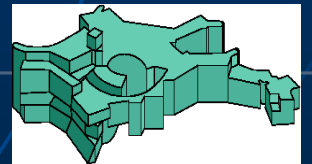


Supernovae und das beschleunigt expandierende Universum

Wolfgang Hillebrandt
MPI für Astrophysik
Garching



DLR ASTROSEMINAR
Köln 10z, 26. April 2005



Wie alles begann ...

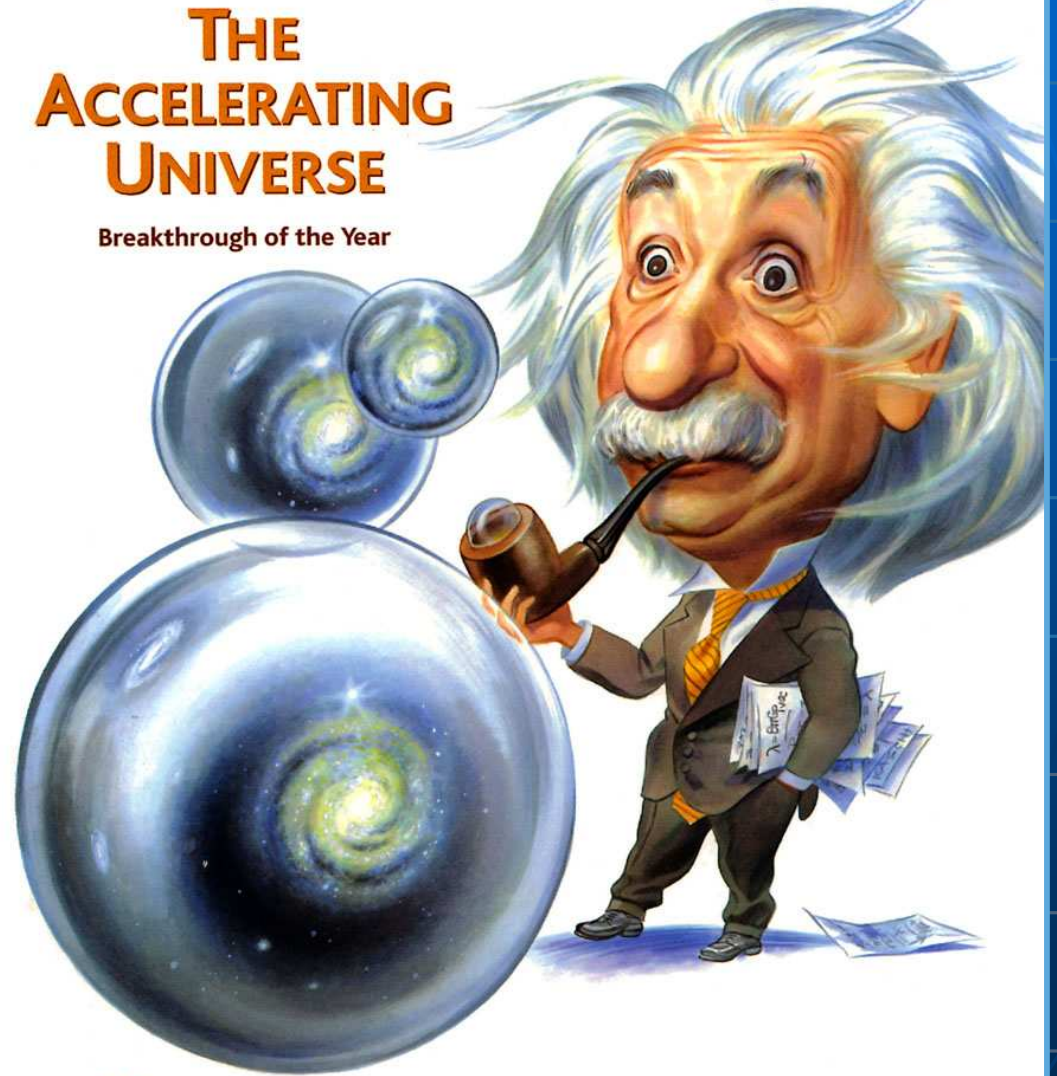
Science

18 December 1998

Vol. 282 No. 5397
Pages 2141-2336 \$7

THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year



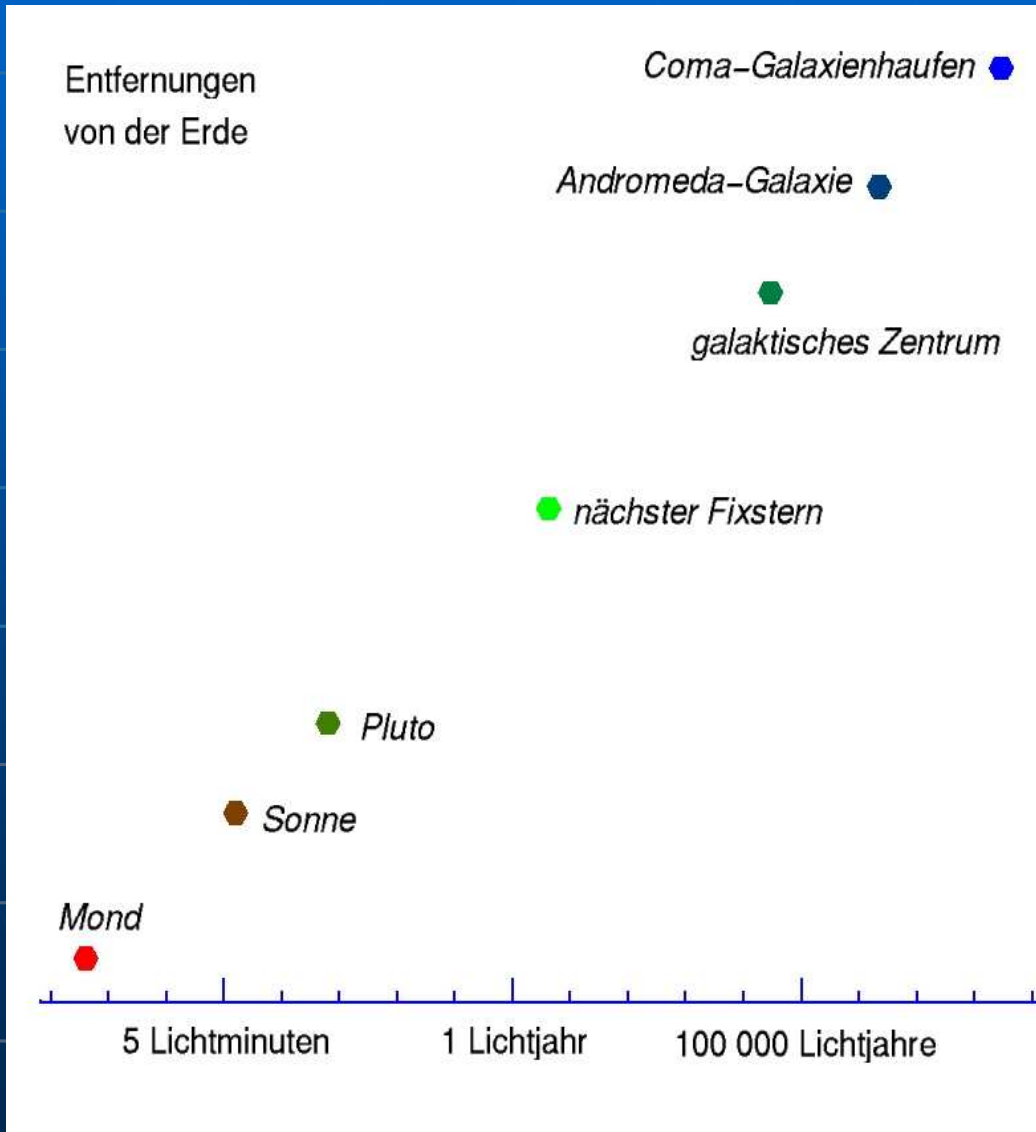
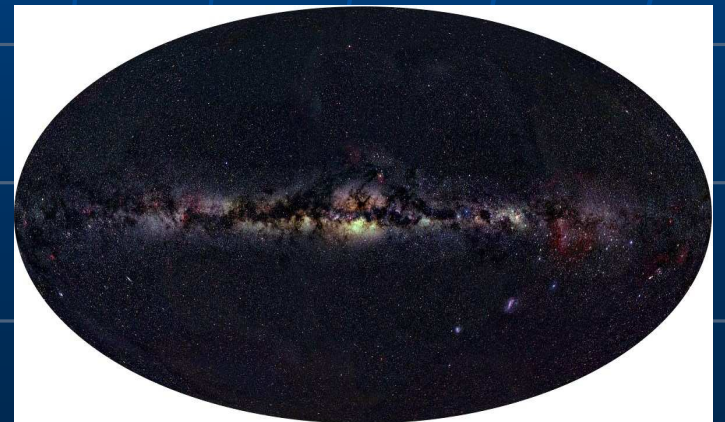
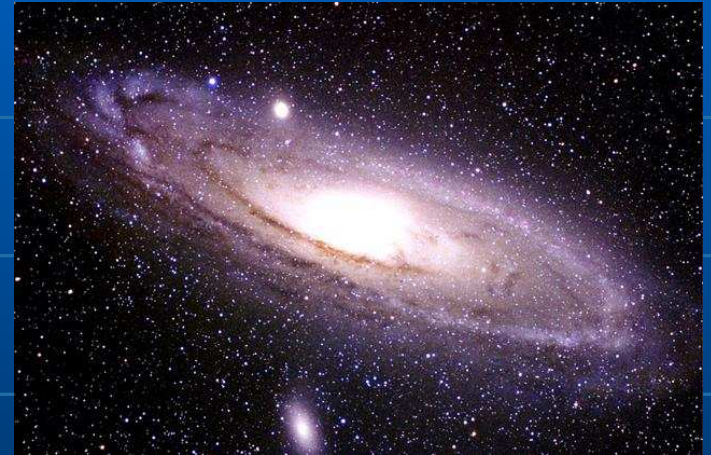
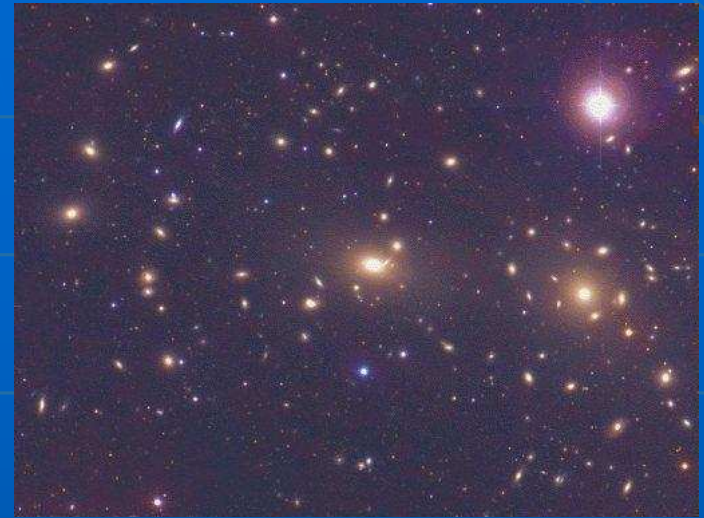
AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

- $\Lambda g_{\mu\nu}$???



Unsere kosmische Nachbarschaft:

1 Lichtjahr = 9,46 Billionen km!



Astronomie: Blicke in die Vergangenheit!



Galaktisches Zentrum:

Auf der Erde lebten
Neandertaler

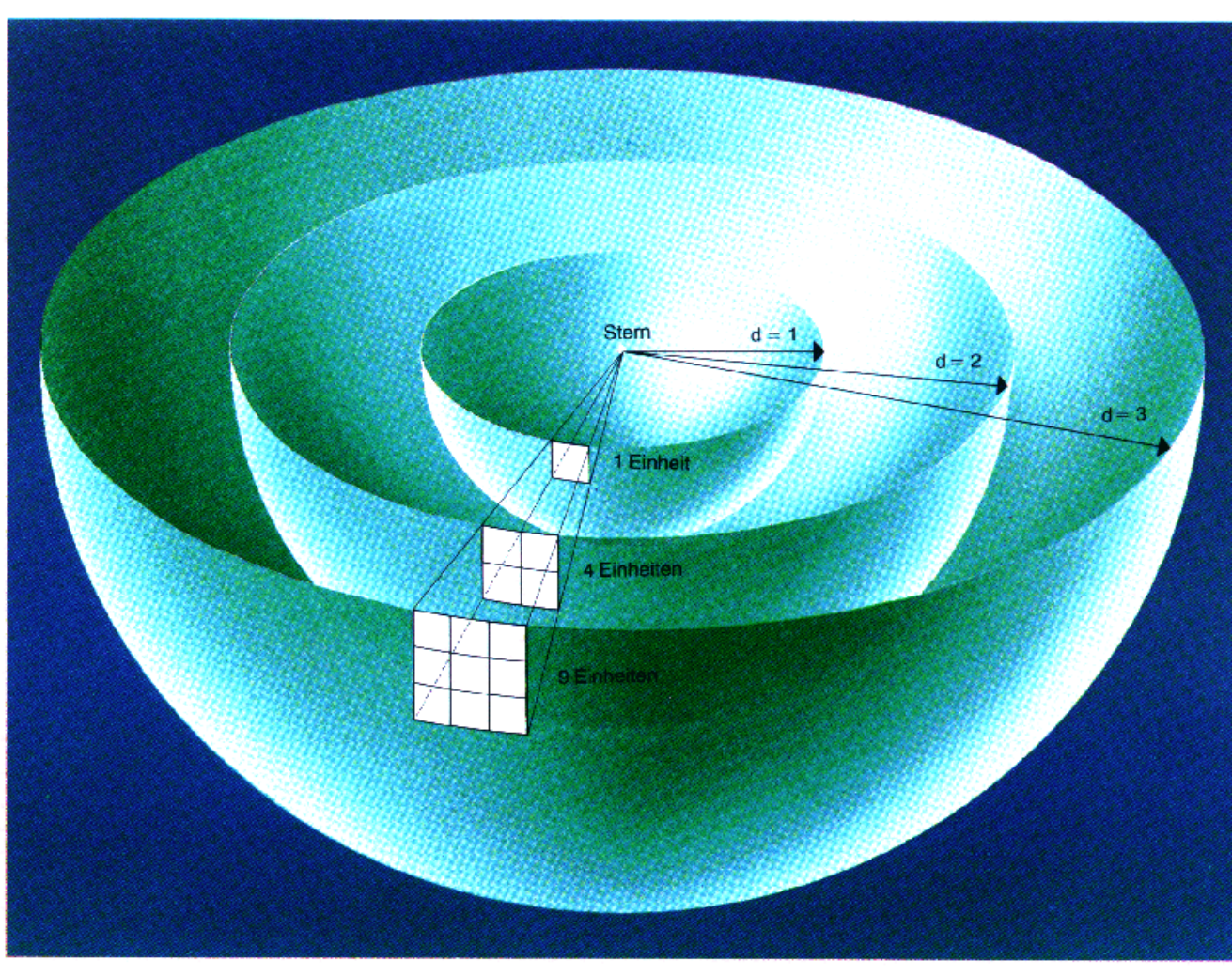
Andromeda-Galaxie:

Die Alpen entstehen

Der Coma-Haufen:

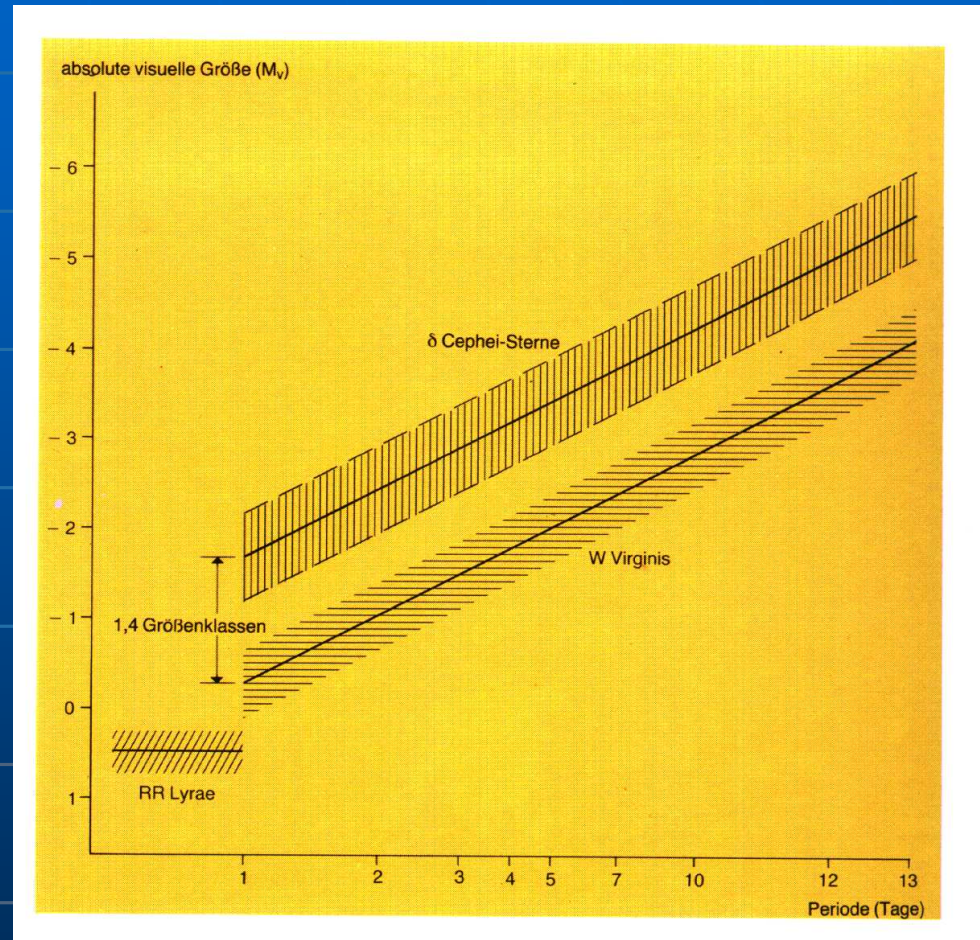
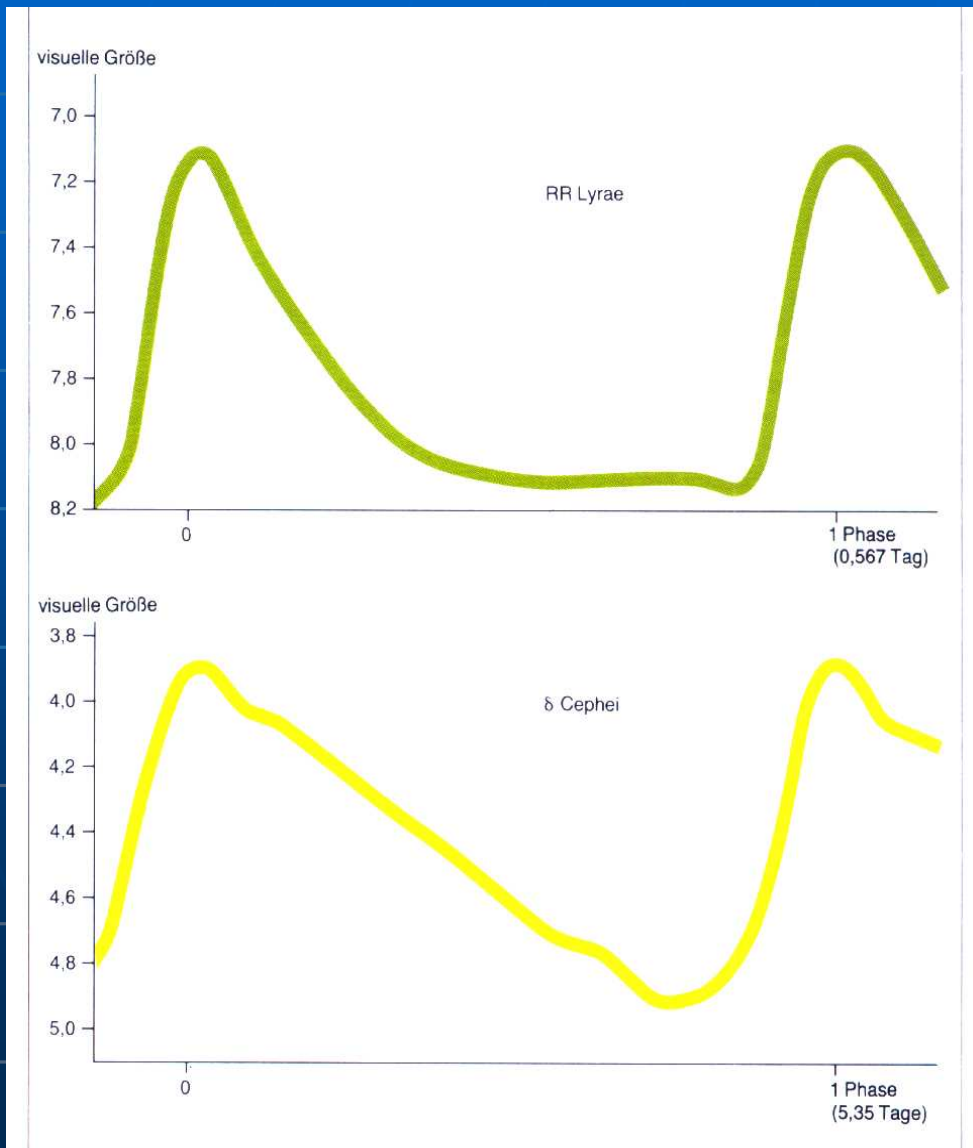
Archeopteryx flog

Kosmische Entfernungsmessungen

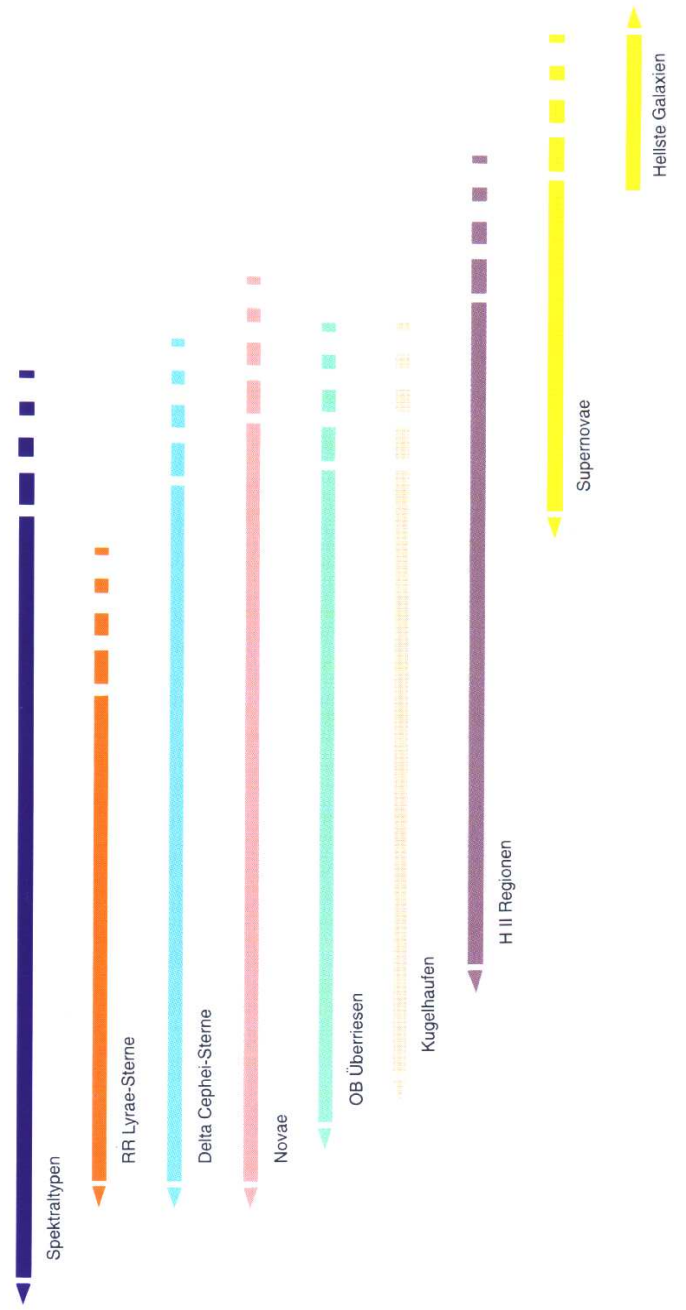
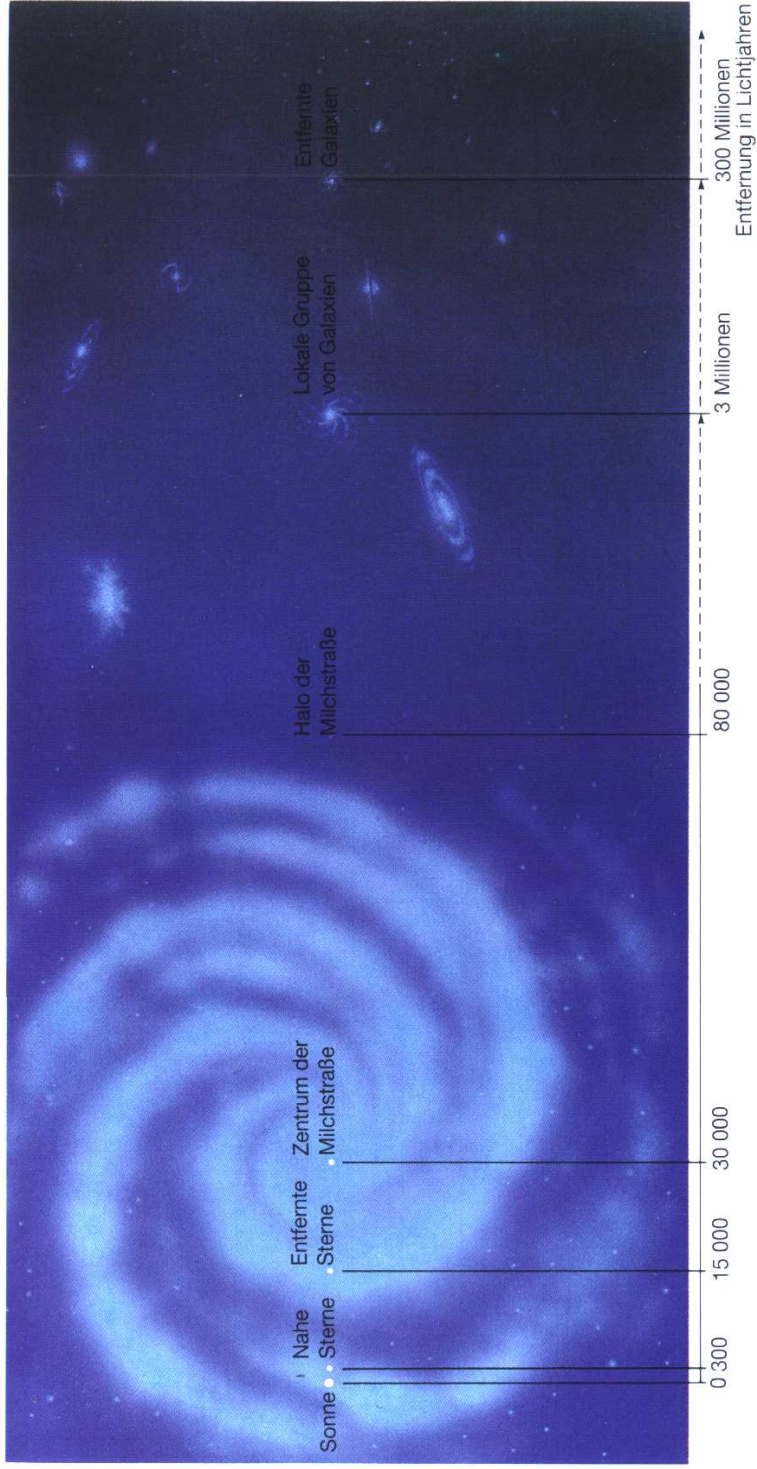


Das Prinzip
der Standard-
Kerzen

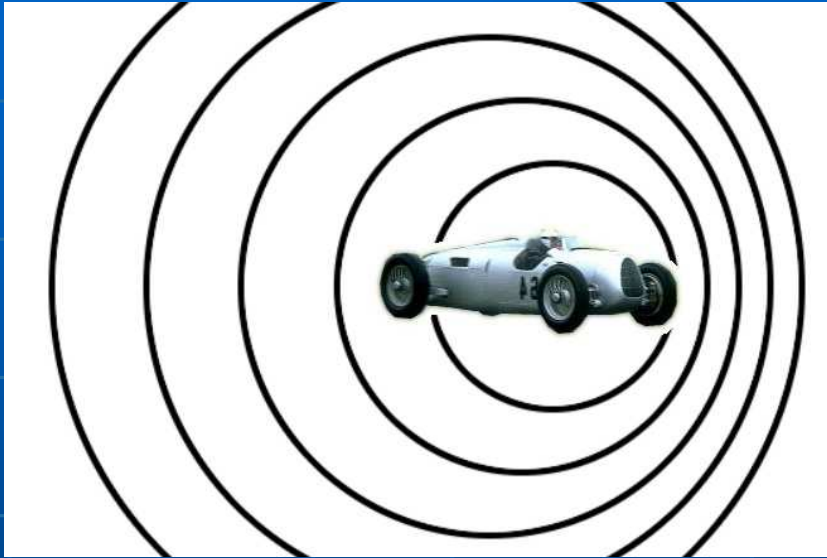
Kosmische Entfernungsmessungen



Variable Sterne: “Kalibrierbare Standard-Kerzen”?

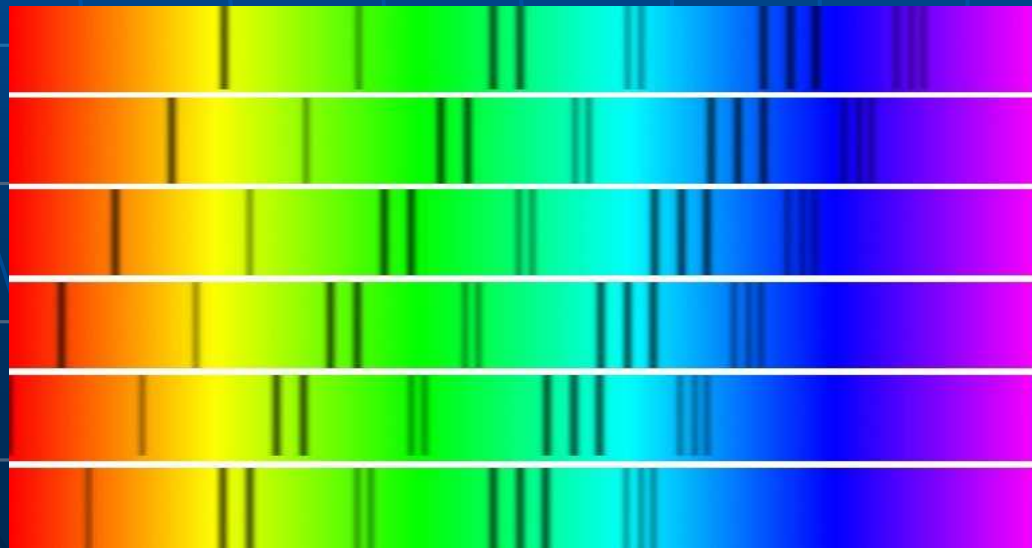


Dopplereffekt und Galaxienflucht



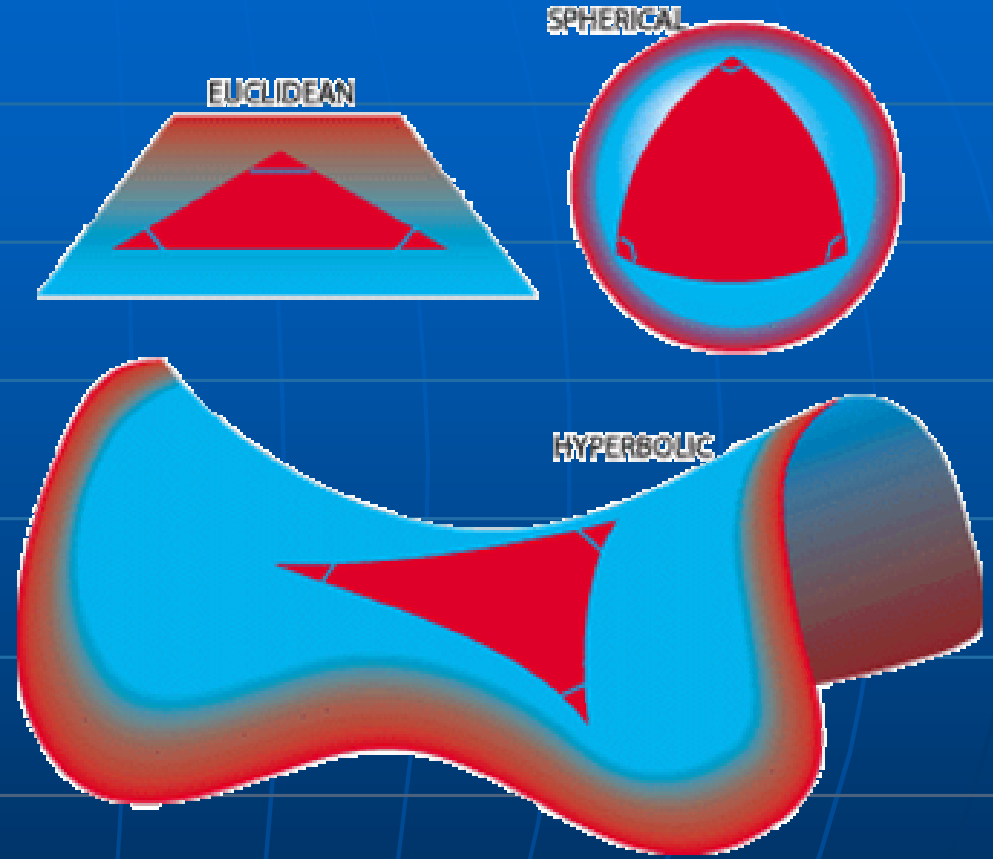
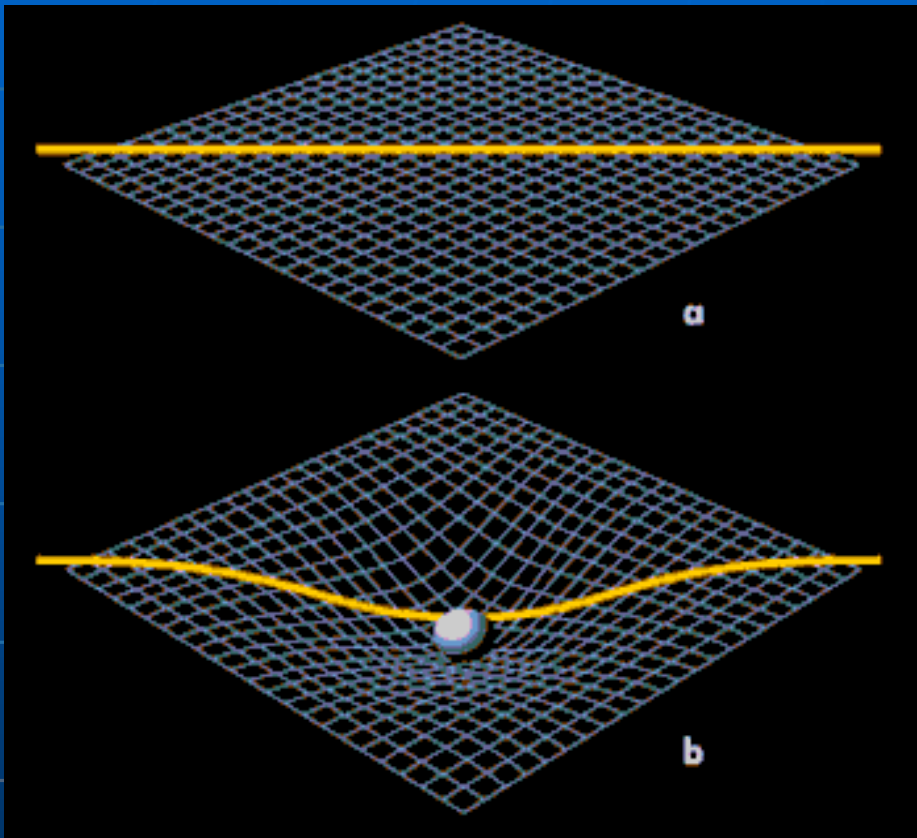
Wenn sich ein Stern oder ein Galaxie von uns wegbewegt:

v



Das Licht erscheint rot-verschoben!

Die Geometrie des Universums



1. Die Gravitation *krümmt* den Raum.
2. Das Universum ist ein Raum *konstanter Krümmung*.

Mittlerer Abstand
zwischen den
Galaxien

$\Omega_M = 0$

Offen $\Omega_M < 1$

$\Omega_M = 1$

Geschlossen

$\Omega_M > 1$

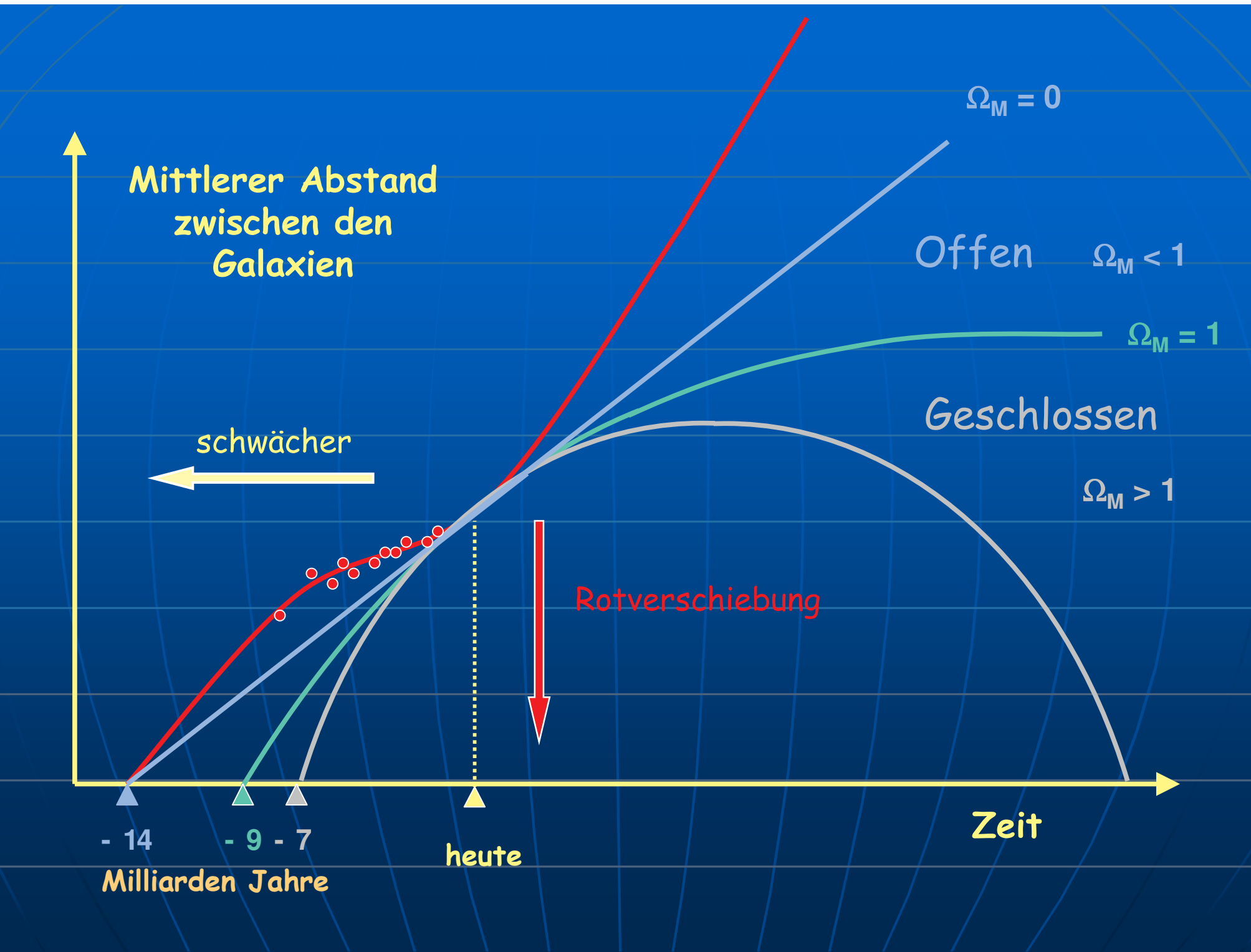
schwächer

Rotverschiebung

- 14
- 9 - 7
Milliarden Jahre

heute

Zeit



Supernovae als Standardkerzen?

Supernova (SN) 1604 (“Keplers Supernova”)



Was ist eine (Typ Ia) Supernova?

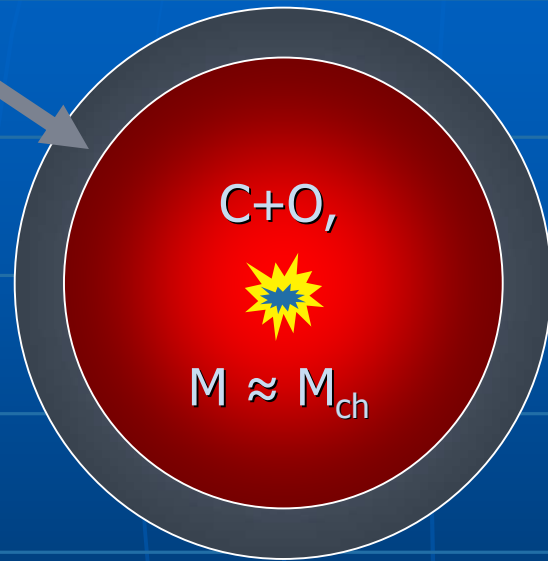


Tycho Brahes Supernova: SN 1572



Wie explodieren Typ Ia Supernovae?

He (+H)
vom
Begleitstern



Dichte $\sim 10^9 - 10^{10}$ g/cm³

Temperatur: einige 10^9 K

Radien: einige 1000 km

Explosionsenergie:

Fusion von
C+C, C+O, O+O
 \Rightarrow "Fe"

Laminare Brenn-
geschwindigkeit:

$U_L \sim 100$ km/s $\ll U_S$

Zu wenig wird
verbrannt!

Die Physik turbulenter Verbrennung...

∅ Tägliche Erfahrung:

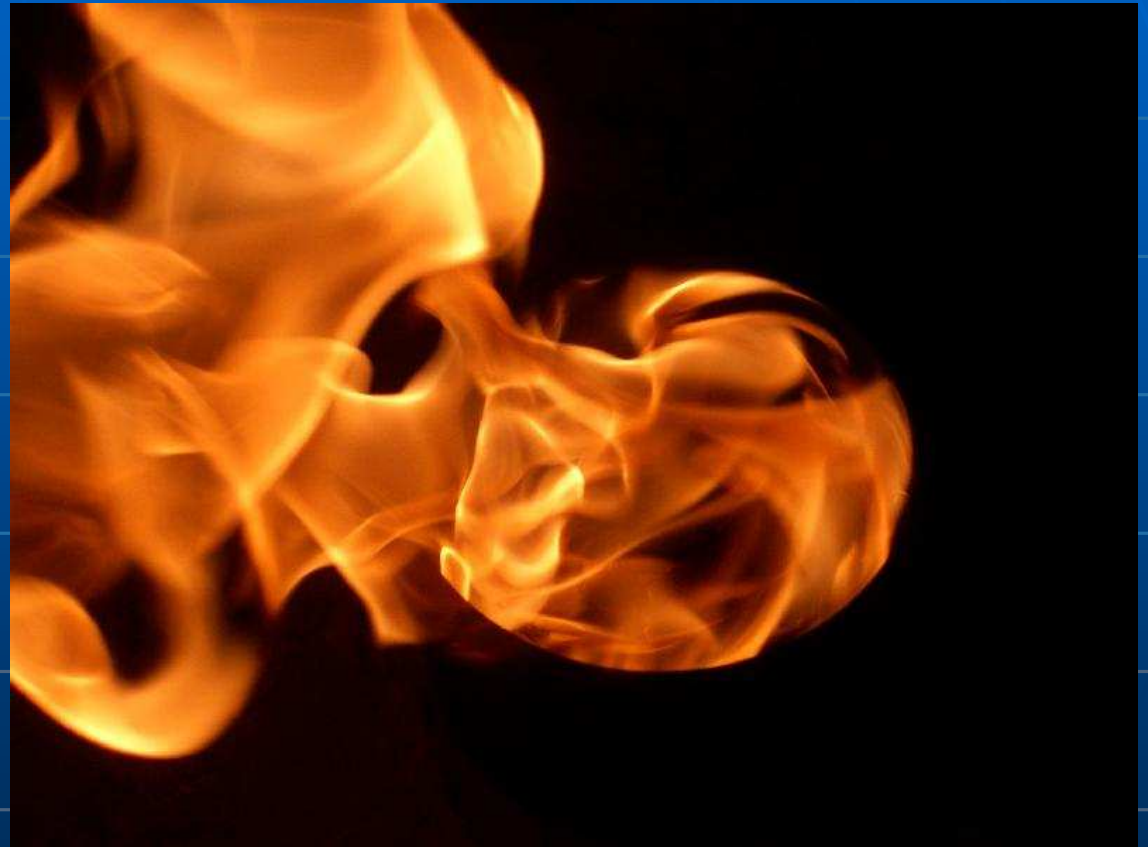
Turbulenz vergrößert die Brenngeschwindigkeit.

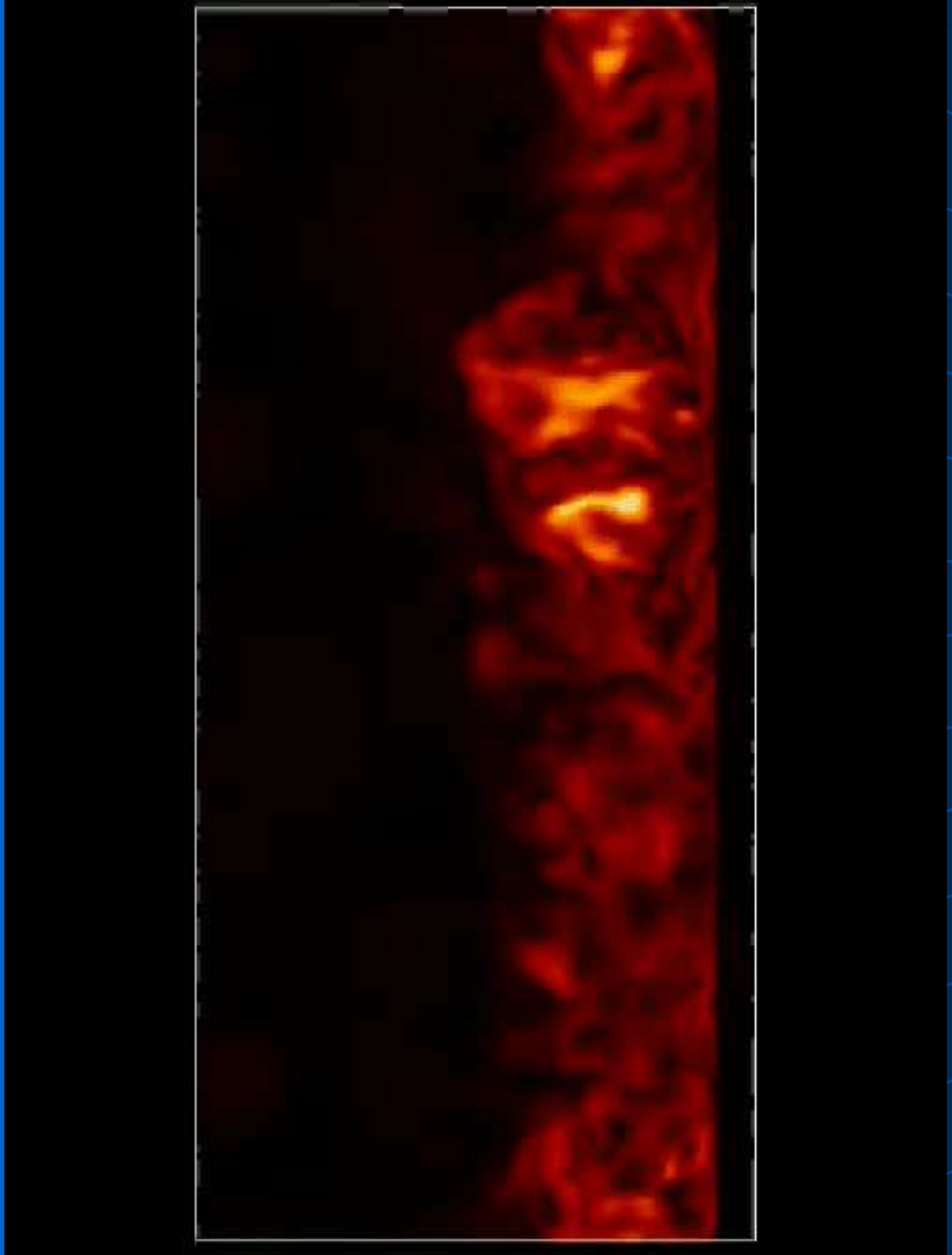
∅ Im Grenzfall starker Turbulenz:

$$U_B \sim V_T!$$

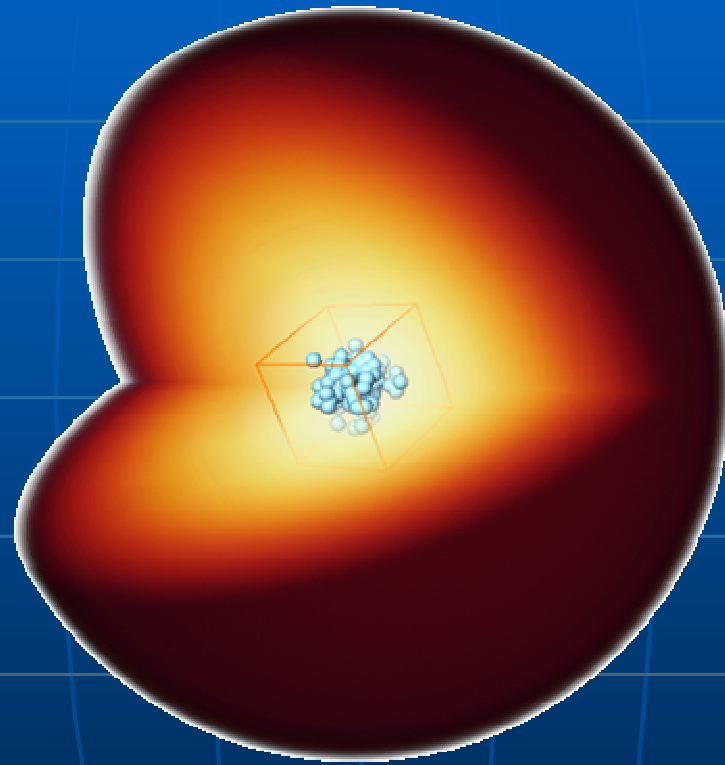
∅ Physik

thermonuklearen „Brennens“ ist sehr ähnlich der vorge-mischter chemischer Flammen.

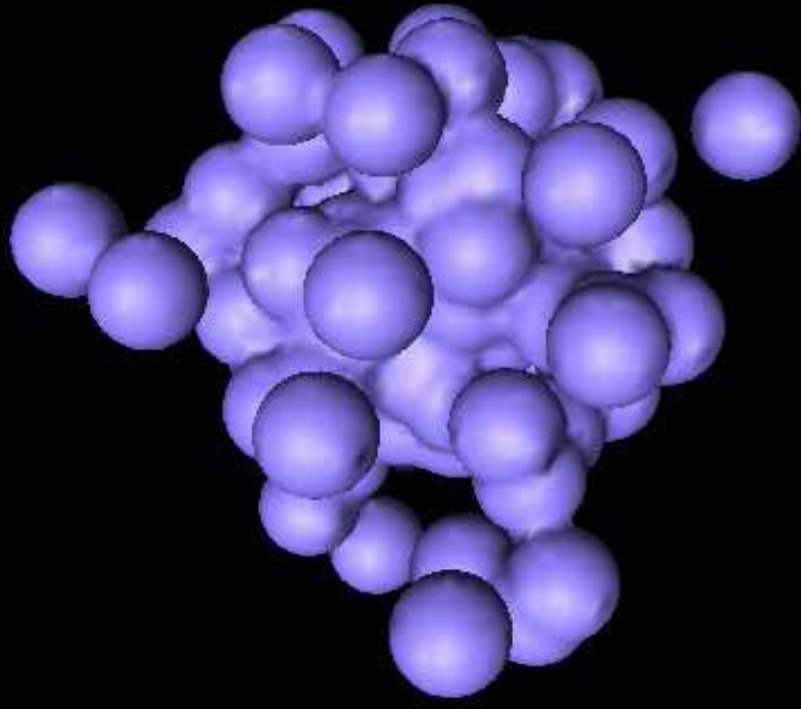




... und Supernova-Modellierung



1e+07 [cm]



1e13 5e14

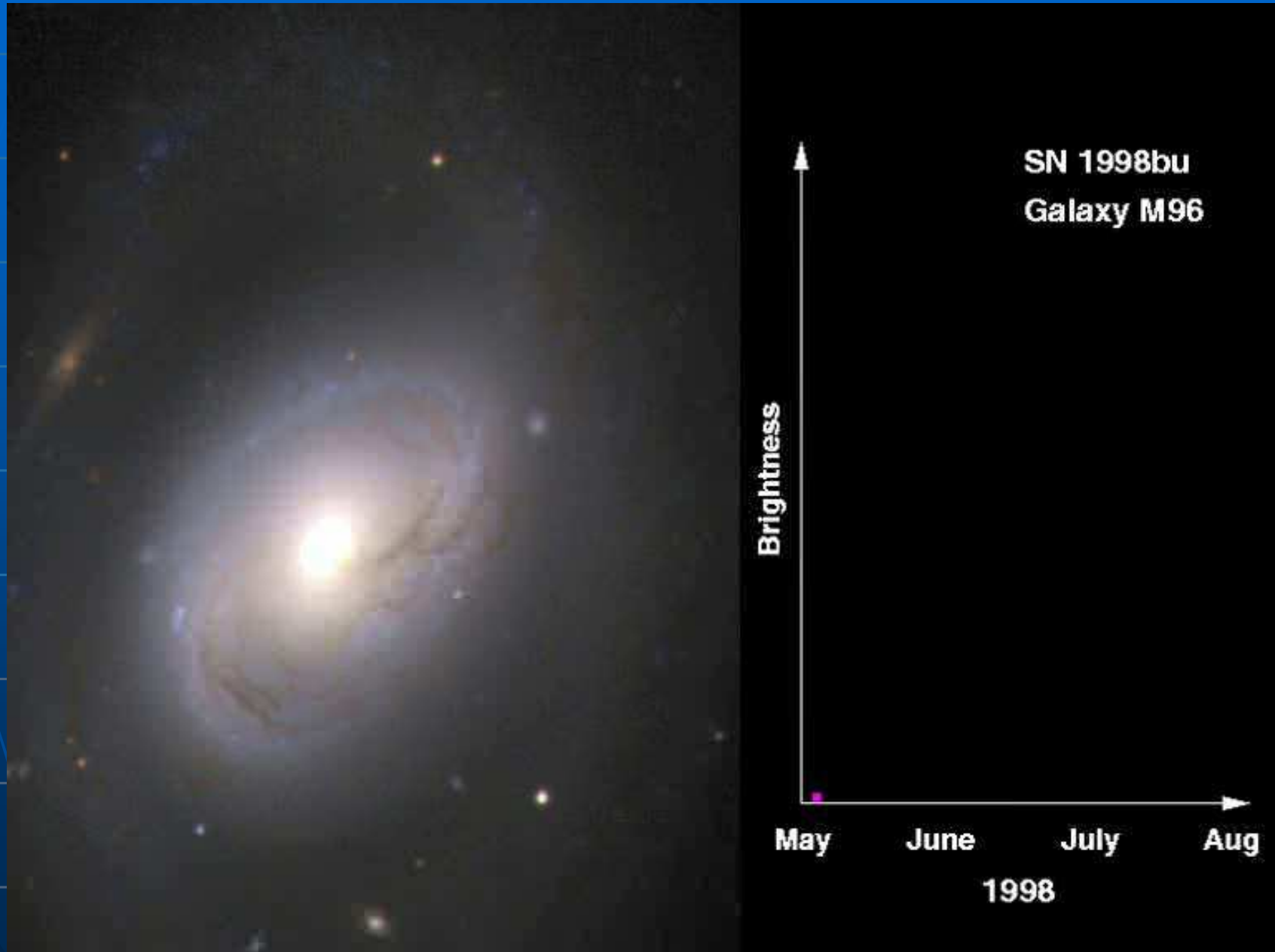
t = 0/100 s



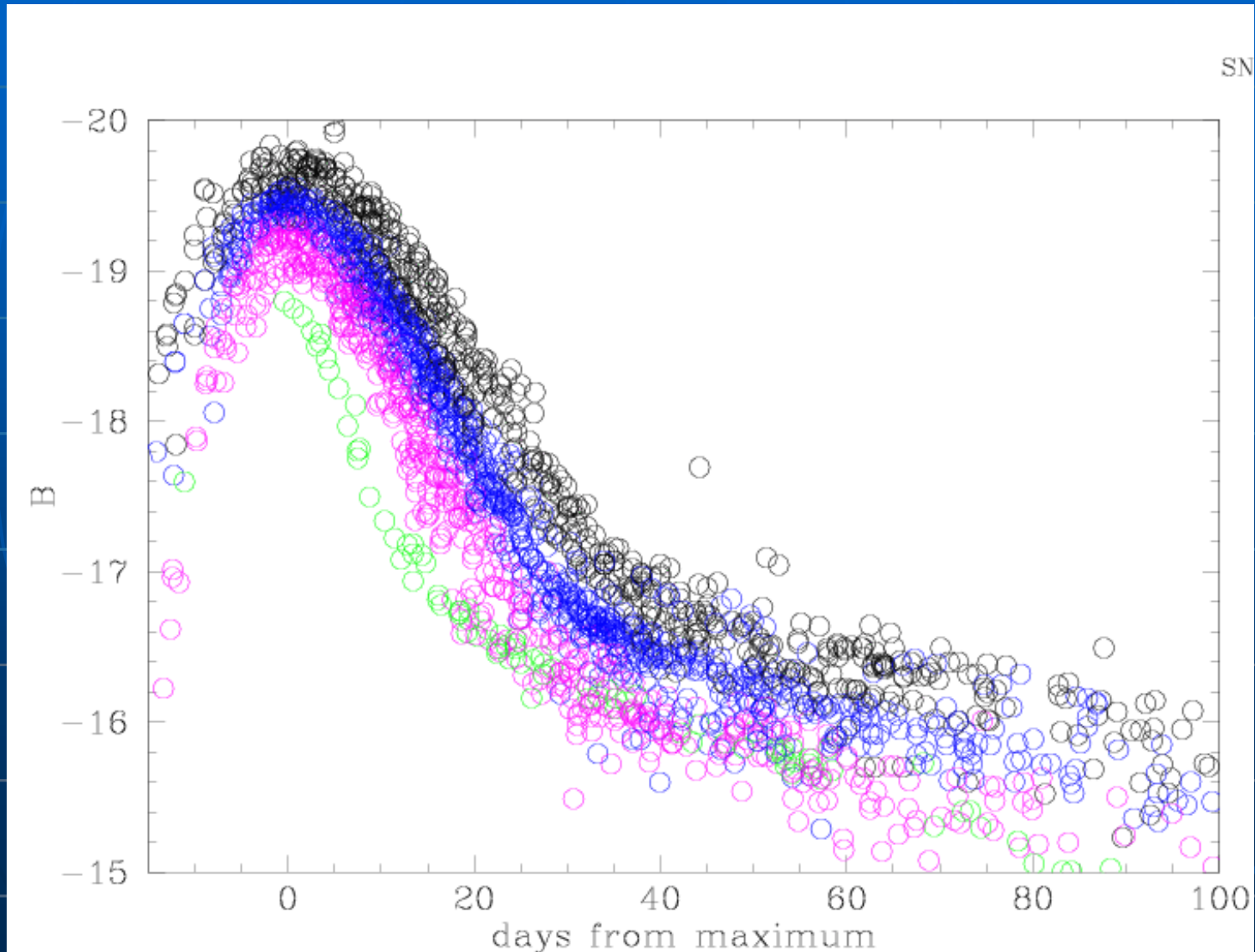
Weißer
Zwerg



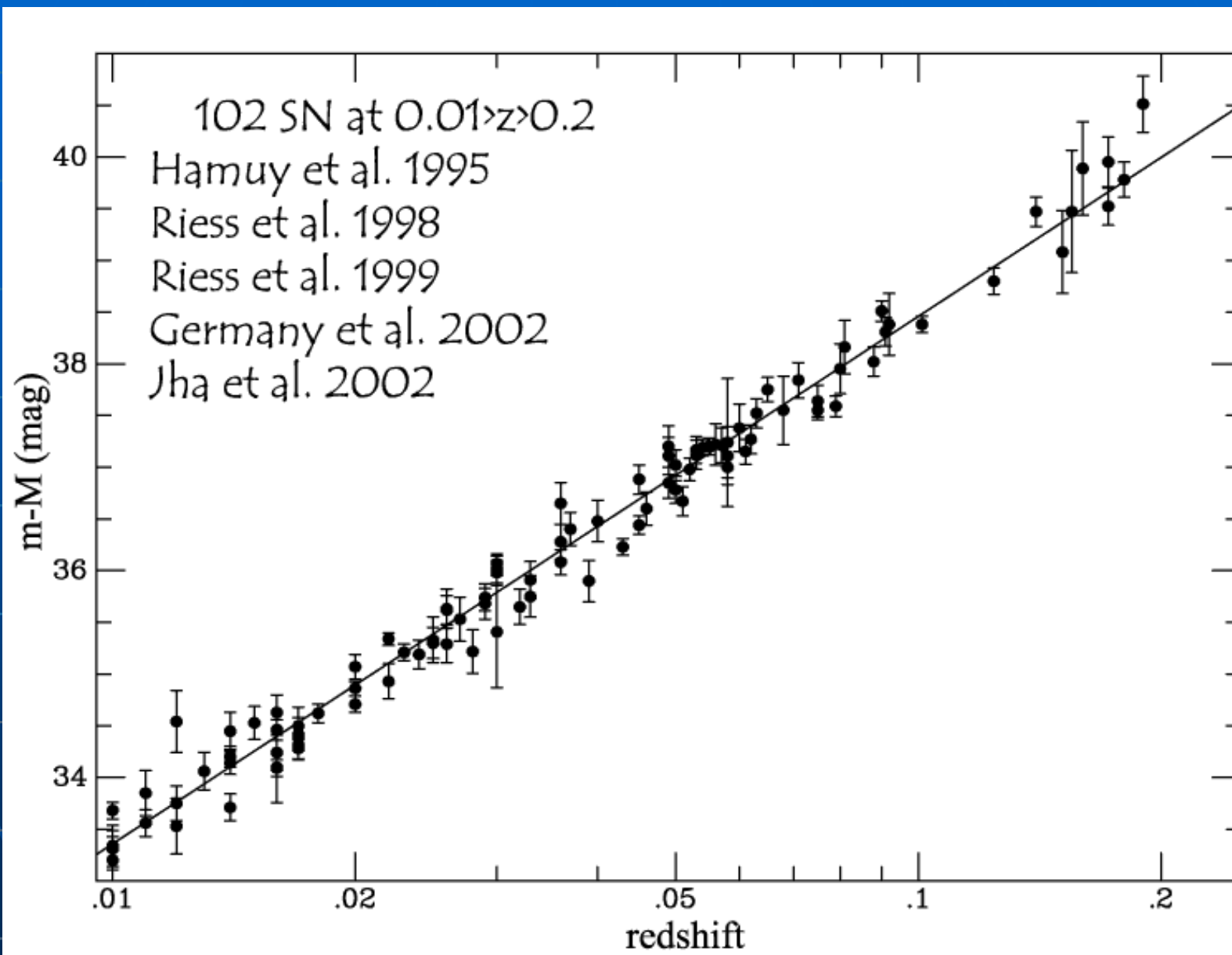
Supernovae in entfernten Galaxien



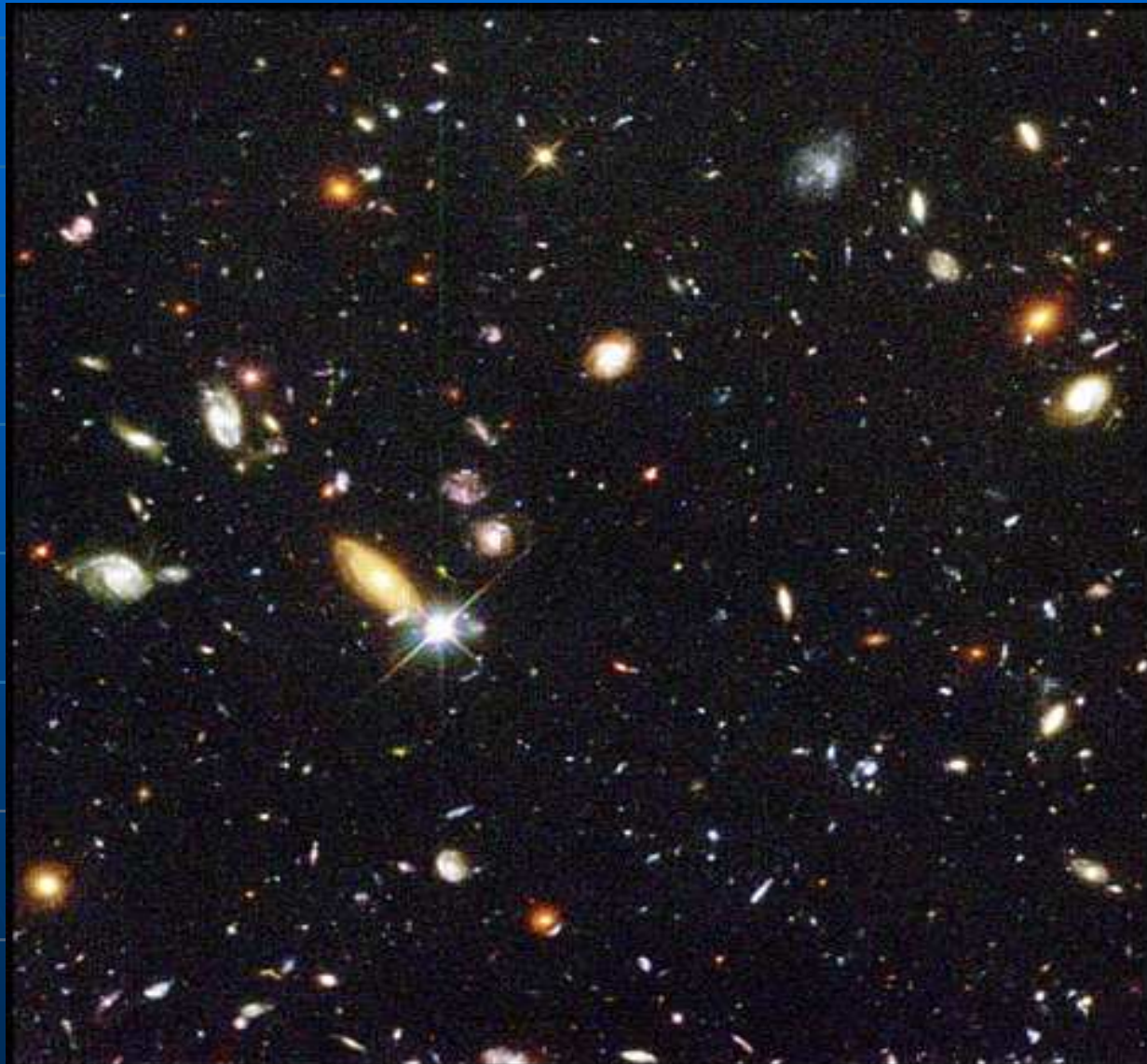
Lichtkurven von gut beobachteten SNe Ia



Das Hubble-Diagramm für nahe Supernovae



Sehr weit entfernte Supernovae



Hubble Deep Field

HST · WFPC2

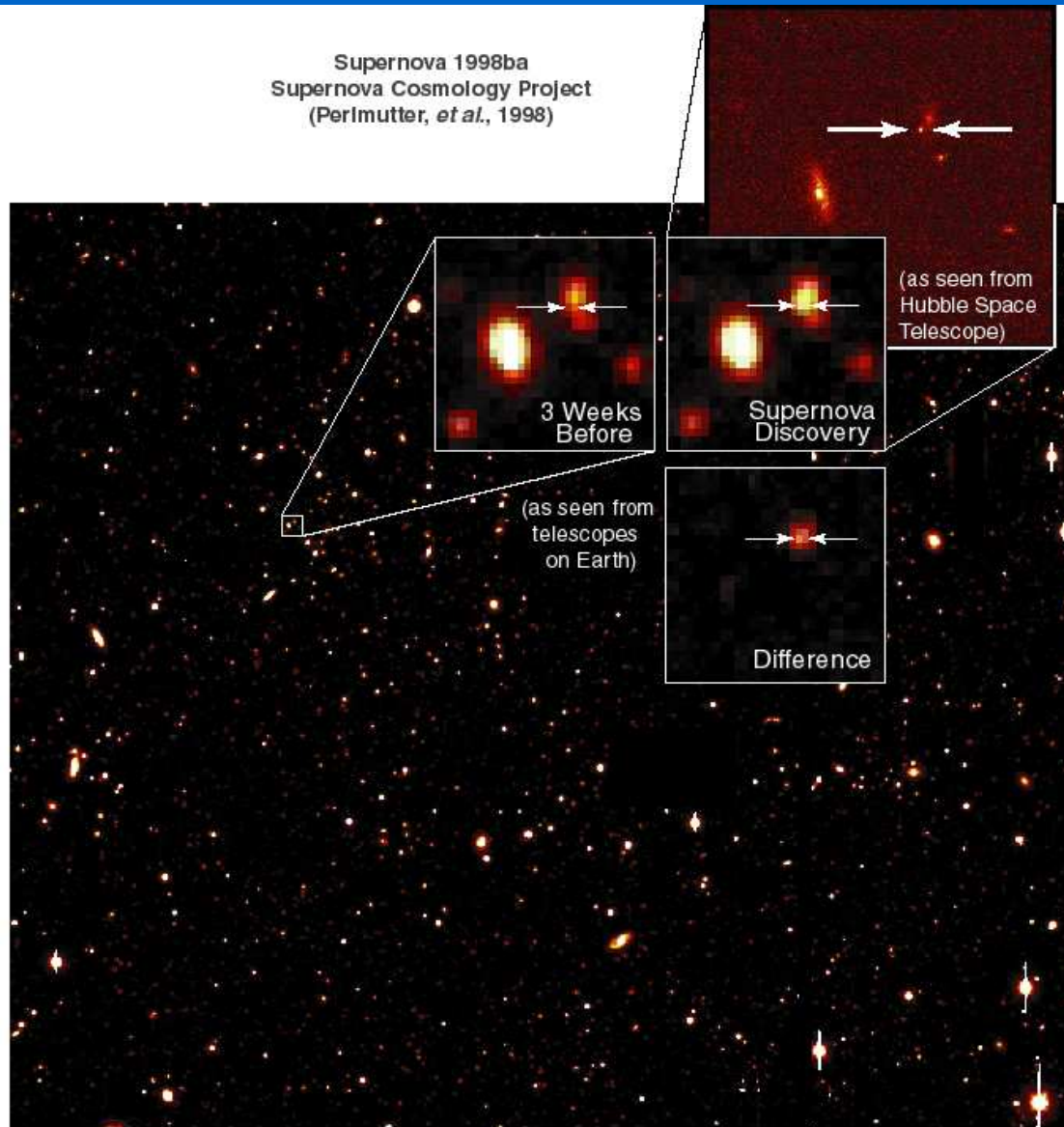
PRC96-01a · ST ScI OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST ScI), NASA

Supernovae
sind sehr selten,
ca. 1 SN pro
100 Jahre und
Galaxie.



Man muß sehr
viele Galaxien
beobachten!

Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)

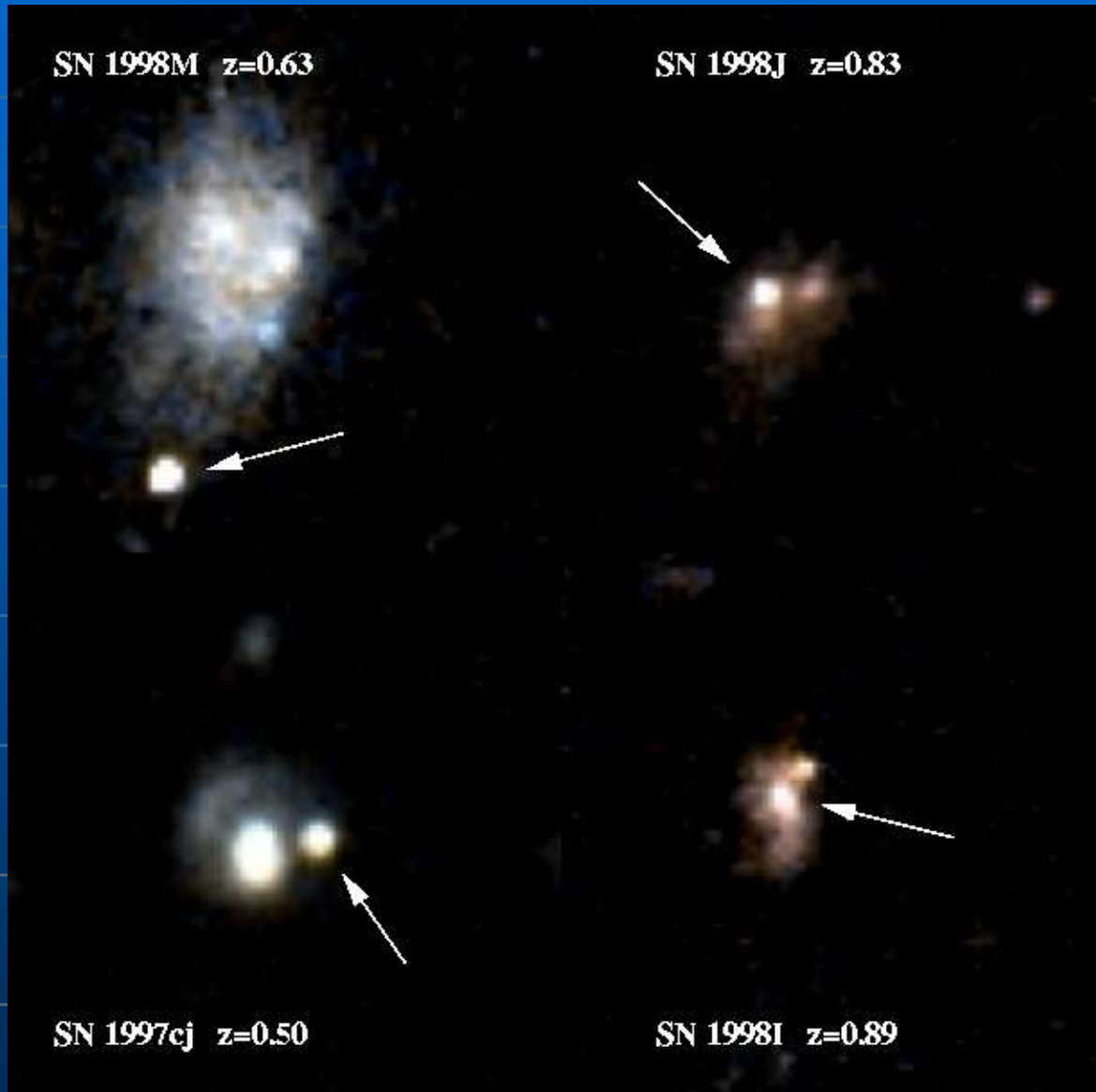


Suchstrategie:

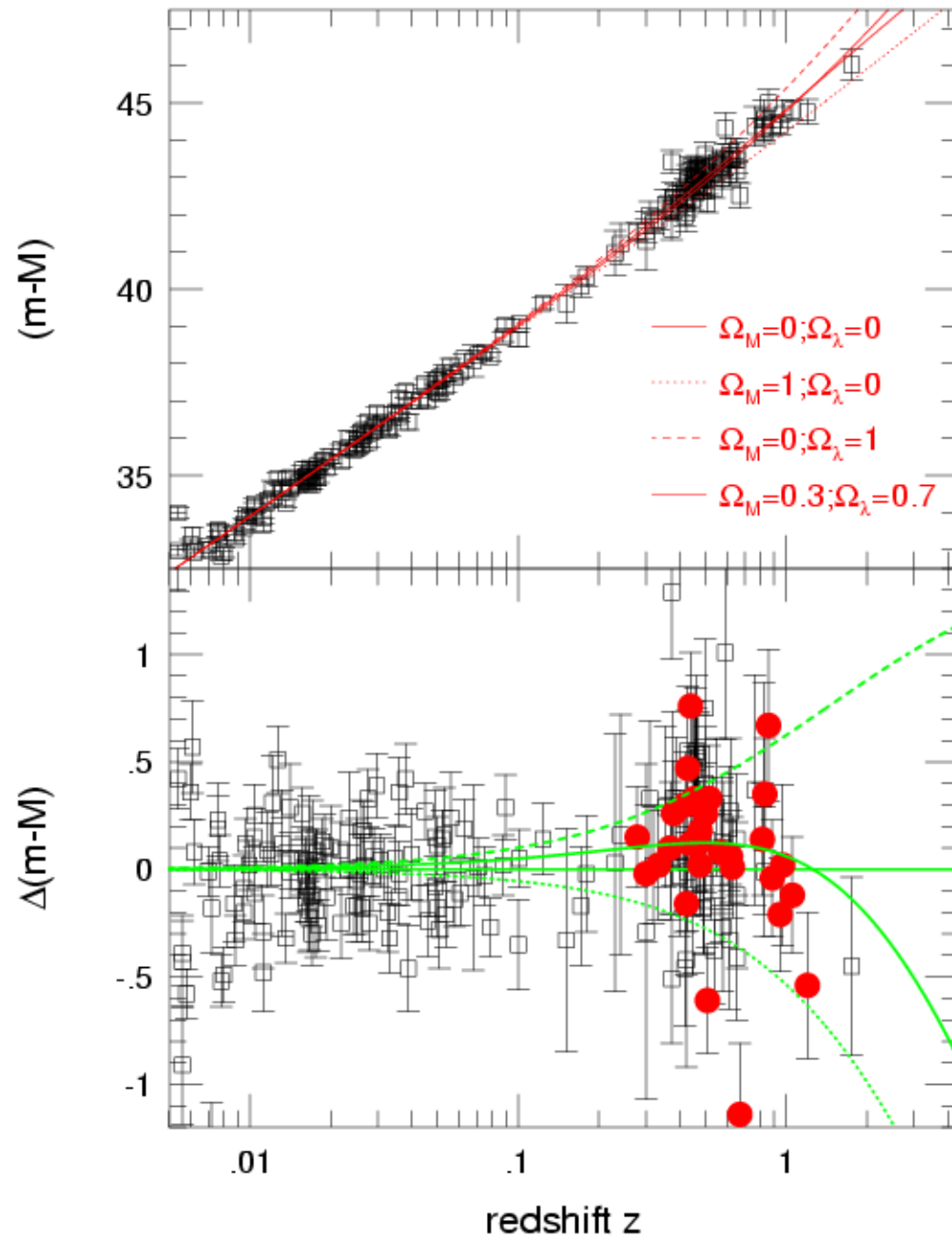
1. Wiederholtes Scannen eines Feldes.
2. Elektronisches Auslesen der Daten.
3. Nachfolgebeobachtungen.

Supernovae werden bei Rotverschiebungen von $Z > 0,4$ routinemäßig entdeckt:

- Was ist die intrinsische Streuung in der Helligkeit?
- Sind sie verschieden von den Lokalen?
- Verstehen wir die Unterschiede?

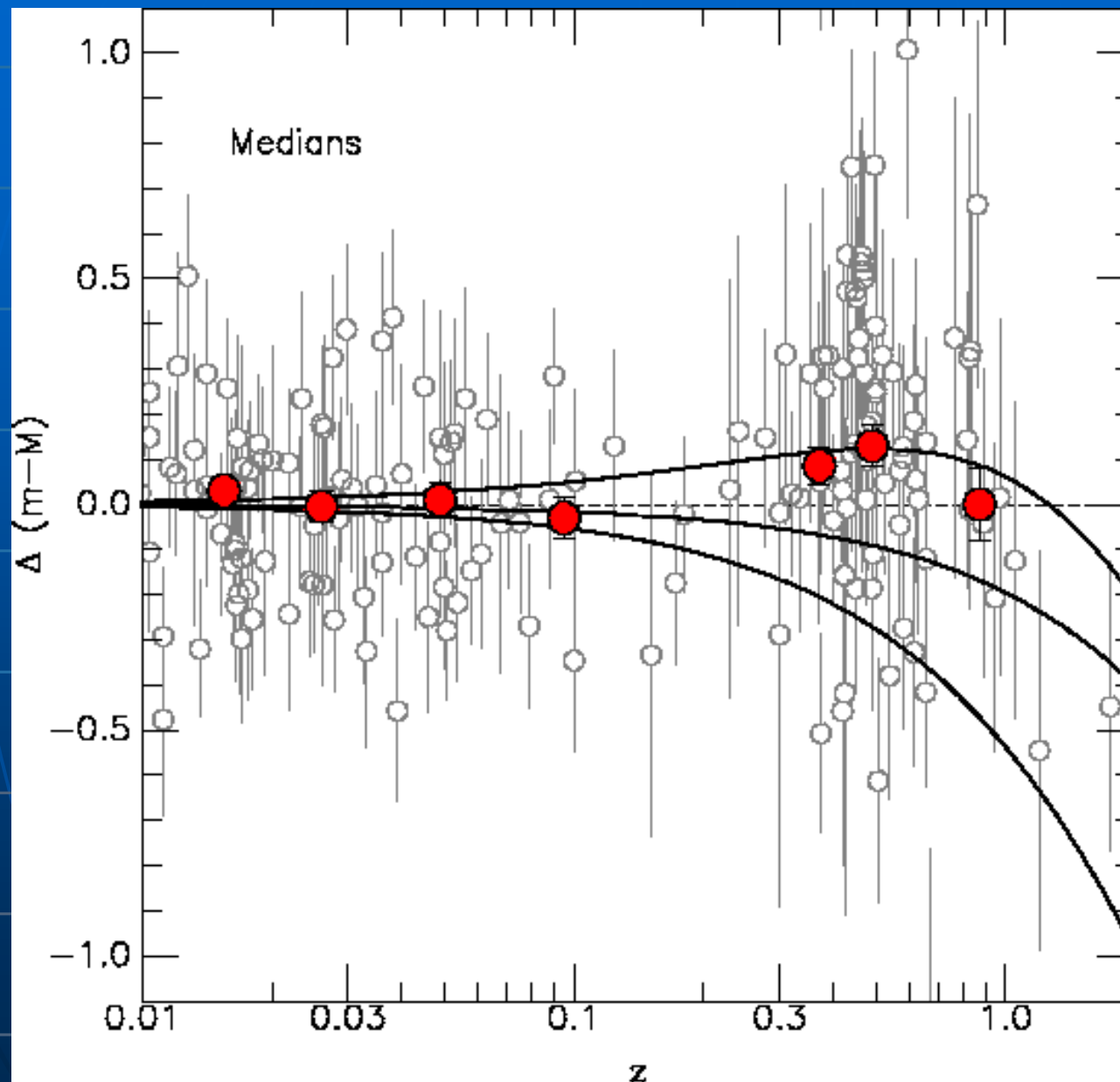


Supernovae bei hohen Rotverschiebungen



Tonry et al. 2003

209 SNe Ia und Mittelwerte



Tonry et al. 2003

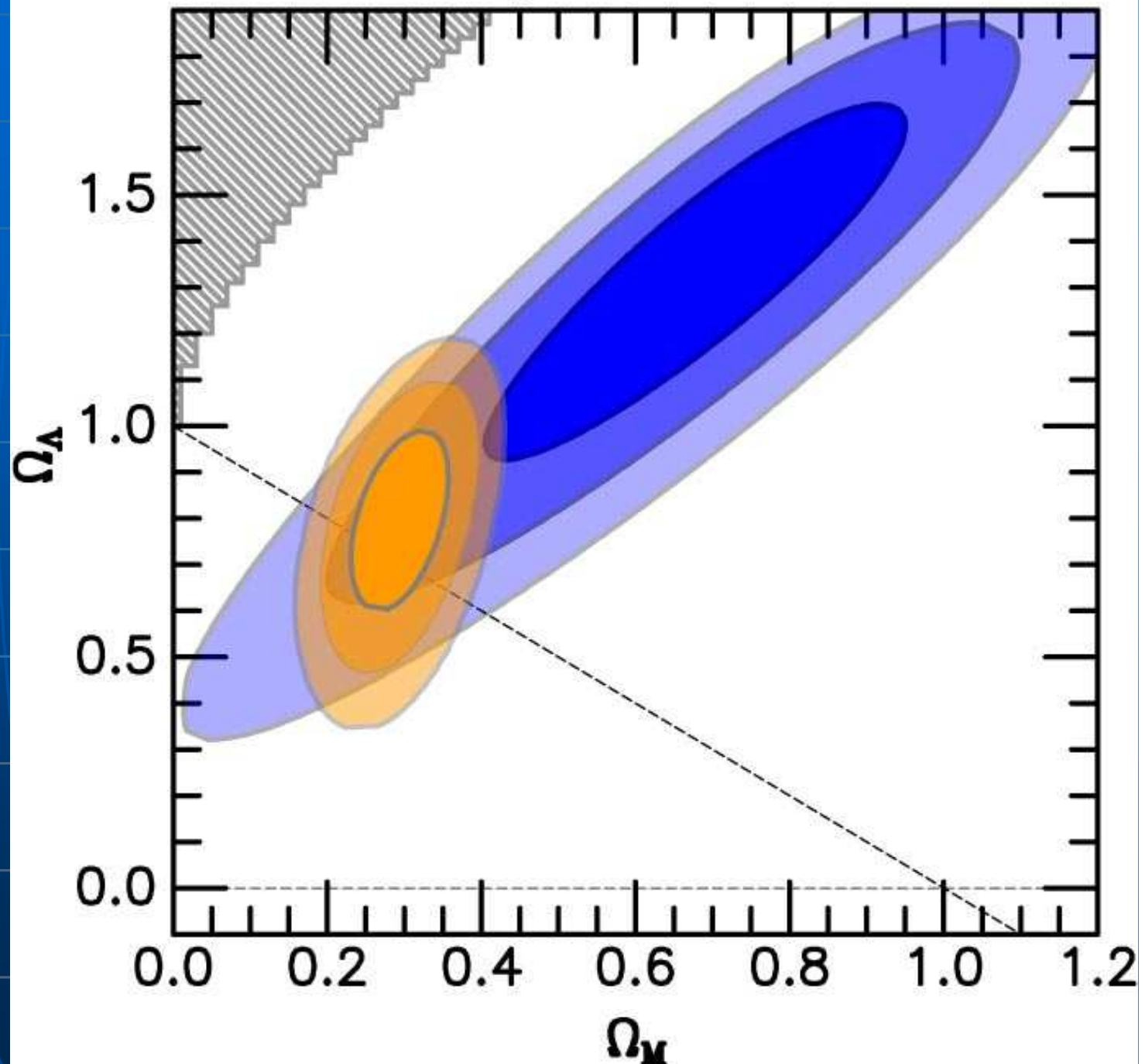
2dF:

$$\Omega_M = 0.2 \pm 0.03$$

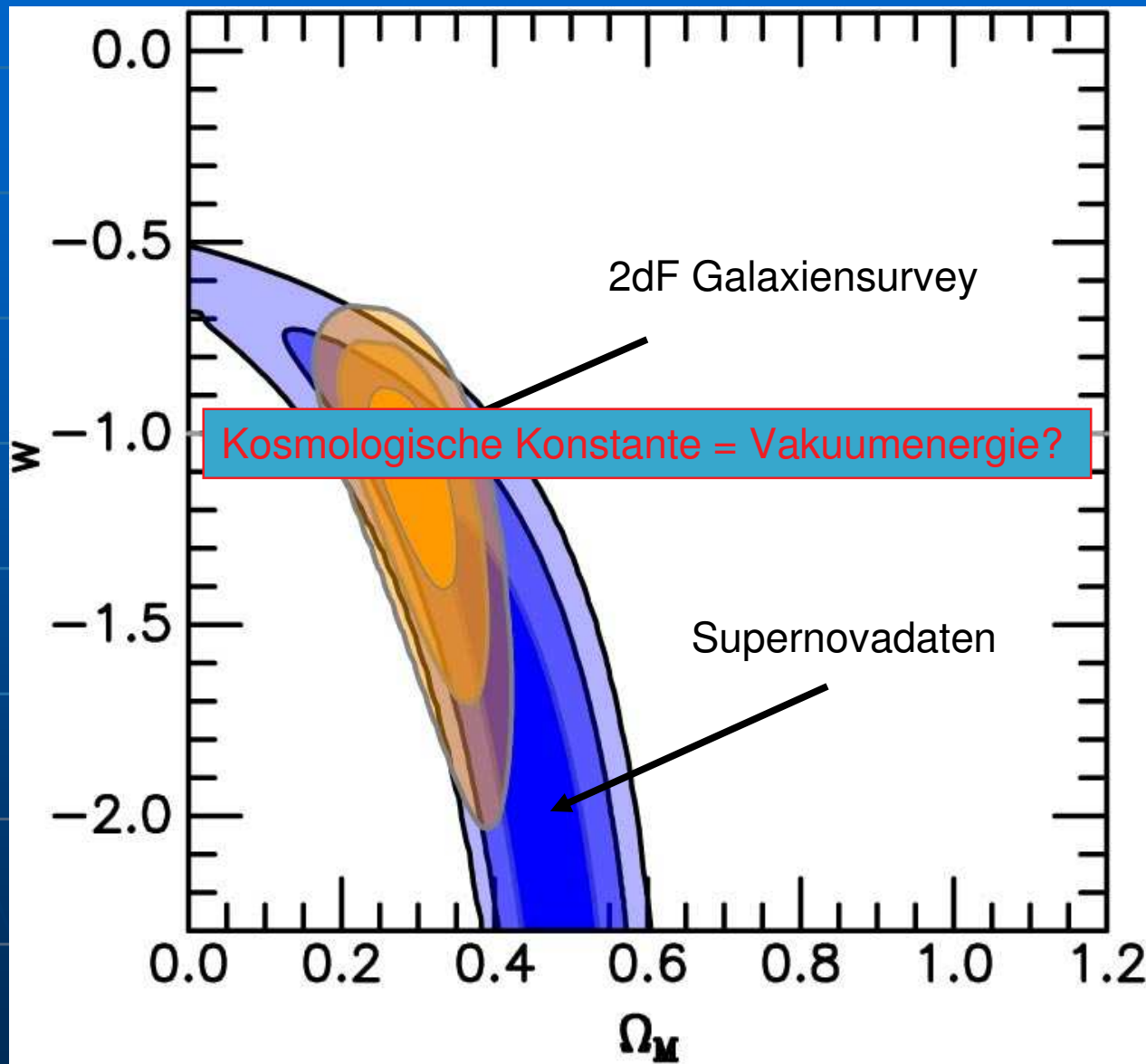
KP:

$$h = 0.72 \pm 0.08$$

Entire High-Z SN Ia Data Set



Kosmologie und Typ Ia Supernovae



Die
"Zustandsgleichung"
des Universums:

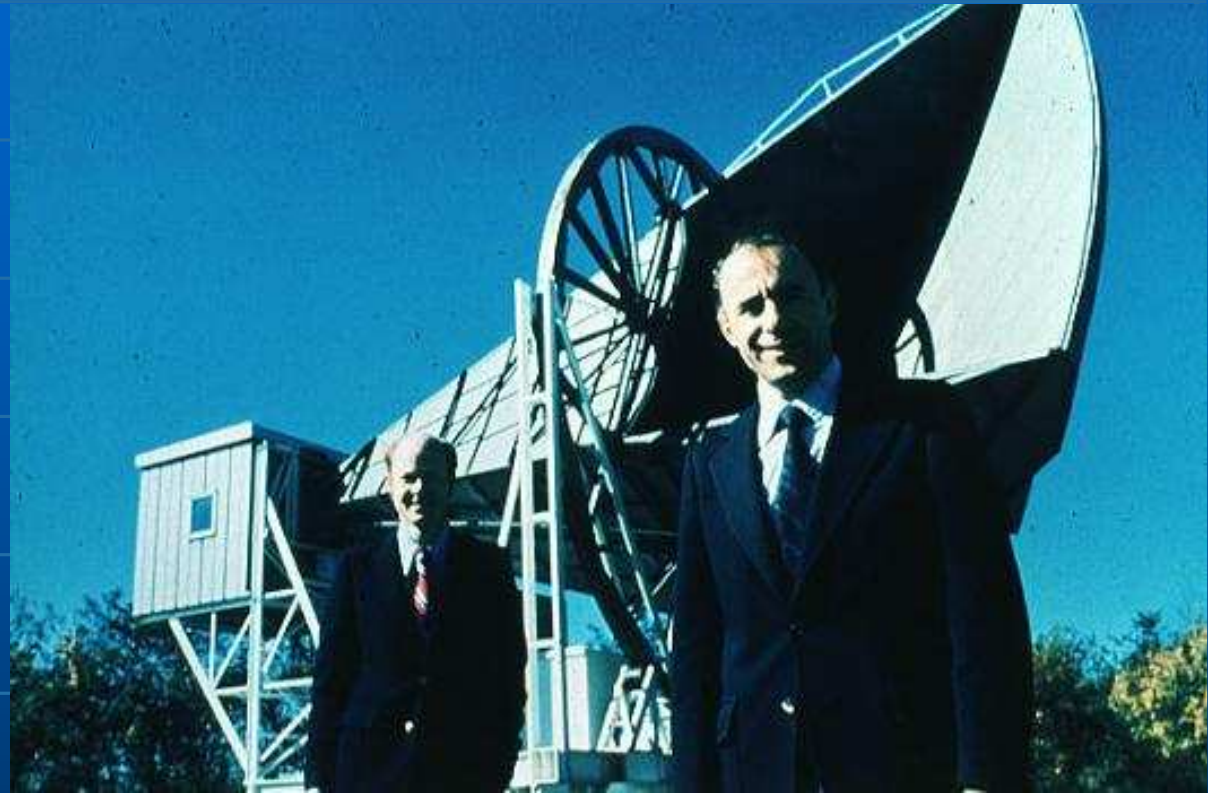
$$p = wp$$

$$\ddot{a} \sim (\rho + 3p)$$

$$w < -1/3 : \quad \longrightarrow$$

Beschleunigung!

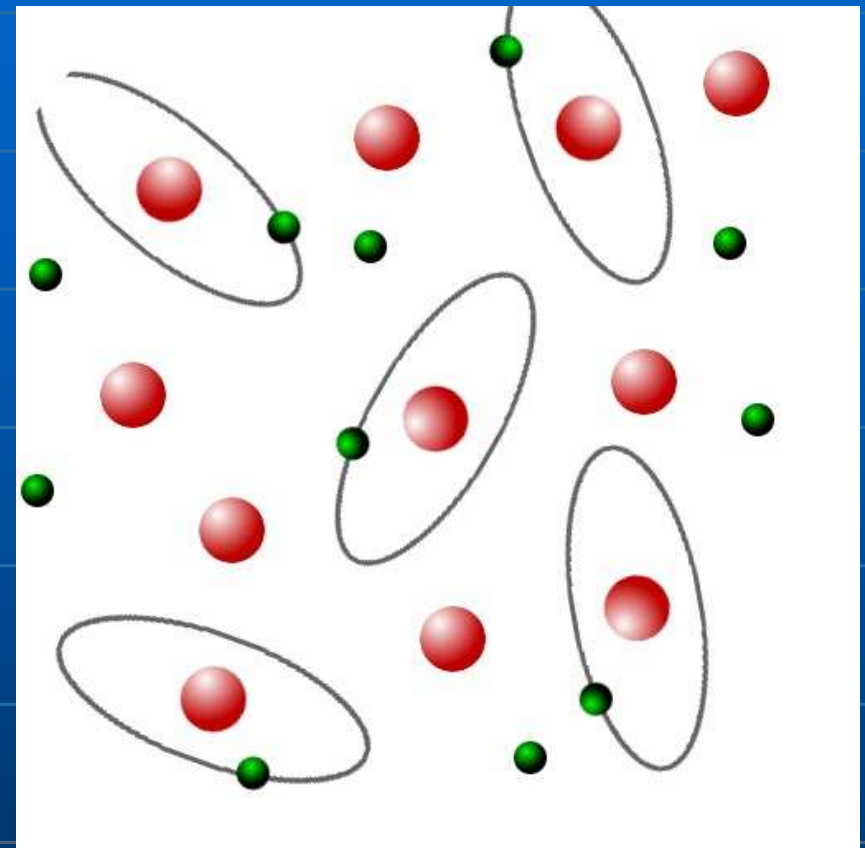
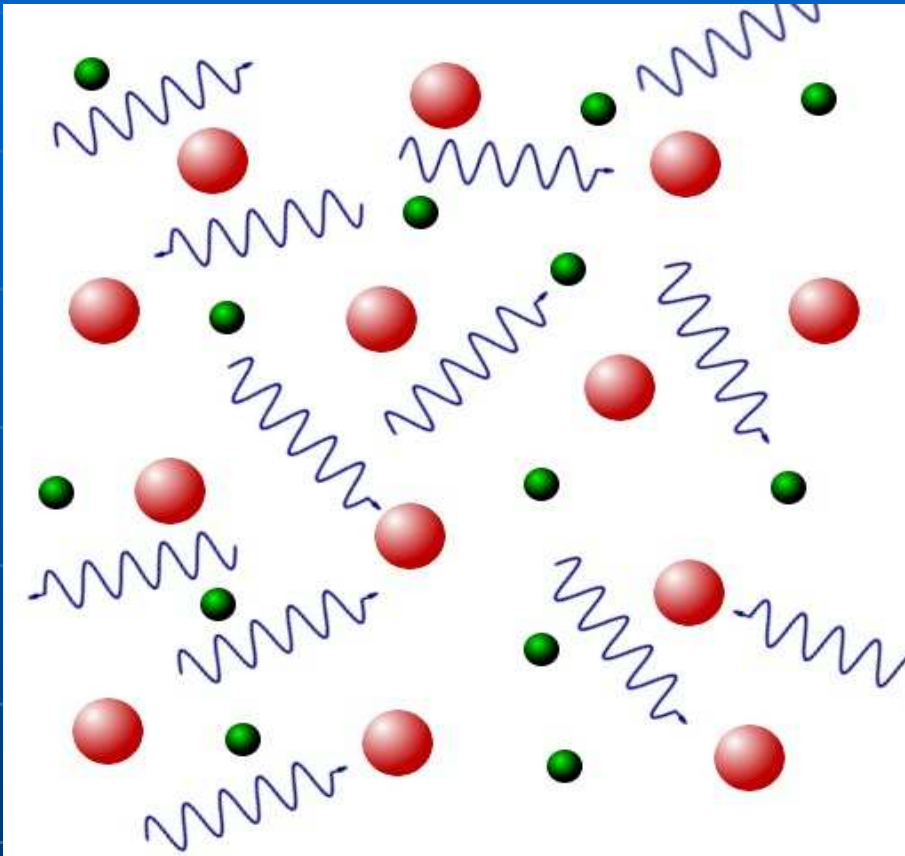
Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund



George Gamow (1946): *Es gibt ~400 Photonen pro Kubikzentimeter*

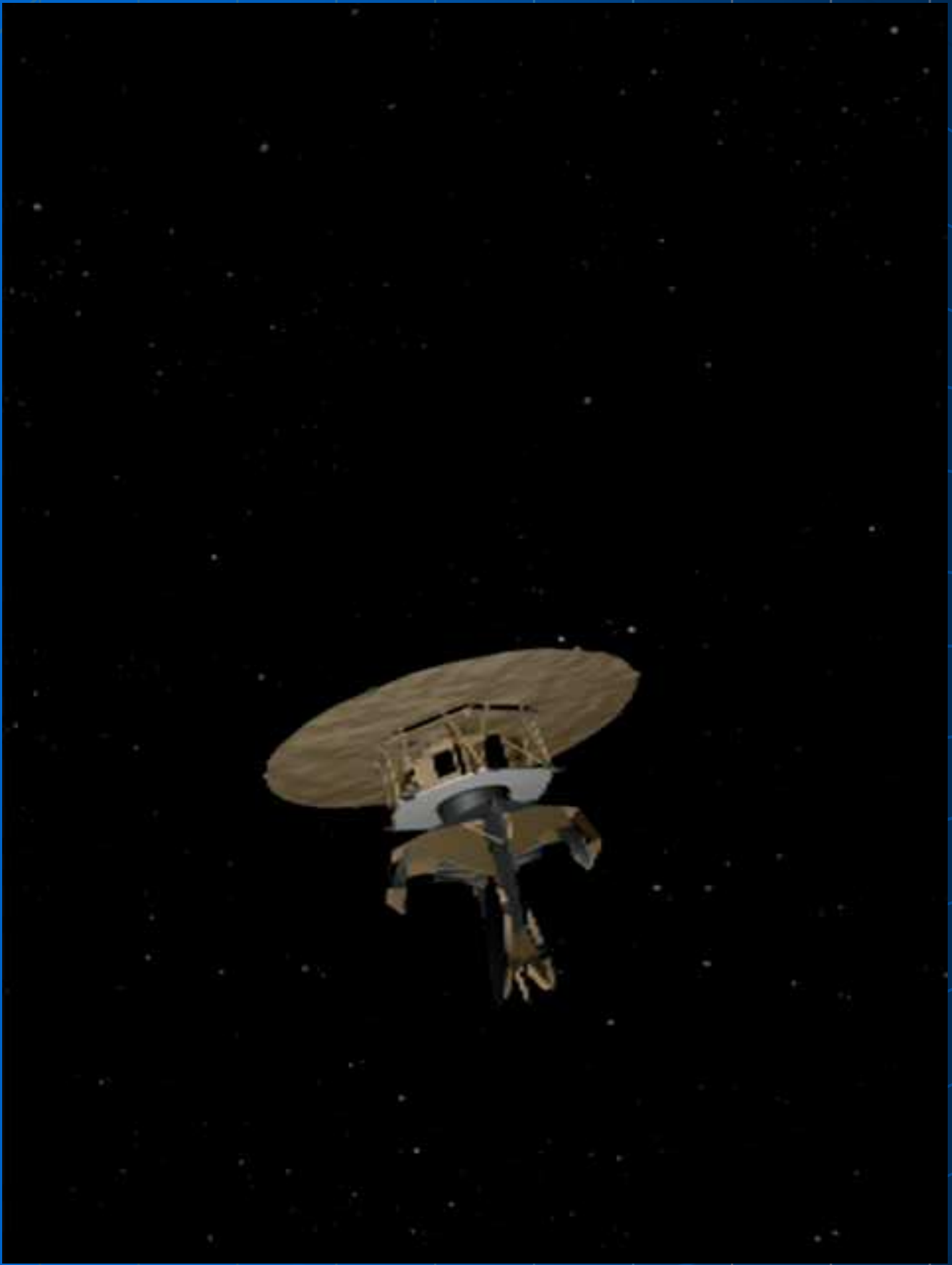
Arno Penzias und Robert Wilson: *Zufällige Entdeckung 1964*

Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund



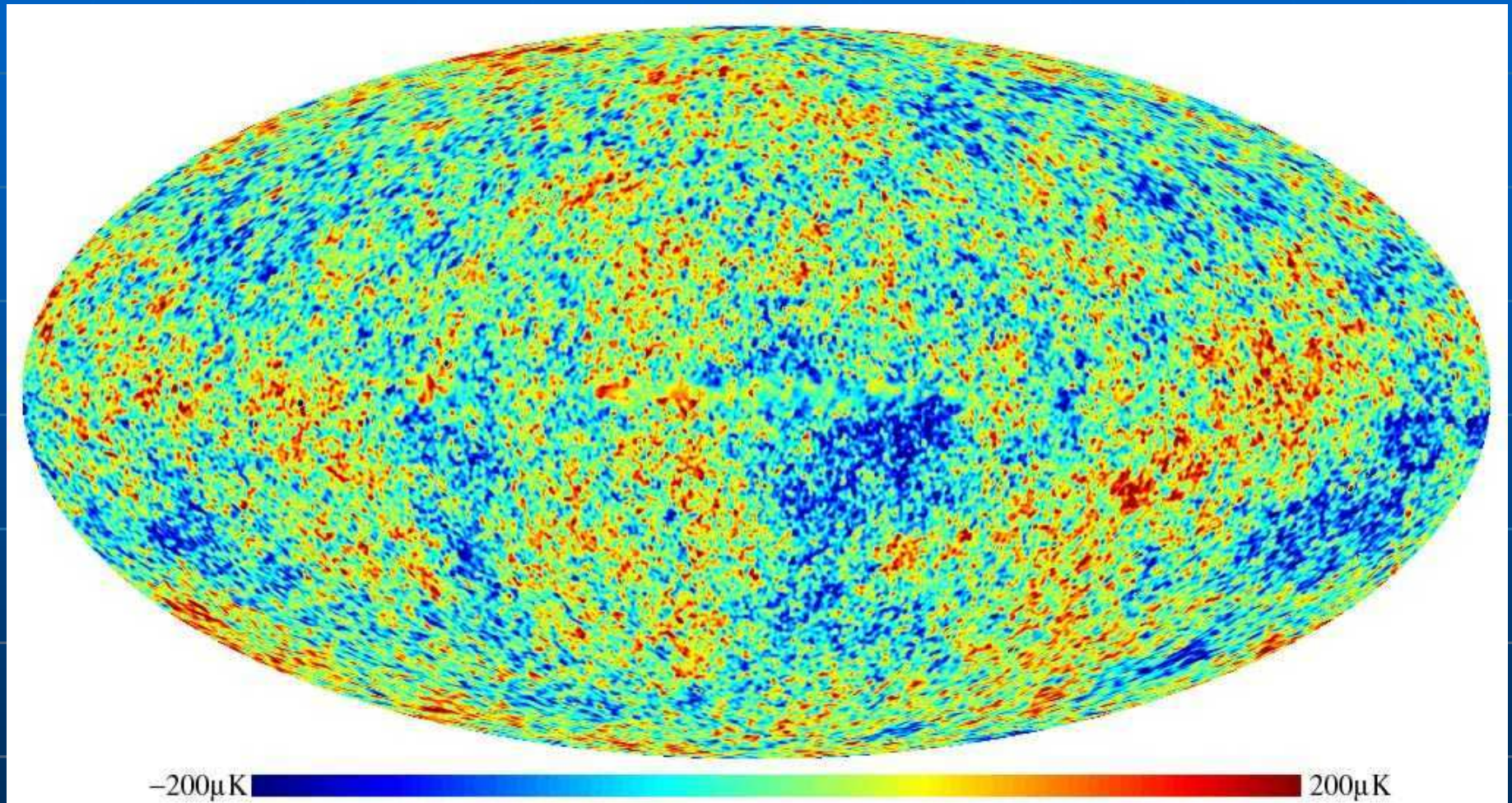
Vor der Rekombination: *Das Universum ist undurchsichtig.*
Nach der Rekombination: *Das Universum ist durchsichtig.*

Übergang ~300 000 Jahre nach dem Urknall!





Der Himmel im "Licht" der 2,7° K Strahlung



(nach WMAP)

Die Interpretation der Daten



Interpretation der Daten:

Geometrie des Universums:

“flach” (Euklidisch)

“Dunkle Energie”:

70%

“Dunkle Materie”:

26%

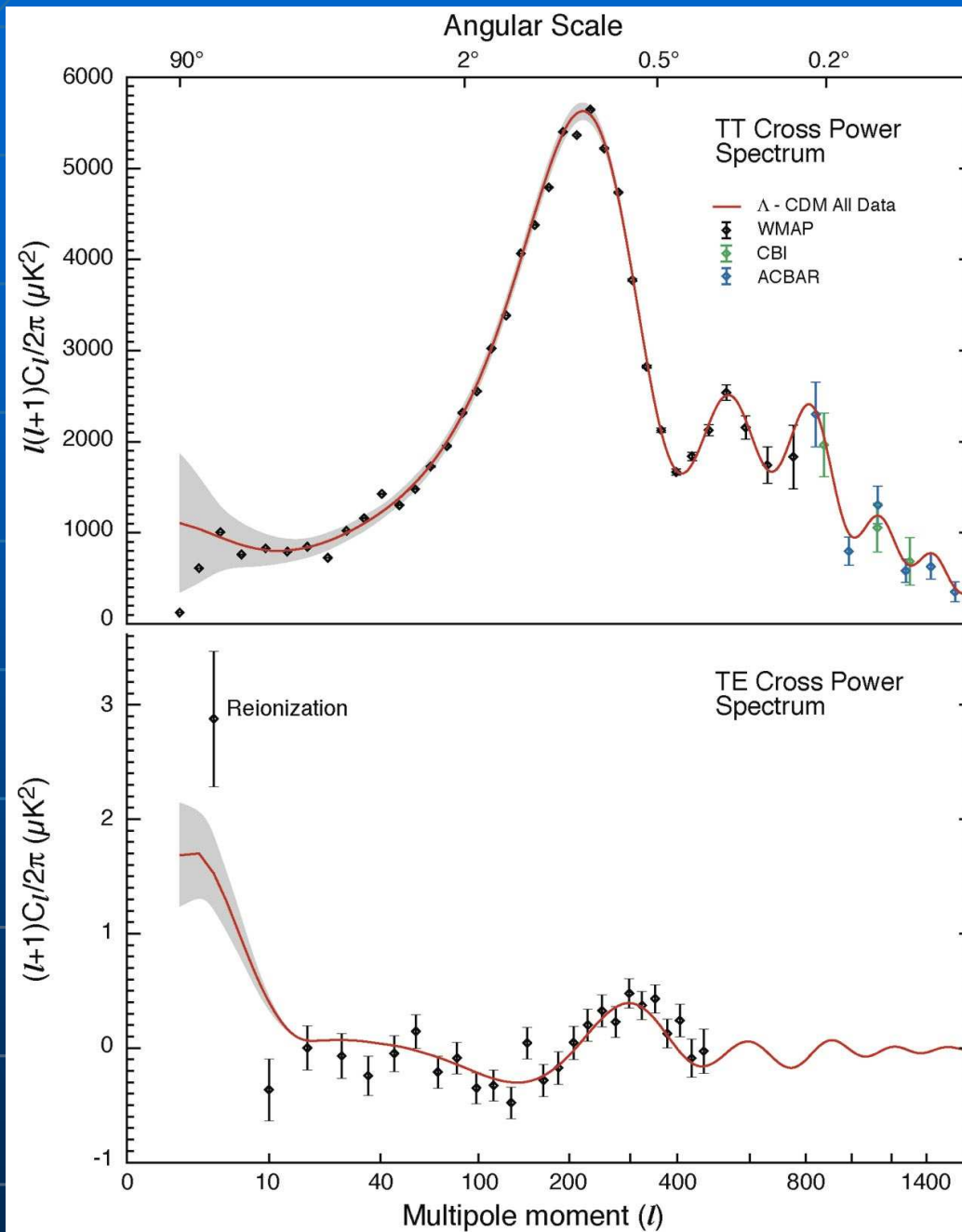
Baryonen:

4%

Alter des Universums:

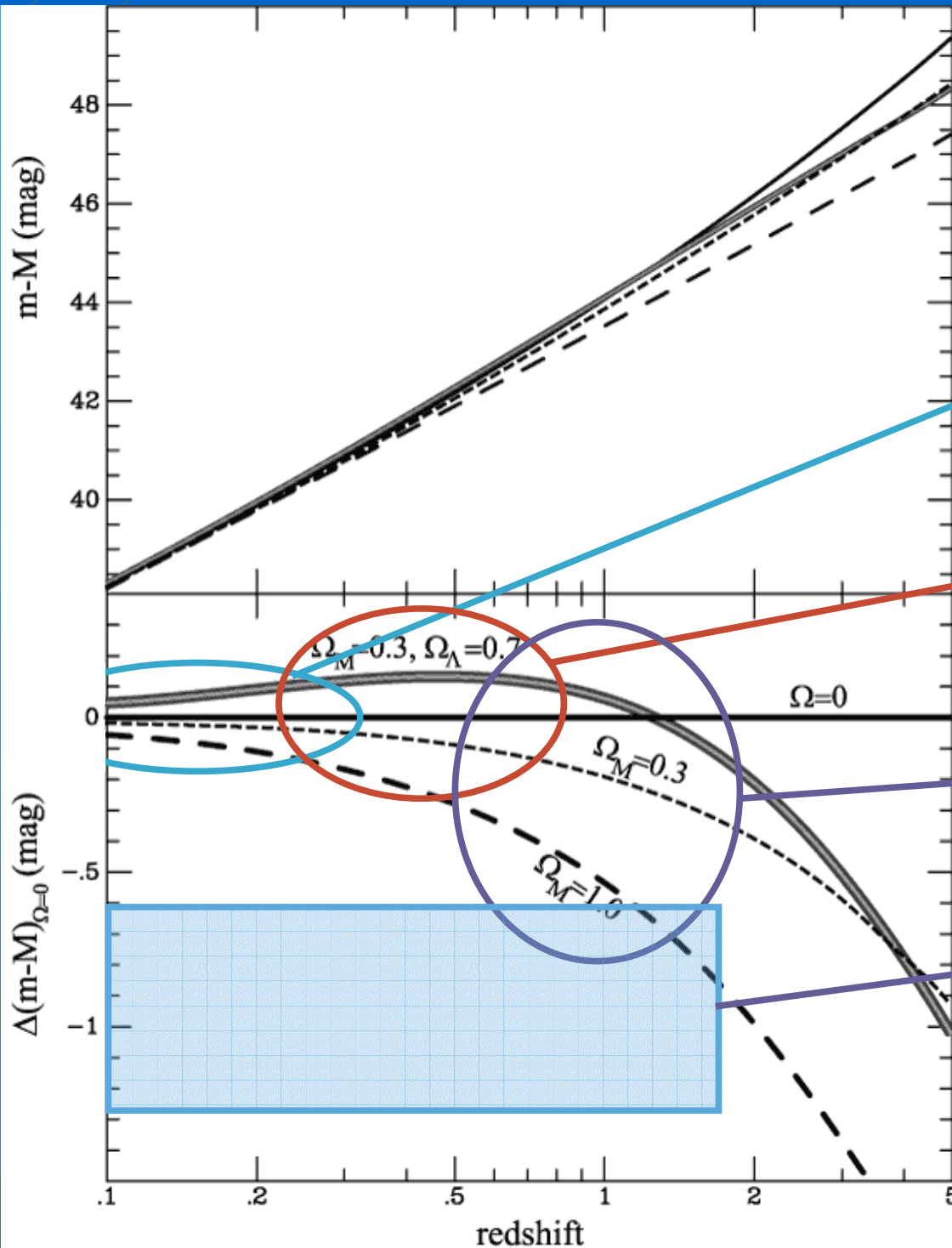
14 Milliarden Jahre

(Fehler < 5%)



Was bringt die Zukunft?

SN Projekte



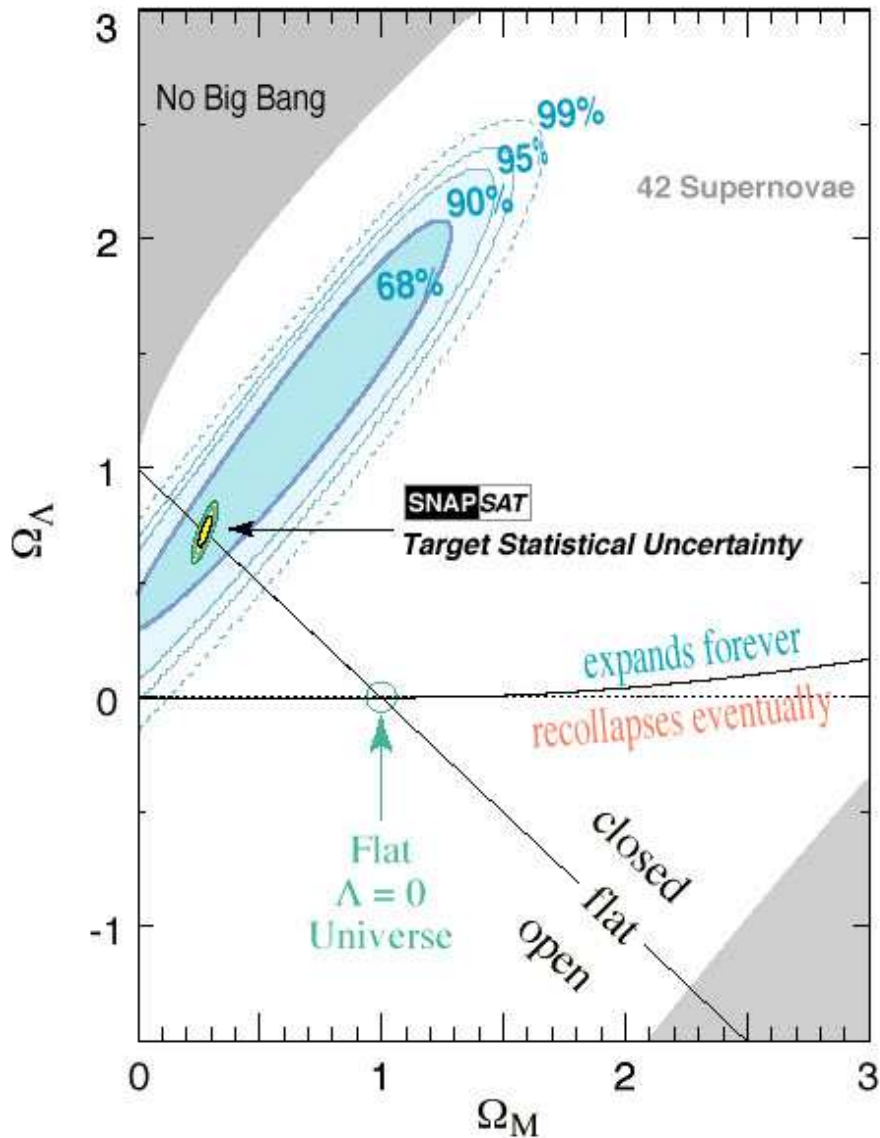
SN Factory
Carnegie SN Projekt

ESSENCE
CFHT Legacy Survey

Hohe-z SN Suche
(GOODS)

SNAP
(Supernova
acceleration
Probe)

Supernova Cosmology Project
Perlmutter *et al.* (1998)



SNAP: "Supernova/Acceleration Probe"

**“Es gibt eine Theorie, die behauptet:
Sobald irgend jemand herausfindet, was genau
es mit dem Universum auf sich hat, und warum
es hier ist, wird es sofort verschwinden und
durch etwas ersetzt, das noch bizarrer und
unerklärlicher ist.”**

**“Es gibt eine andere Theorie die sagt, das habe
bereits stattgefunden.”**

Douglas Adams