologie**

- ▷ Friedmann-Lemaître-Lösung
- ▷ Materiegehalt des Universums
- ▷ kosmog. Konstante und Raumkrümmung

- **Probleme der kosmog. Konstanten**

- ▷ Higgs-Feld in der Frühphase des Universums
- ▷ Quantenfluktuationen
- ▷ mögliche Lösungen des Problems

Kosmologie

- Die gegenwärtigen Ansätze zur Beschreibung des Universums, seiner vergangenen und zukünftigen Entwicklungsgeschichte basieren auf dem **Urknallmodell**

- Wichtige fundamentale Annahmen in der Beschreibung:

▷ **kosmologisches Prinzip** = Homogenität & Isotropie des Universums

▷ **Expansion**

→ Rotverschiebung

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

→ Fluchtgeschwindigkeit

$$v = H \cdot D - c \frac{z \cdot (z+2)}{z(z+2) + 2} \approx c \cdot z - \frac{c}{2} z^2 + \dots$$

↑ Lichtgeschwindigkeit
↑ Entfernung
↑ Hubble-Konstante

▷ **Gravitation ist einzige weitreichende**

Wechselwirkung

- Damit können Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen aufgestellt werden. Eine dieser Lösungen, die heute intensiv diskutiert wird, ist die **Friedmann-Lemaître-Lösung**

Friedmann-Lemaître-Lösung

$$1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K$$

Materie

kosmog.
Konstante

Raum=
krümmung

$$\bullet \Omega_M \equiv \frac{\text{Dichte } \rho_M}{\text{krit. Dichte } \rho_c} ; \Omega_\Lambda \equiv \frac{c^2 \Lambda}{3H^2} ; \Omega_K \equiv -\frac{kc^2}{R^2 H^2}$$

$$\triangleright \rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G_N} \quad : \text{ heutiger Wert } \hat{=} 60^4 \text{ m}_{\text{proton}} / \text{m}^3$$

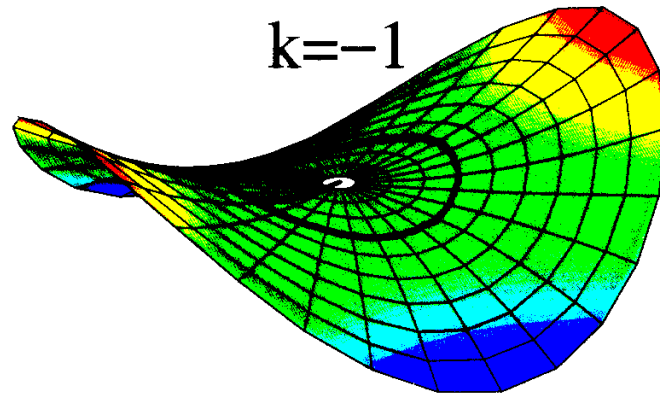
$$\triangleright H = \left(\frac{\dot{R}}{R} \right) \quad : \text{ Hubble-Konst. } H = H(t) ; \text{ heutiger Wert } = 75 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

$$\triangleright R \quad : \text{ Radius des Raumes}$$

$$\triangleright k = +1, 0, -1 \quad : \text{ Krümmungsparameter}$$

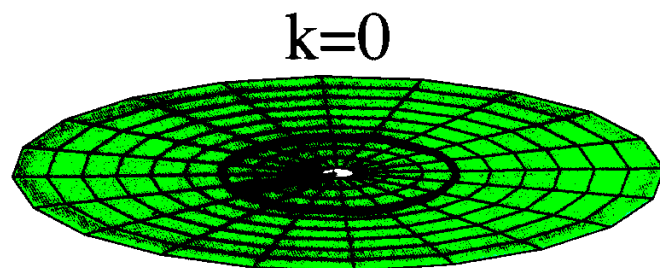
Arten der Krümmung

Veranschaulicht für 2 Dimensionen:

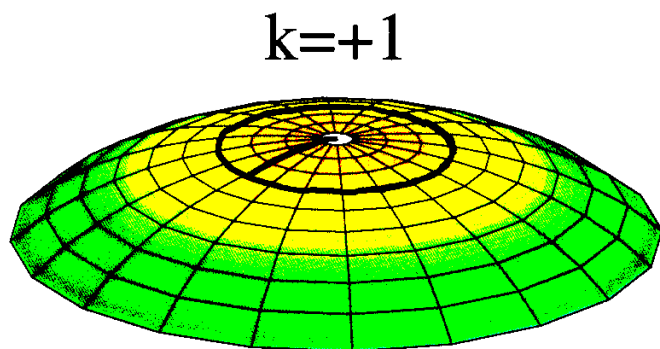


Kreisfläche:

$$F > \pi r^2$$



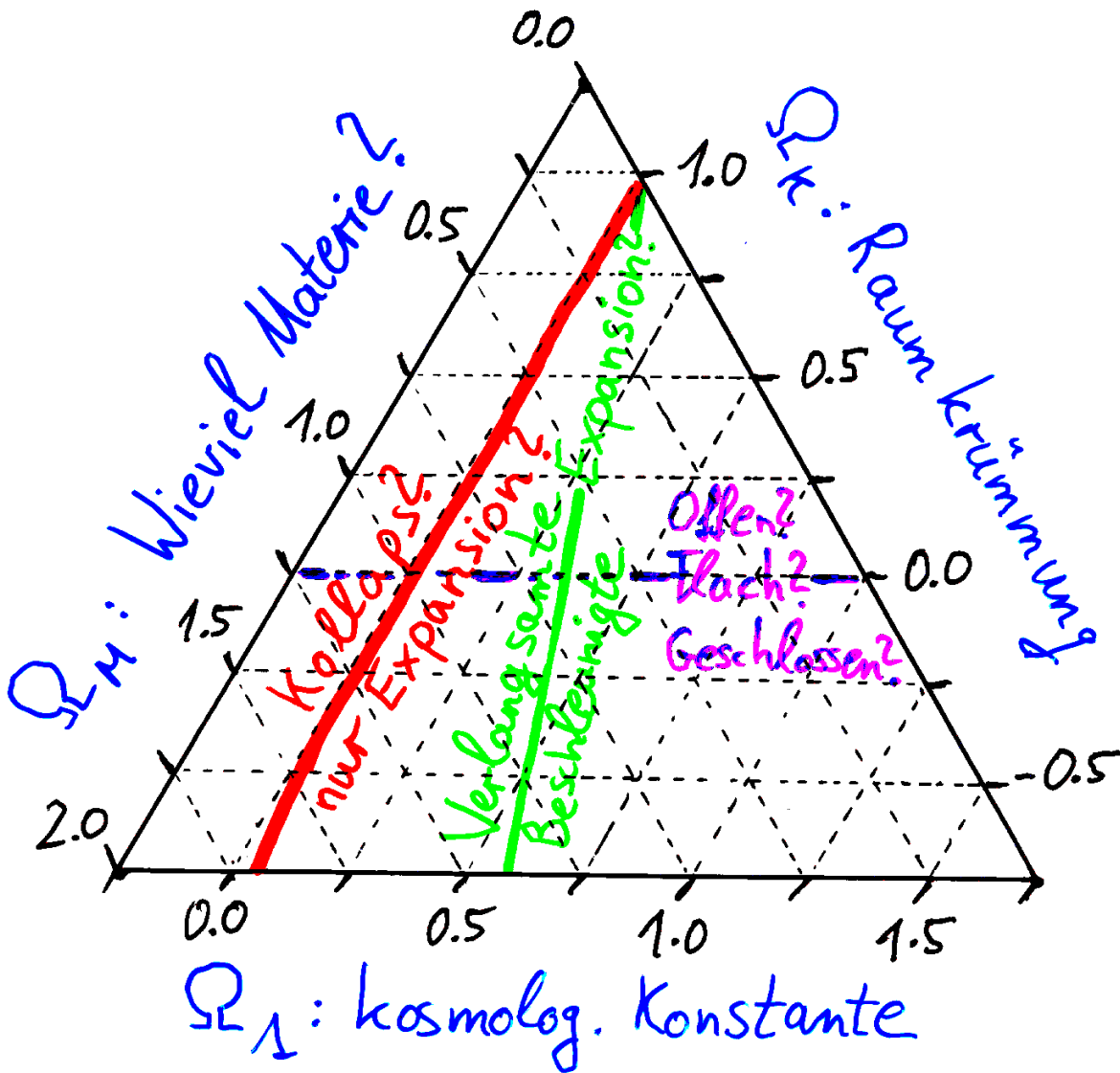
$$F = \pi r^2$$



$$F < \pi r^2$$

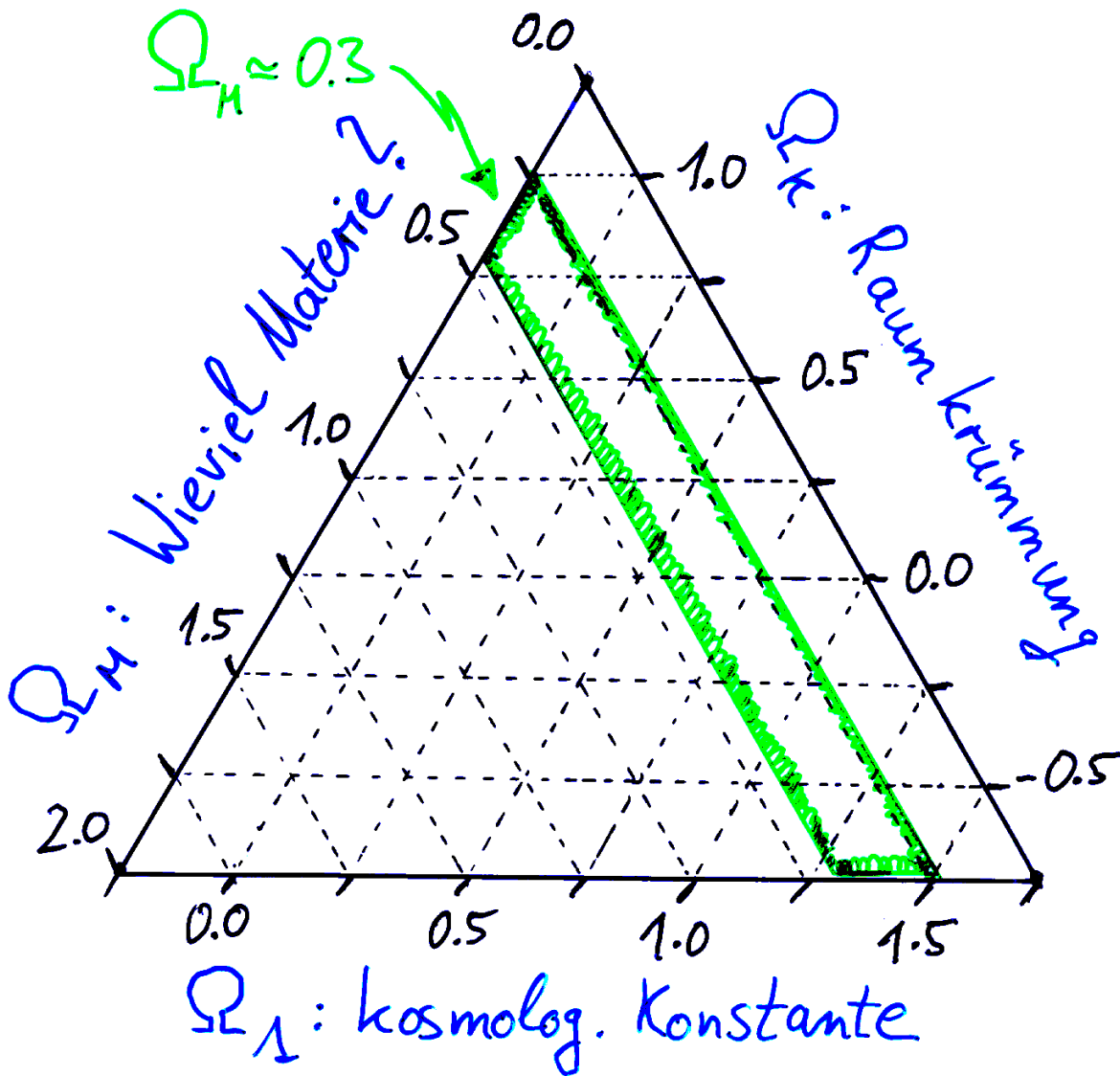
Das kosmologische Dreieck

Die Relation $1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K$ gilt für alle Zeiten und Entwicklungsstadien des Universums (nach einer möglichen inflationären Phase). Sie stellt eine Beziehung zwischen den drei Größen $\Omega_M, \Omega_\Lambda, \Omega_K$ her, die in Form eines Dreiecks veranschaulicht werden kann:



Das kosmologische Dreieck

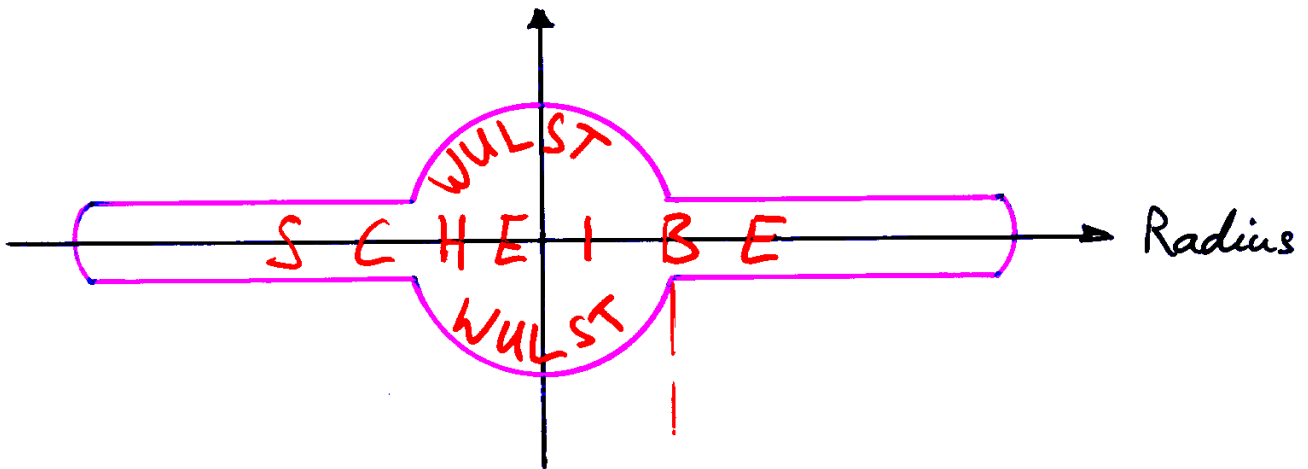
Die Relation $1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K$ gilt für alle Zeiten und Entwicklungsstadien des Universums (nach einer möglichen inflationären Phase). Sie stellt eine Beziehung zwischen den drei Größen $\Omega_M, \Omega_\Lambda, \Omega_K$ her, die in Form eines Dreiecks veranschaulicht werden kann:



Kenntnis des Materieanteils schränkt Lösungsbereiche ein!

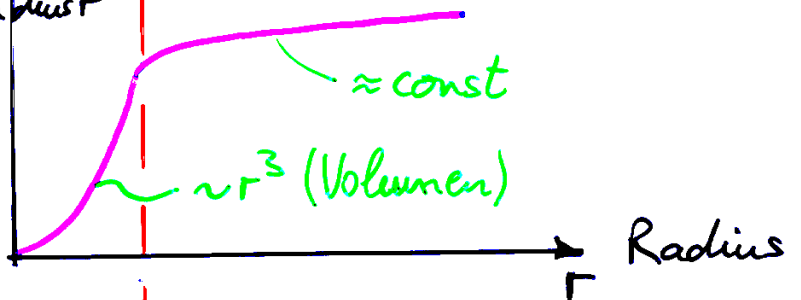
Rotationskurven von Galaxien

- Seitenansicht einer Galaxie:

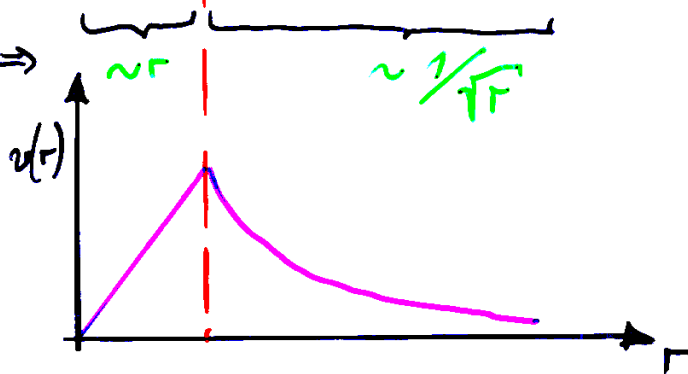


- Erwartung für die Massenverteilung:

Massen-
summe $M(r)$
bis Radius r



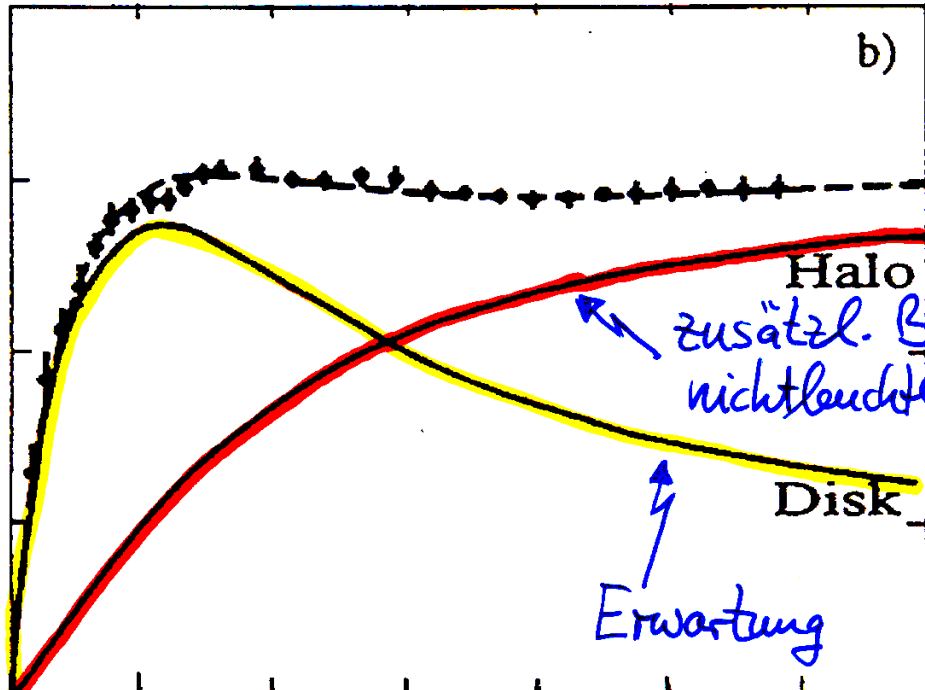
- Rotation: $v(r) \sim \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \Rightarrow$



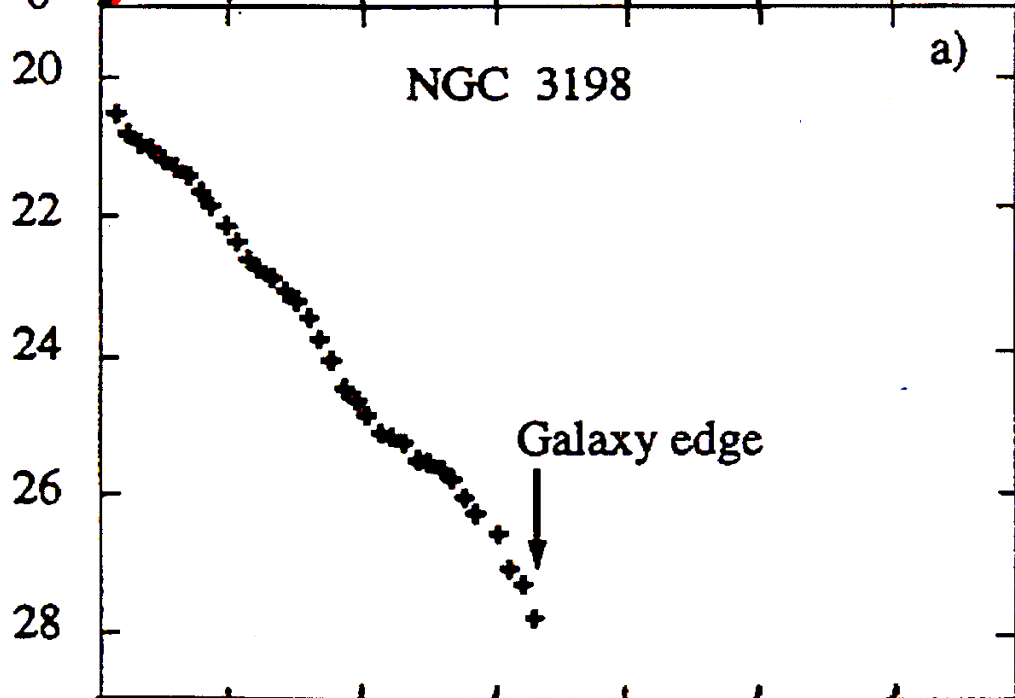
... Rotationskurve von Galaxien

Beobachtung:

Rotat. geschw. $v(r)$
[km/s]



Helligkeit:
 $-2.5 \lg(\text{Leuchtkraft})$



Radius r [kpc]

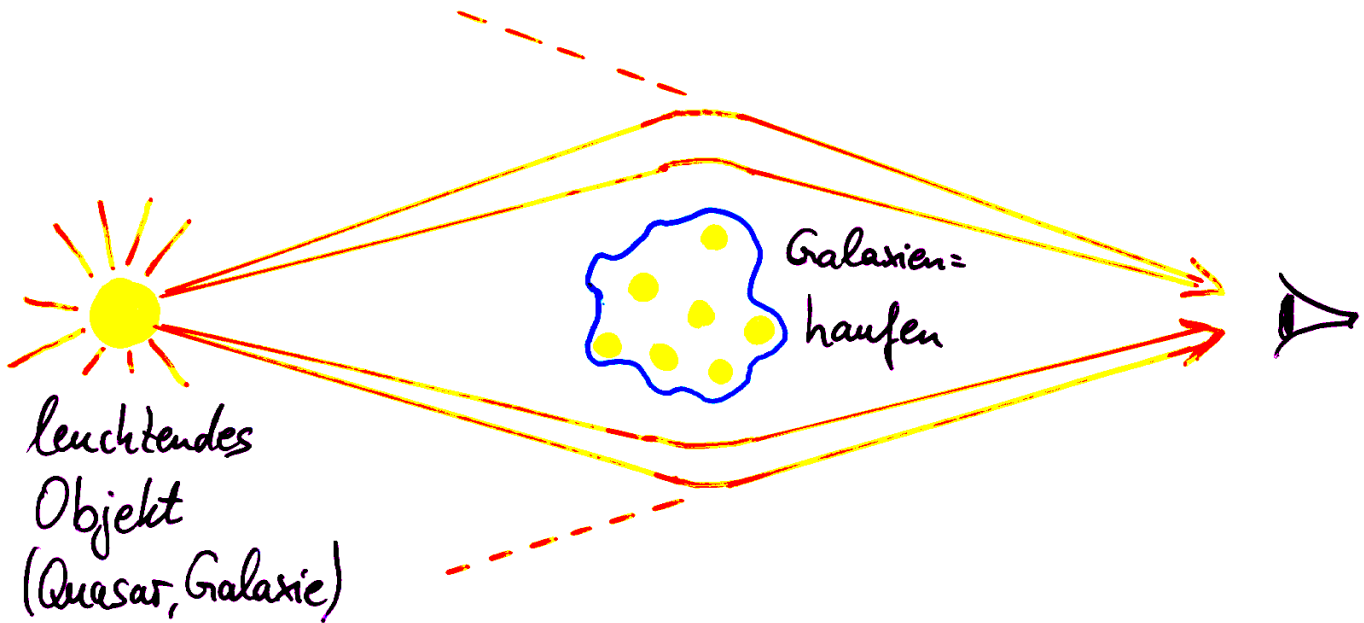
aus $\frac{M}{L} \Rightarrow$
Masse-zu-Leuchtkraft

$$\Omega_{\text{Halo}} \approx 0.02 \dots 0.10$$

,d.h. der Anteil
an der kritischen
Dichte des Universums

Gravitationslinsen - Effekt

Licht wird durch die gravitative Wirkung eines Galaxienhaufens abgelenkt ...

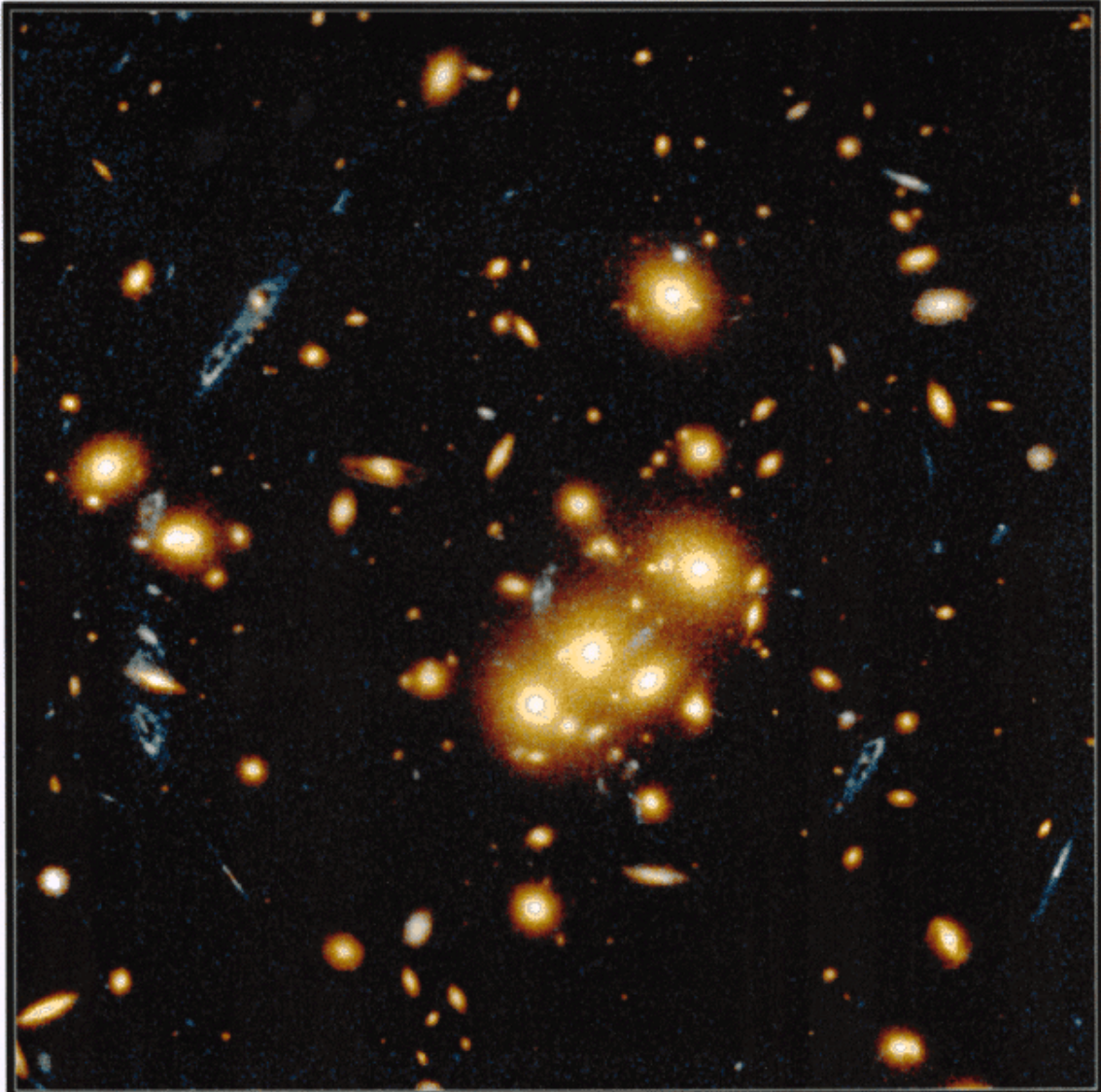


... und erscheint in mehrfacher Abbildung dem Beobachter auf der Erde. Aus den Bildern des leuchtenden Objektes kann die **Masse und Massenverteilung des Galaxienhaufens** rekonstruiert werden. Die Ergebnisse weisen auf einen Masseanteil hin, der etwa

$$\Omega_M \approx \Omega_{\text{Haufen}} \approx 0.2 \pm 0.1$$

beträgt, also ca. 20% der kritischen Dichte des

$$\text{Universums} \left(\rho_c = \frac{3 \cdot H^2}{8\pi G_N} ; H \approx 50-100 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \text{ (Hubble-Konst.)} \right)$$
$$\rho_c \approx 5 \text{ M}_{\text{Proton}} / \text{m}^3$$

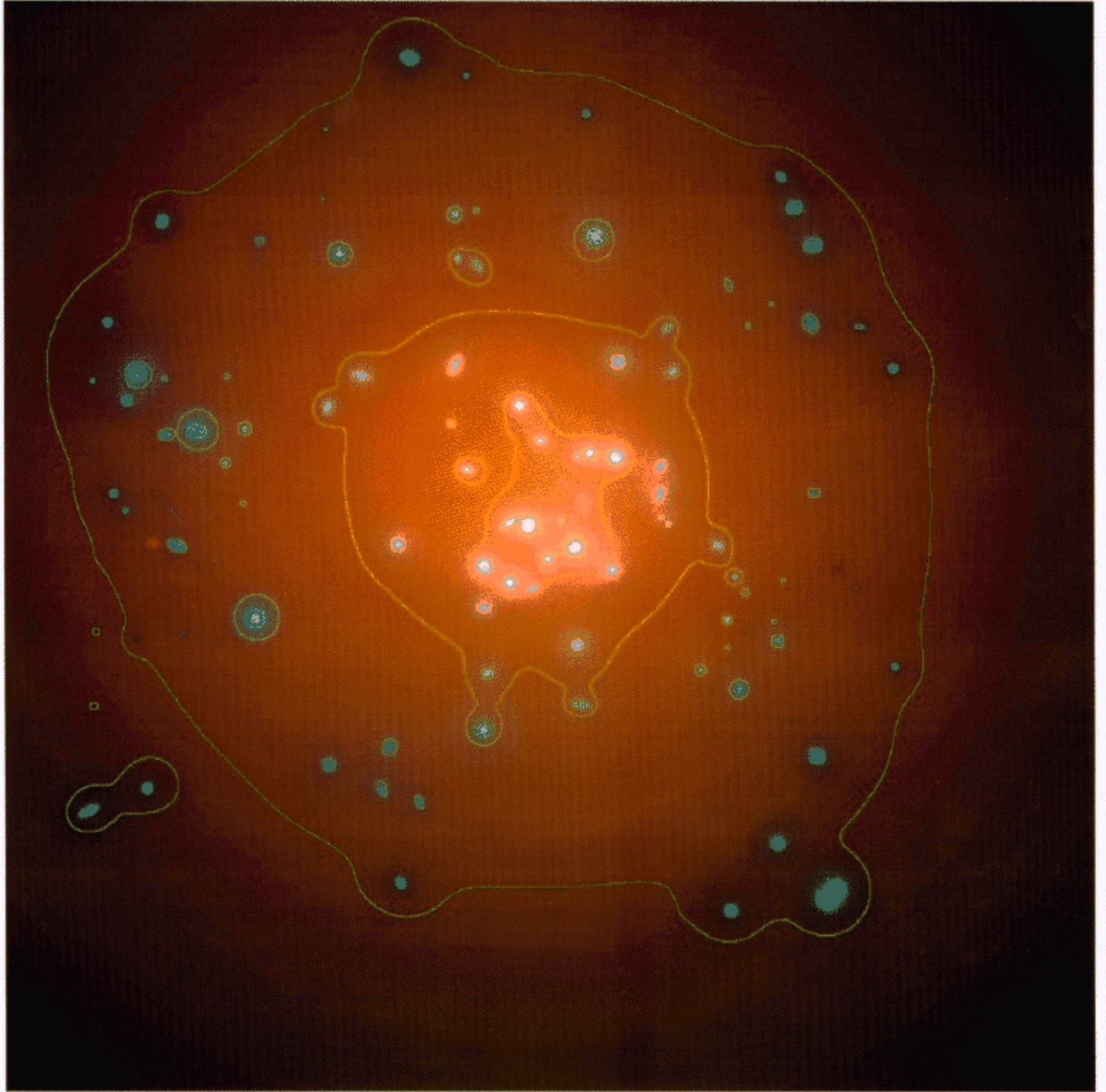


Gravitational Lens
Galaxy Cluster 0024+1654

HST · WFPC2

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),
J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA



Nukleosynthese im Urknall

Aus dem Urknallmodell kann der Anteil der Baryonen an der Materiedichte im Universum berechnet werden, wenn man die Teilchendichte (genauer: Anzahldichte der leichten Atomkerne) messen kann.

Zur Erinnerung an die Prozesse nach dem Urknall:

▷ $T > 10^{10} \text{ K}$ therm. Gleichgewicht zw. Protonen & Neutronen



▷ $T \approx 10^{10} \text{ K}$ ($\hat{=} 1 \text{ s}$ nach Urknall)

□ Neutrinos entkoppeln (Energie für obige Reaktion zu gering)

□ Proton/Neutron-Verhältnis friert ein: $\frac{\# n}{\# p} = e^{-\frac{\Delta m}{k_B T}}$

▷ $10^{10} \text{ K} > T > 10^9 \text{ K}$



▷ $T \approx 10^9 \text{ K}$ ($\hat{=} 3 \text{ min}$ nach Urknall)



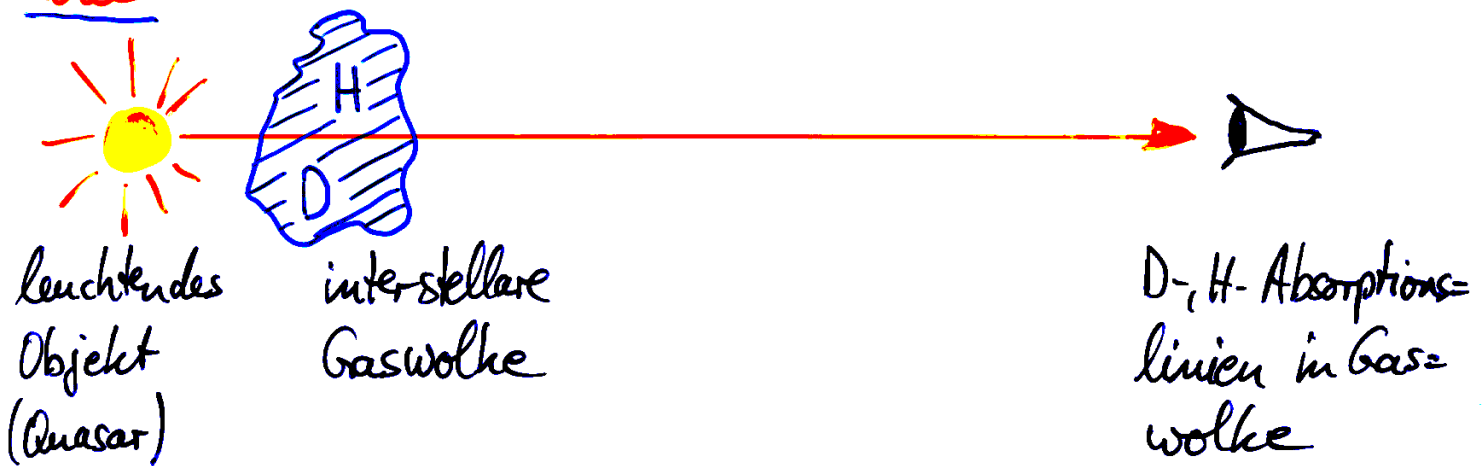
und weitere Prozesse

⇒ Baryondichte spiegelt sich im Anteil von ${}^4\text{He}$ des frühen Universums wider

Bestimmung des ^4He -Anteils im Universum

Methode ist indirekt: Es wird der Deuterium-zu-Wasserstoff-Anteil D/H bestimmt und dann mittels Nukleosynthesemodell des Urknalls auf ^4He -Anteil umgerechnet. Messung des D/H -Anteils:

Idee:

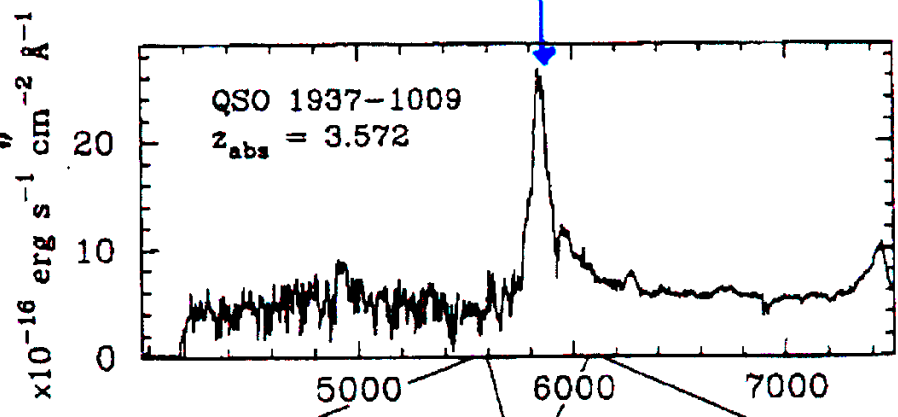


frühes Universum (\cong große Rotverschiebung) heute

Messung: u.a. am Keck-Observatorium (Hawaii) mit 9.8 m-Spiegelteleskop und hochauflösenden Doppelgitterspektrograph

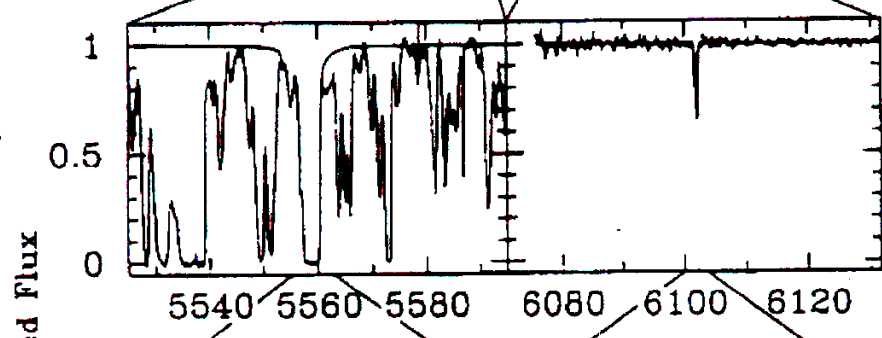
... Messung am Keck-Observatorium

Strahlungsfluß

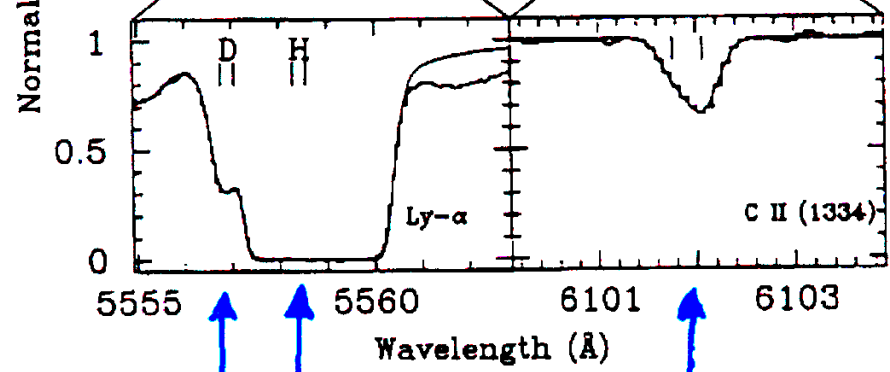


Lyman- α -Linie von Wasserstoff des Quasars ($z_{\text{Quasar}} \approx 3.9$)

Absorption

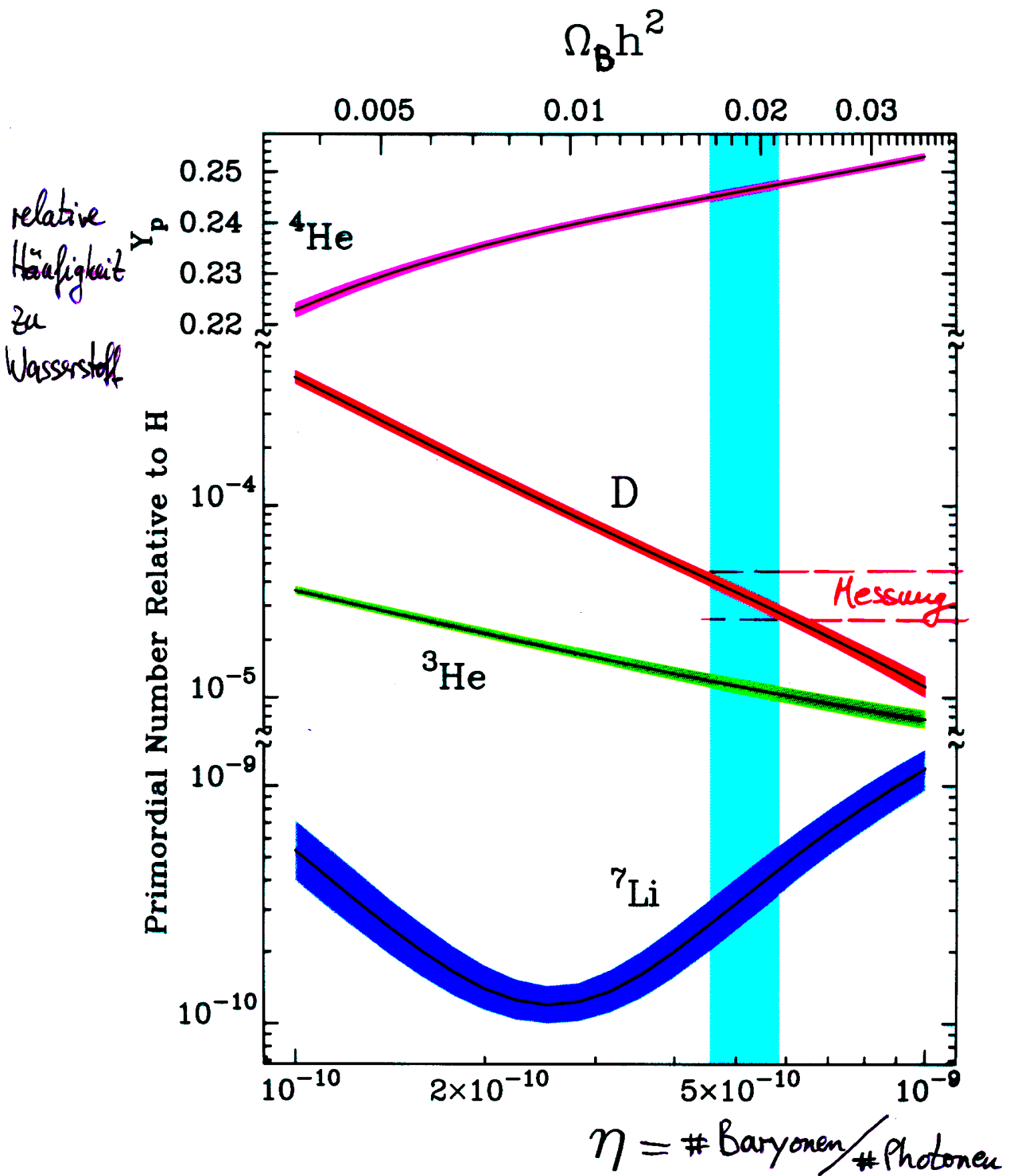


Absorption



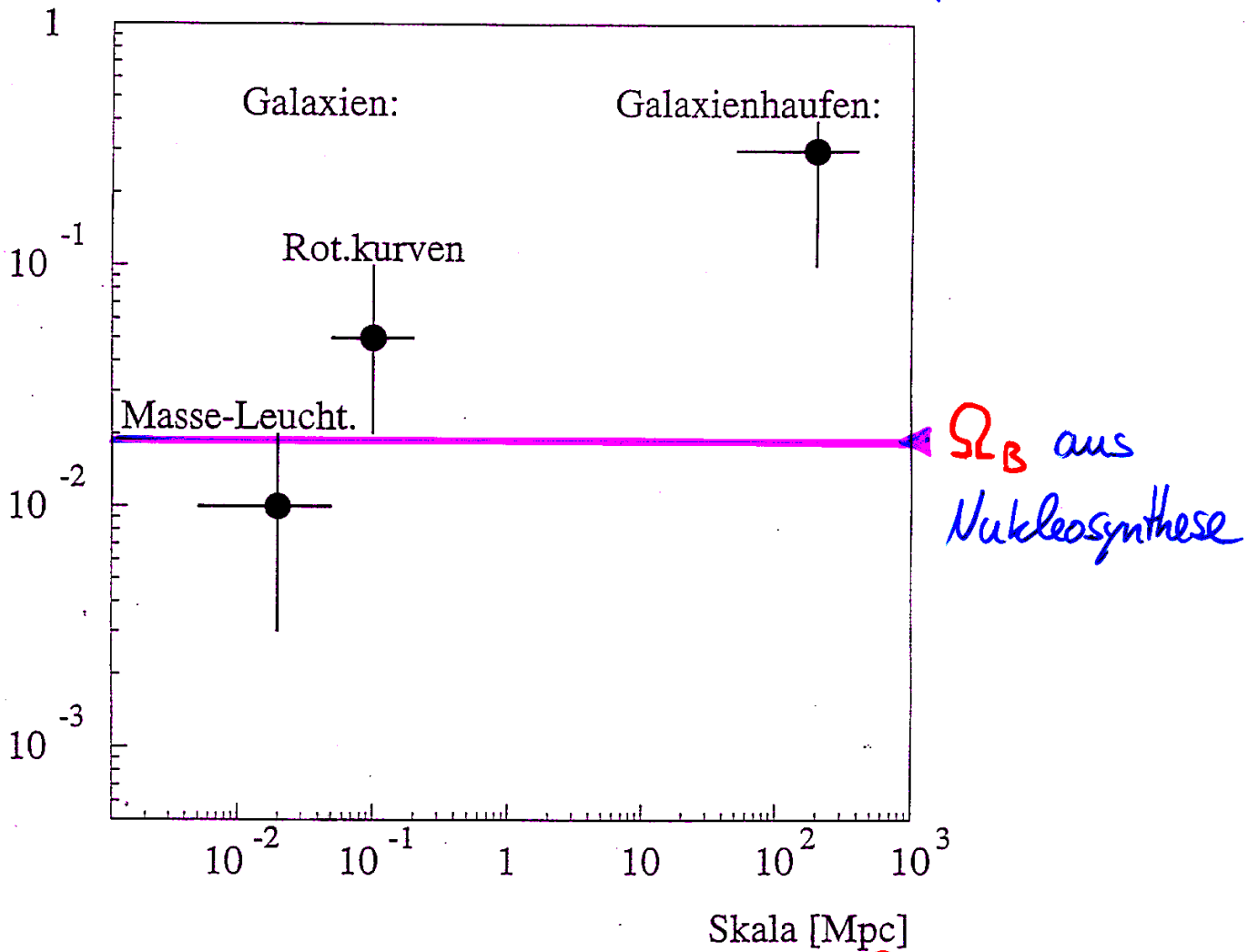
Absorptionslinien: D H C⁺
(Ly- α)

Nukleosynthese beim Urknall



⇒ baryonischer Anteil: $\Omega_B = 0.019 \pm 0.004$

Materie im Universum und Konsequenzen



- größere Skala \rightarrow größeres Ω
- $\Omega_{\text{Masse-Leucht}} \leftrightarrow \Omega_B \rightarrow$ Defizit: dunkle baryon. Materie
- $\Omega_B \leftrightarrow \Omega_{\text{Haufen}} \rightarrow$ Defizit: dunkle nicht-baryon. Materie

\Rightarrow Etwa 90% der Materie im Universum ist nicht-baryonisch, also nicht Proton, Neutron, ...

$\Omega_M \approx 0.3$, $\Omega_\Lambda = ?$ und $\Omega_K = ?$

• $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ - Relation aus Supernovae Typ I

▷ Typ I Supernovae: Lichtkurven sehr ähnlich!
→ absolute Helligkeit

▷ $\frac{\text{sichtbare}}{\text{absolute}}$ Helligkeit → Entfernung D_L

▷ Entfernung aus Rotverschiebung $c \cdot z \approx H_0 \cdot D_z$

▷ Vergleich $D_L \gtrless D_z$

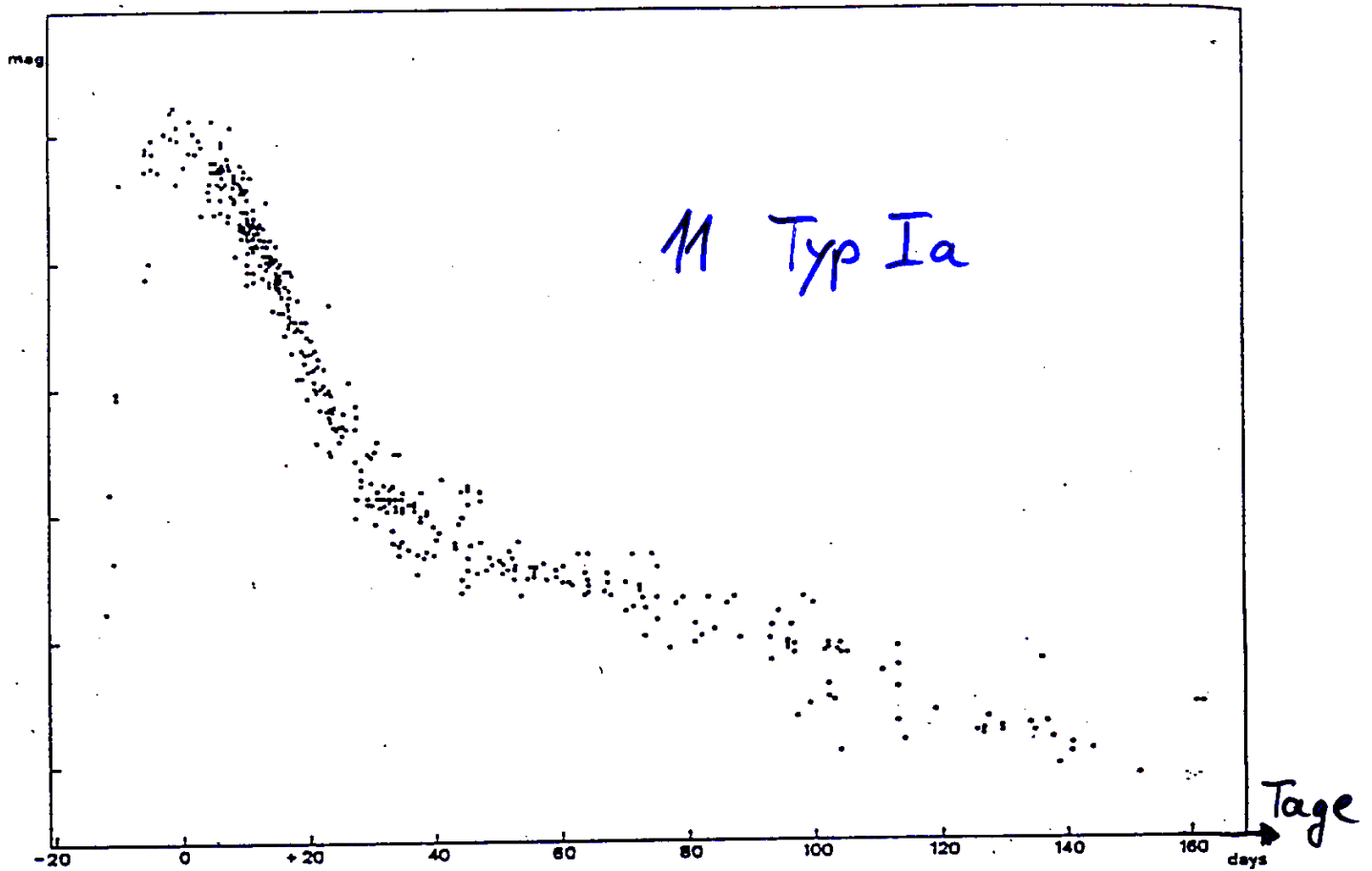
⇒ ~~beschleunigte~~ / ~~verzögerte~~ Expansion

▷ beste Anpassung (Ω_K beliebig)

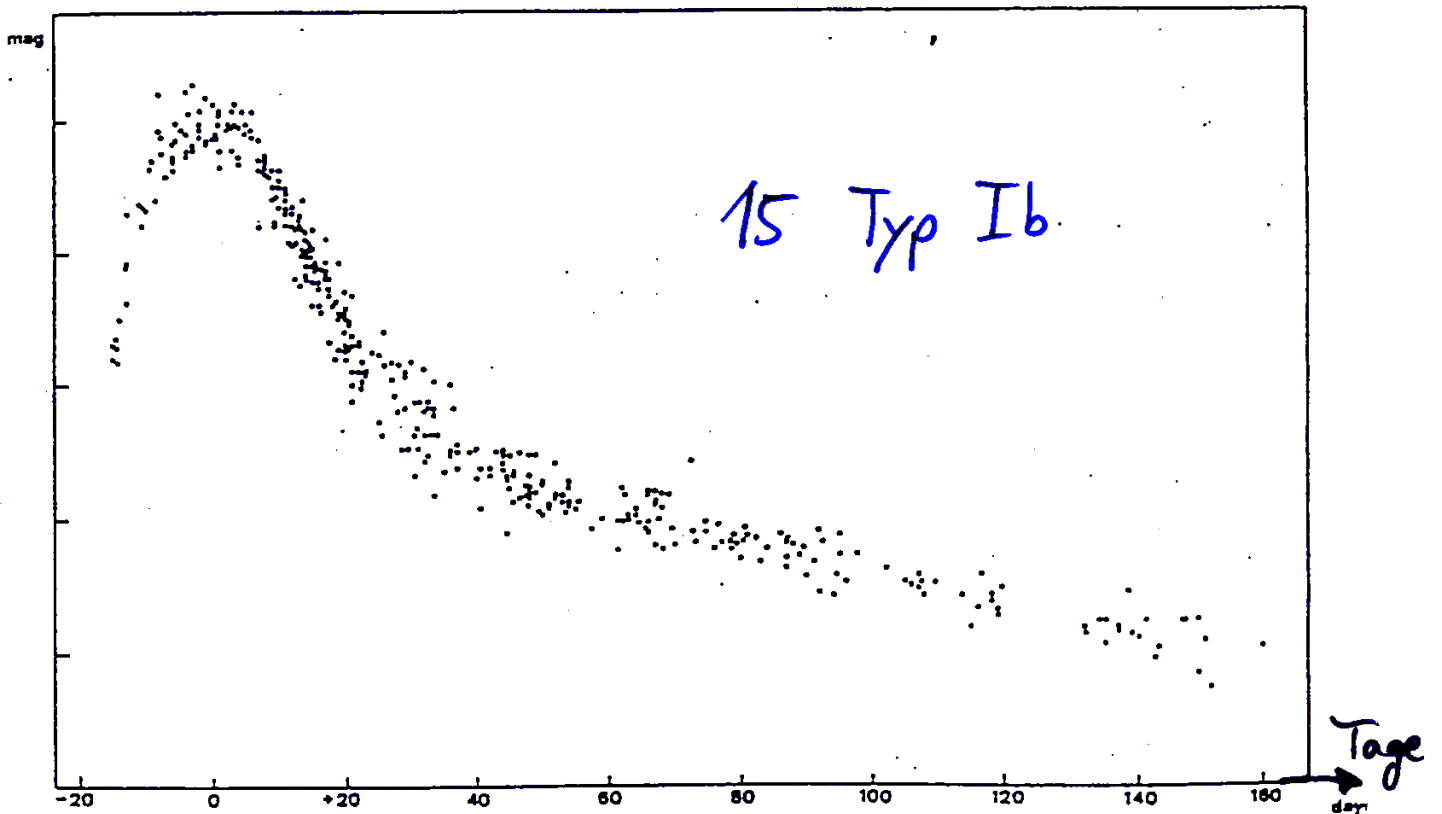
$$0.8 \cdot \Omega_M - 0.6 \Omega_\Lambda = -0.2 \pm 0.1$$

Lichtkurven von Supernovae Typ I

R. Barbon *et al.*



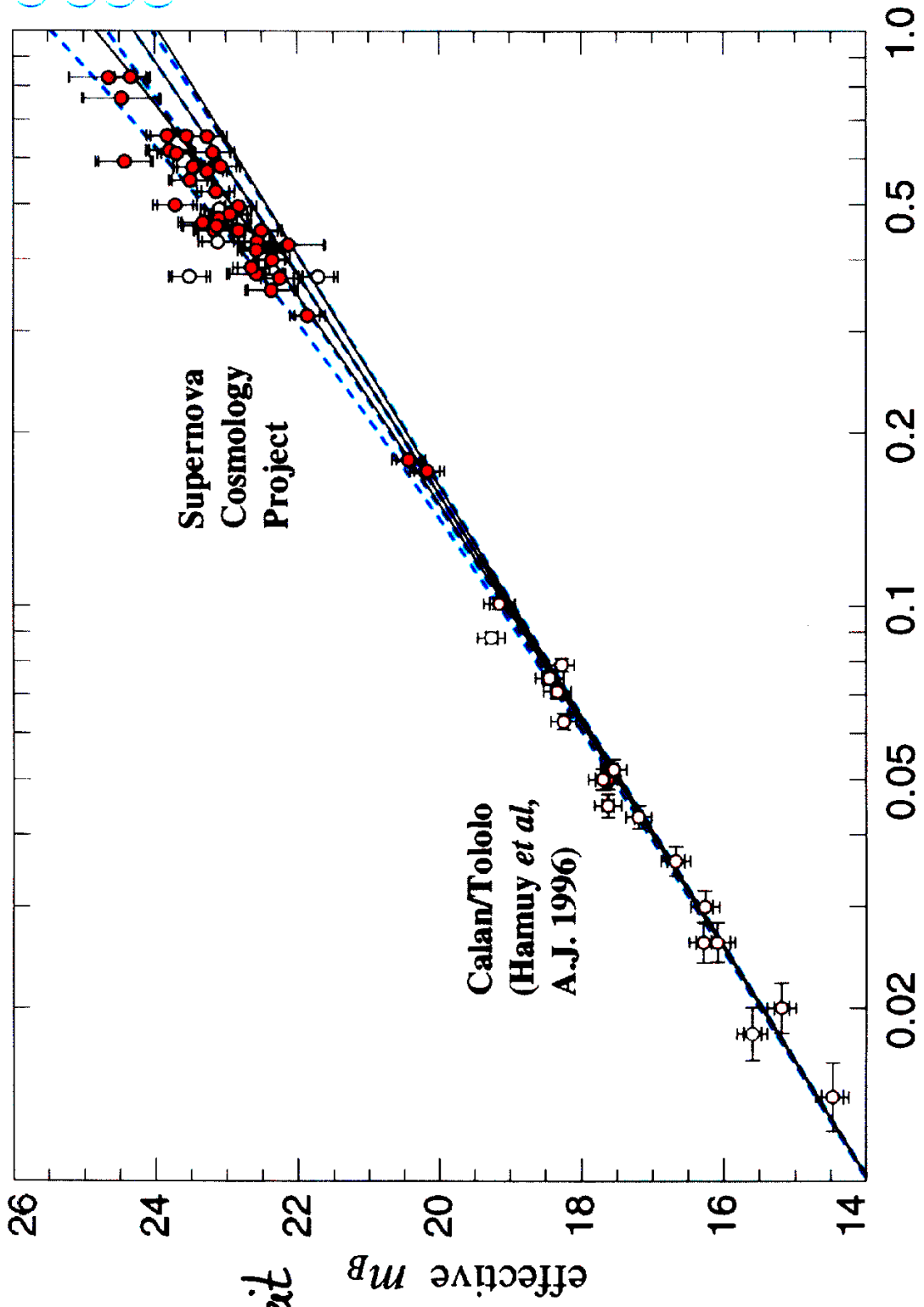
Average light curve of 11 "fast" SN-Ia (see Table 4)



Average light curve of 15 "slow" SN-Ib (see Table 4)

Supernovae Typ Ia

- $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) =$
 (0, 1)
 (0.5, 0.5)
 (1, 0)
 (1.5, -0.5)
- Flat $\Lambda = 0$



Helligkeit
[magn]

Rotverschiebung

redshift z

$\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = ?$ und $\Omega_K = ?$

• Ω_K : Krümmung des Raumes

▷ Meßbar aus: Anisotropie der Hintergrundstrahlung

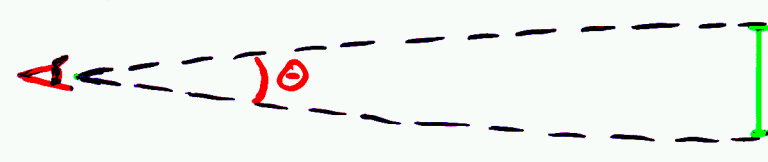
▷ Winkelabstand Θ zw. Anisotropien

$\hat{=}$ Längenmaßstab bei Entkopplung von
Materie \leftrightarrow Strahlung

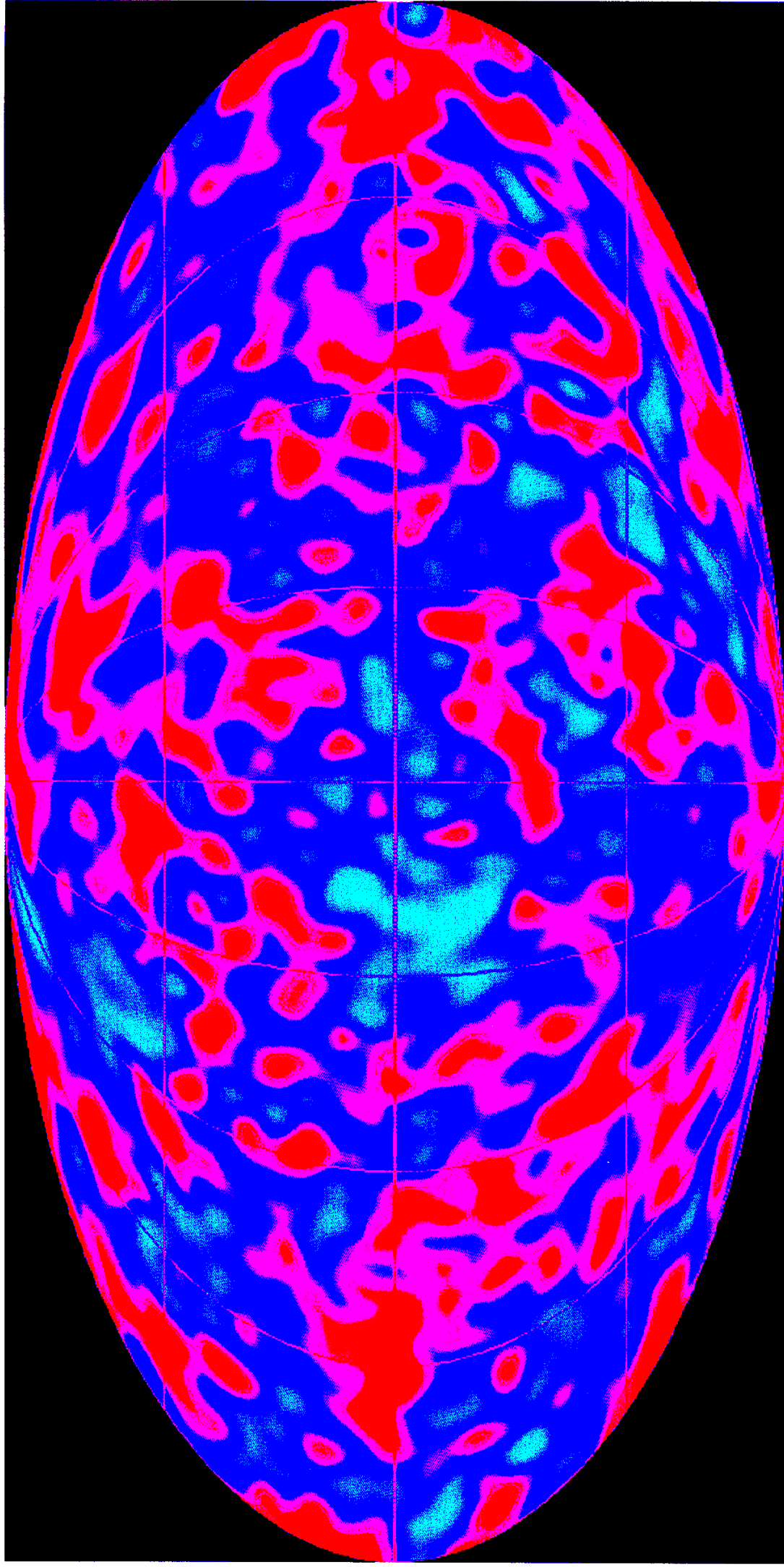
▷ Urknalltheorie: $\Theta \approx 1^\circ \cdot \sqrt{1 - \Omega_K}$

$\Omega_K > 0$:  erscheint kleiner

$\Omega_K = 0$: 

$\Omega_K < 0$:  erscheint größer

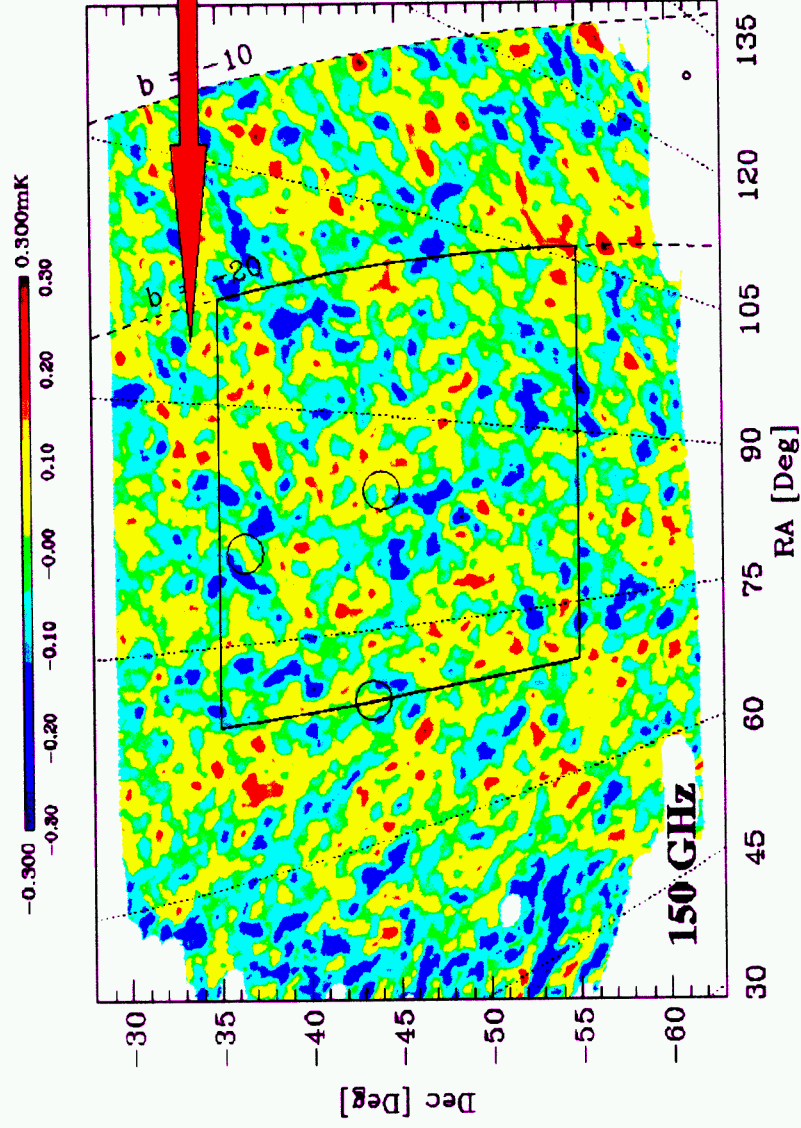
COBE - Satellit: Anisotropie der Hintergrundstrahlung



■ $\cong -30\mu\text{K}$ ■ $\cong +30\mu\text{K}$

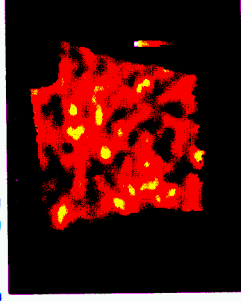
... Anisotropie der Hintergrundstrahlung

▷ Messung mit Satelliten (COBE) und Ballon-Experimenten



Boomerang-98

1800 sq deg;
used 440 sq deg
(inner rectangle)
(maps approx. to scale)

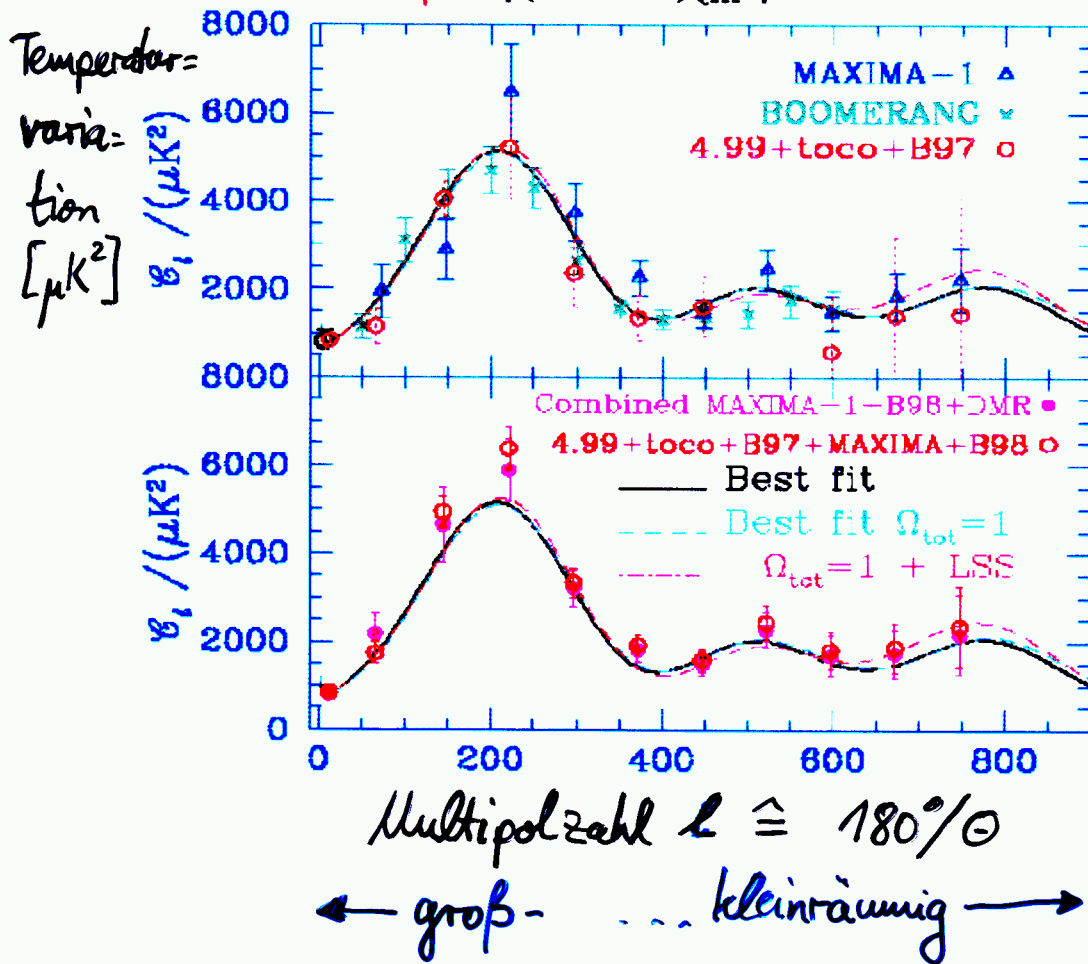


Maxima-1
full 124 sq deg

... Anisotropie der Hintergrundstrahlung

▷ Messung: (Entwicklung nach Multipolen)

$$C_l = \langle |(\Delta T/T)_{lm}|^2 \rangle_{l(l+1)/2\pi}$$

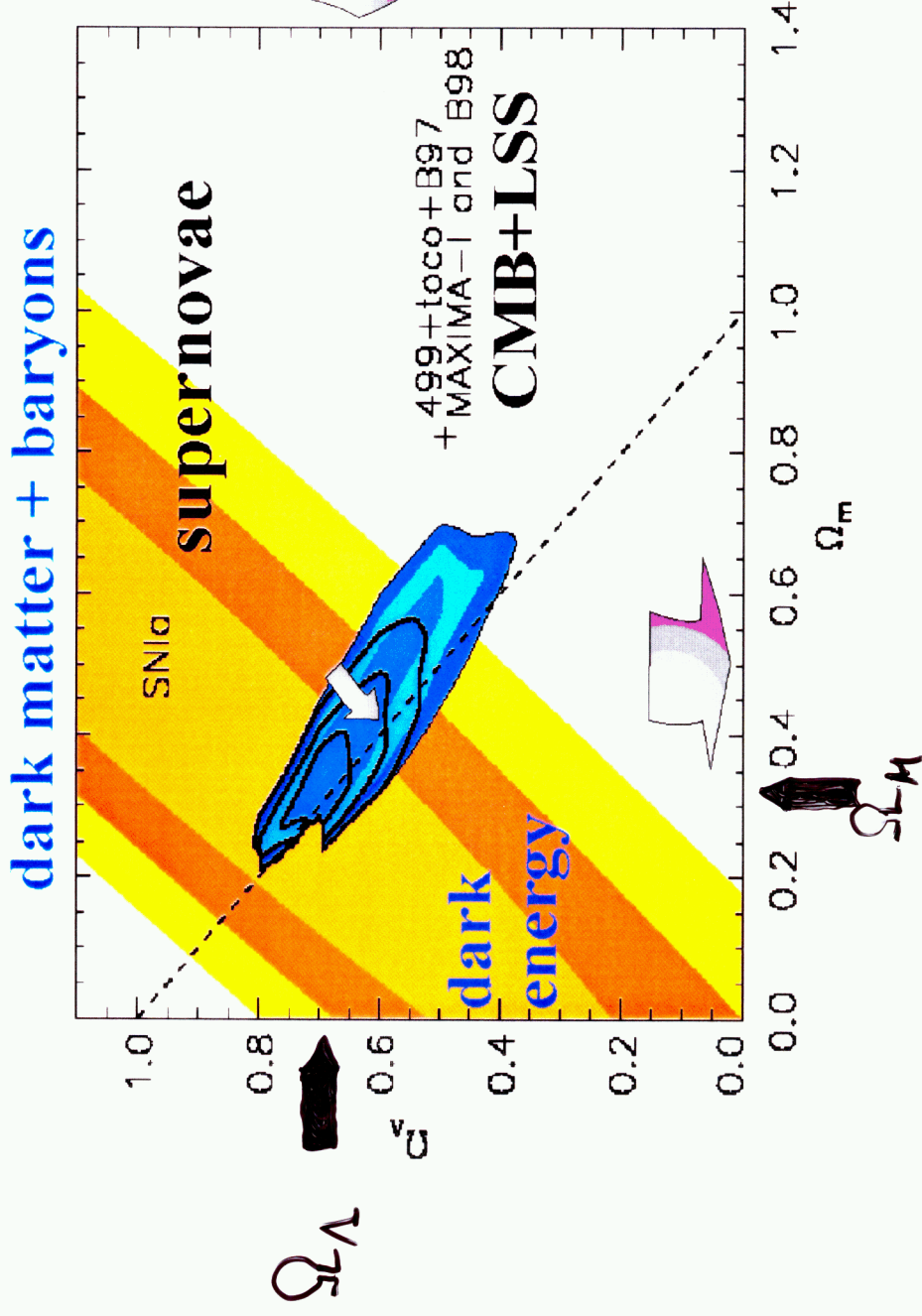


▷ Kurven: Angepaßt Modellrechnungen

$$\Rightarrow \Omega_K \approx 0 \quad \text{und} \quad \Omega_\Lambda \approx 0.7$$

Kosmologische Parameter

- Kombination aller Messergebnisse

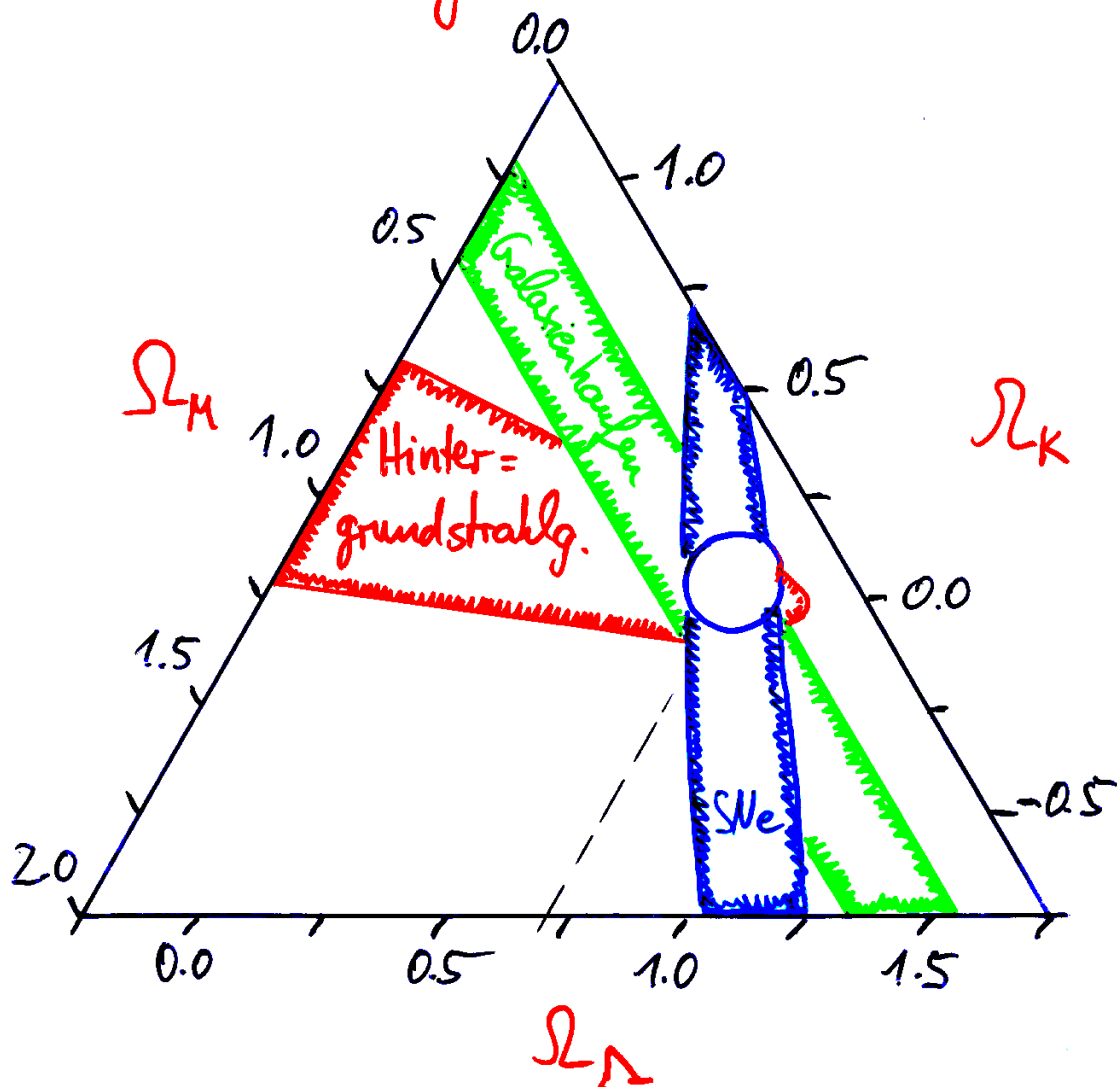


Pfeile und
blaue Konturen:
nur Hintergrundstr.
Messergebnisse

Kosmologie: Zusammenfassung

- baryonische dunkle Materie : $\Omega_B \approx 0.02$
- nicht-baryon. dunkle Materie : $\Omega_{nb} \approx 0.28$
noch nicht experimentell etabliert!
- Materie : $\Omega_M \approx 0.3$
- kosmolog. Konstante : $\Omega_\Lambda \approx 0.7$
- Raumkrümmung : $\Omega_K \approx 0$

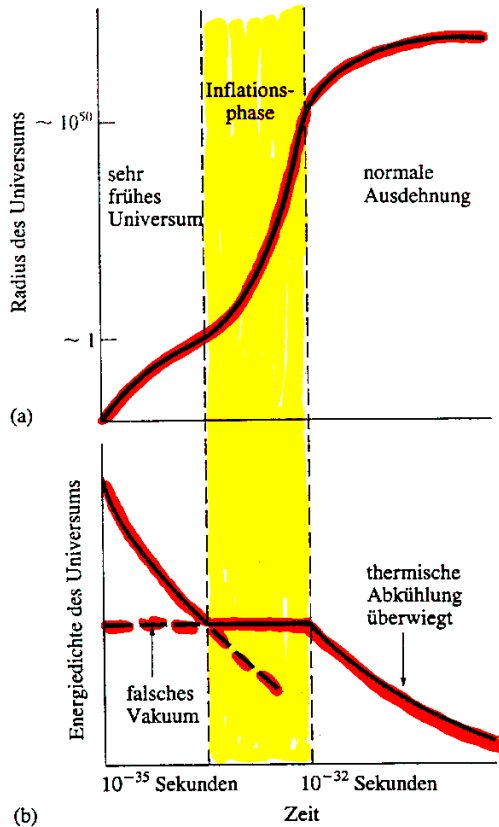
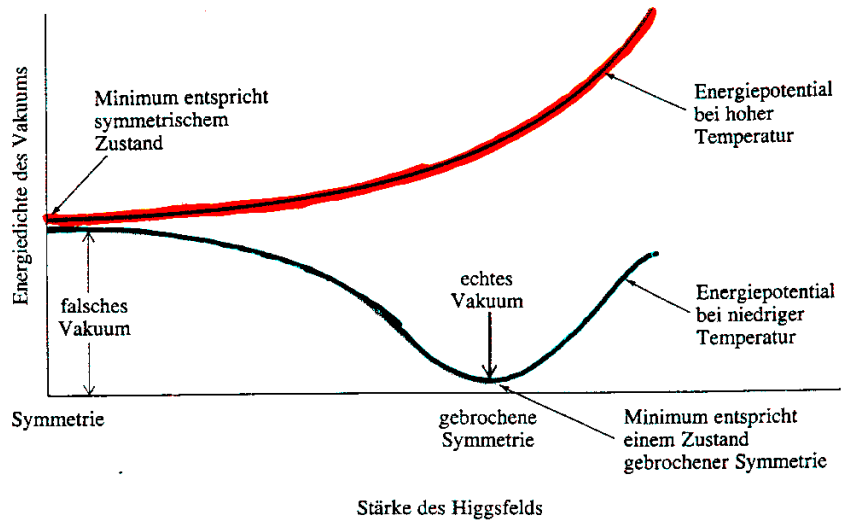
⇒ Das kosmologische Dreieck:



Higgs-Feld in der Frühphase des Universums

- Probleme, die folgenden Beobachtungen ohne Forderung spezieller und willkürlicher Bedingungen zu erklären
 - ▶ großräumige Homogenität der 3K-Hintergrundstrahlung
 - ▶ inhomogene Materieverteilung in Form von Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen
 - ▶ Alter des Universums erfordert ein Verhältnis Ω von Dichte zu kritischer Dichte von $\Omega = 1 \pm 10^{-60}$
 - ▶ Rotation des Universums liegt nicht vor
 - ▶ magnetische Monopole, aus Theorien zur Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie, nicht beobachtet
- Lösung: kosmische Inflation
Vakuumgetriebene Expansion zwischen 10^{-35} und 10^{-32} s nach Urknall blähte das Universum um einen Faktor 10^{50} auf!
- Antriebsquelle: Übergang vom "falschen" Vakuum in das "echte" Vakuum der spontan gebrochenen Symmetrie.

6.8 Die Vakuumenergie ist eine Art potentielle Energie des Universums. Wie alle Systeme strebt das Universum einen Zustand minimaler potentieller Energie an. Bei hohen Temperaturen stellt sich unter Vereinheitlichung der Naturkräfte eine perfekte Symmetrie ein (rote Kurve für die Energiedichte). In diesem symmetrischen Zustand hat das Universum eine positive Energiedichte. Bei niedrigeren Energien wird das Energieminimum erreicht, wenn die Symmetrie gebrochen ist. Die Energiedichte des Minimums fällt auf Null ab – ein Hinweis auf ein Vakuum, dessen Energiedichte Null ist. (Dies ist in unserem heutigen Universum der Fall.) Die Inflation wird vom quantenmechanischen Vakuum mit seiner positiven Energiedichte in Gang gehalten.



6.9 Während der inflationären Periode wächst der Abstand aller Objekte im Weltraum viel schneller als vorher oder nachher (a). Die Dichte des Universums sinkt beständig (b). Nur in der inflationären Phase werden seine Eigenschaften vom quantenmechanischen Vakuum bestimmt. Die Inflation des Universums wird dadurch verursacht, daß die Dichte konstant bleibt, also bei der Ausdehnung des Raums nicht kleiner wird.

Problem der kosmolog. Konstante

- $\Omega_\Lambda = 0.7$ aus astrophysikal. Beobachtungen bedeutet eine Vakuumenergiedichte von

$$\rho_\Lambda = \Omega_\Lambda \cdot \rho_c \approx 0.7 \cdot 5.99 \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3} \approx 4.2 \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$$

- Quantenfluktuationen (z.B. e^-) verursachen eine Vakuumenergiedichte von

$$\rho_V \approx \frac{1}{64(\hbar c)^3} \cdot (m_{\text{Pl}} \cdot c^2)^4 \approx 4.5 \cdot 10^{129} \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$$

$\leftarrow \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2$
Planck-Masse

- Das Higgs-Potential hat im Minimum bei $v = 246 \text{ GeV}$ einen Wert von $V(v) = -\mu^2 v^2$ folgt für

$$\rho_H = \frac{8\pi G_N}{c^2} \cdot \frac{V(v)}{(\hbar c)^3} = -\frac{8\pi G_N}{c^2} \cdot \mu^2 v^2 / (\hbar c)^3$$

und damit eine Vakuumenergiedichte von

$$\rho_H \approx -\mu^2 v^2 / (\hbar c)^3 \approx -3.9 \cdot 10^{53} \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$$

$\leftarrow \mu > 7 \text{ GeV}$

\Rightarrow Es gibt gravitierende Diskrepanzen zwischen beobachteter und erwarteter Vakuumenergiedichten!

Problem der Vakuumenergie

Die verschiedenen Erwartungen für die Vakuumenergie dichte weichen gravierend von dem Beobachtungswert der kosmolog. Konstante ab. Prinzipiell gibt es noch keine Erklärung dafür. Allerdings existieren verschiedene Lösungsvorschläge, z.B.

- ▷ **Λ CDM** nimmt eine "glatte" (räumlich uniforme), zeitabhängige Komponente der (kalten) Dunklen Materie (Cold Dark Matter) an, die eine beliebige Zustandsgleichung besitzt und nicht auf Inhomogenitäten der Dunklen Materie und des Baryon-Photon-Neutrino Fluids reagiert.
- ▷ **QCDM** oder **Quintessenz** ersetzt die kosmolog. Konst. Λ durch eine dynamische, zeitabhängige und räumlich inkomogene Komponente, deren Zustandsgleichung sich von der für Baryonen, Neutrinos, Dunkle Materie und Strahlung unterscheidet, wobei sich der Zustand konstant, uniform oder oszillierend entwickeln kann.

Fazit

- Raum ist flach (euklidische Geometrie)
- Expansion des Universums beschleunigt angetrieben durch eine "Vakuumenergie", die einen Druck erzeugt
- fundamentale Defizite der bisherigen Teilchentheorien, da erwartete Vakuumenergiedichte 50 bis 100 Größenordnungen geringer beobachtet als von Theorie erwartet wird
- Materie im Universum besteht zu $\approx 10\%$ Baryonen (Protonen & Neutronen) und zu $\approx 90\%$ anderer, bisher unbekannter Natur.