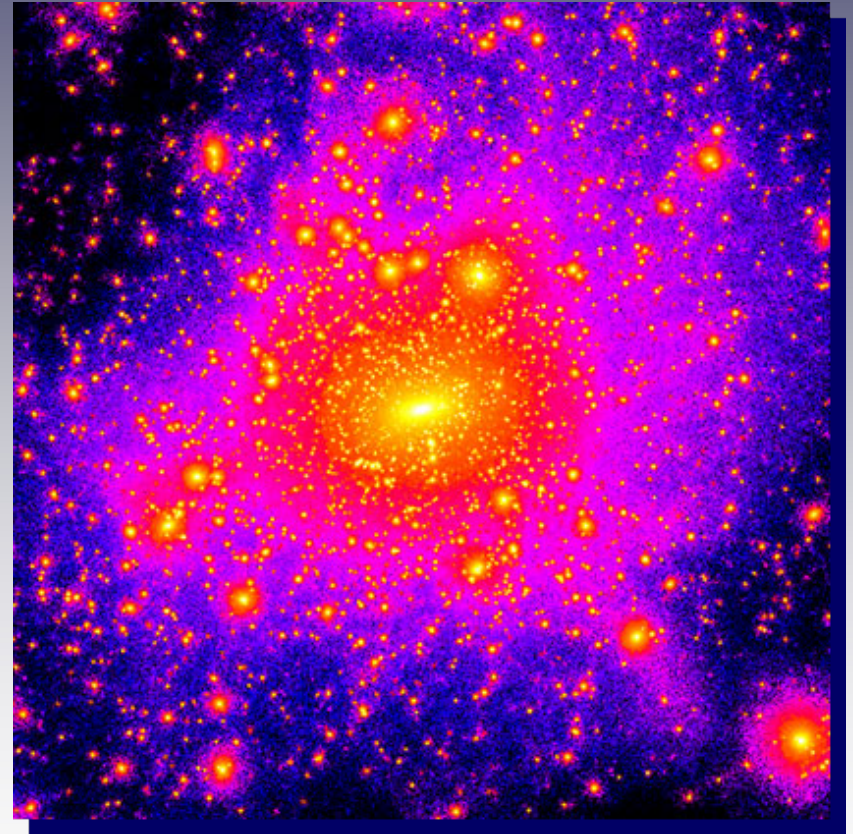
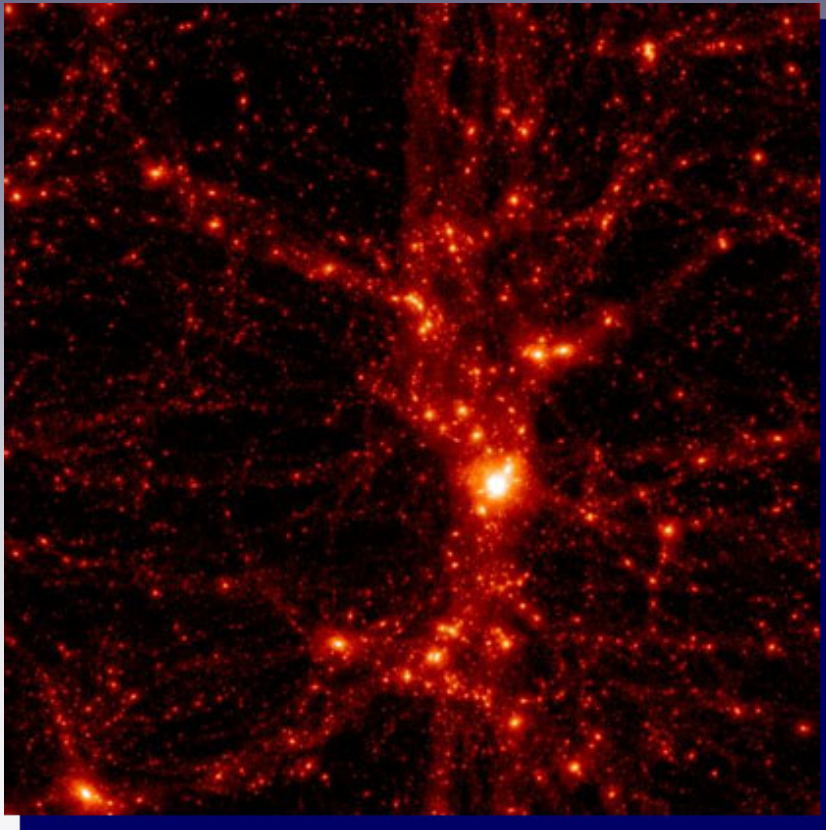


Kosmologische Evidenz für Dunkle Materie



AIP

Matthias Steinmetz (AIP)

Überblick

- **Klassische astronomische Evidenz für dunkle Materie und dunkle Energie**
 - ◆ Rotationskurven
 - ◆ Galaxienhaufen
 - ◆ Großskalige Strömungen
- **Evidenz via kosmische Hintergrundstrahlung**
- **Probleme des Modells**
 - ◆ Rotationskurven
 - ◆ Kleinskalige Strukturen



AIP

DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

Oct 4th 2004

Klassische astronomische Evidenz für dunkle Materie und dunkle Energie

Friedmann-Gleichung

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

oder mit $\Omega_X = \frac{\text{Dichte in } X}{\text{krit. Dichte}} \quad (t=t_0)$

$$= H_0^2 \left(\Omega_r a^{-4} + \Omega a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda \right)$$

relativistic
matter

non-relativistic
matter

curvature

cosmological
constant

$$\Rightarrow \Omega_r + \Omega + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$$

Eine kosmische Inventur

■ Summe der leuchtenden Materie

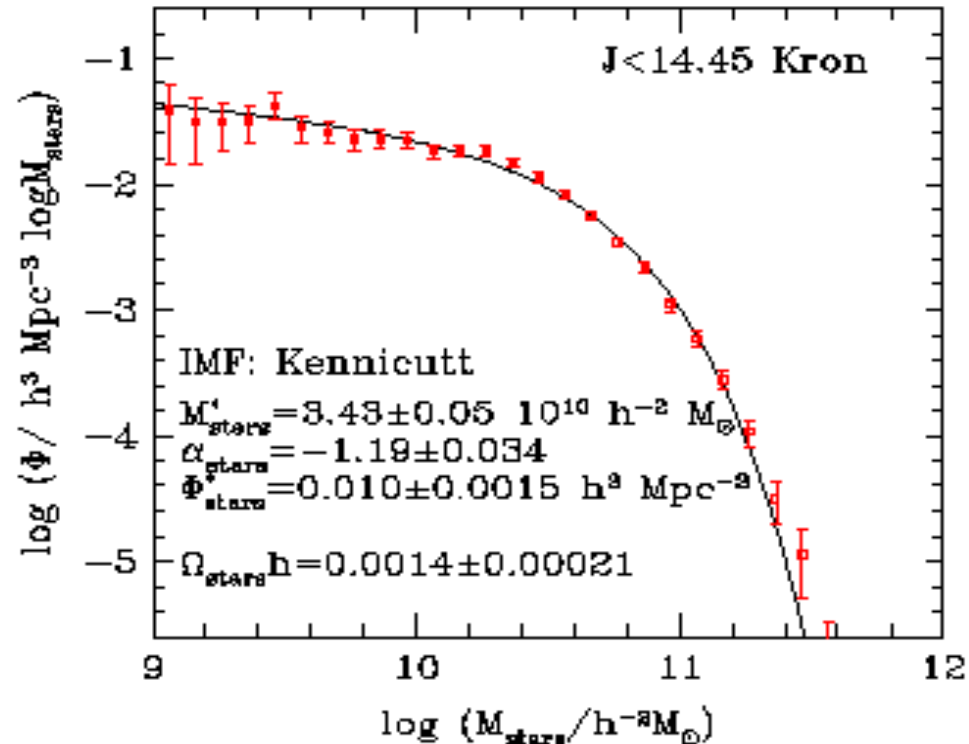
◆ $\Omega_s = 0.23\%$

■ Standard-Thermodynamik ($T_{CMB}=2.728$ K)

◆ Strahlung: $\Omega_r = 0.0047\%$

◆ Masselose Neutrinos: $\Omega_\nu = 0.003\%$

◆ Massereiche Neutrinos: $\Omega_\nu < 1\%$

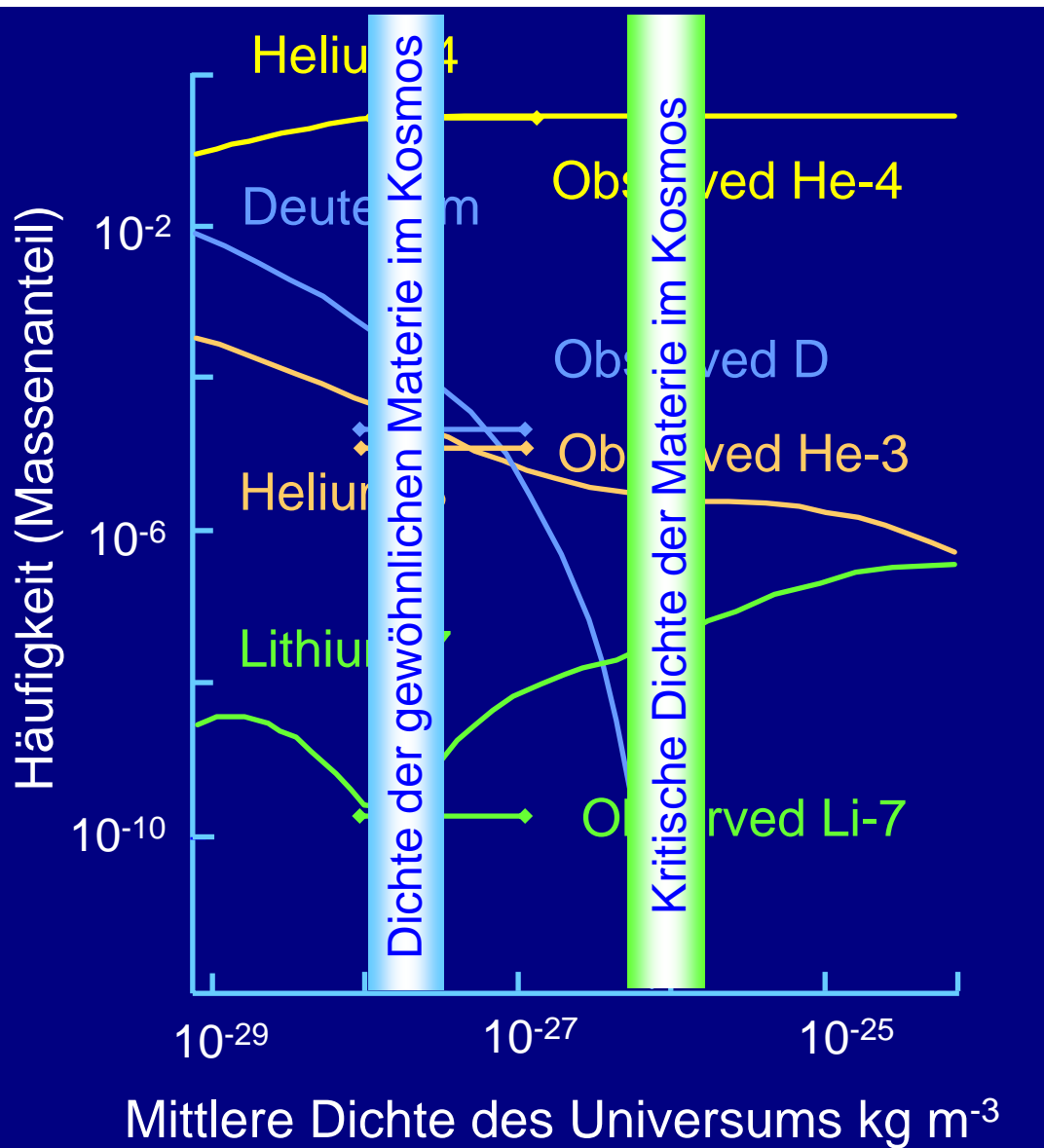


Die Entstehung der leichten Elemente



DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

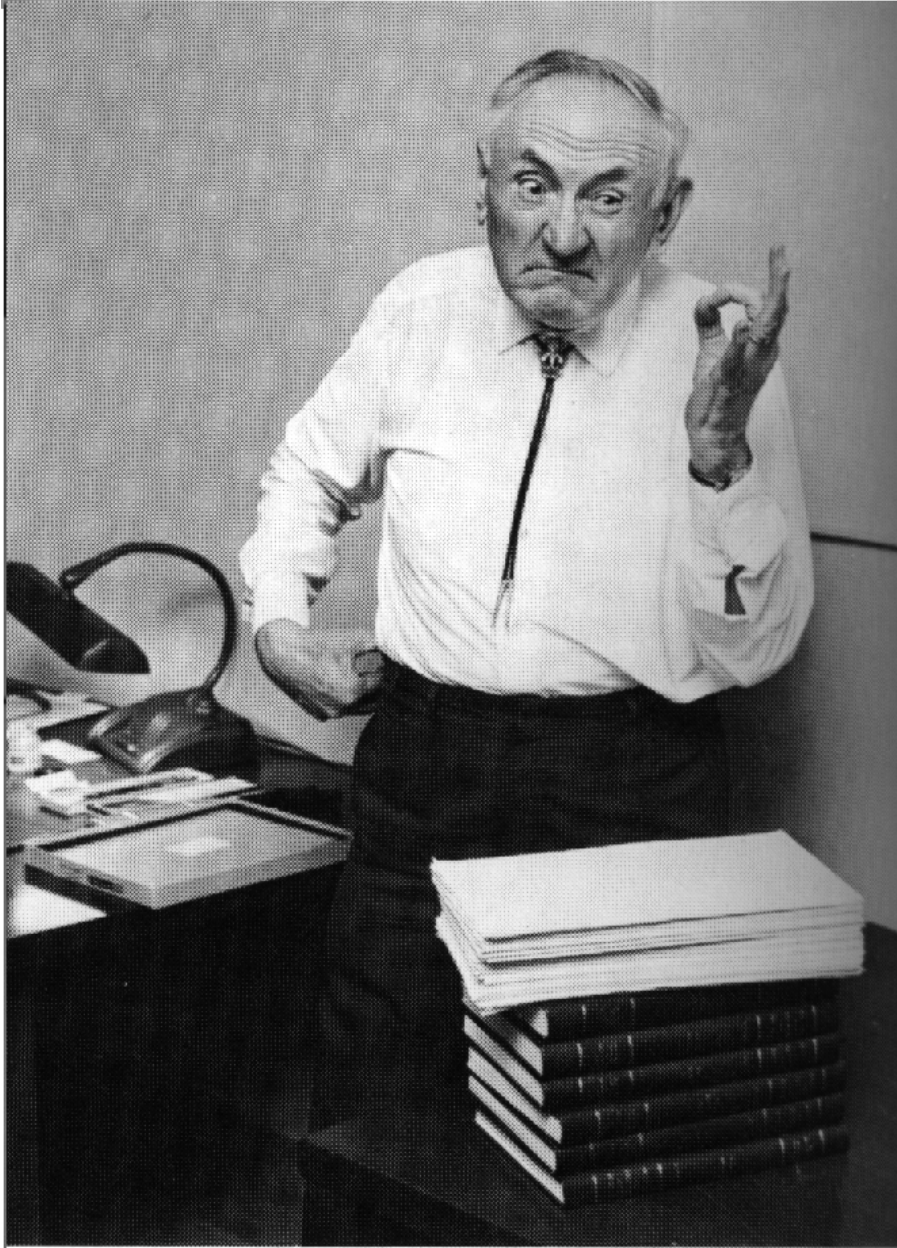
Oct 4th 2004



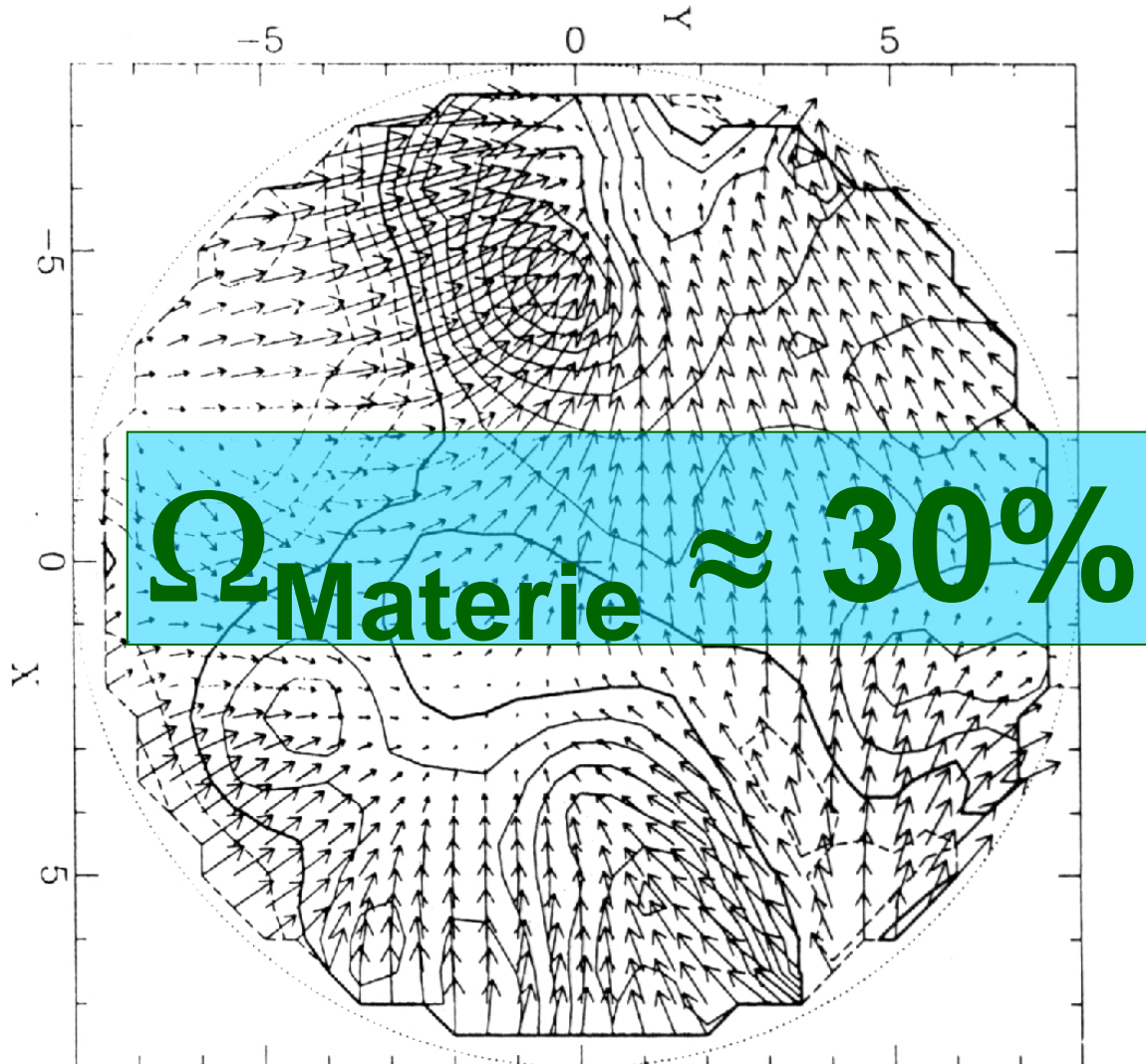
$$\Omega_b = 0.045 \pm 0.004$$

- Das Universum besteht zu 95% nicht aus baryonischer Materie
- 95% der baryonischen Materie sind nicht beobachtet !

Fritz Zwicky (1898-1974)

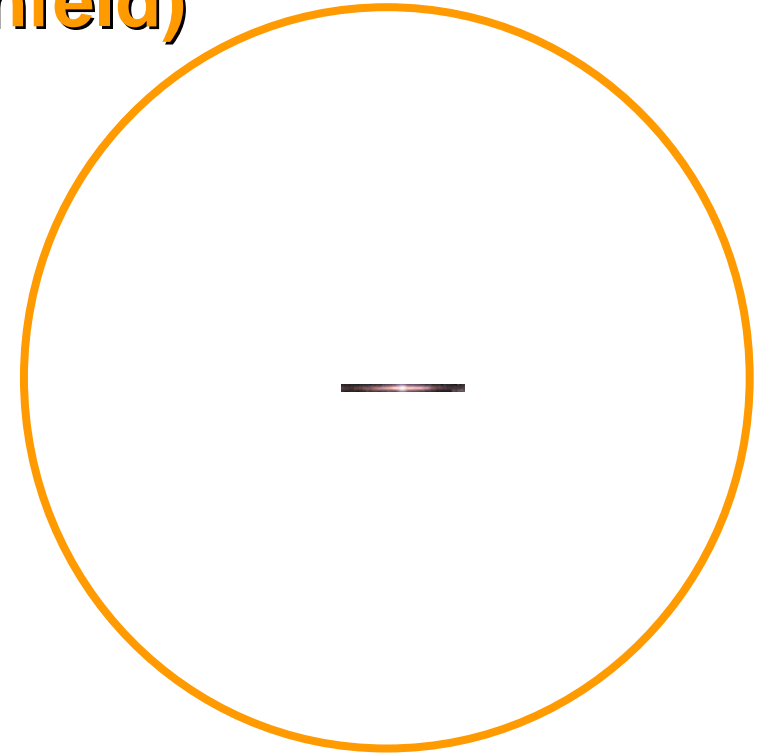


Indirekt messbare Masse



Dunkle Materie vs alternative Gravitationstheorien

Potential (Fernfeld)

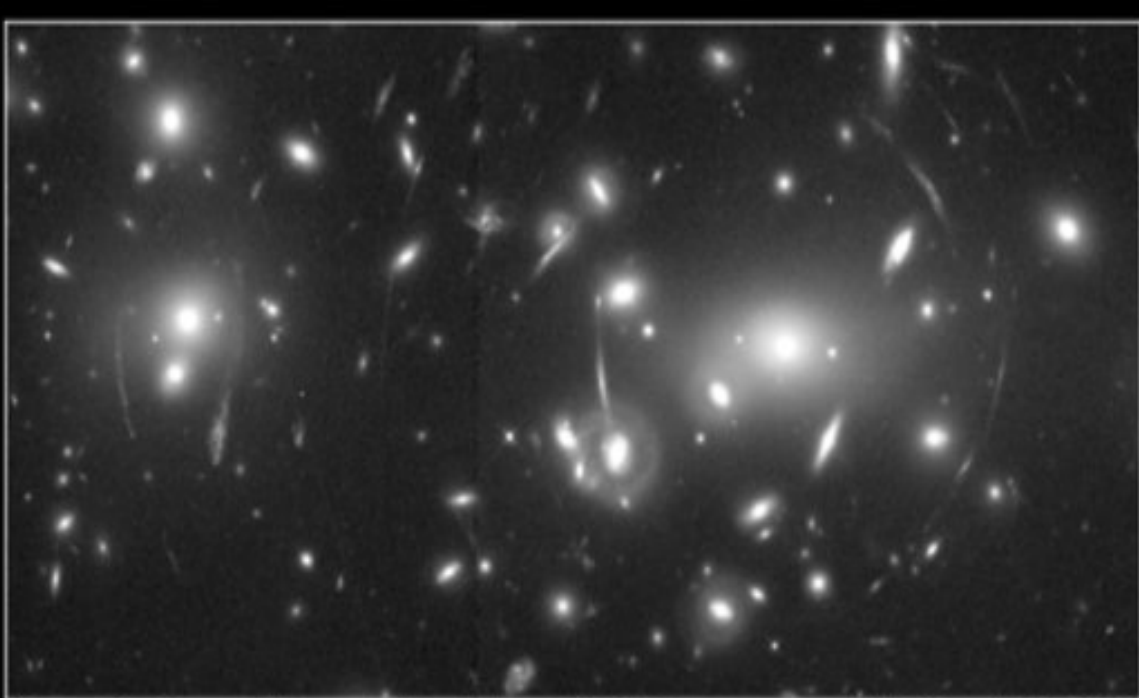


Dunkle Materie

Alternative Gravitationstheorie

Dunkle Materie vs alternative Gravitationstheorien

$$\langle e_{Halo} \rangle = f \langle e_{shear} \rangle$$



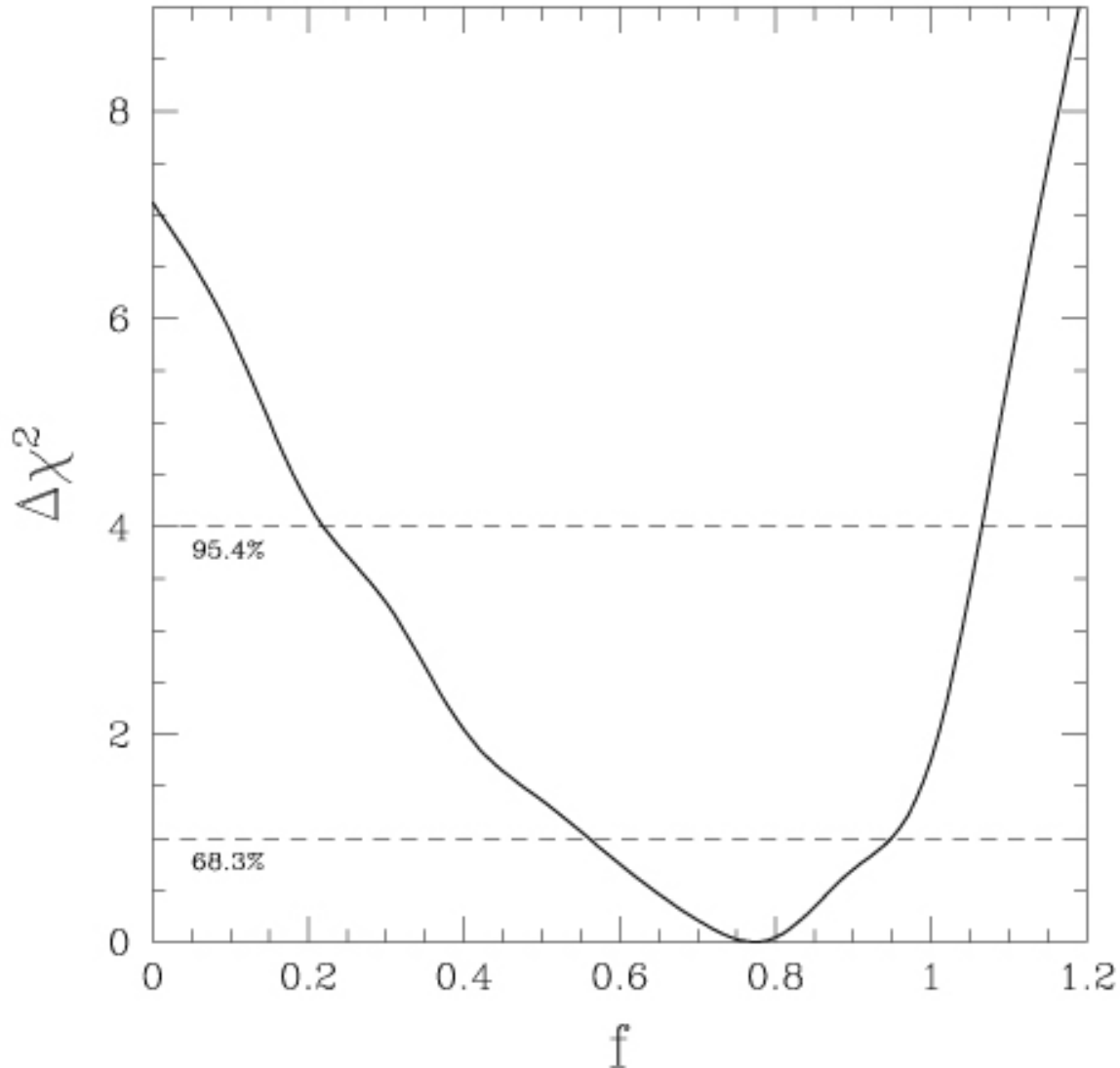
Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

Hoekstra et al 2004

Dunkle Materie vs alternative Gravitationstheorien

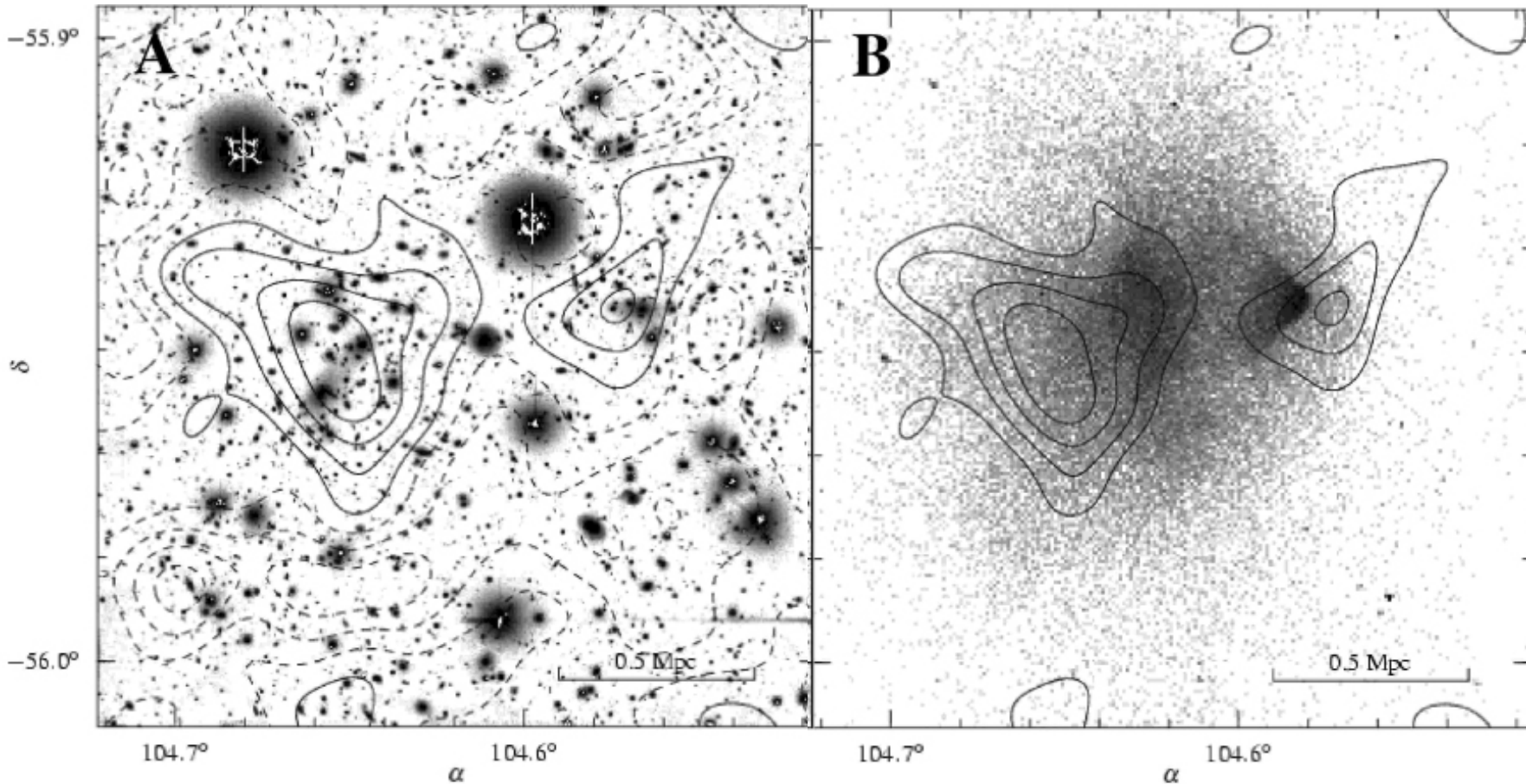


$$\langle e_{Halo} \rangle \approx 0.33$$

- Konsistent mit CDM
- ⚡ Wechselwirkende DM
- ⚡ Modified Newtonian Dynamics (?)

Hoekstra et al 2004

Dunkle Materie vs alternative Gravitationstheorien



optisch

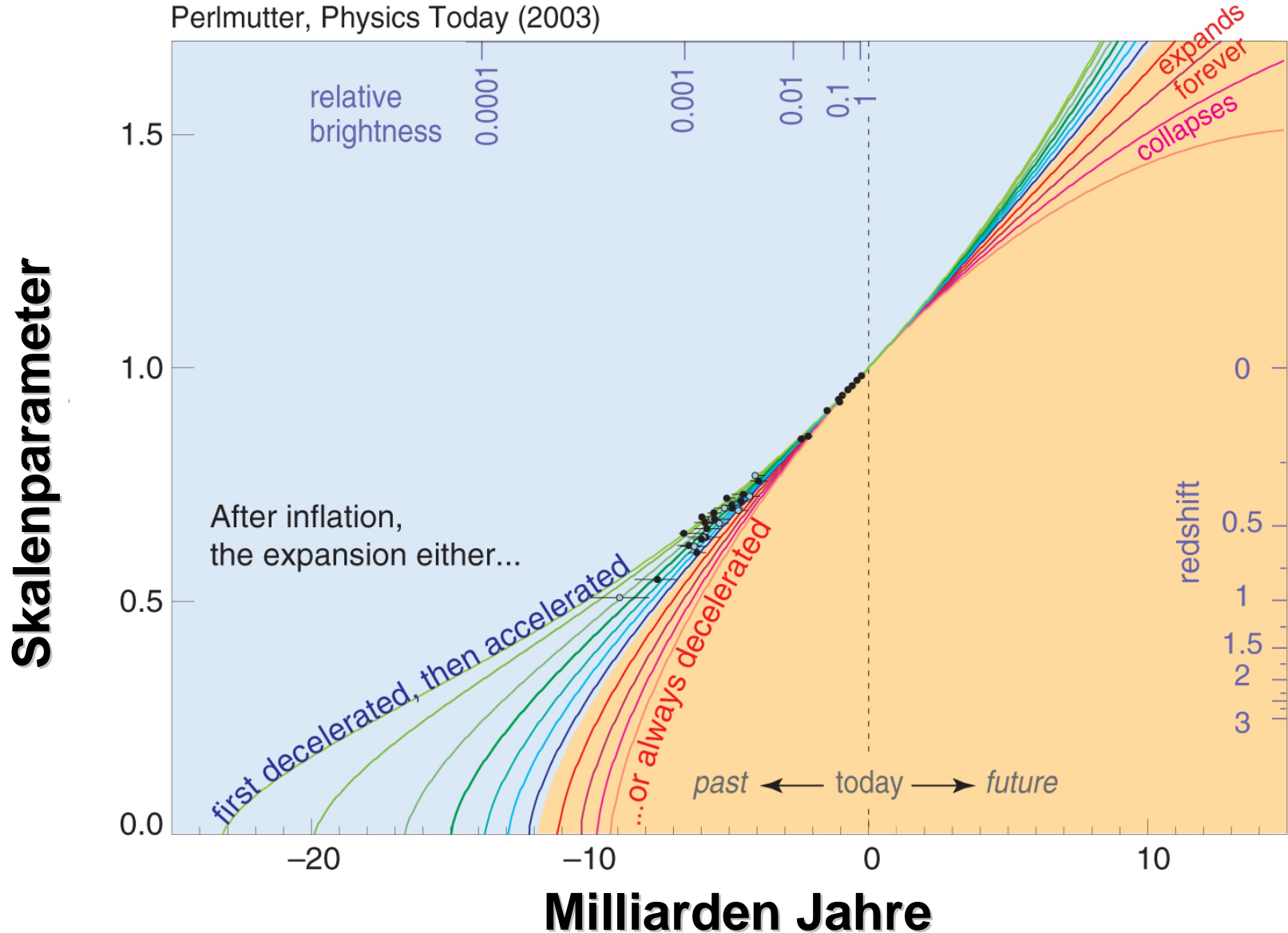
Röntgen

“bullet cluster” 1E0657-558

Clowe et al 2004

Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich

Perlmutter, Physics Today (2003)



Skalenparameter

Milliarden Jahre

After inflation,
the expansion either...

first decelerated, then accelerated

...or always decelerated

expands forever

collapses

past ← today → future

redshift

0
0.5
1
1.5
2
3

1.5
1.0
0.5
0.0

-20 -10 0 10



“Concordance model”

- $\Omega = 0.3$
(Schwerkraft)
- $\Omega_b = 0.05$
(Nukleosynthese)
- $\Omega_\Lambda = 0.7$
(beschleunigte Expansion)
- $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$
(heutige Expansion)



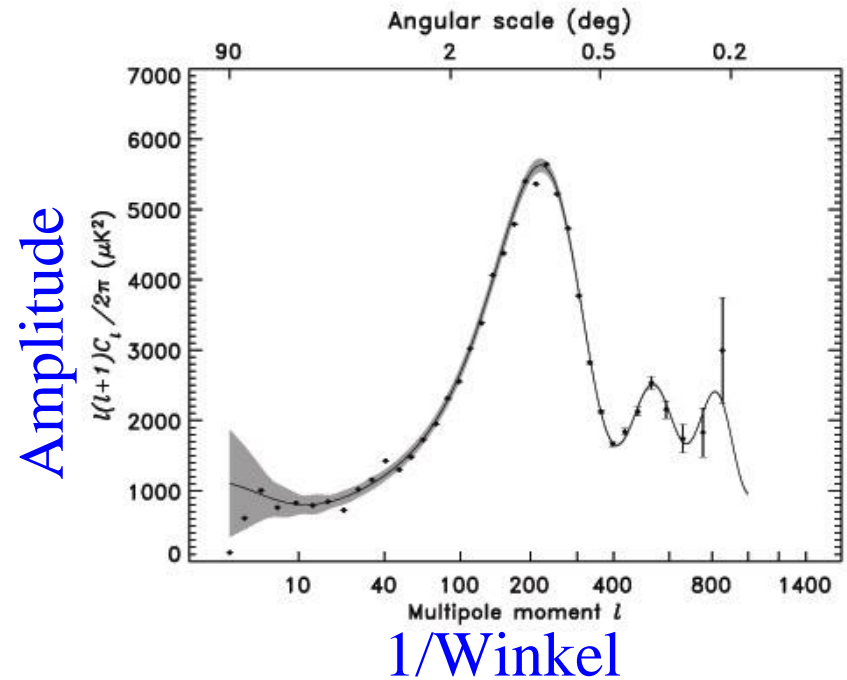
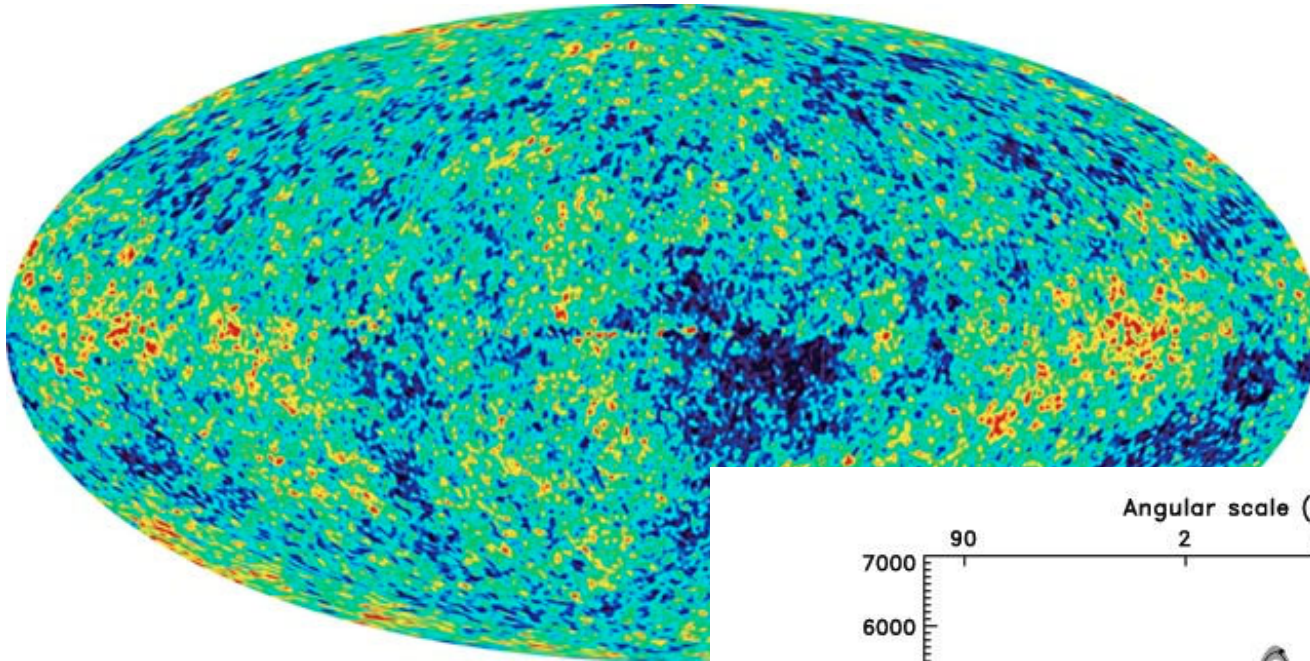
AIP

DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

Oct 4th 2004

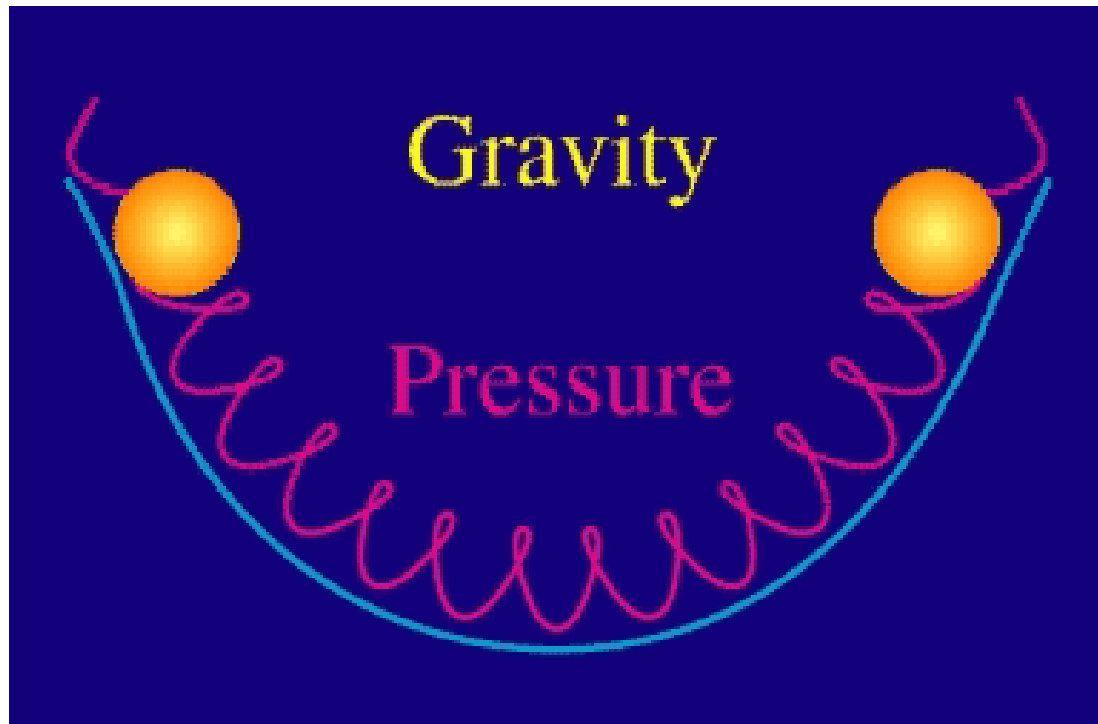
Evidenz via kosmische Hintergrundstrahlung

Eine erneute kosmische Inventur



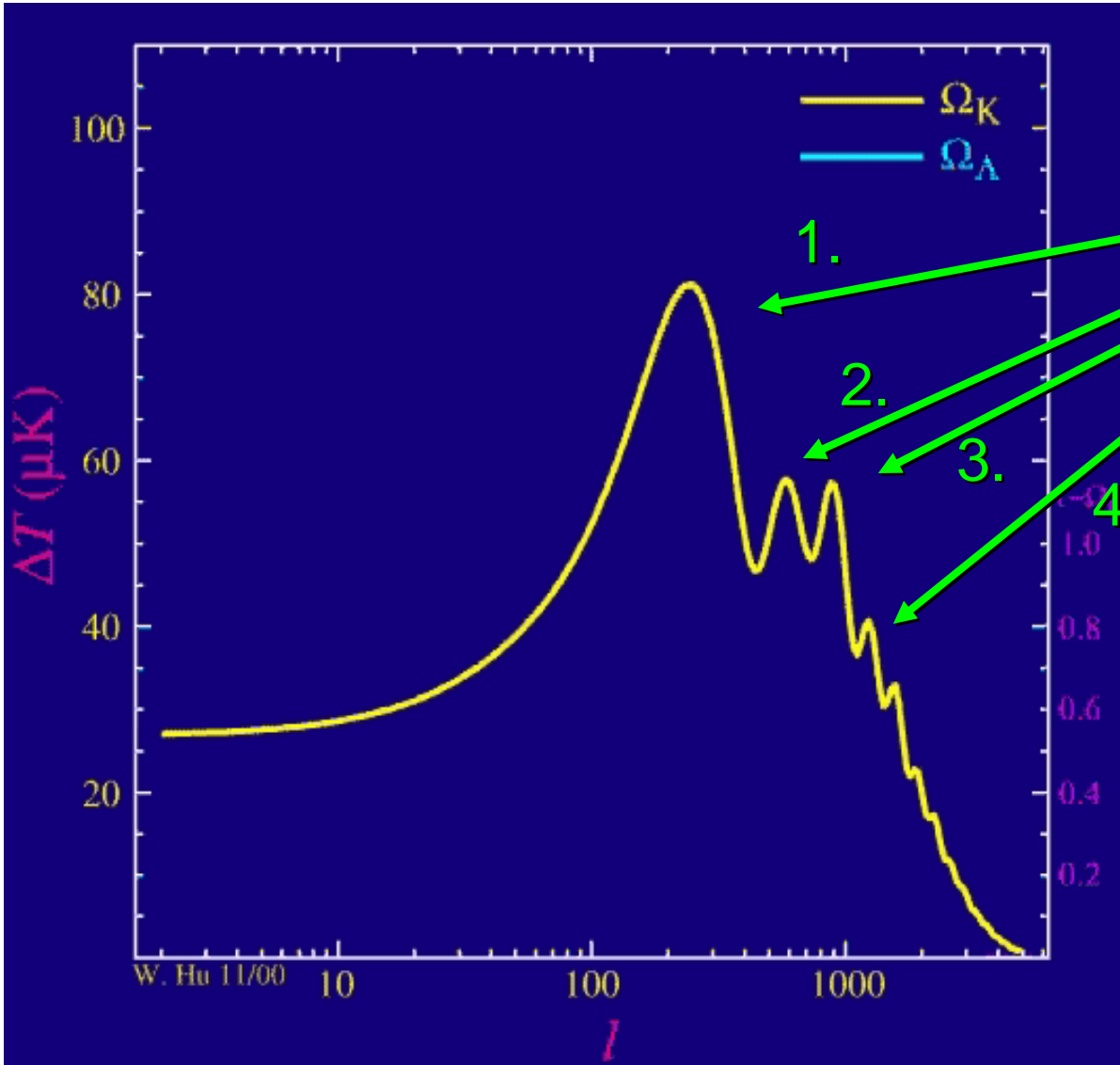
Eine erneute kosmische Inventur

- Wettkampf zwischen Schwerkraft (anziehend) und Druck (abstoßend)
⇒ Schwingungen



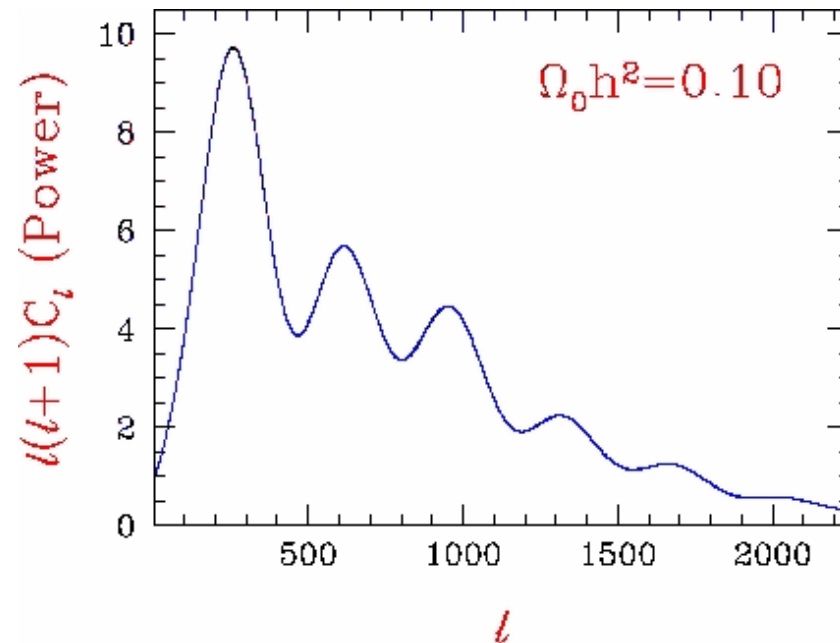
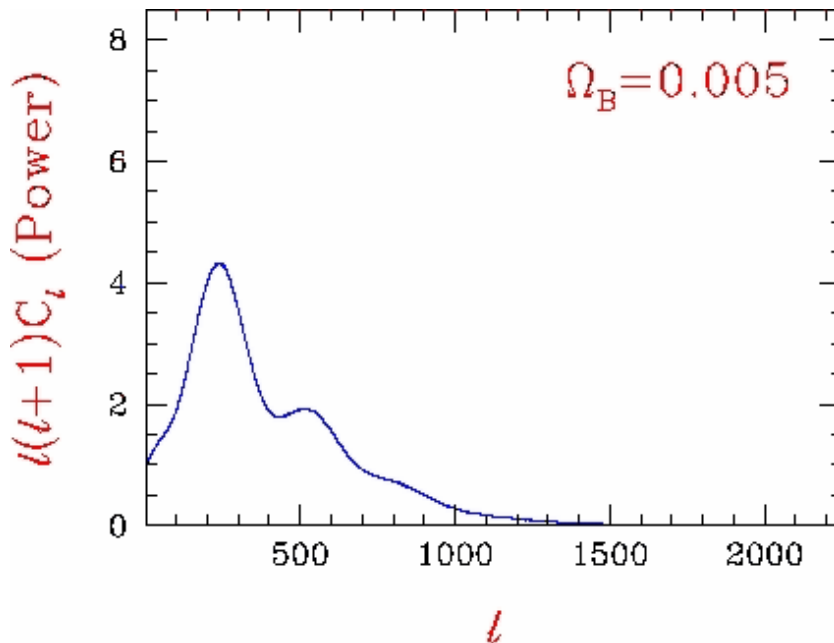
- “Klangfarbe des Universums”

Eine erneute kosmische Inventur



Akustische
Schwingungen
Harmo-
nische

Eine erneute kosmische Inventur



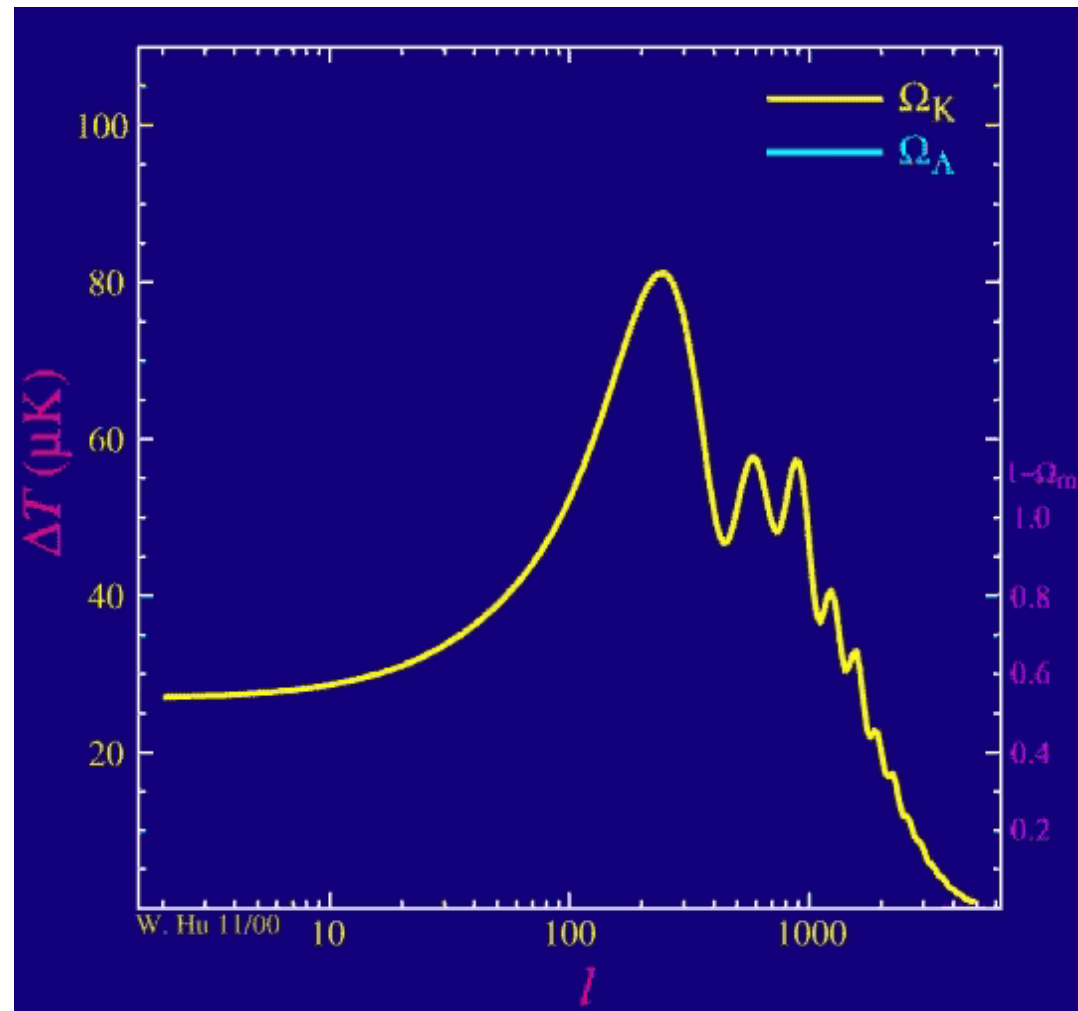
$$\overset{\Omega_b}{\updownarrow} \Omega / \Omega_b \approx 5-6 \overset{\Omega}{\updownarrow}$$

Masse auf
der Feder

Potentialtiefe

Eine erneute kosmische Inventur

- Schallwellen
⇒ Resonatoren
- Tiefster Ton:
Resonanz in der
Fundamental-
mode
- Wellenlänge:
Schalllaufstrecke
über das Alter
des Universums
(@ $z=1100$)
⇒ Zollstock



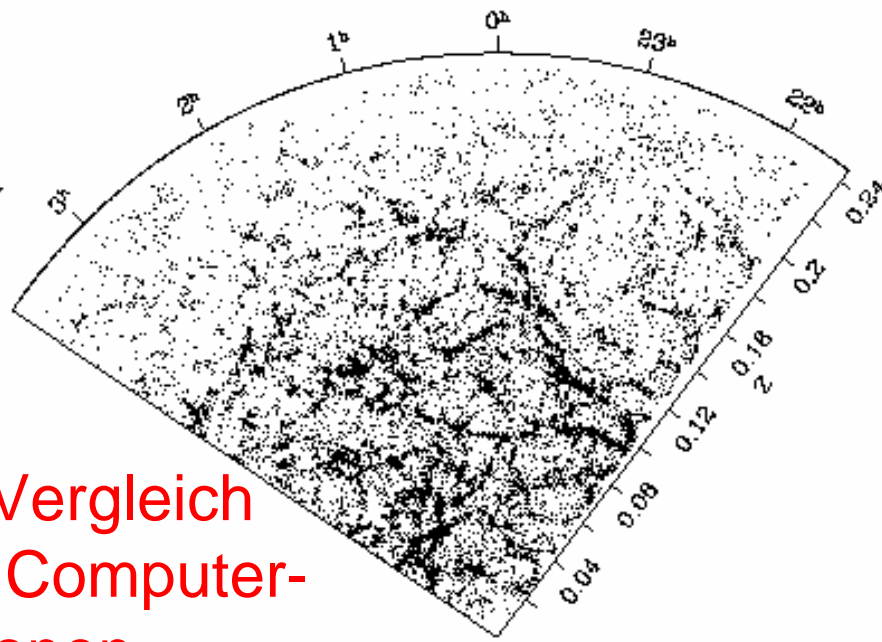
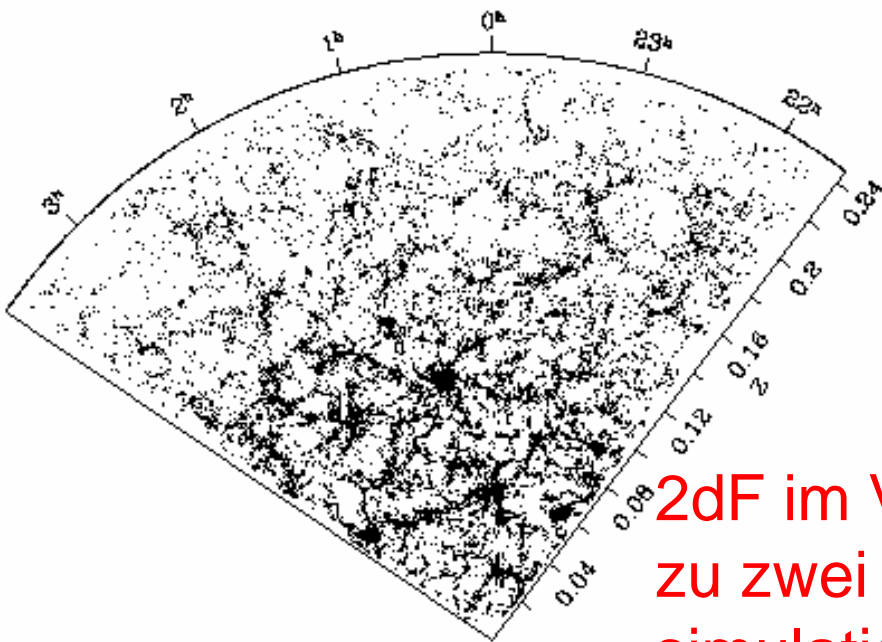


AIP

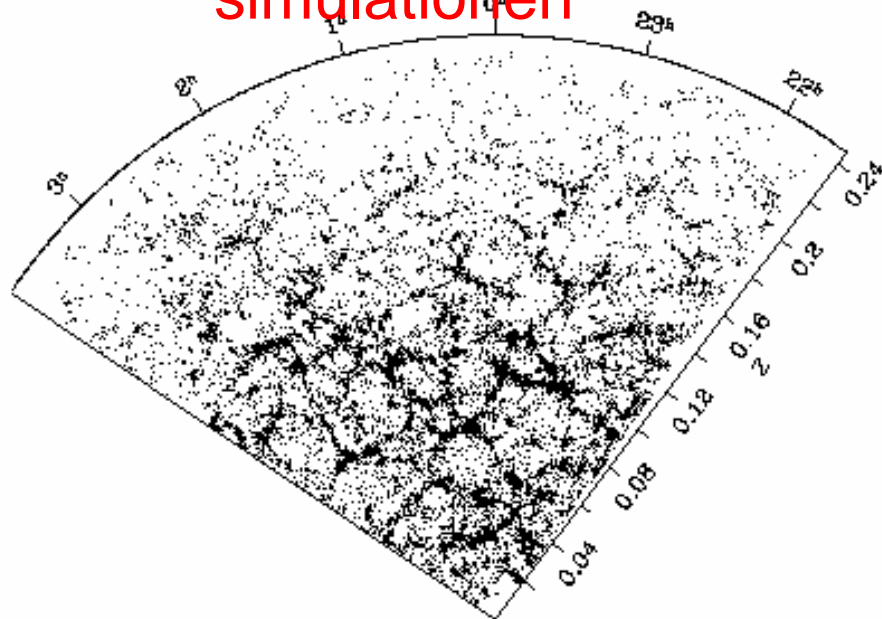
DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

Oct 4th 2004

Probleme des Modells

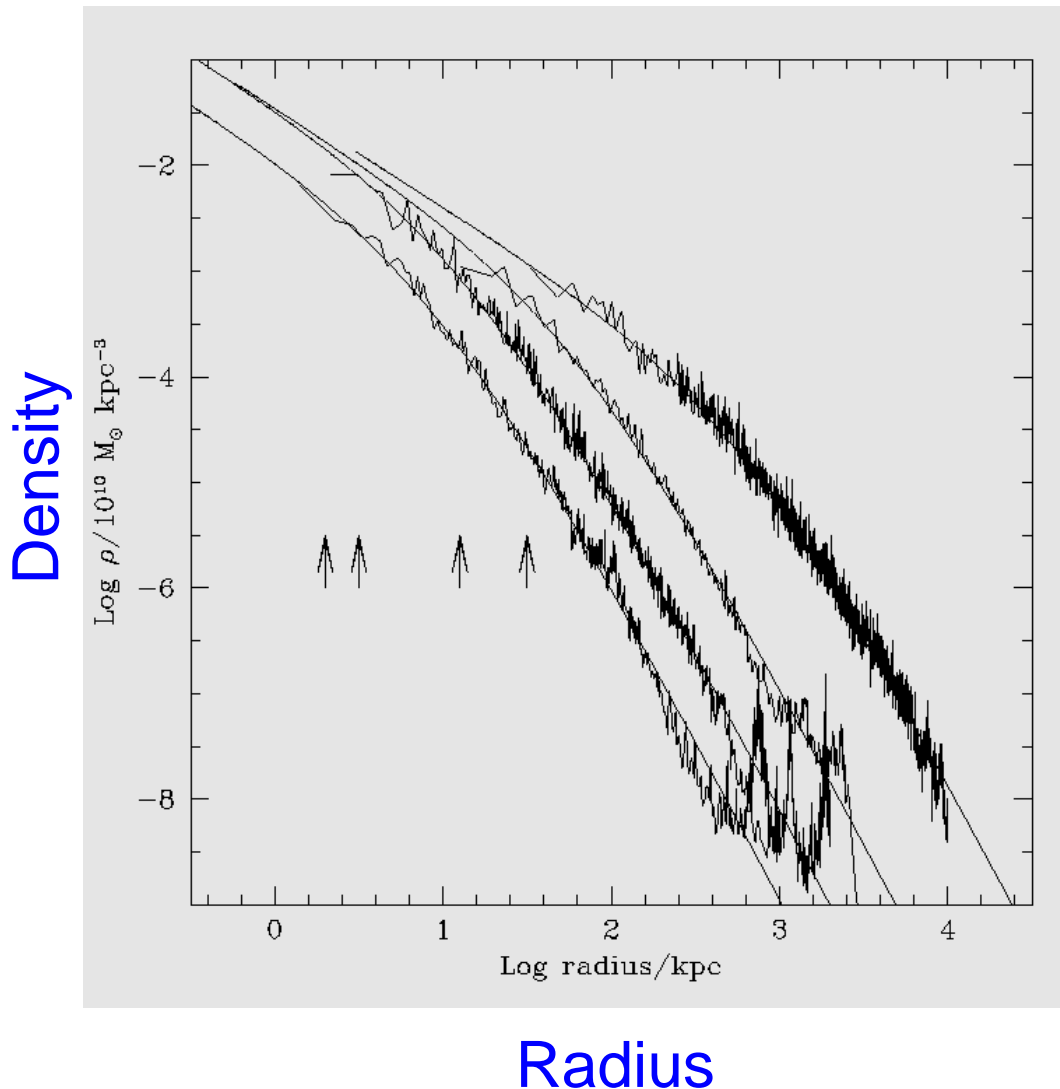


2dF im Vergleich
zu zwei Computer-
simulationen



Frenk al 2003

Dichteprofile von Cold Dark Matter Halos



- Das Massenprofil eines dunklen Halos ist unabhängig von der Halomasse und von den kosmologischen Parametern

$$\frac{\rho(r)}{\rho_{crit}} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

Navarro, Frenk &
White 1997

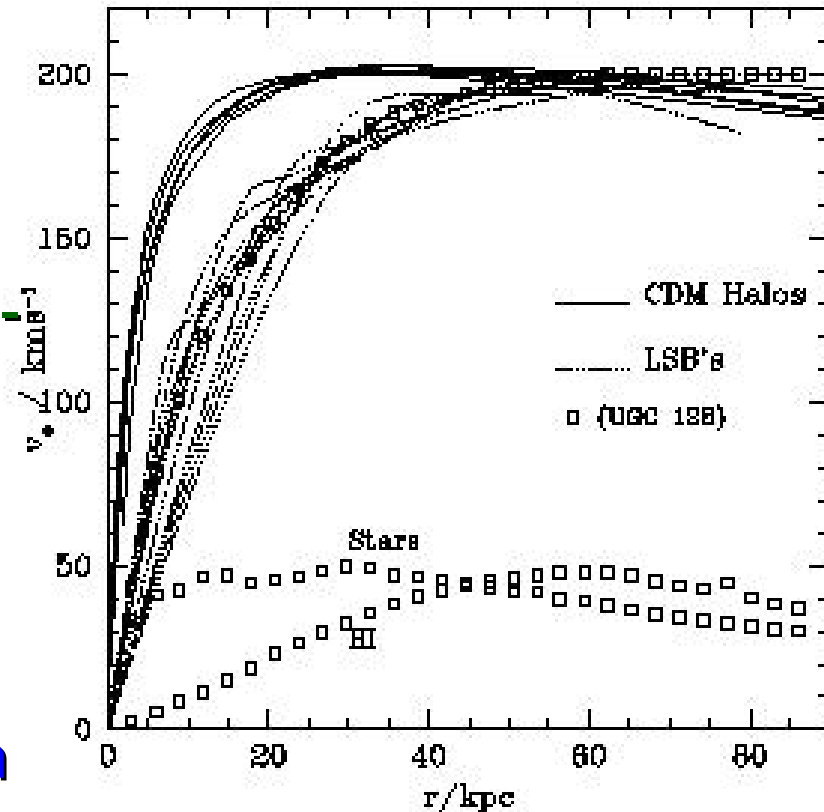
LSB-Rotationskurven vs CDM Halos

■ Vorsicht ...

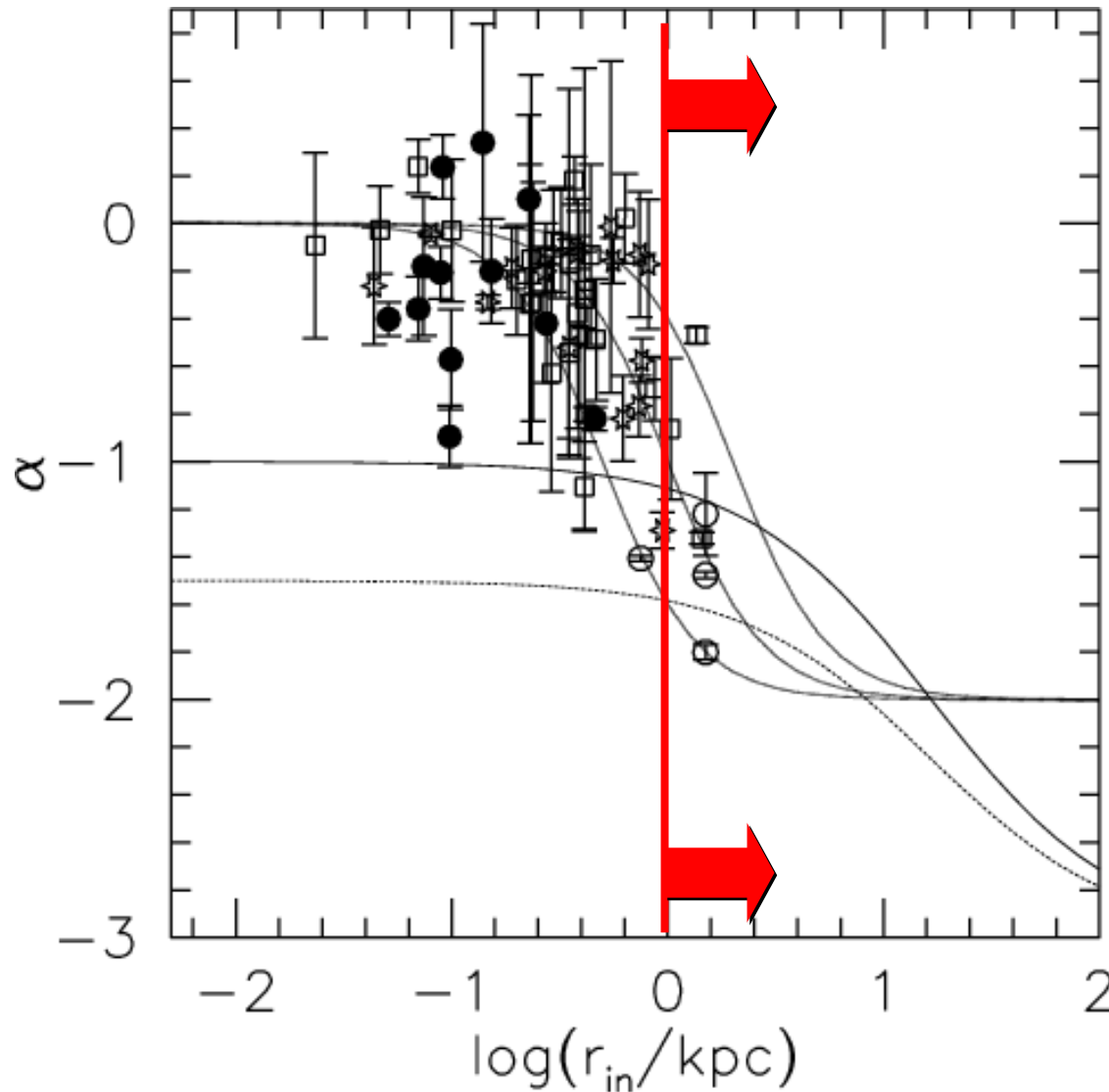
◆ Strikt gesprochen besteht die Diskrepanz zwischen der Rotationsgeschwindigkeit des Gases und der Zirkulargeschwindigkeit des Halos.

◆ Beide können sich unterscheiden, da:

- Halo ist nicht sphärisch
- Geschwindigkeitsdispersion des Gases oder die Scheibendicke sind von Bedeutung
- Abweichungen vom Gleichgewicht.



Dichte-Profile der LSB-Halos

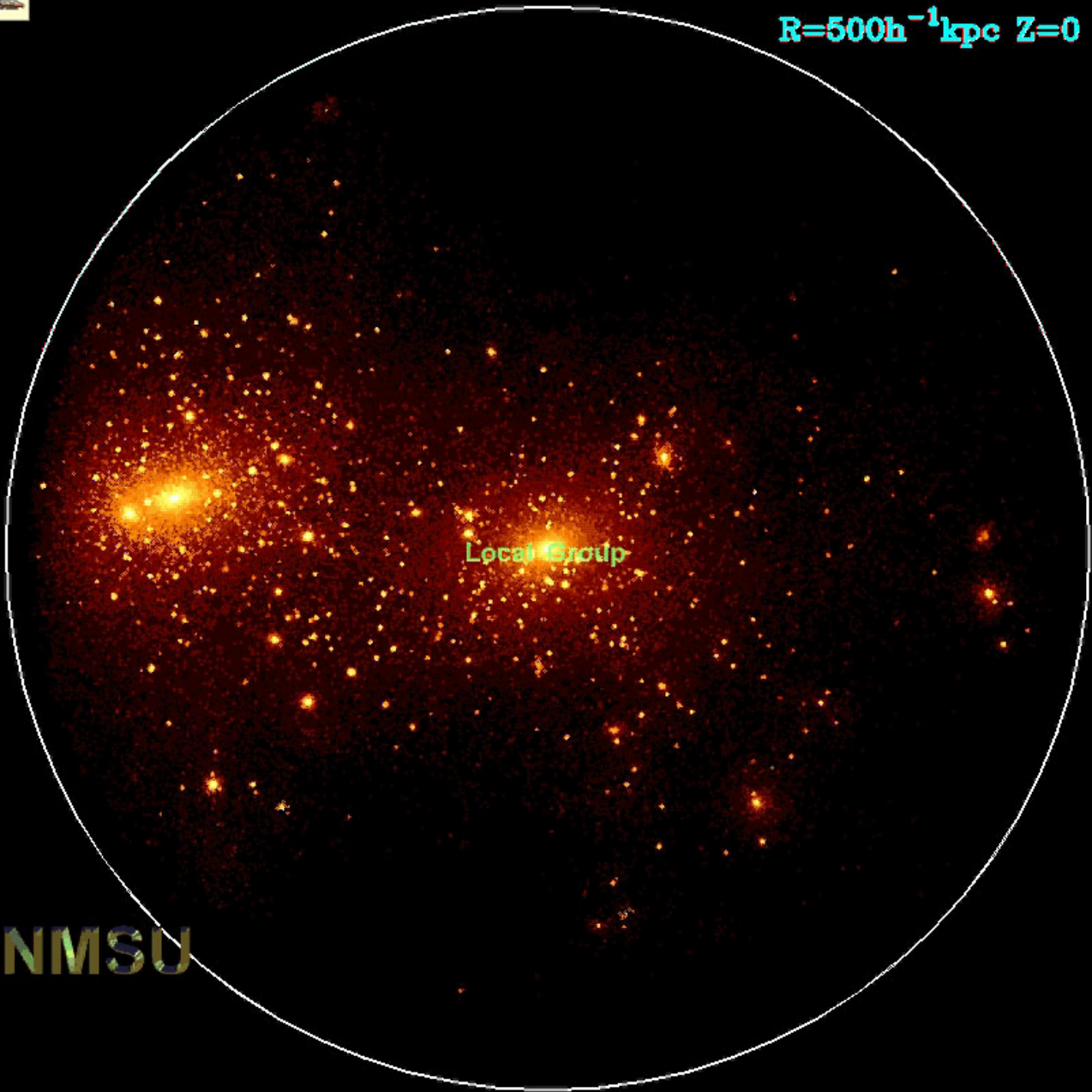


**LSBs haben
Cores
↔
CDM halos
???**

McGaugh et al. 2002



$R=500h^{-1}\text{kpc}$ $Z=0$



Local Group

NMSU

Klypin et al
2001





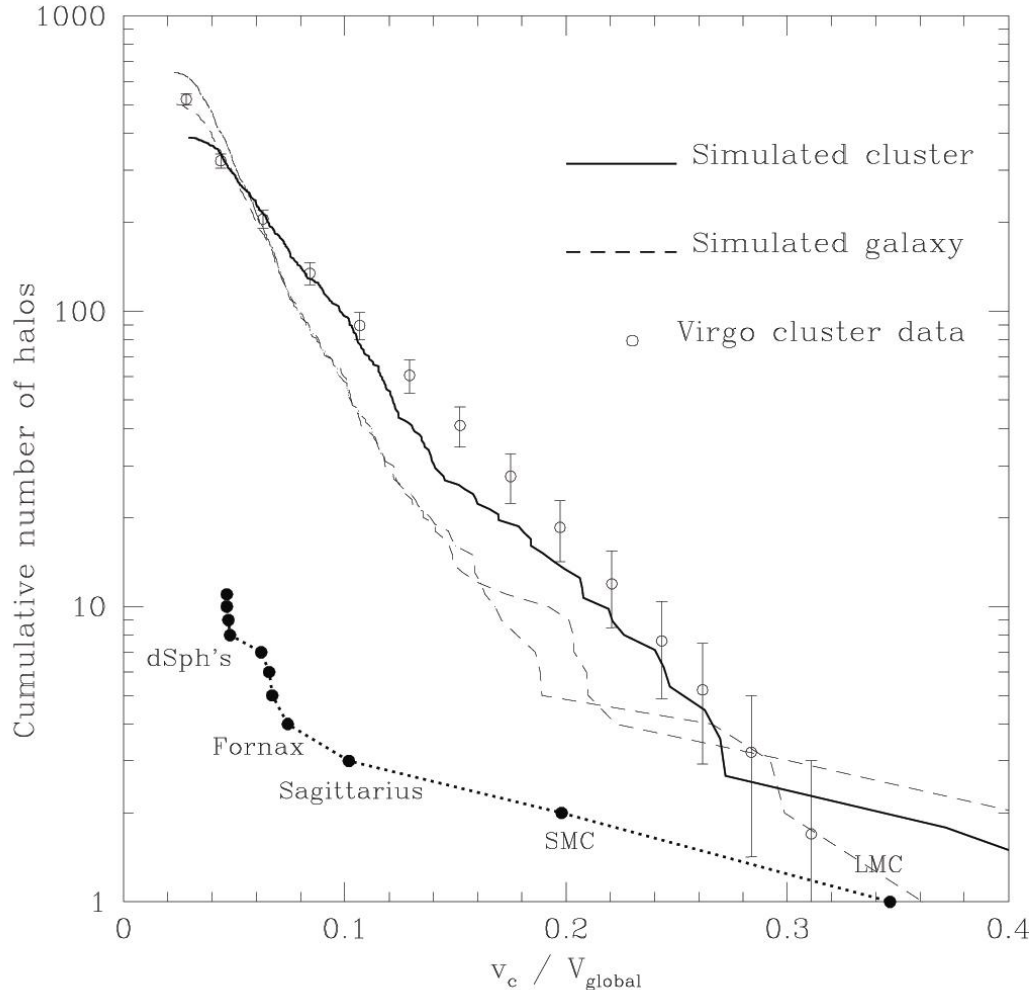
AIP

DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

Oct 4th 2004

Substructure and the abundance of Milky Way satellites

cumulative number



circular velocity

Moore et al 1999
Klypin et al 1999

Substruktur und die Häufigkeit von Satelliten der Milchstraße

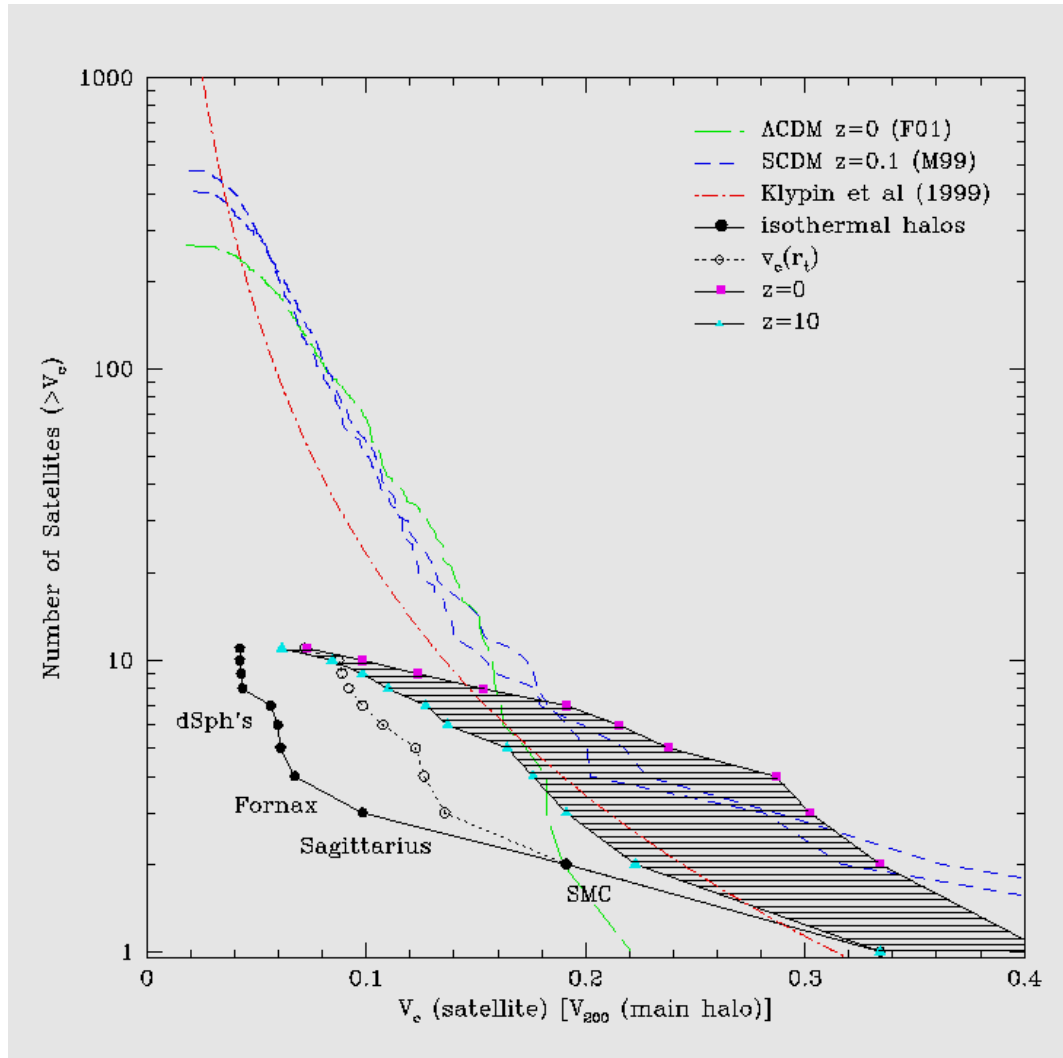


AIP

DESY Workshop 2005
Astro Particle Physics

Oct 4th 2004

cumulative number



circular velocity

Hayashi et al 2002



Substruktur und DM-Experimente

- Substruktur überlebt sehr lange im Phasenraum
 - ◆ „kalte Ströme“
 - ◆ nachweisbar im Geschwindigkeitsraum
 - ◆ MW halo in der Sonnenumgebung: Überlagerung von mehreren Hundert Strömen
- Helmi et al: in guter Approximation multivariate Gaussian
- Diemand et al: lumpy phase space

