

# Dunkle Materie

im Weltall

und ihre

kosmologische

Bedeutung

Otmar Biebel

10.11.1999

# Inhaltsübersicht

- Einführung: Dunkle Materie, Kosmologie
- Hinweise auf "Dunkle Materie"
- Kandidaten für "Dunkle Materie"
- kosmologisches Gesamtbild
- Zusammenfassung

# Materie im Universum

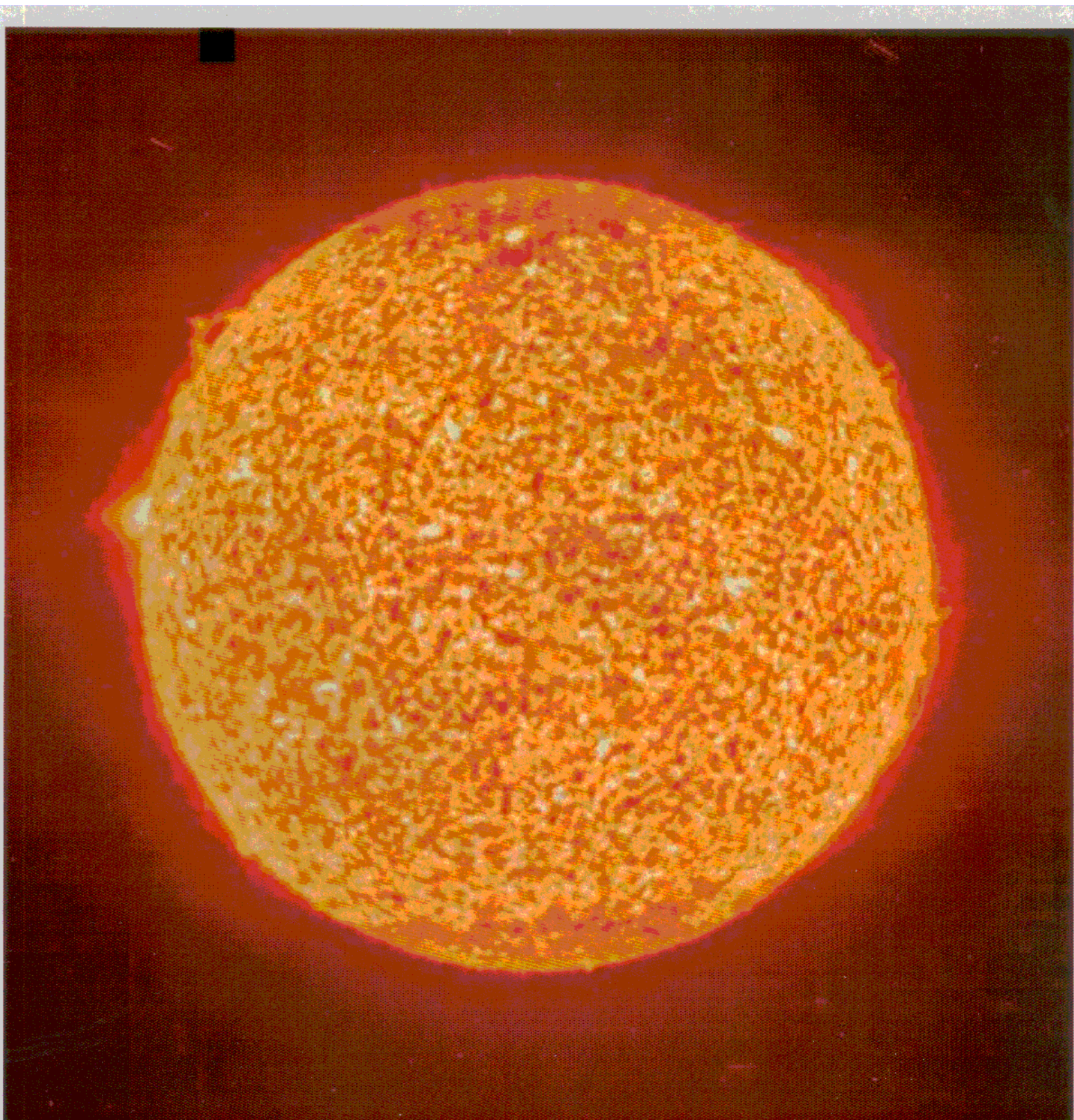
- teilweise hell → sichtbar!
  - ▷ z.B. in Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen
- teilweise dunkel → unsichtbar?
  - ▷ z.B. in Planeten, Monde, Asteroide, Kometen, ...
    - i.a. nicht direkt sichtbar
    - Gravitationswirkung auf helle Begleiter
    - periodische Abdeckung heller Begleiter

Aber: Massenanteil gering

z.B. Sonnensystem: Planeten  $\hat{=} 1\% M_{\odot}$

- ▷ weitere Beiträge?
  - gravitative Wirkung!

- Rolle der Materie in Kosmologie ...





# Kosmologie

- Urknallmodell

- Annahmen:

- ▷ kosmologisches Prinzip

= Homogenität & Isotropie des Universums

- ▷ Expansion

→ Rotverschiebung  $z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$

→ Fluchtgeschwindigkeit

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

H : Hubble-Konstante

D : Entfernung

c : Lichtgeschwindigkeit

- ▷ Gravitation einzige weitreichende Wechselwirkung

# Kosmologie

## Friedmann - Lemaitre - Lösung:

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

Materie

kosmog.  
Konstante

Raum=  
krümmung

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

$$\rho_c \equiv \frac{3 H^2}{8 \pi G} : \text{ heutiger Wert } \hat{=} 5 \text{ m}_{\text{Proton}} / \text{m}^3$$

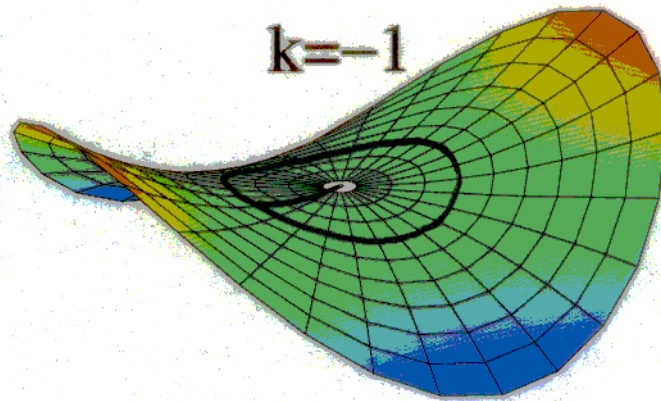
$$H \equiv \left( \frac{\dot{R}}{R} \right) : \text{ Hubble-Konst. } H = H(t)$$

$R$  : Radius des Raumes

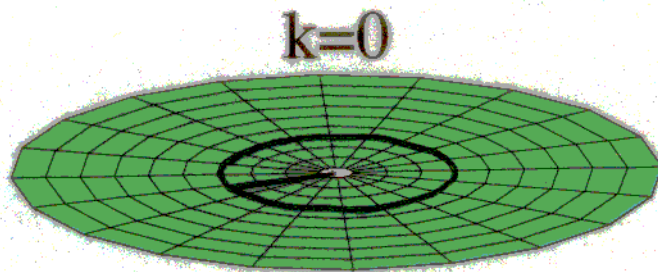
$k = +1, 0, -1$  : Krümmungsparameter

# Arten der Krümmung

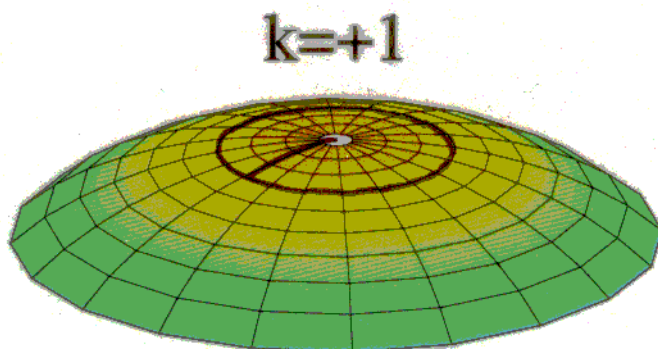
Veranschaulicht für 2 Dimensionen:



Kreisfläche:  
 $F > \pi r^2$



$F = \pi r^2$



$F < \pi r^2$

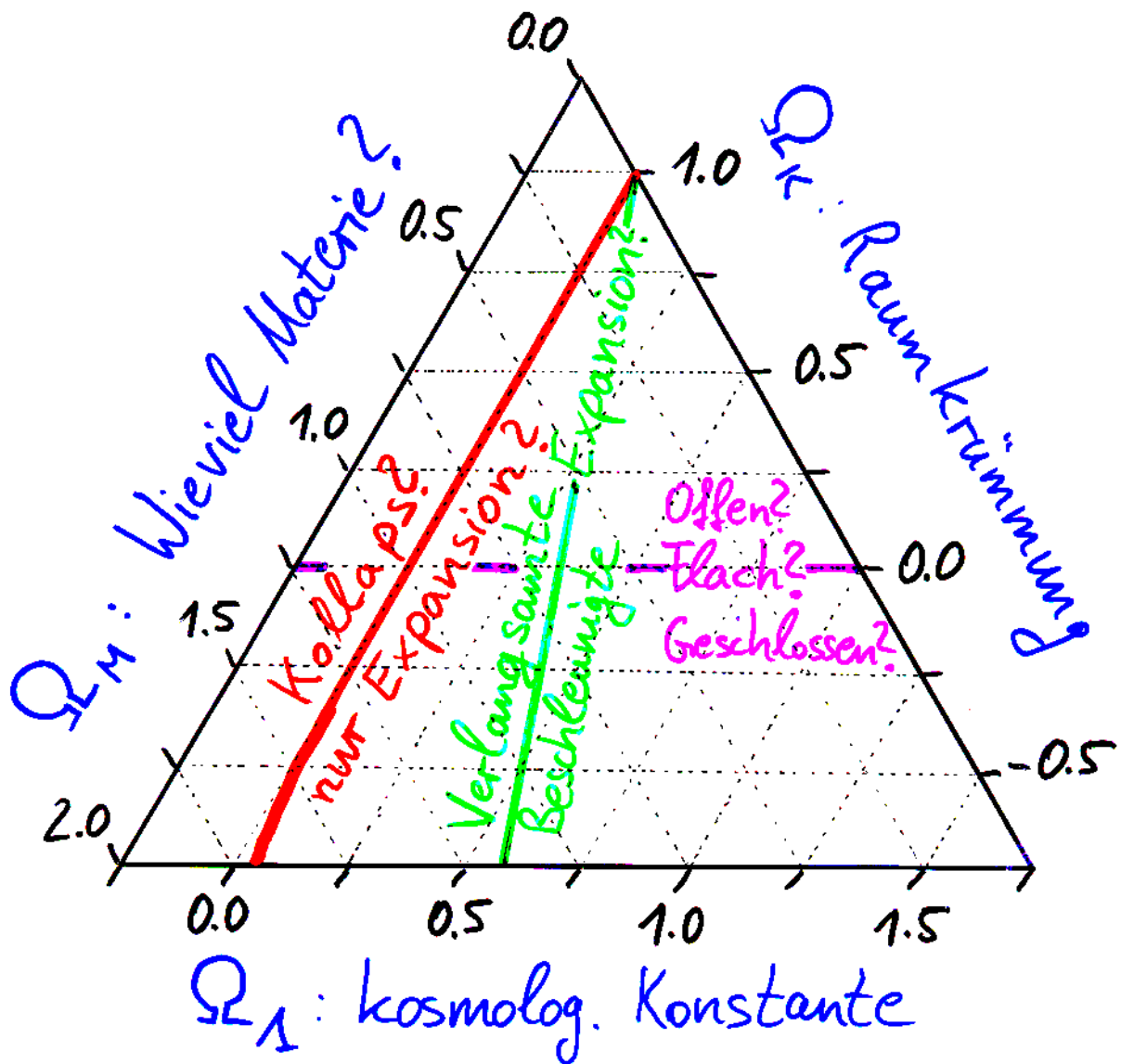


# Fragen zum Universum

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



## kosmologisches Dreieck



→ Kenntnis des Materieanteils  
schränkt Lösungsbereiche ein

# Hinweise auf "Dunkle Materie"

## (1) Sichtbarer Materieanteil:

Leuchtdichtedichte von Galaxien ( $\hat{=} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^3}$ )

$$\mathcal{L}_B \approx 2 \cdot 10^8 \frac{L_\odot}{(\text{Mpc})^3}$$

$$(1 \text{ Mpc} \hat{=} 3.26 \text{ Mly} \hat{=} 30.71 \cdot 10^{18} \text{ km})$$

$\Rightarrow$  Dichte einer Galaxie

$$\rho_G = \left(\frac{M}{L}\right)_G \cdot \mathcal{L}_B$$

$$\rho_c = 2.8 \cdot 10^{11} \frac{M_\odot}{(\text{Mpc})^3} \quad \text{krit. Dichte}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{M}{L}\right)_G \approx 1400 \Omega_{\text{vis}} \cdot \left(\frac{M_\odot}{L_\odot}\right) \approx 5000 \frac{\text{kg}}{\text{W}}$$

empirisch:  $\left(\frac{M}{L}\right)_G \approx (4 \dots 30) \cdot \left(\frac{M_\odot}{L_\odot}\right)$

$$\Rightarrow 0.003 < \Omega_{\text{vis}} < 0.02$$

# M100

## A Spiral Galaxy in the Virgo Cluster

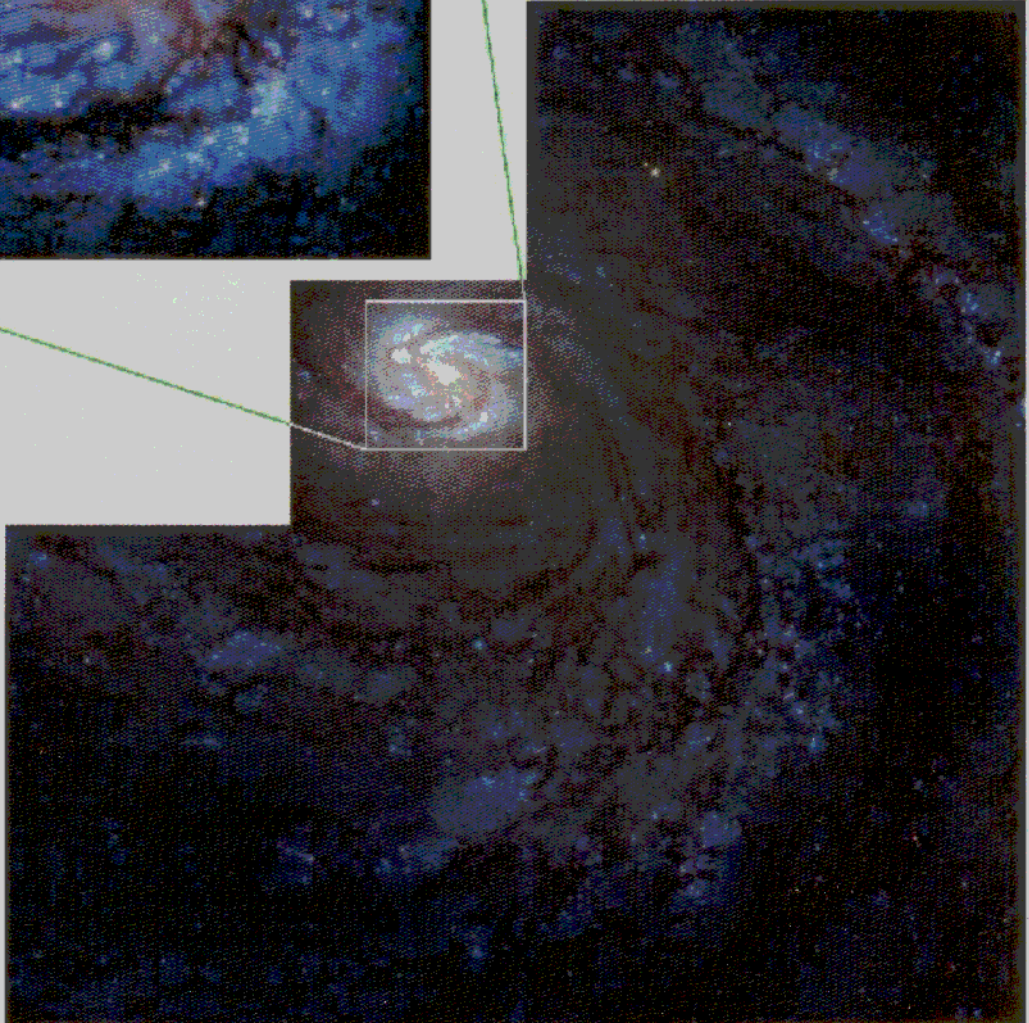
Hubble Space Telescope

Wide Field Planetary Camera 2

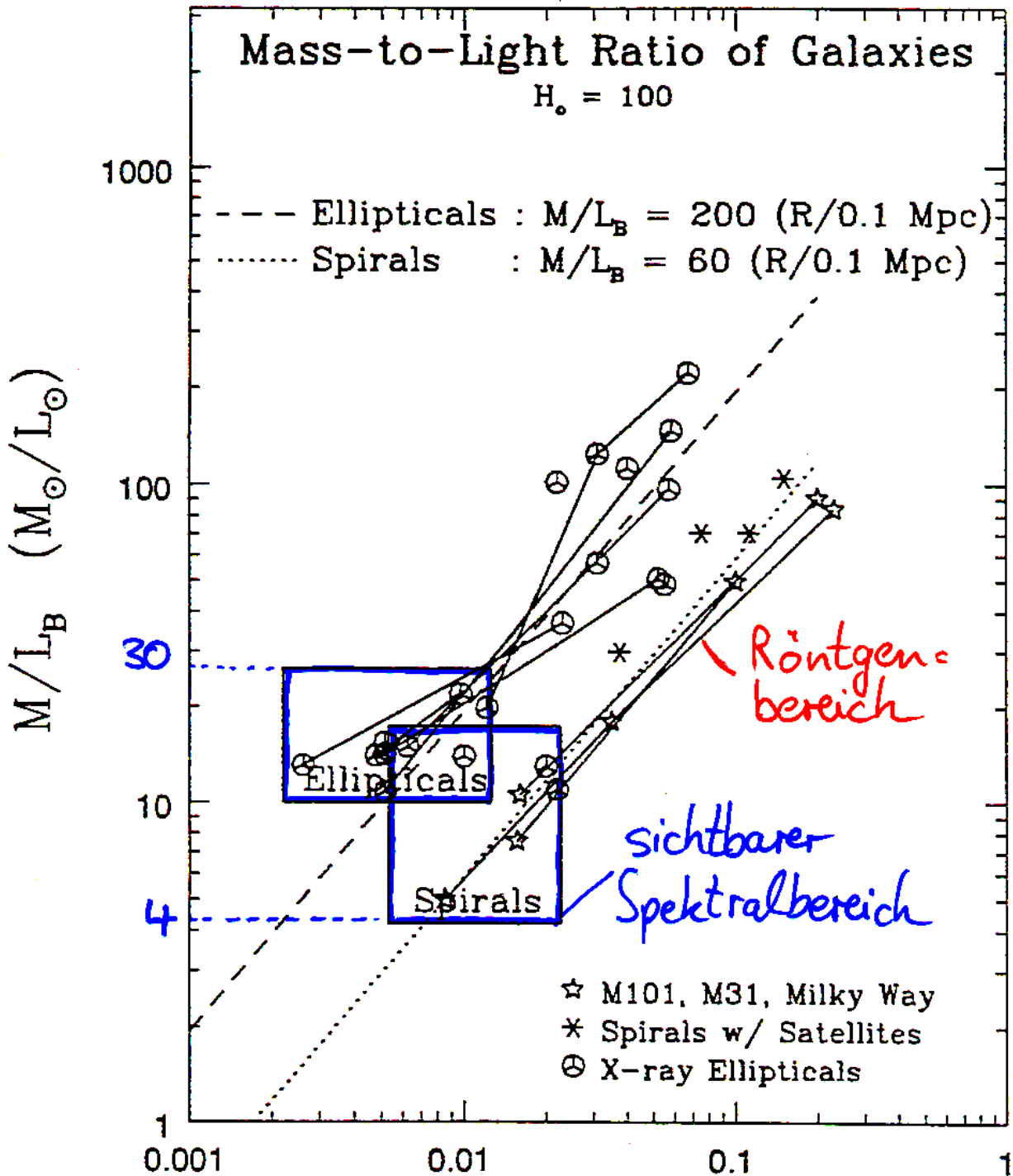


Upper panel shows the nucleus of M100 imaged with the Planetary Camera at full resolution.

Image at left shows a mosaic of the three Wide Field Cameras plus the Planetary Camera.



# Masse-Leuchtkraftverhältnis

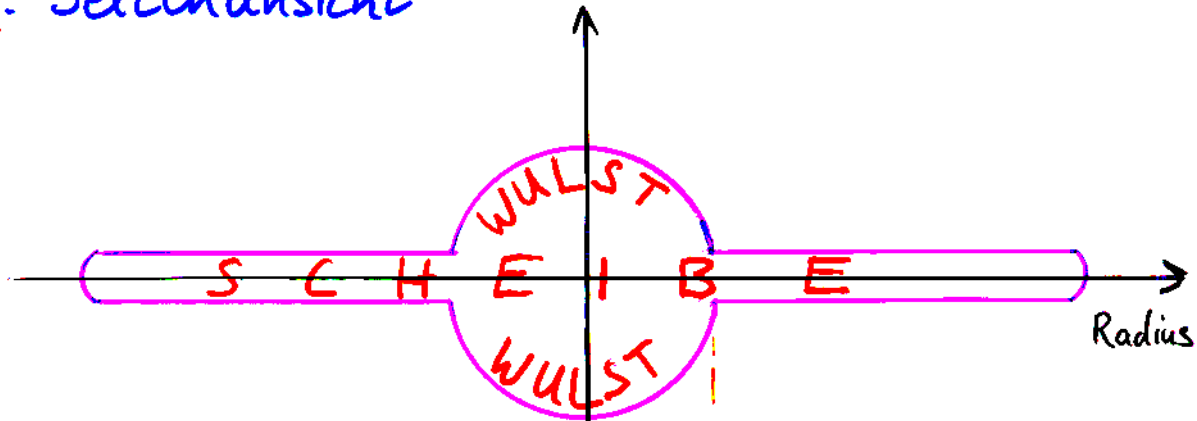


radius Abstand  $R$  (Mpc)  
 vom Galaxienzentrum

# Hinweise auf "Dunkle Materie"

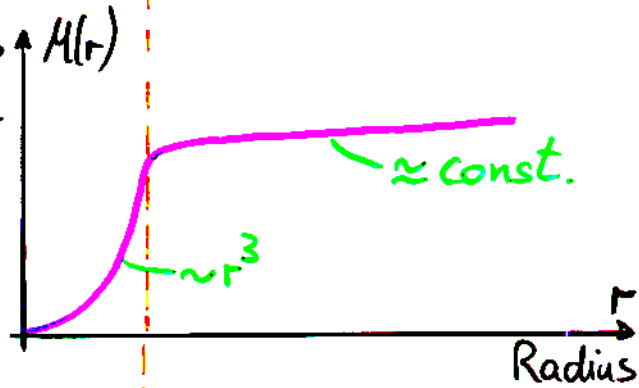
## (2) Rotationskurven von Galaxien

Galaxie: Seitenansicht

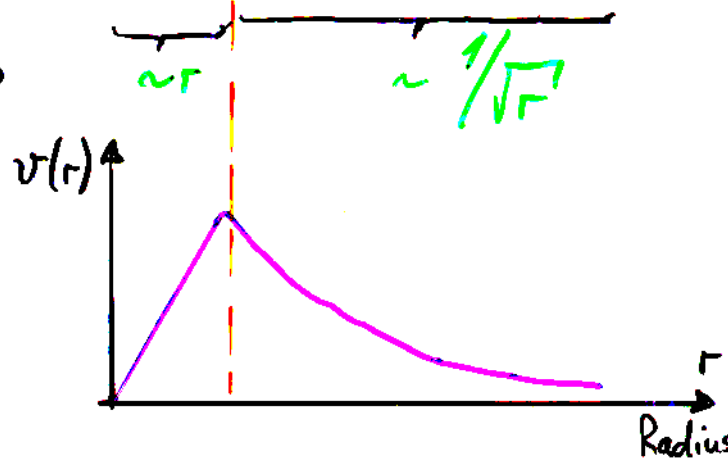


Erwartung:

Massensumme  
bis Radius  $r$



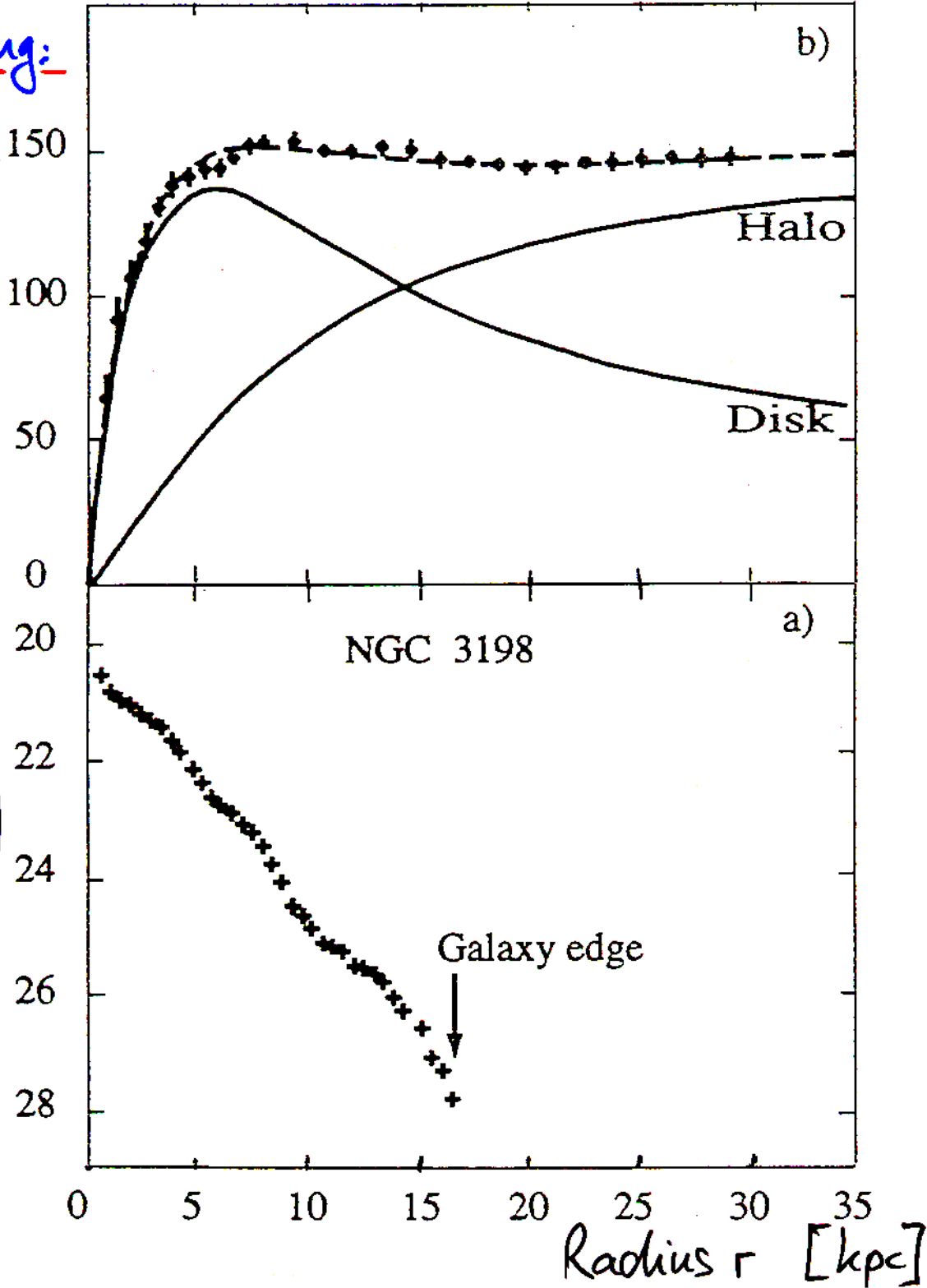
Rotation:  $v(r) \sim \sqrt{\frac{M(r)}{r}}$   $\Rightarrow$



# ... Rotationskurve von Galaxien

Beobachtung:

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

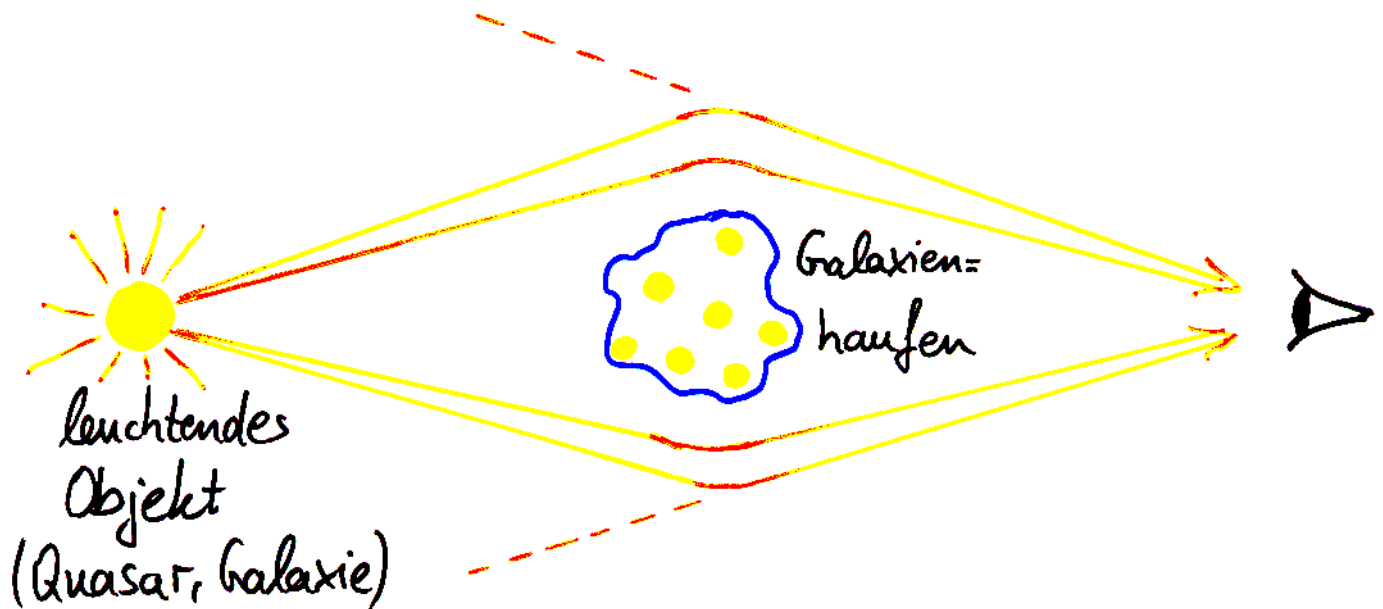


aus  $\left(\frac{M}{L}\right) \Rightarrow$

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

# Hinweise auf "Dunkle Materie"

## (3) Gravitationslinsen - Effekt

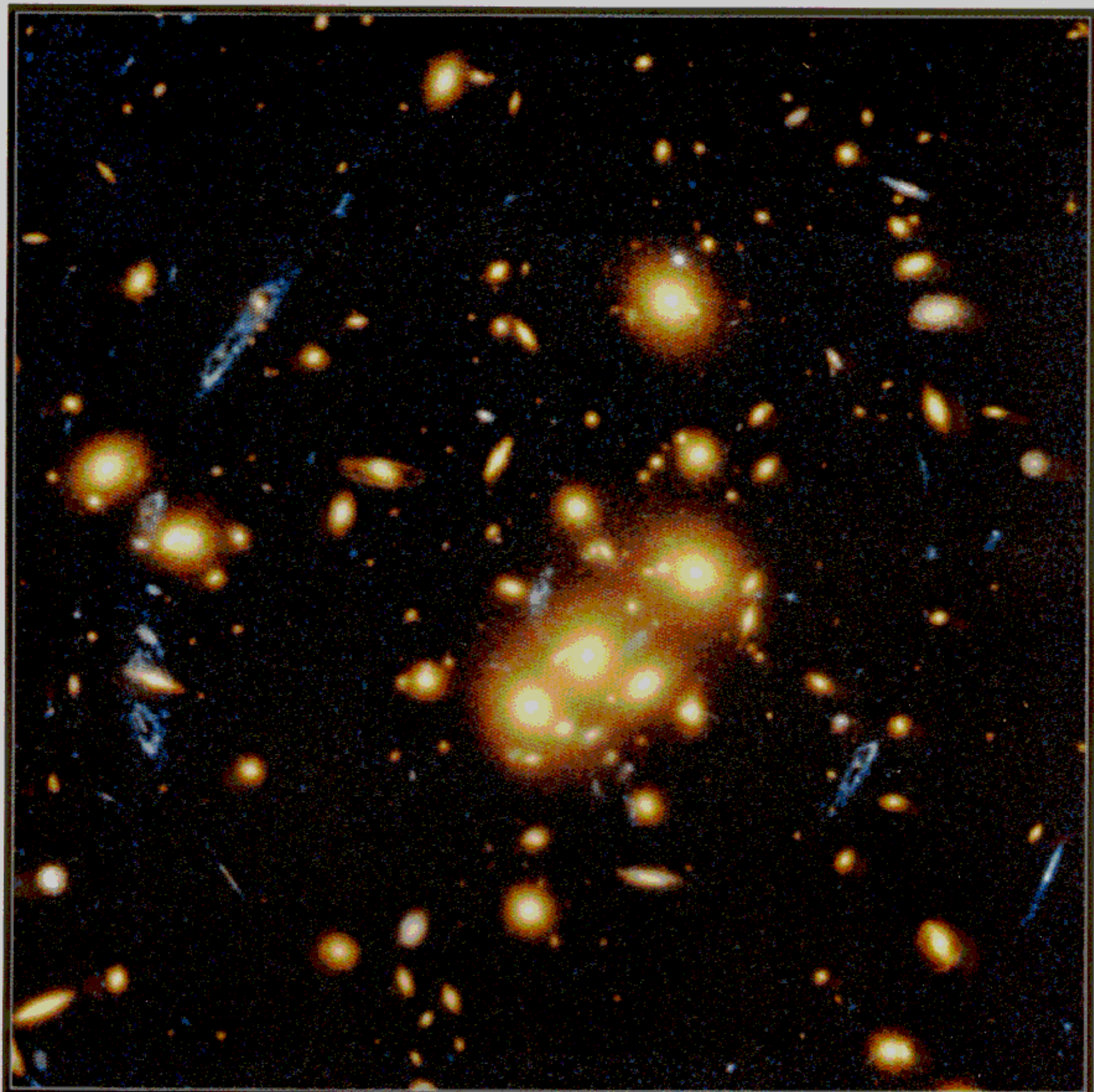


Mehrfache Abbildung

→ Rekonstruktion der Haufenmasse

$$\rightarrow \left(\frac{M}{L}\right)_{\text{Haufen}} = (200 \pm 70) \left(\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}\right)$$

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



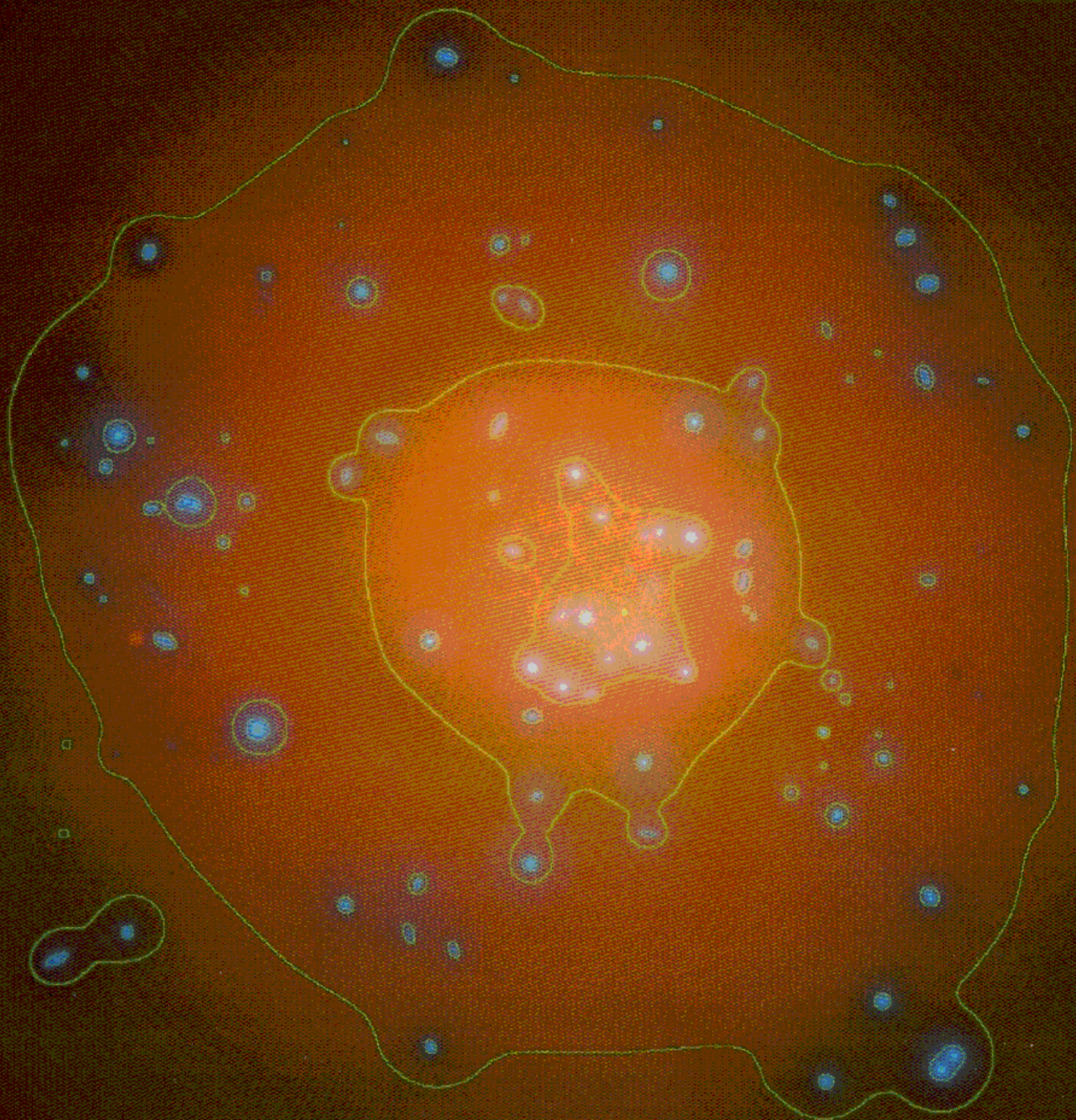
**Gravitational Lens**  
**Galaxy Cluster 0024+1654**

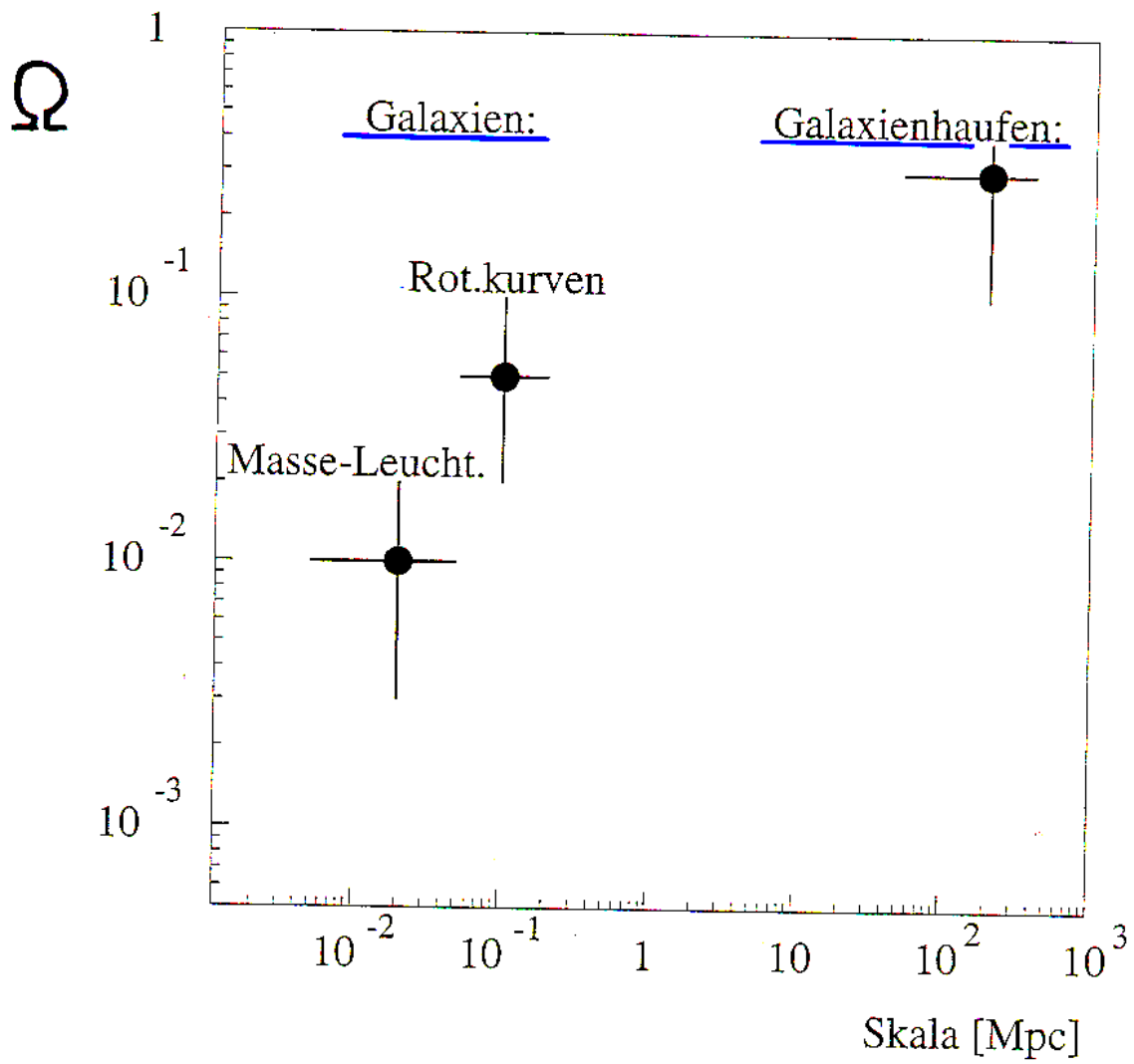
HST · WFPC2

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

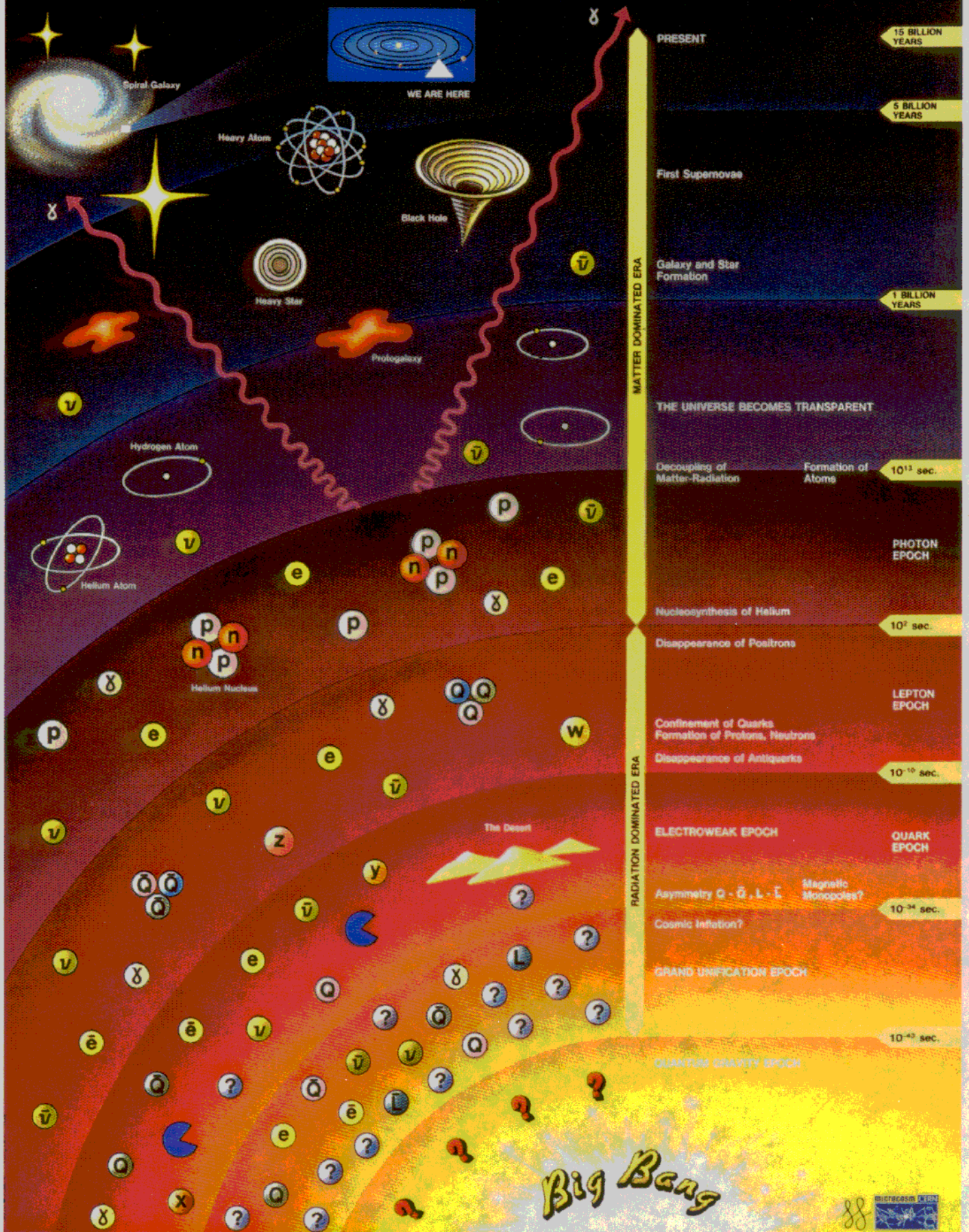






- größere Skala  $\rightarrow$  größeres  $\Omega$

# History of the Universe



# Hinweise auf "Dunkle Materie"

## (4) Elementsynthese beim Urknall

▷  $T > 10^{10}$  K:

thermisches Gleichgewicht zw. Protonen & Neutronen

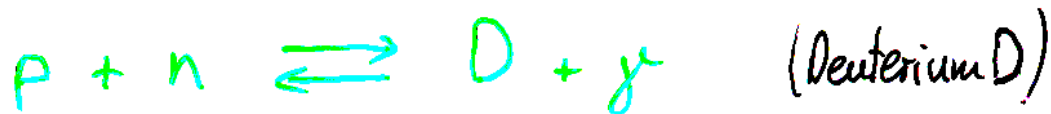


▷  $T \approx 10^{10}$  K: ( $\approx 1$  s)

□ Entkopplung der Neutrinos

□ Einfrieren des Verhältnisses  $\frac{\#n}{\#p} = e^{-\frac{\Delta m}{k_B T}}$

▷  $10^{10}$  K  $>$   $T >$   $10^9$  K:



▷  $T \approx 10^9$  K: ( $\approx 3$  min)

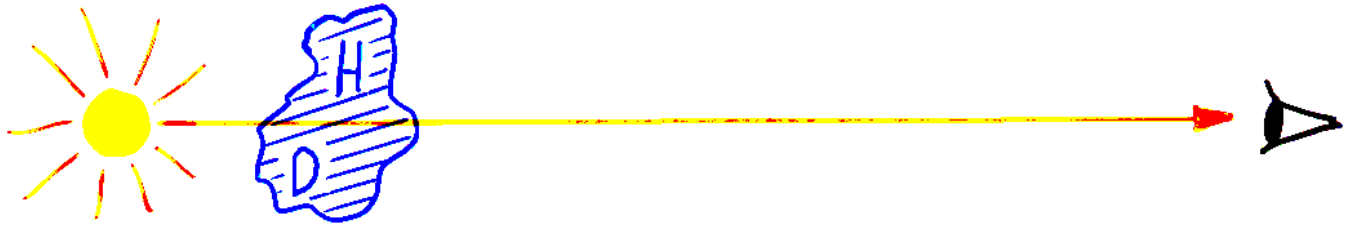


und weitere

● Baryondichte  $\rightarrow$   ${}^4\text{He}$ -Produktion

# Bestimmung von D/H aus Elementsynthese

## Idee:



leuchtendes  
Objekt  
(z.B. Quasar)

interstellare  
Gaswolke

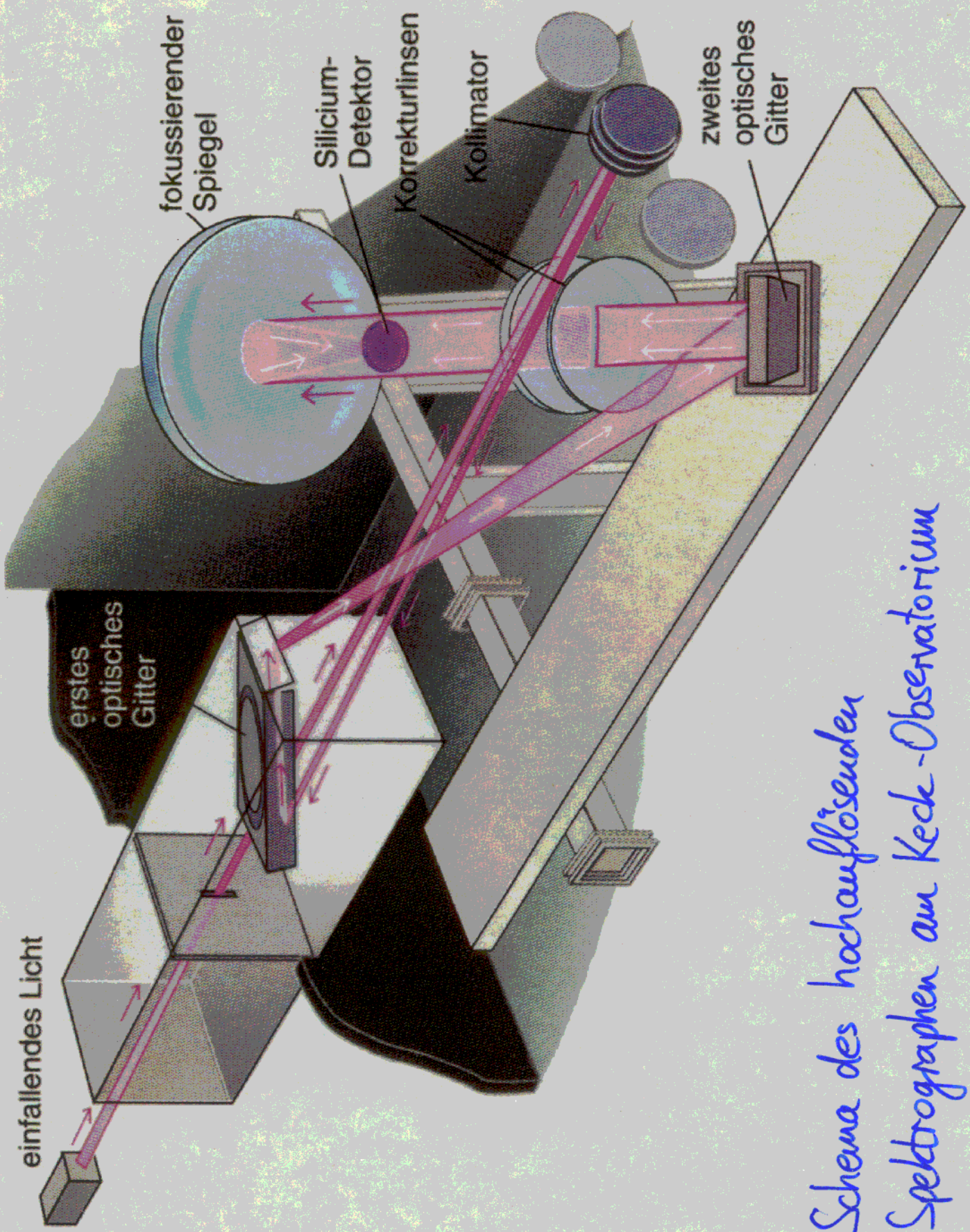
D-, H-Absorption  
in Gaswolke

← frühes Universum  
( $\hat{=}$  große Rotverschiebung) → heute

## Messung:

Keck-Observatorium (Hawaii)

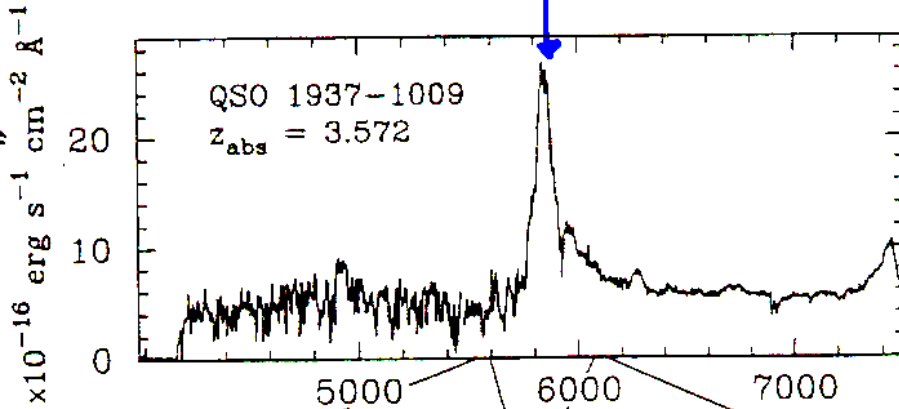
9.8 m optisches Teleskop



Schema des hochauflösenden Spektrographen am Keck-Observatorium

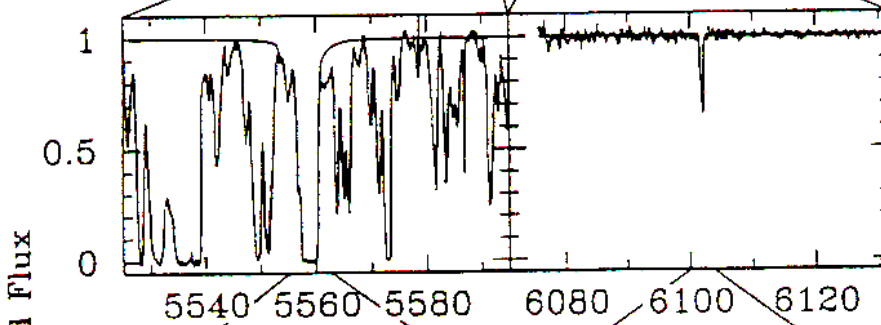
# ... Messung am Keck-Observatorium

Strahlungsfluß

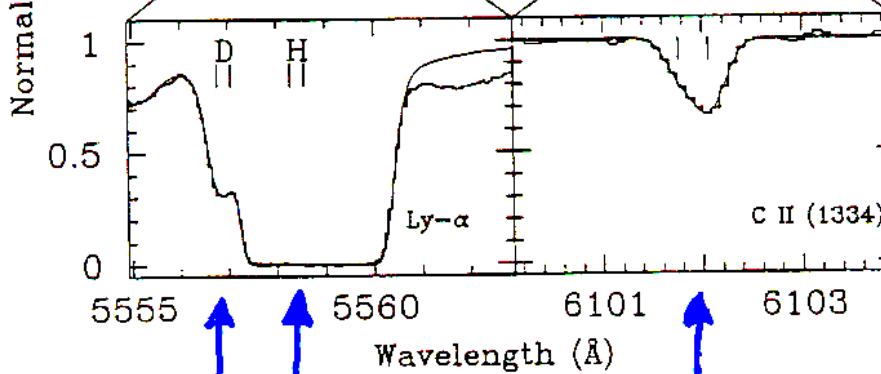


Lyman- $\alpha$ -Linie von Wasserstoff des Quasars ( $z_{\text{Quasar}} \approx 3.9$ )

Absorption



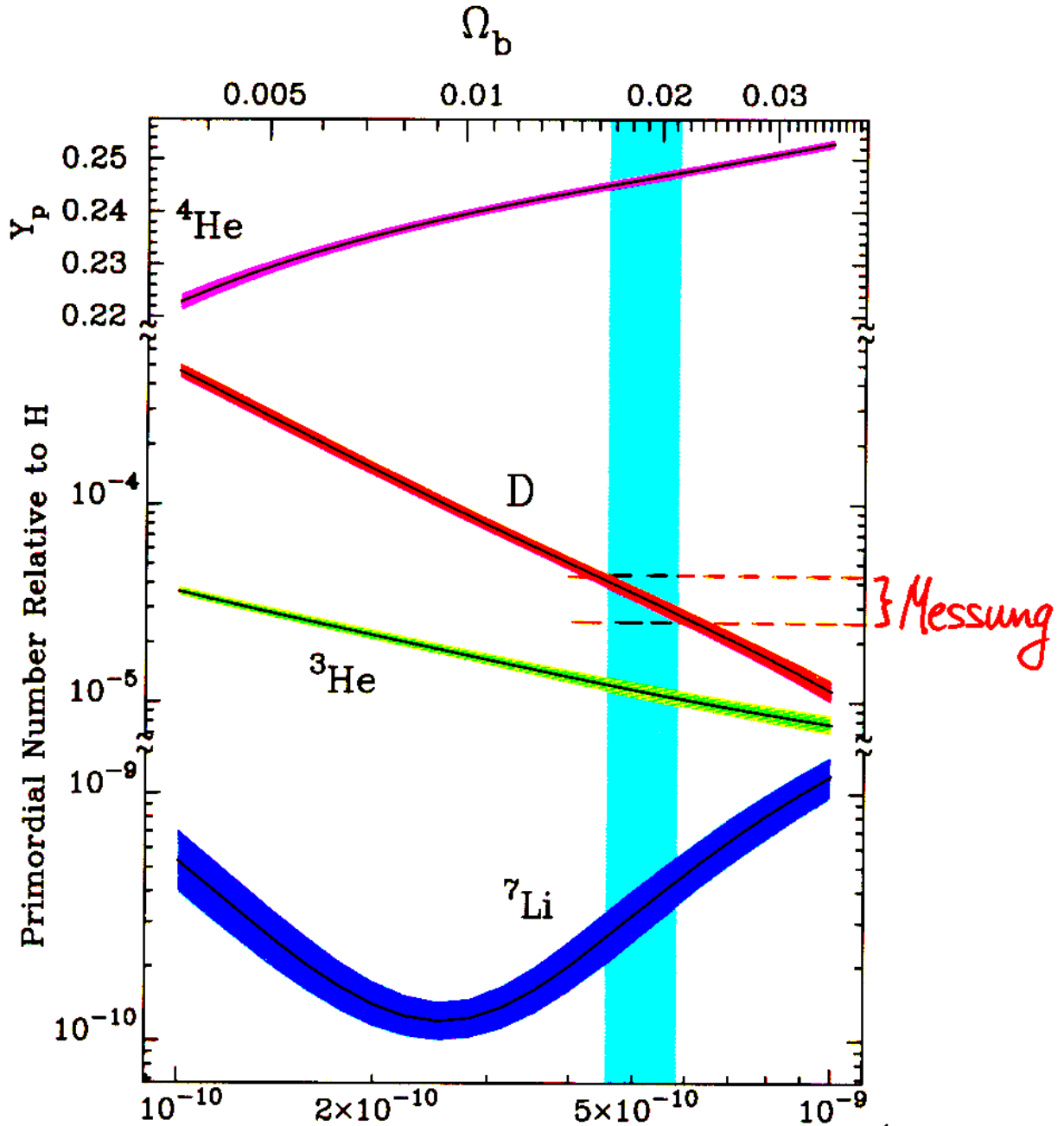
Absorption



Absorptionslinien: **D** **H** **C<sup>+</sup>**  
(Ly- $\alpha$ )

# ... Elementsynthese beim Urknall

relative  
Häufigkeit  
zu  
Wasserstoff

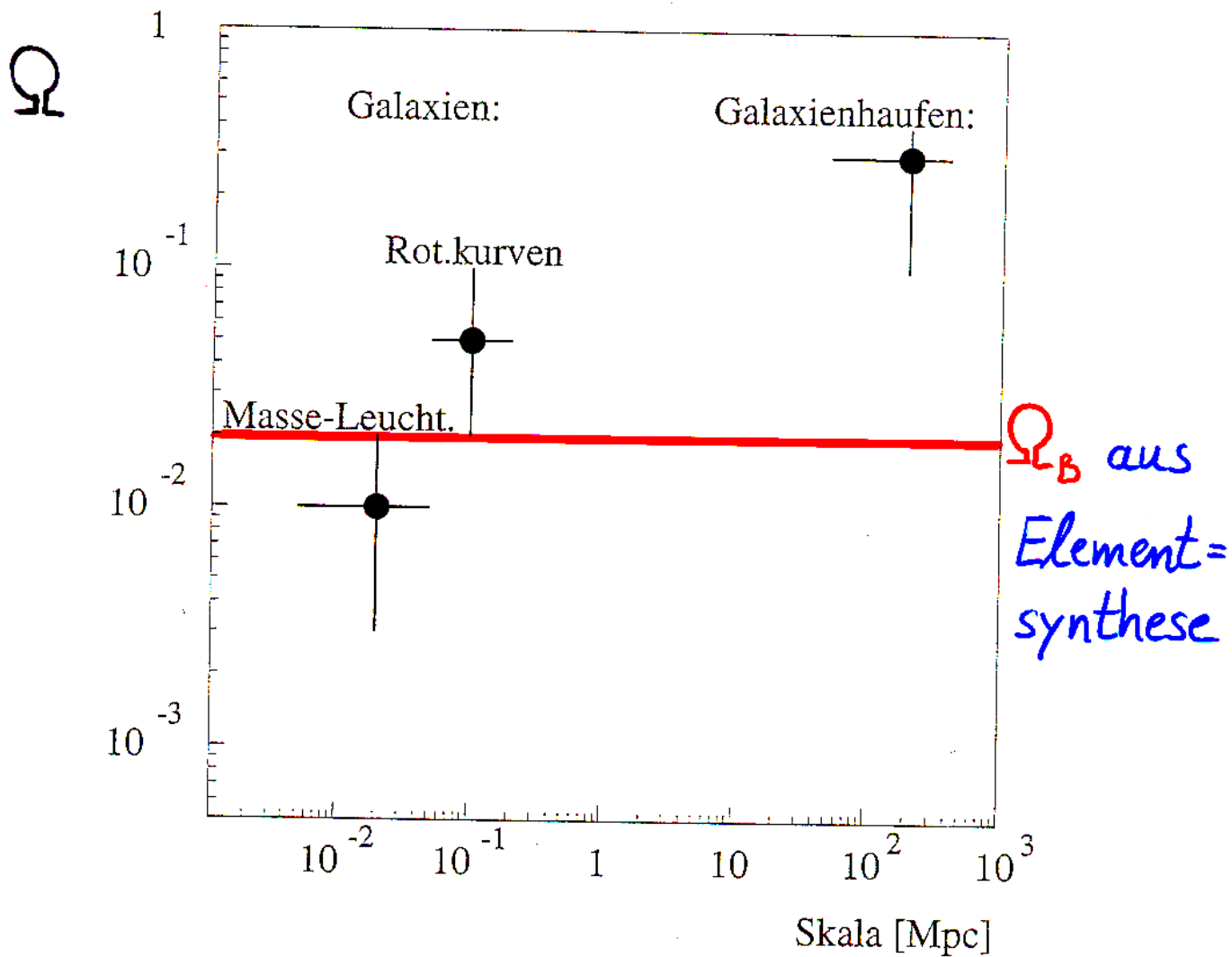


$\eta = \# \text{ Baryonen} / \# \text{ Photonen}$



$$\Omega_B = 0.019 \pm 0.004$$





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

# Kandidaten für "Dunkle Materie"

## (1) Baryonische Materie:

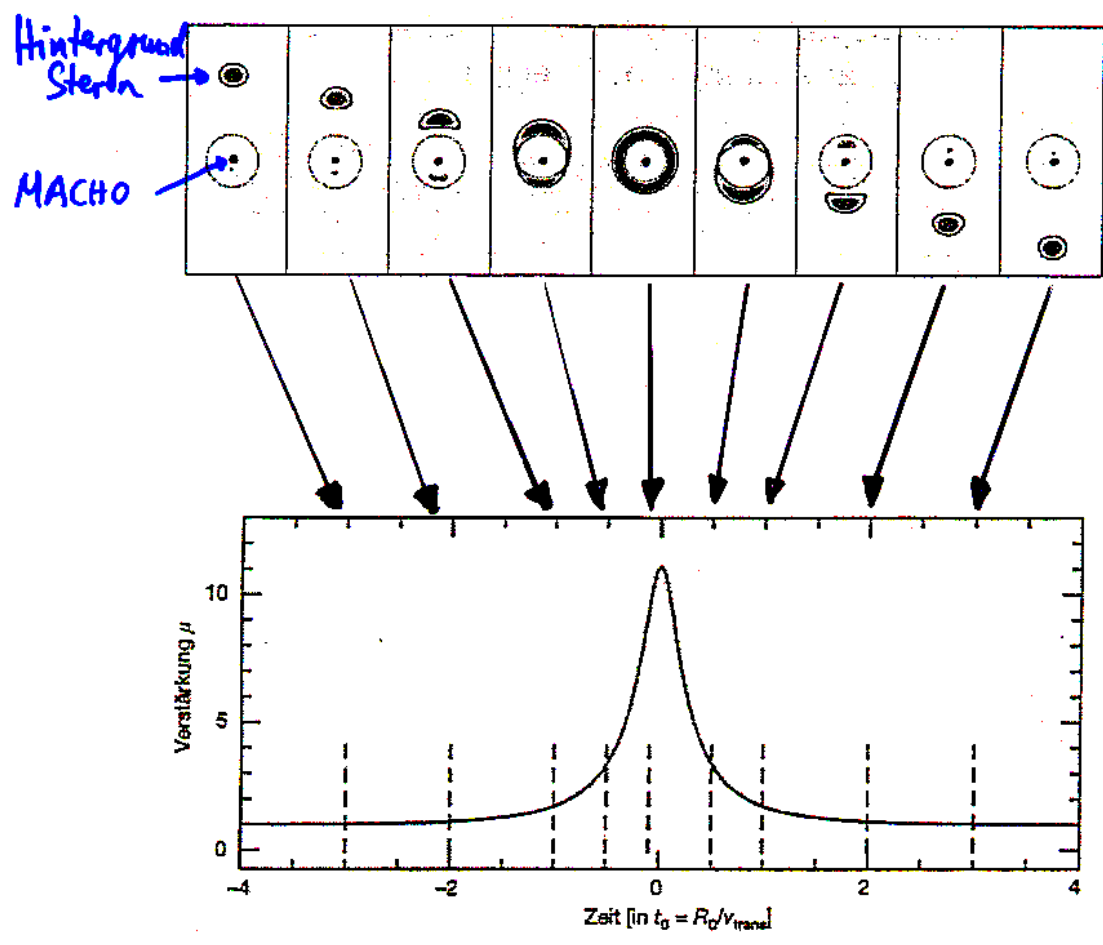
i.a. schwach leuchtende massive Objekte

- braune Zwerge  
 $M < 0.08 M_{\odot}$
- weiße Zwerge  
Sternendstadium mit  $M = 0.5 \dots 1.4 M_{\odot}$
- Neutronensterne  
Sternendstadium mit  $M > 1.4 M_{\odot}$
- allgemein: MACHO (Massiv compact halo object)

# Kandidaten für "Dunkle Materie"

- Suche nach MACHOs

Beobachtung durch Mikrogravitationslinsen-Effekt

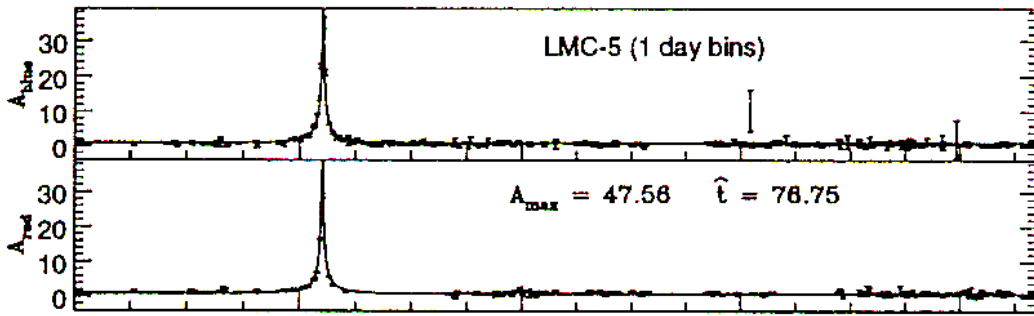


wichtig: Effekt ist achromatisch!

# ... Mikrogravitationslinsen-Effekt

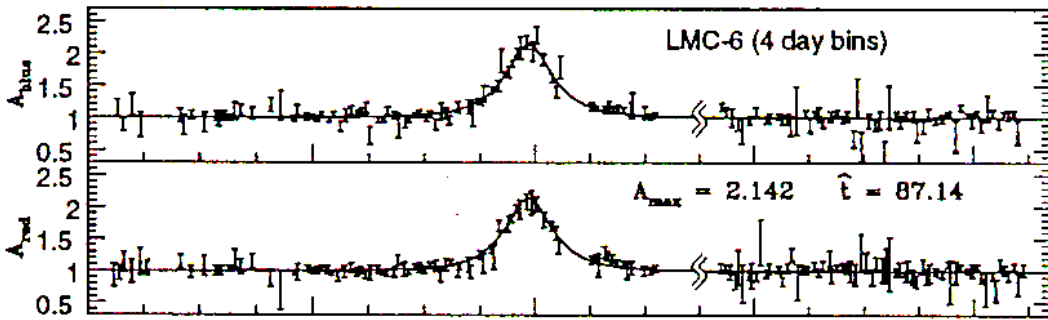
MACHO in Milchstraße auf Stern in Magellanscher Wolke

relative  
Intensität  
blau



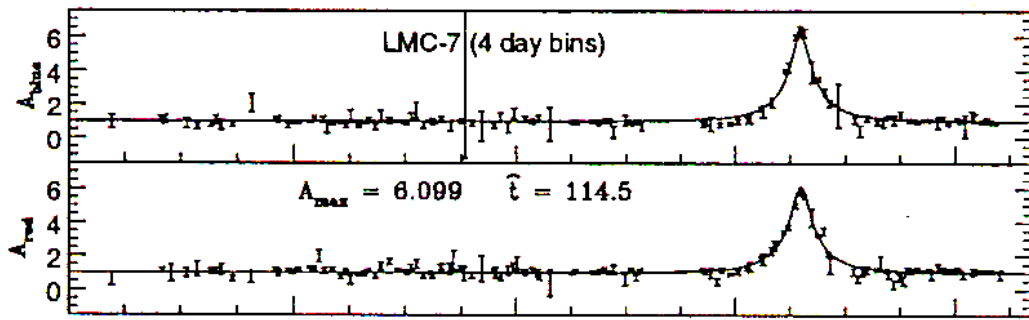
rot

blau



rot

blau



rot

-200 0 200 400 600 Tage  
JD - 2449000

⇒ Linsen-Masse  $\sim 0.05 \dots 1 M_{\odot}$

⇒ Innerhalb von 50kpc:  $\sum M_{\text{MACHOs}} \approx 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$   
Vgl.: Milchstraße:  $M_{\text{Galaxis}} \approx 2 \dots 14 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

## (2) Nicht-baryonische Kandidaten für "Dunkle Materie"

- Eigenschaften:
  - ▶ massiv
  - ▶ elektrisch neutral
  - ▶ schwach wechselwirkend
- Kandidaten:
  - ▶ **Neutrinos** mit Masse  $> 0$   
geringe Masse genügt, da  
ca.  $330/\text{cm}^3$
  - ▶ **Axion** - Teilchen  
hypothetisch  
Masse?
  - ▶ **WIMP** - Teilchen  
(= weakly interacting massive particle)  
sehr massiv:  
$$m_{\text{WIMP}} > m_{\text{Proton}}$$

# Massive Neutrinos als 'Dunkle Materie'

Neutrinos beim Urknall erzeugt

- Anzahldichte  $n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma \approx 110/\text{cm}^3$  je Generation

$$\Rightarrow \Omega_\nu \approx \frac{\sum m_\nu}{94 \text{ eV}/c^2}$$

- Neutrino-Massengrenzen:

$$\triangleright m_{\nu_e} < 5 \text{ eV}/c^2$$

$$\triangleright m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}/c^2$$

$$\triangleright m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}/c^2$$

und

$$\triangleright 3 \text{ Neutrinogenerationen} \quad m_\nu < 45 \frac{\text{keV}}{c^2}$$

- Hinweise auf  $m_\nu > 0$

Defizite:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{atmosphär. Neutrinos} \\ \text{Sonneneutrinos} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Neutrino-Oszillationen}$   
 $\rightarrow m_\nu < 0.1 \frac{\text{eV}}{c^2}$

$\Rightarrow$

$$\Omega_\nu < 0.003$$

Zu wenig!

# WIMP - Teilchen

- wichtige Kandidaten:

Supersymmetrische Partnerteilchen zu  
gewöhnlichen Elementarteilchen

(Supersymmetrie: Symmetrie zw. fermionischen  
und bosonischen Elementarteilchen

z.B.: Photon, Spin 1  $\leftrightarrow$  Photino, Spin  $\frac{1}{2}$   
Elektron, Spin  $\frac{1}{2}$   $\leftrightarrow$  skalares Elektron,  
Spin 0)

- konkret: leichtestes SUSY-Teilchen (LSP)  
(wenn stabil)

- Wissensstand:  $m_{LSP} \gtrsim 40 \text{ GeV}/c^2$

(Experimente am  
LEP-Beschleuniger  
des CERN)

# WIMP - Teilchensuche

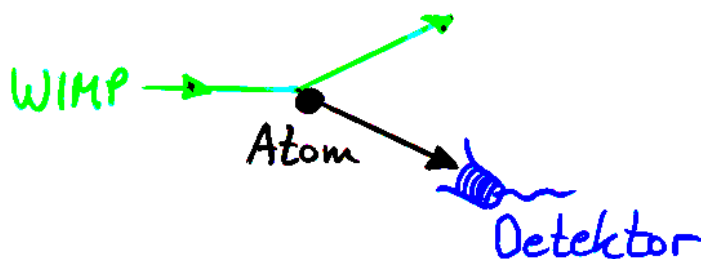
- WIMPs aus Urknall sind "kalt"

$$T_{\text{WIMP}} \approx T_{\nu} = 1.95 \text{ K}$$

- bilden Halo um Galaxis

Sonnensystem fliegt mit  $\approx 230 \text{ km/s}$   
durch "See aus WIMPs"

- nutze Rückstoßenergie



- Erde rotiert mit  $\approx 30 \text{ km/s}$  um Sonne

$\Rightarrow$  **Erwartung:** Jährliche Modulation ( $\approx 7\%$ )  
der WIMP-Stoßrate



# Positives Resultat des DAMA - Experiments?

DAMA (= Dark Matter, Gran Sasso Labor, Italien)

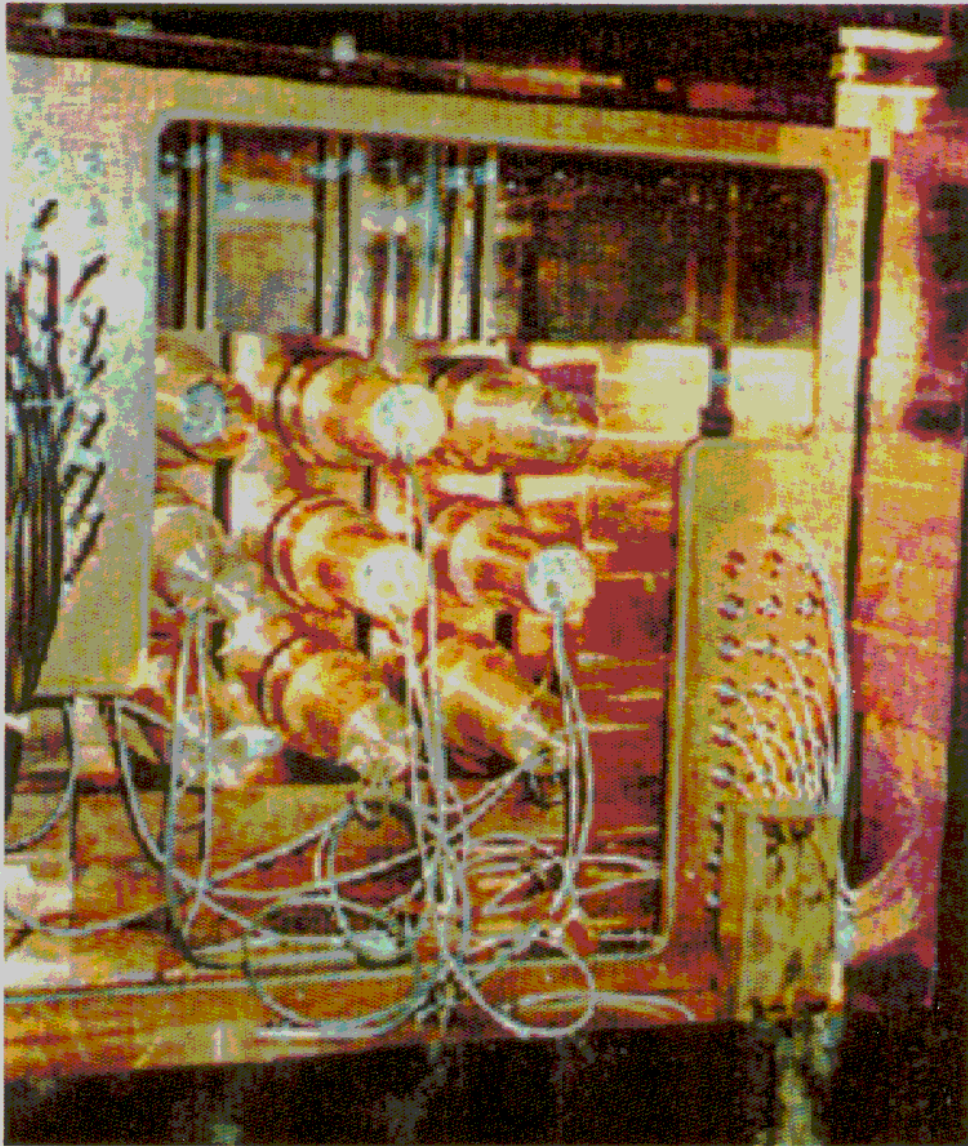
- insgesamt  $\approx 100$  kg NaI(Tl) - Szintillator
- Rückstoßenergie  $\rightarrow$  Lichtsignal
- Meßdauer  $> 180$  Tage (insb. Nov'97 - Jul'98)
- Modulation der Zählrate: 3...6%  
( $> 98\%$  stat. Zuverlässigkeit)
- Anpassung der Vorhersage:

$$m_{\text{WIMP}} = \left( \begin{array}{c} 59 \\ -14 \end{array} \right) \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

$\rightarrow$  Bestätigung für Periode Jul-Nov abwarten!

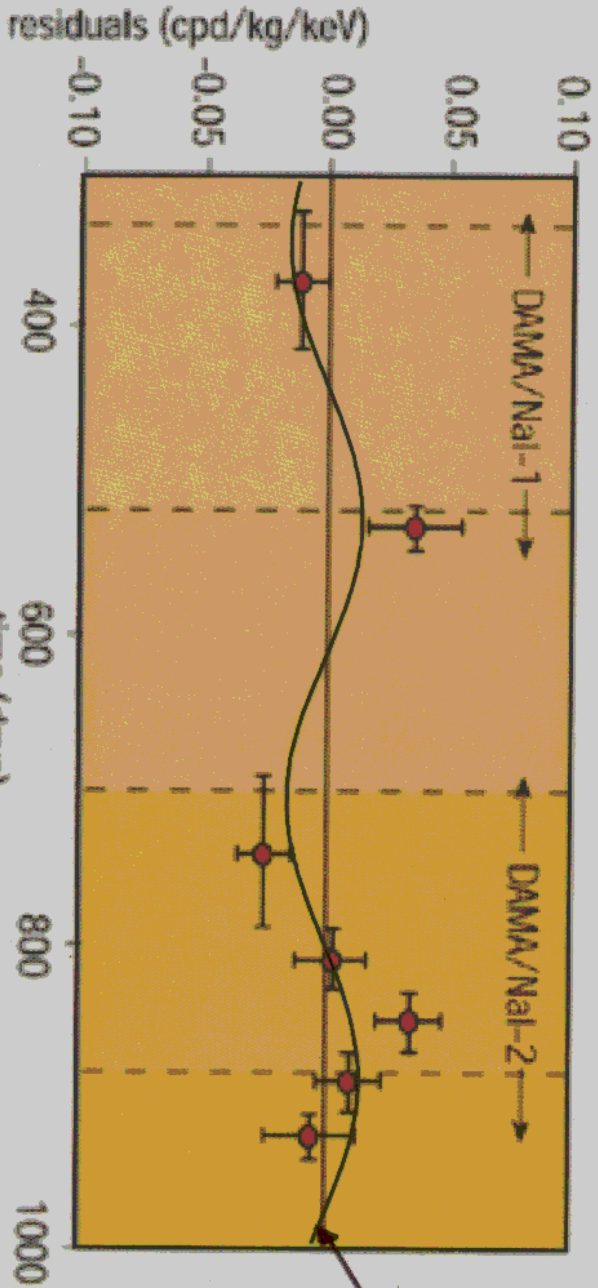
# DAMA - Experiment, Gran Sasso

≈ 100 kg NaI (TL) - Szintillator



Messdauer > 180 Tage (insb. Nov '97 - Jul '98)

# DAMA-Experiment: Messung



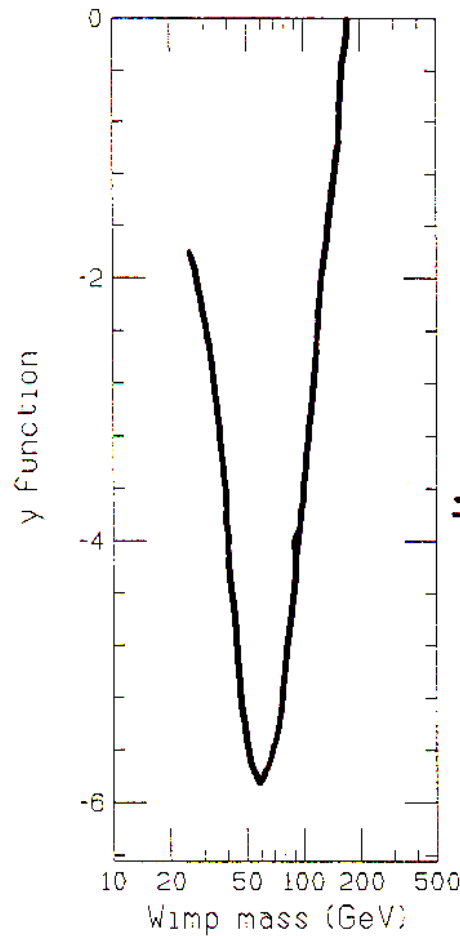
Abweichung  
von konst.  
Untergrund =  
Zählrate

Modulation  
 $\pm 0.03$   
mit 365 Tagen  
Periodendauer

# ... DAMA - Resultat

- Anpassung der Vorhersage:

$\Delta[2 \cdot \ln(\text{Likelihood})]$



$\Rightarrow m_{\text{WIMP}} = \left( \begin{matrix} 59 + 17 \\ -14 \end{matrix} \right) \frac{\text{GeV}}{c^2}$

WIMP-Masse

## Zwischenfazit zur Suche

- Nicht-baryonische "Dunkle Materie":  $\Omega_{\text{nB}} \approx 0.28$ 
  - ▶ Außer Neutrino: Existenz für keinen nicht-baryon. Materiekandidaten gesichert
  - ▶ Neutrinomasse: experimentell nur nach oben beschränkt
- Baryonische "Dunkle Materie":  $\Omega_{\text{B}} \approx 0.02$ 

MACHOs: signifikanter Anteil an Milchstraßen-Masse
- Gesamtanteil der Materie am Universum

$$\Omega_{\text{M}} \approx 0.3$$

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

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

▷ Typ I Super-novae: 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  $D_L \gtrsim D_z$

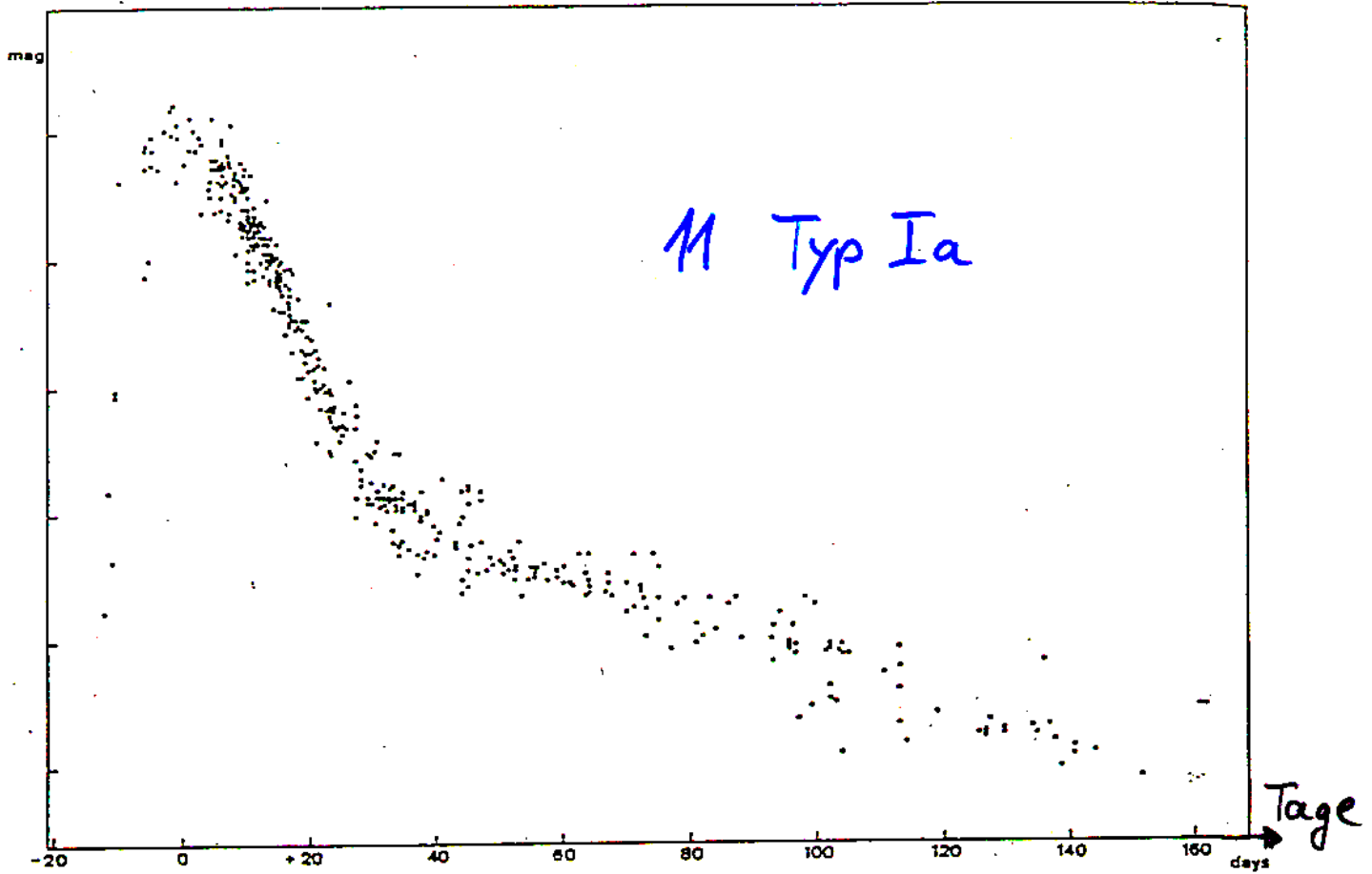
⇒ ~~beschleunigte~~ / ~~verzögerte~~ Expansion

▷ beste Anpassung ( $\Omega_K$  beliebig)

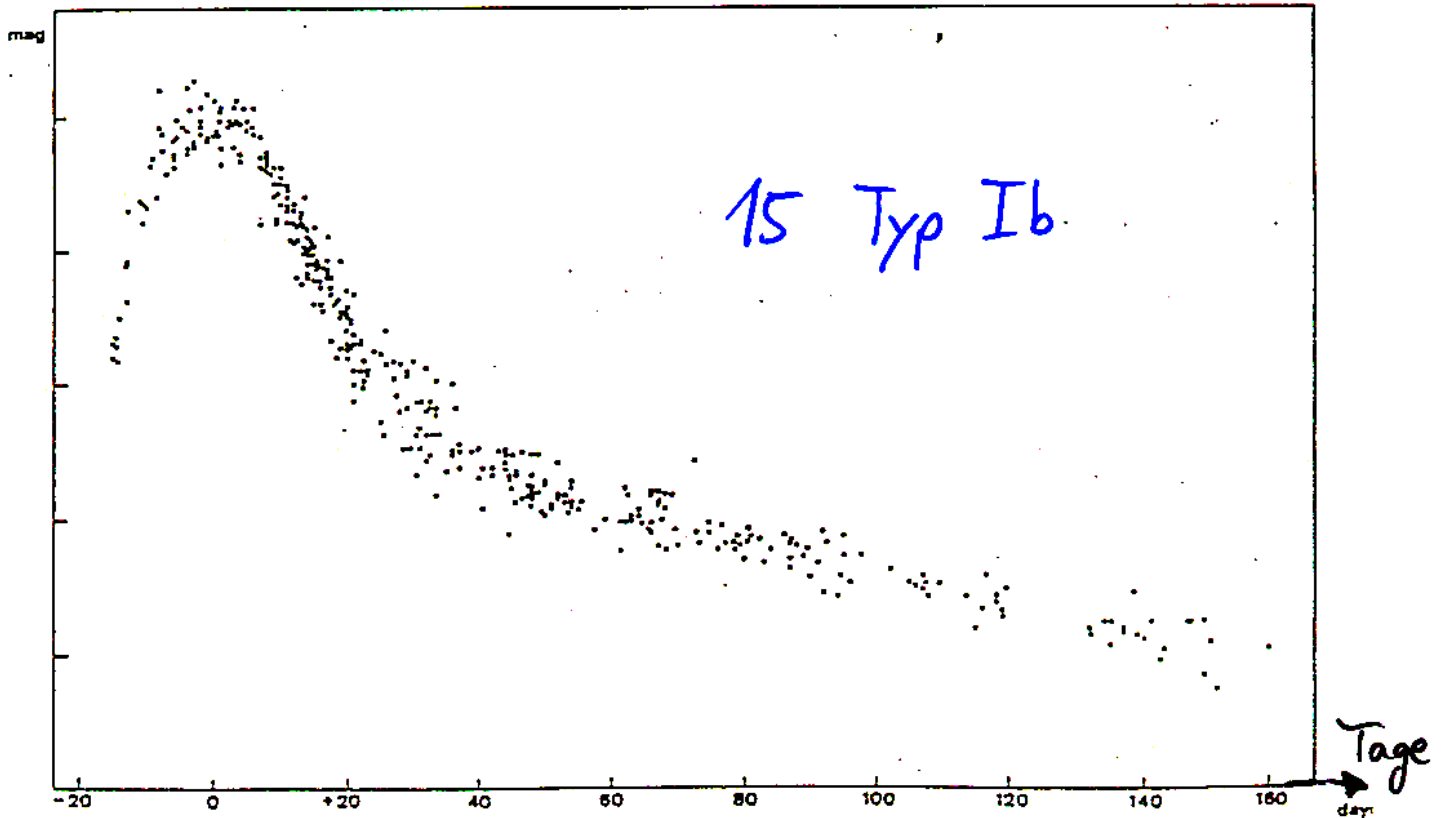
$$0.8 \cdot \Omega_M - 0.6 \Omega_\Lambda = -0.2 \pm 0.1$$

# Lichtkurven von Supernovae Typ I

R. Barbon *et al.*

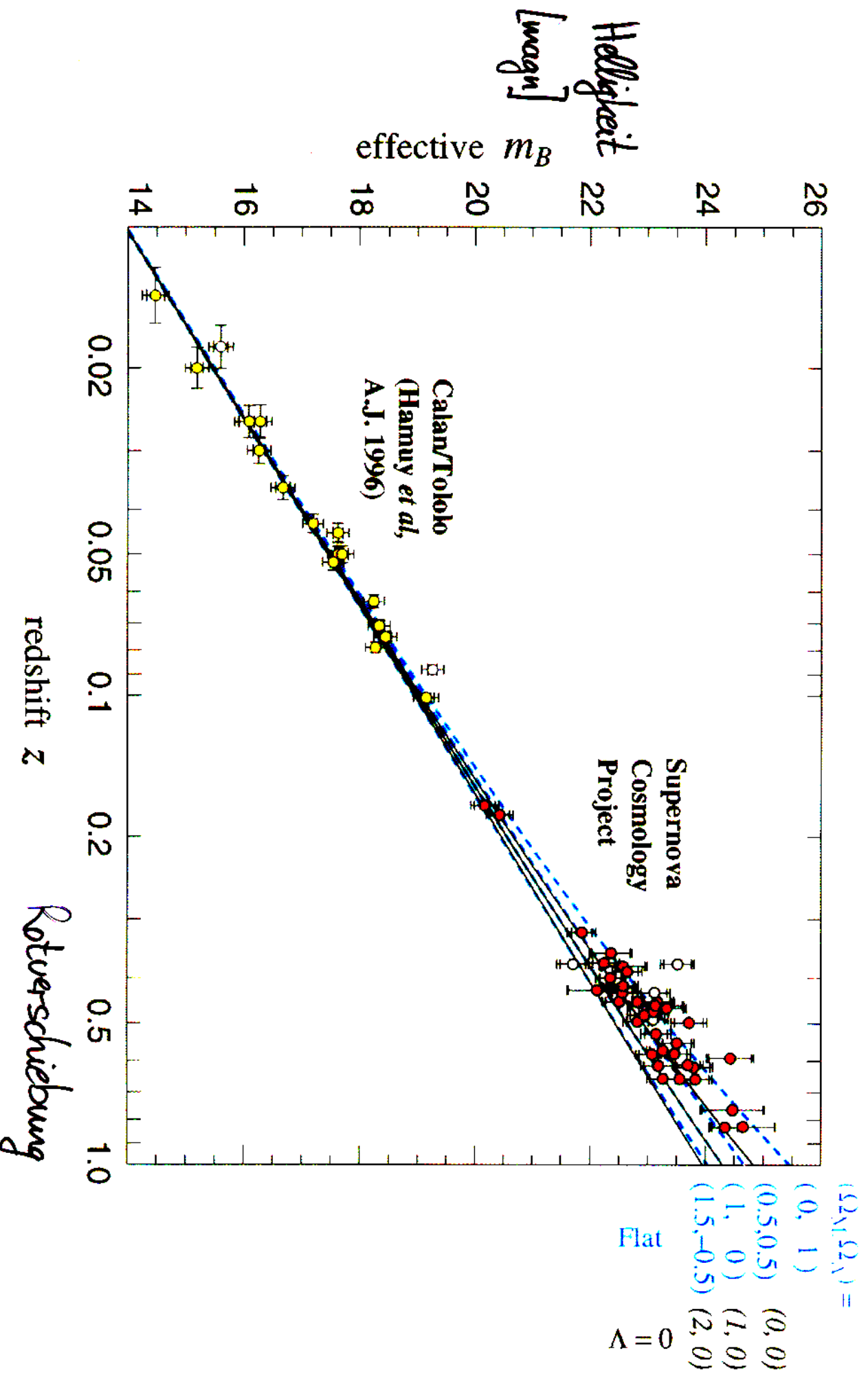


Average light curve of 11 "fast" SN-Ia (see Table 4)



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

# Supernovae Type Ia





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

●  $\Omega_K$ : Krümmung des Raumes

▷ Meßbar aus: Anisotropie der Hintergrundstrahlung

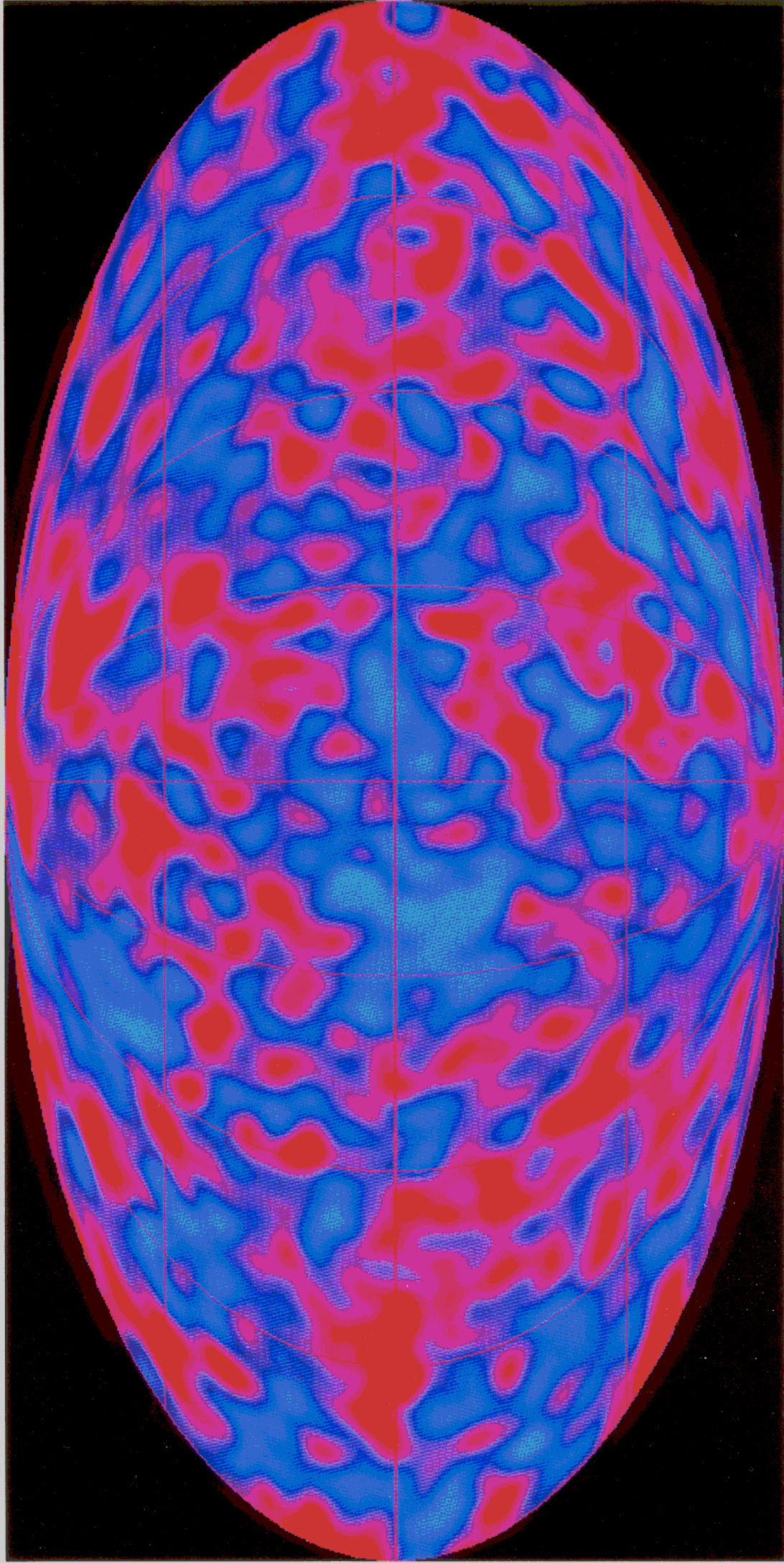
▷ Winkelabstand  $\Theta$  zw. Anisotropien

≅ Längenmaßstab bei Entkopplung von  
Materie  $\leftrightarrow$  Strahlung

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

$\Omega_K \geq 0 \rightarrow \Theta$  erscheint kleiner/größer

# COBE - Satellit: Anisotropie der Hintergrundstrahlung

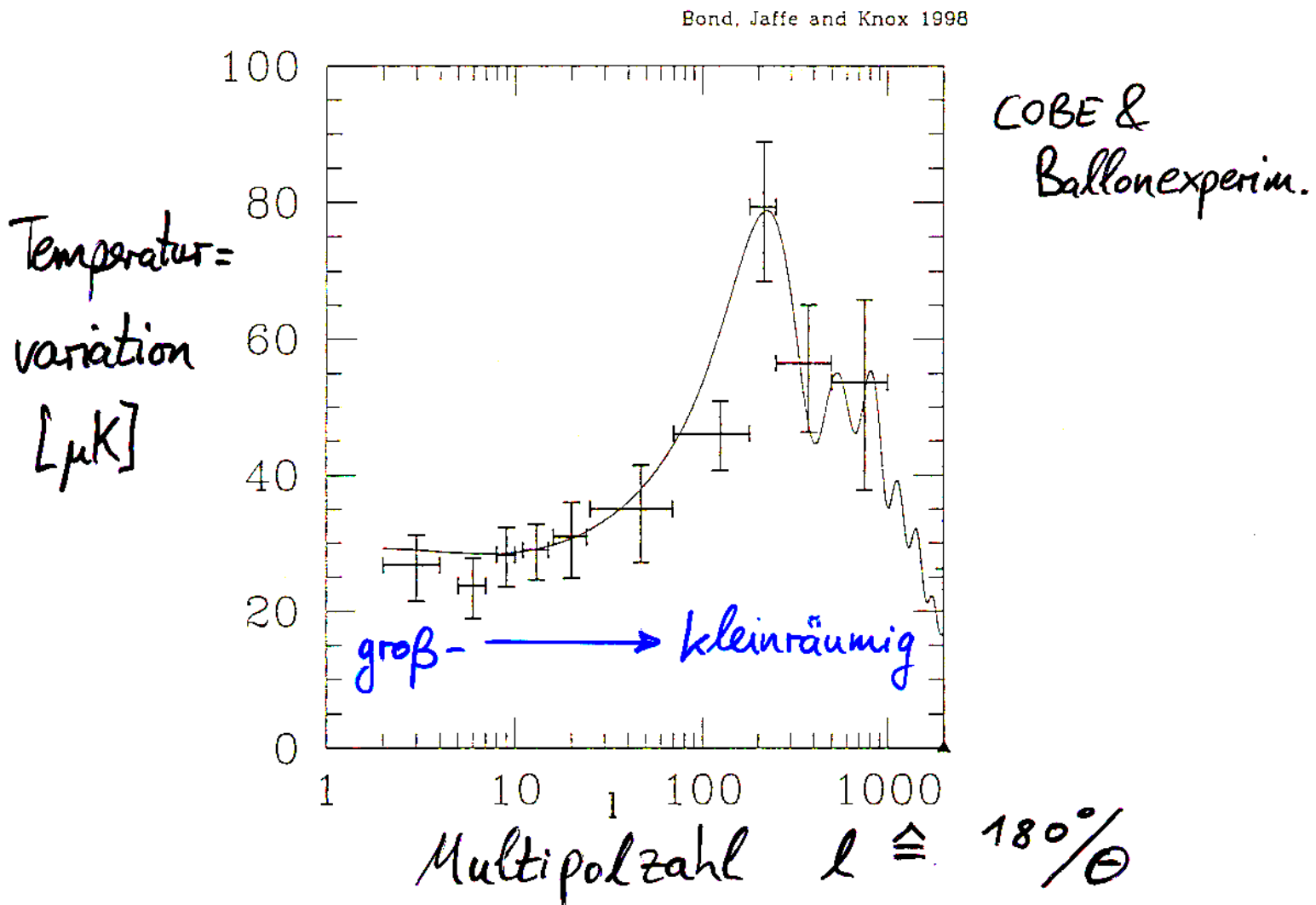


■  $\cong -30\mu\text{K}$

■  $\cong +30\mu\text{K}$

# ... Anisotropie der Hintergrundstrahlung

▷ Messung: (Entwicklung nach Multipolen)



▷ Kurve: Modellrechnung mit

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

# Zusammenfassung

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

⇒ Das kosmologische Dreieck:

