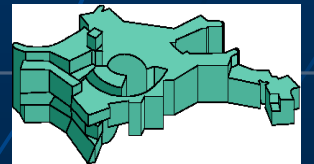


# Supernovae und das beschleunigt expandierende Universum

Wolfgang Hillebrandt  
MPI für Astrophysik  
Garching



Karl Rahner Akademie Köln  
27. April 2005



Wie alles begann ...

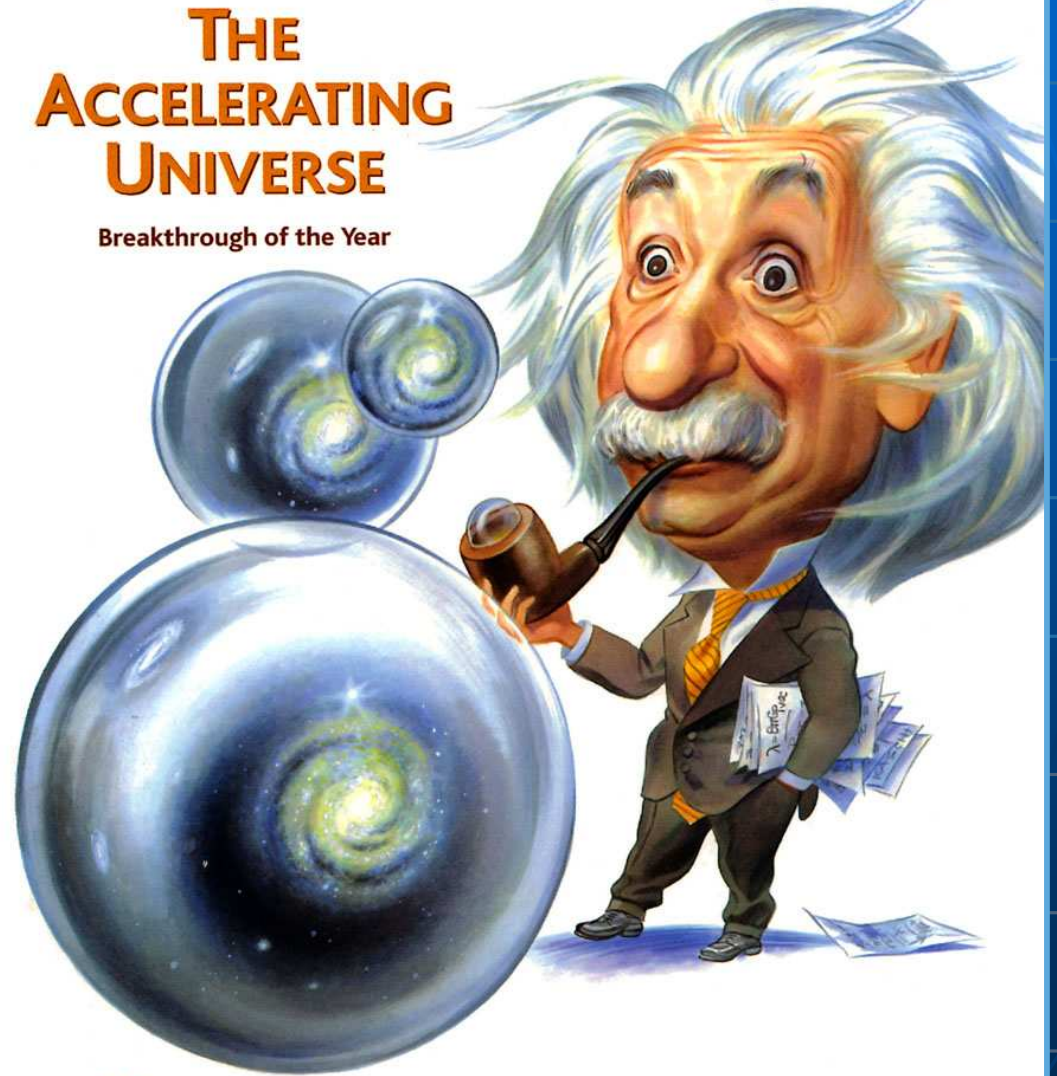
# Science

18 December 1998

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

## THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year



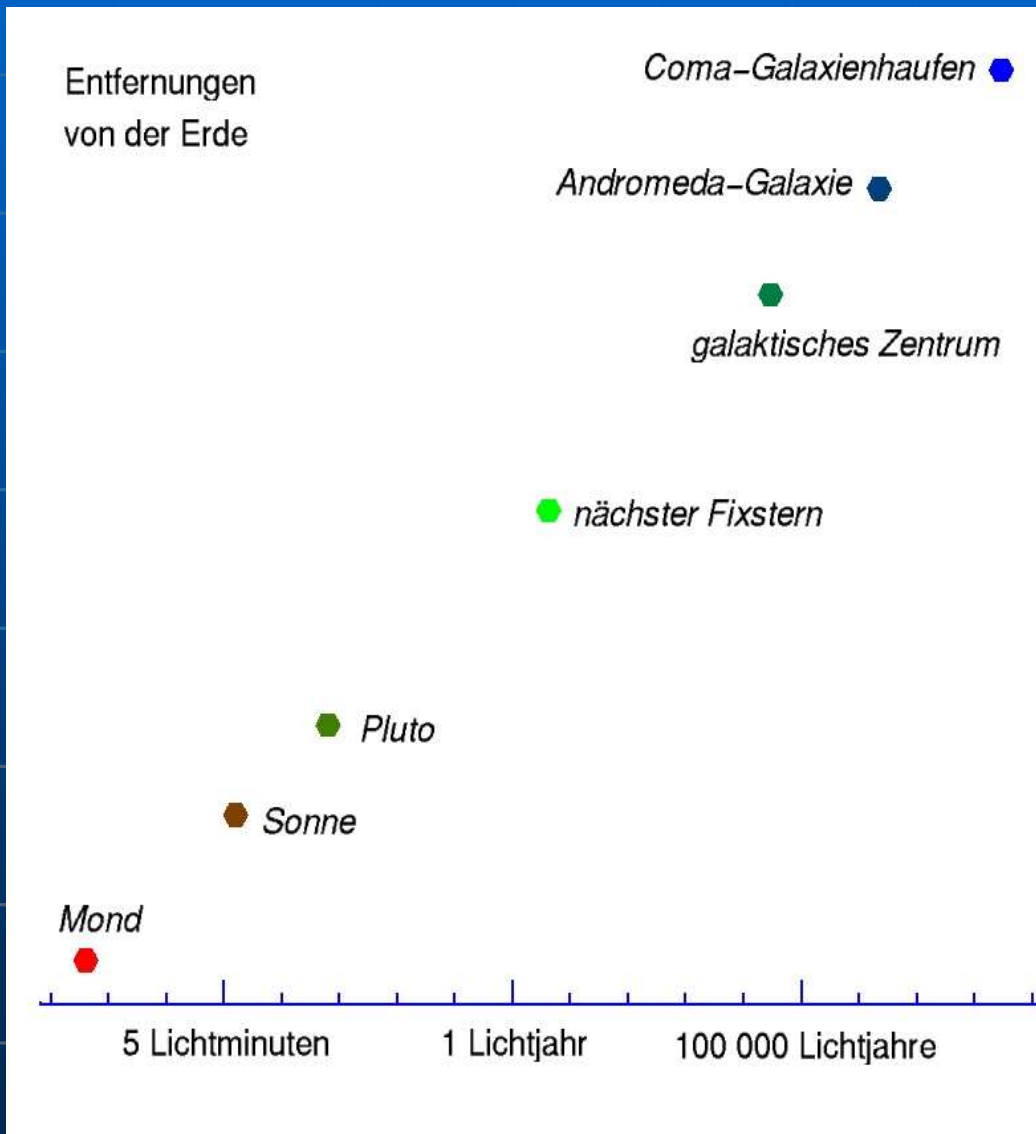
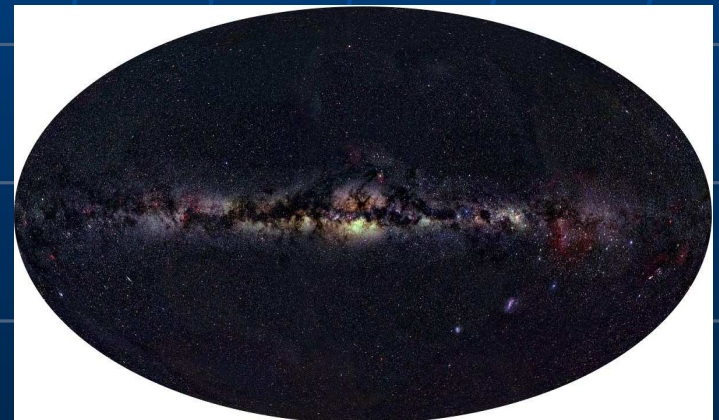
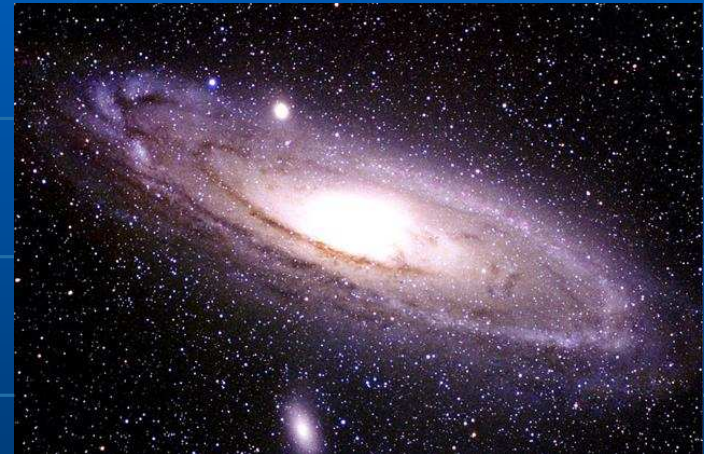
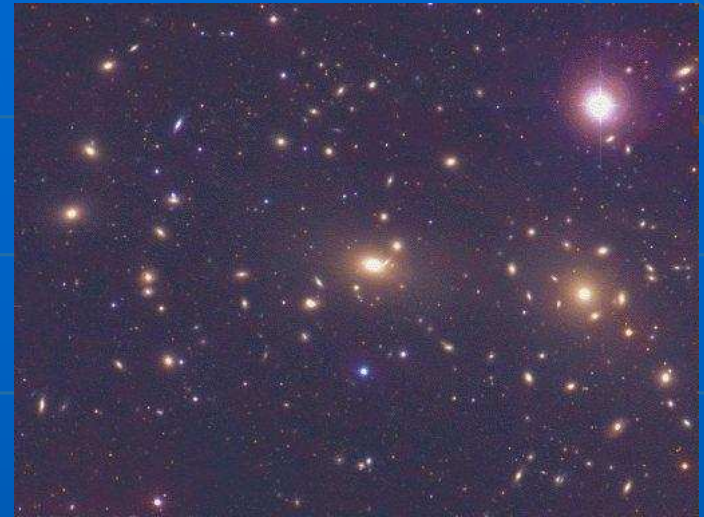
AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

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



# Unsere kosmische Nachbarschaft:

1 Lichtjahr = 9,46 Billionen km!



# Astronomie: Blicke in die Vergangenheit!



Galaktisches Zentrum:

Auf der Erde lebten  
Neandertaler

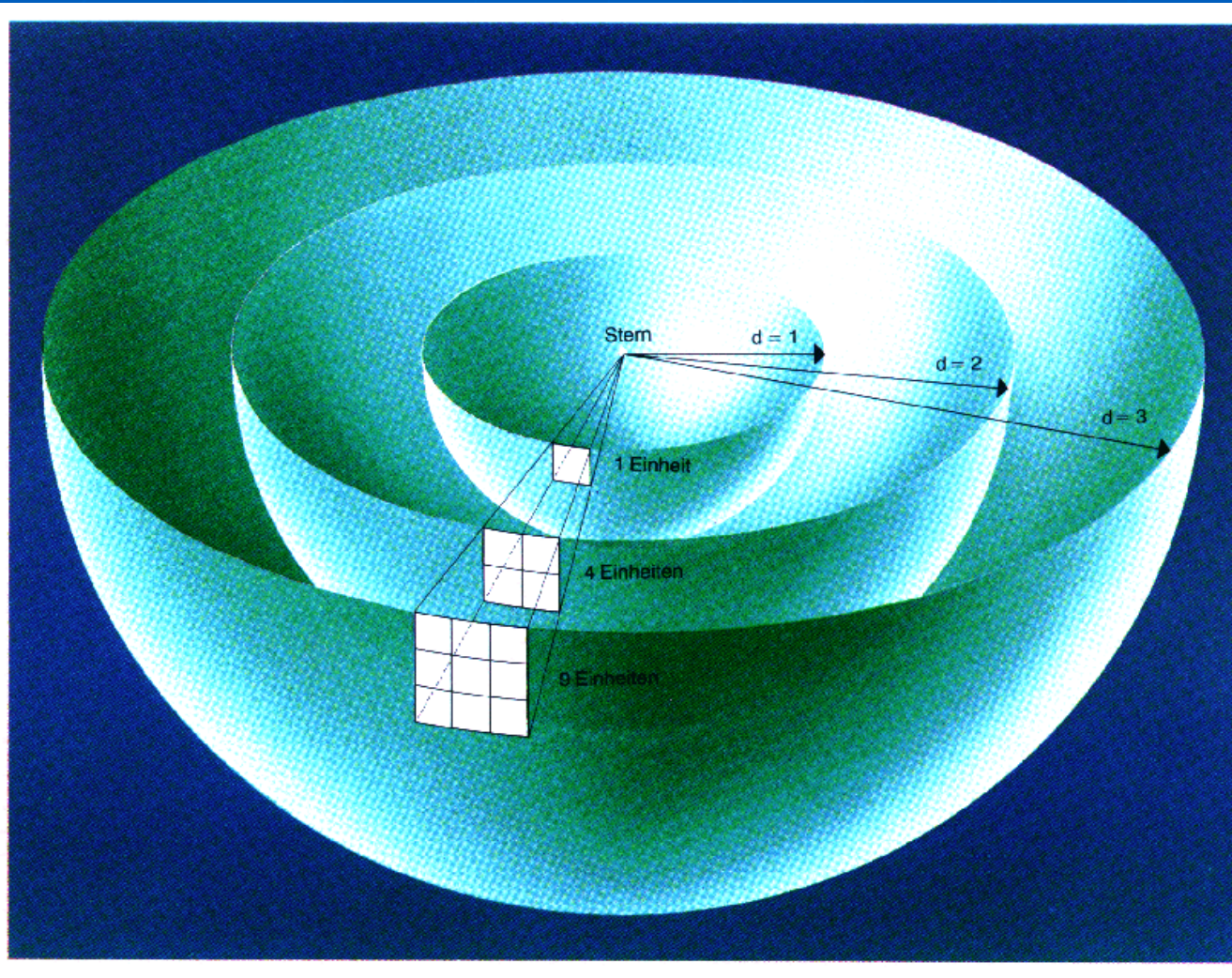
Andromeda-Galaxie:

Die Alpen entstehen

Der Coma-Haufen:

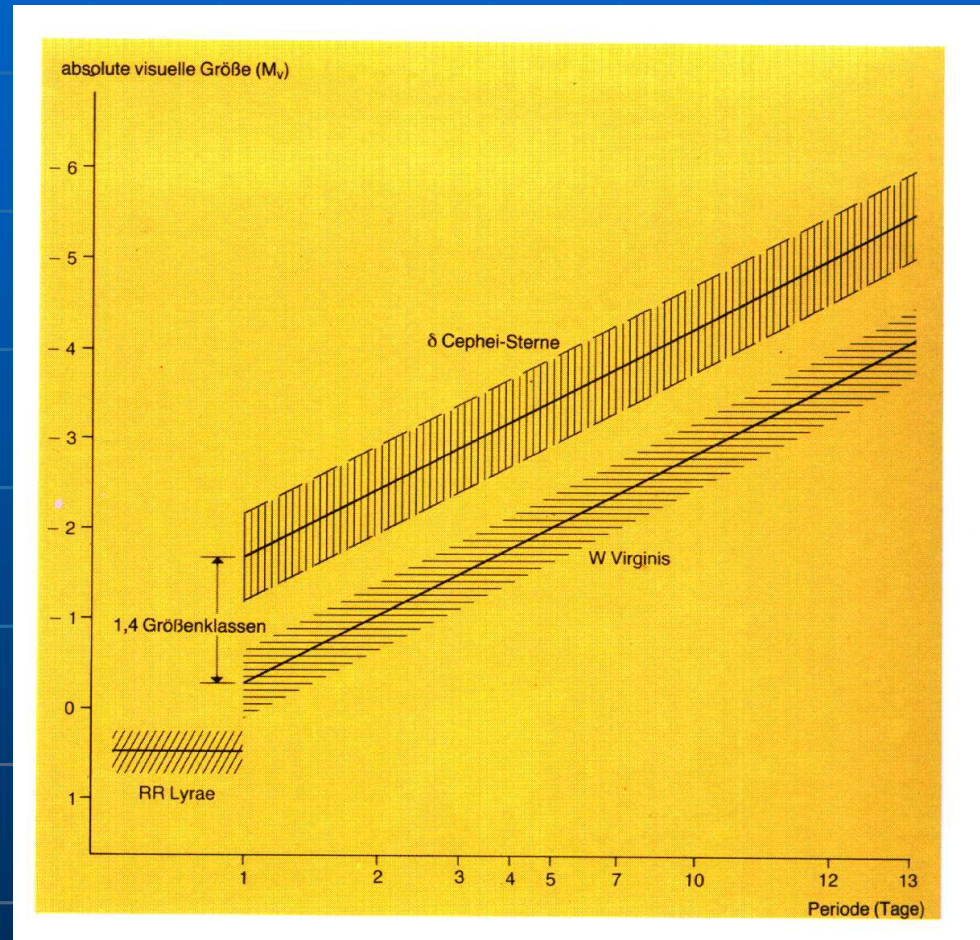
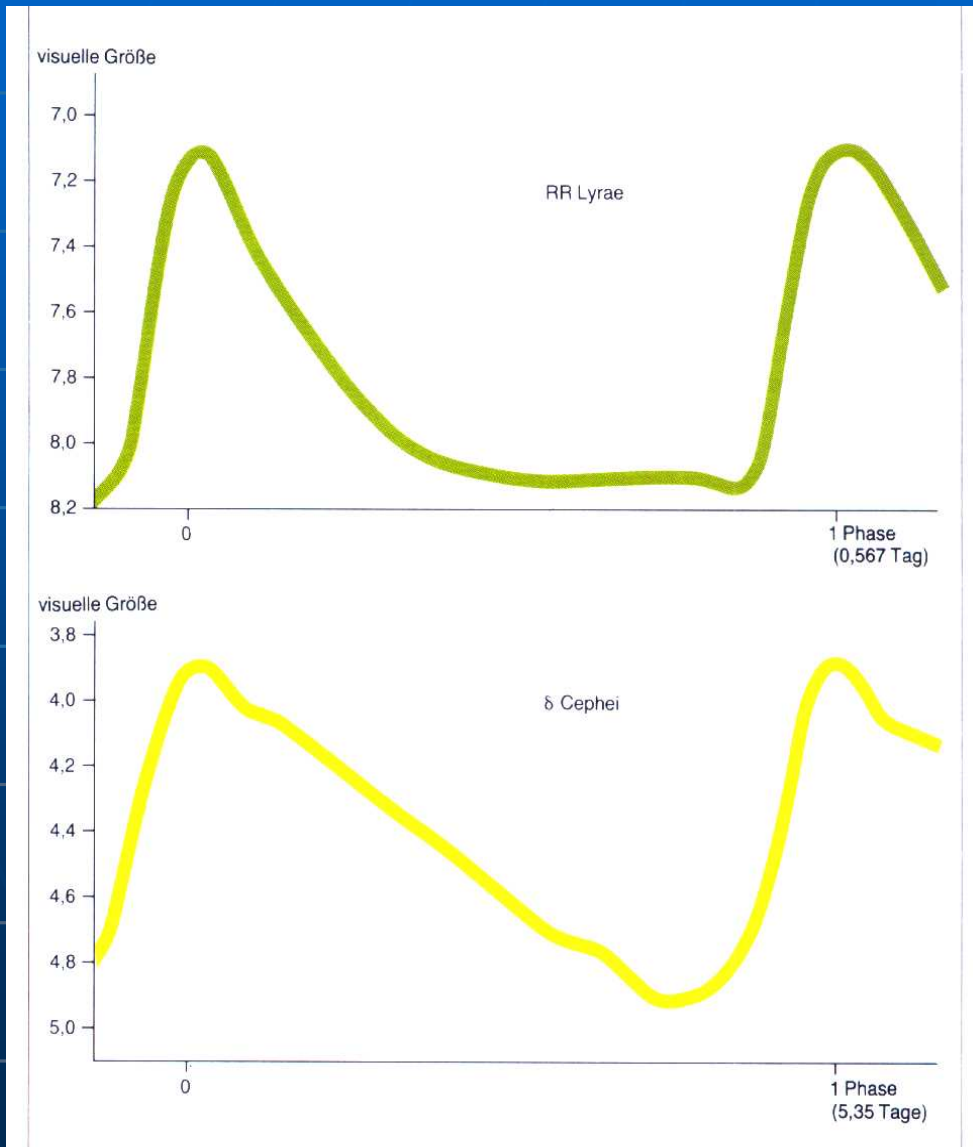
Archeopteryx flog

# Kosmische Entfernungsmessungen

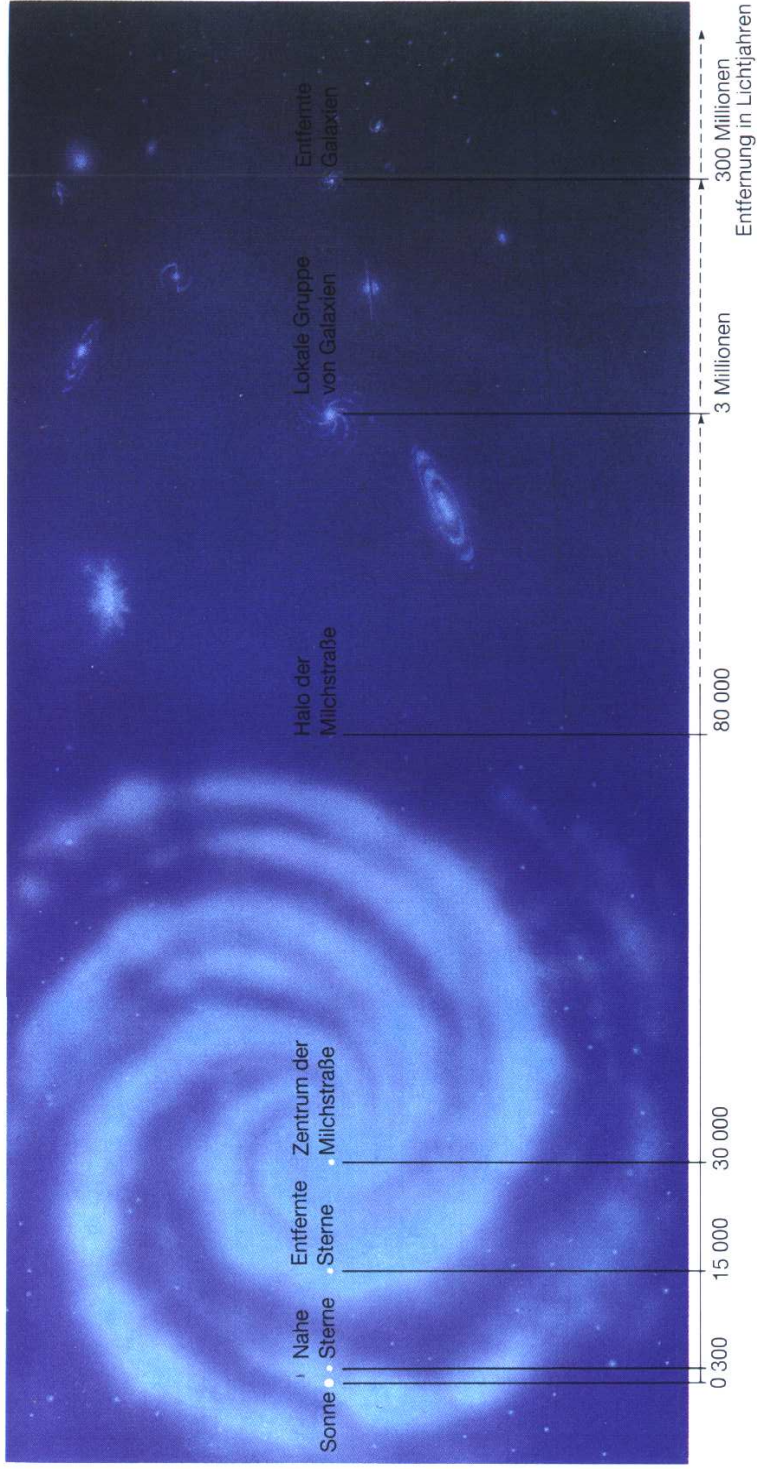


Das Prinzip  
der Standard-  
Kerzen

# Kosmische Entfernungsmessungen

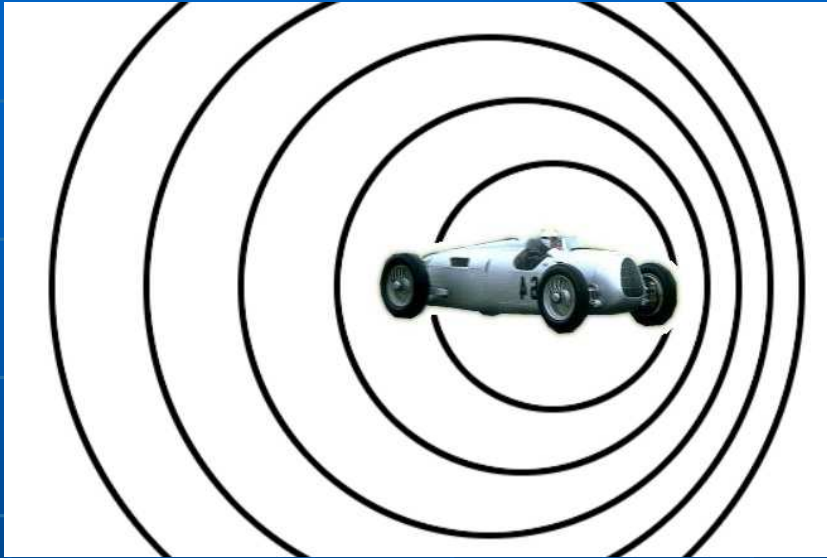


Variable Sterne: “Kalibrierbare Standard-Kerzen”?



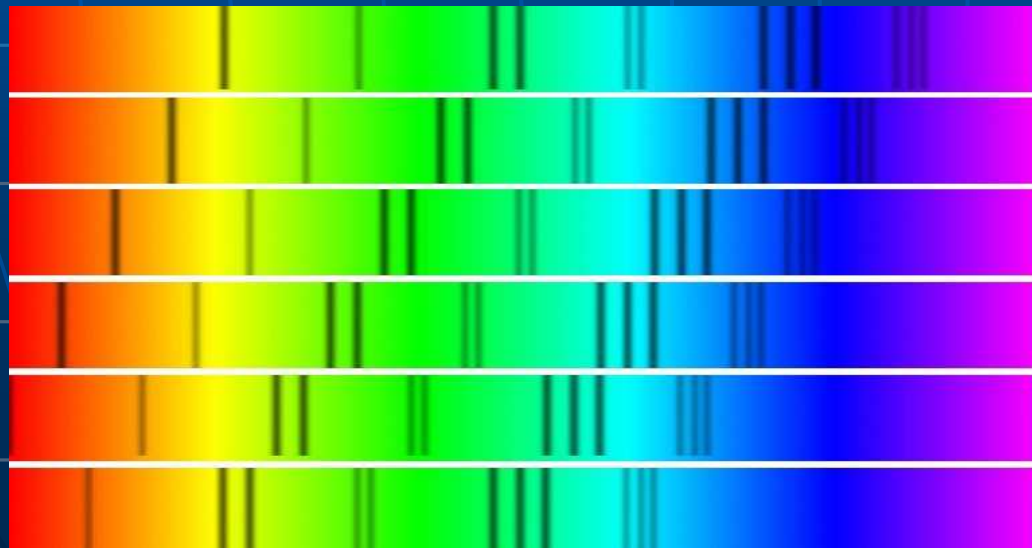


# Dopplereffekt und Galaxienflucht



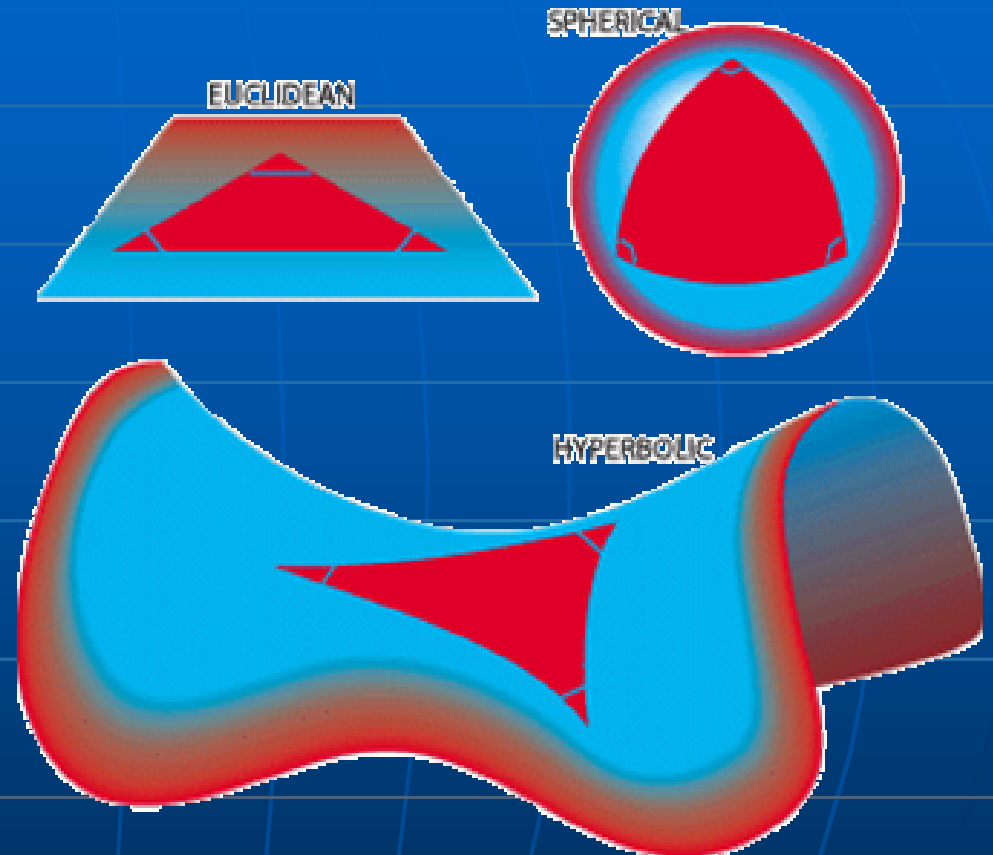
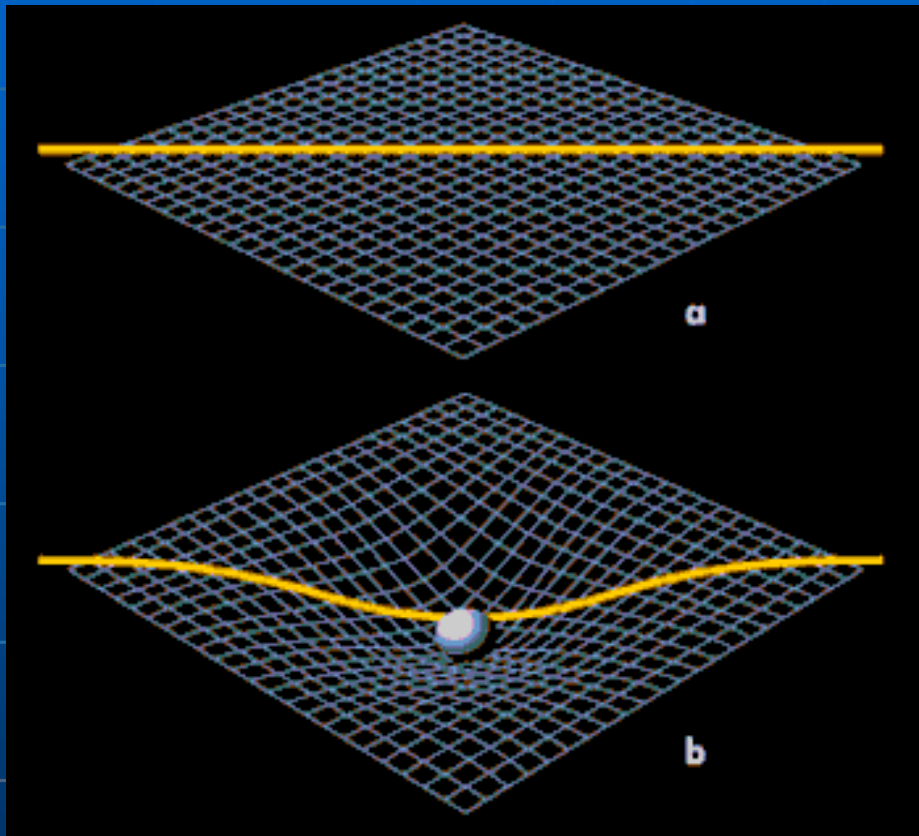
Wenn sich ein Stern oder ein Galaxie von uns wegbewegt:

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

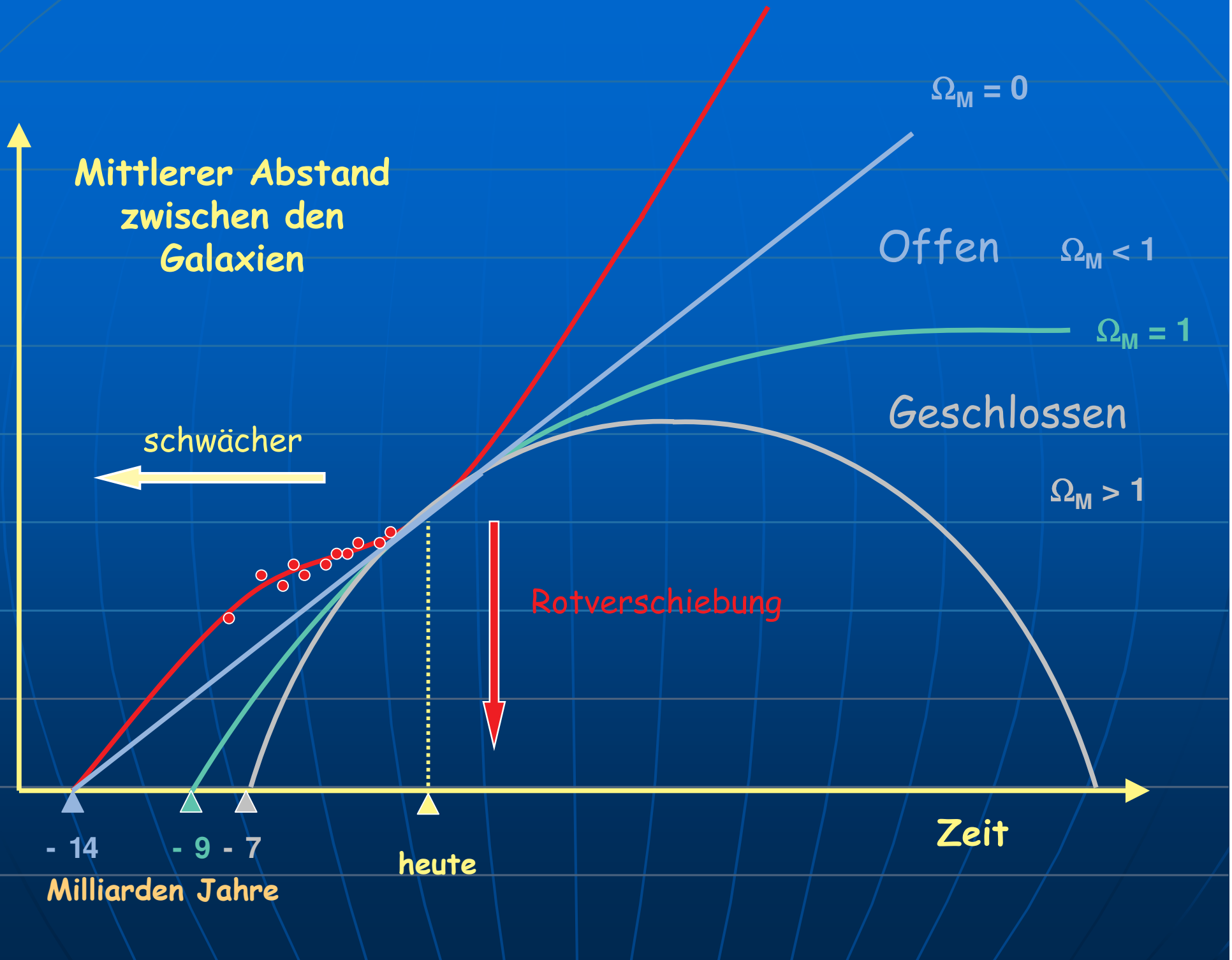
Rotverschiebung

- 14  
Milliarden Jahre

- 9 - 7

heute

Zeit



# Supernovae als Standardkerzen?

Supernova (SN) 1604 (“Keplers Supernova”)



# Was ist eine (Typ Ia) Supernova?

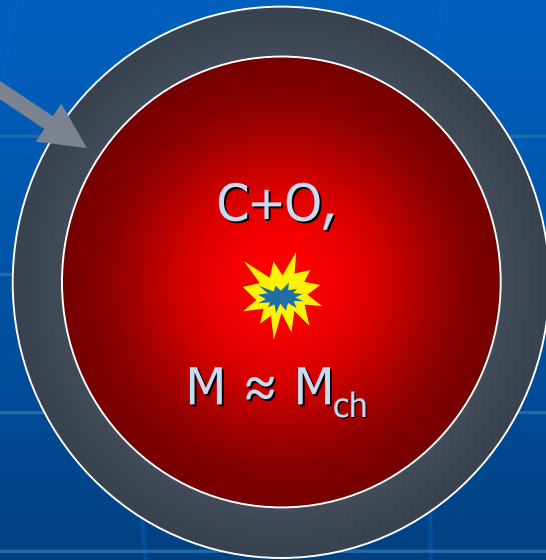


# Tycho Brahes Supernova: SN 1572



# Wie explodieren Typ Ia Supernovae?

He (+H)  
vom  
Begleitstern



Explosionsenergie:

*Fusion von*  
*C+C, C+O, O+O*  
*⇒ "Fe"*

Laminare Brenn-  
geschwindigkeit:

$U_L \sim 100 \text{ km/s} \ll U_S$

*Zu wenig wird*  
*verbrannt!*

Dichte  $\sim 10^9 - 10^{10} \text{ g/cm}^3$

Temperatur: einige  $10^9 \text{ K}$

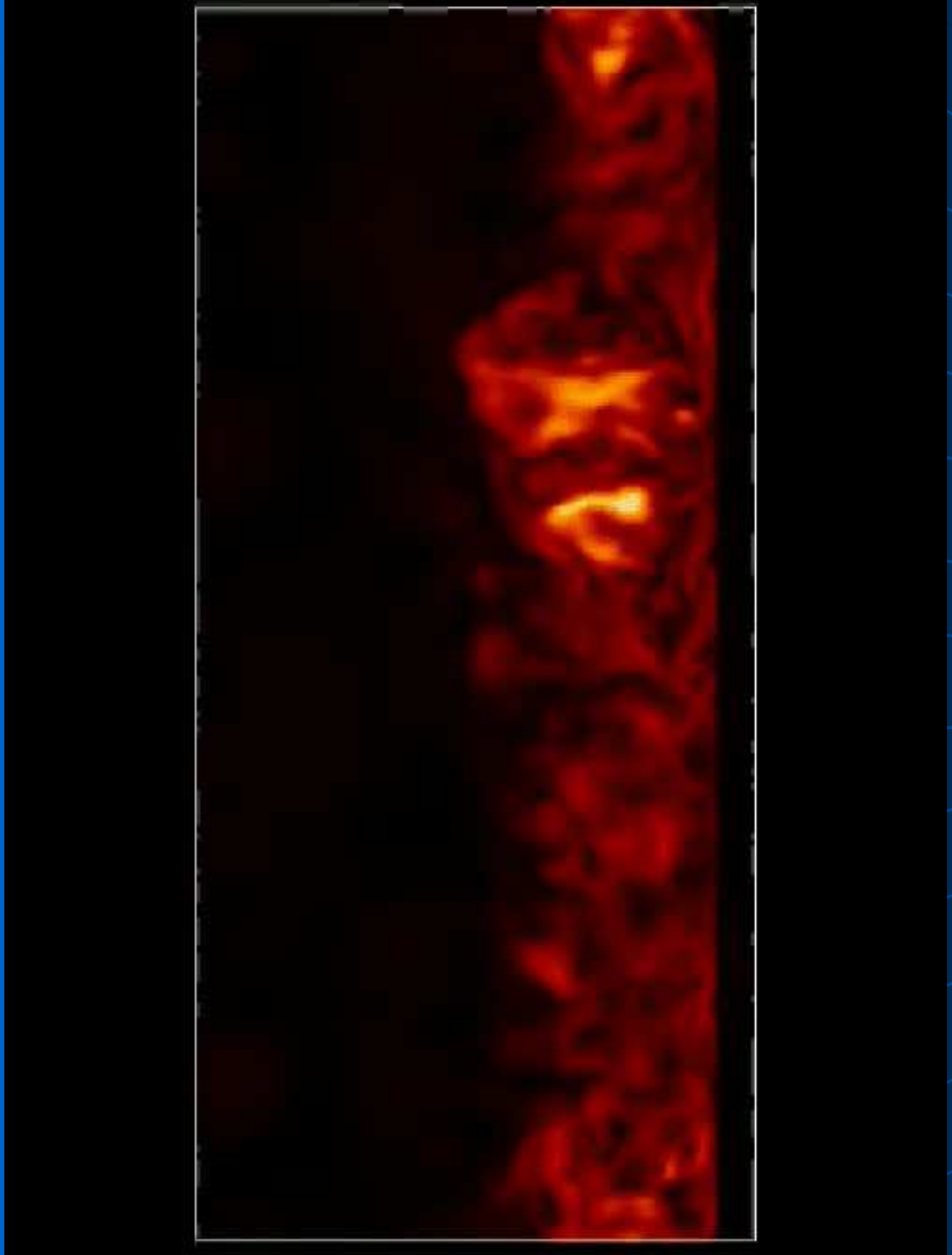
Radien: einige 1000 km

# Die Physik turbulenter Verbrennung...

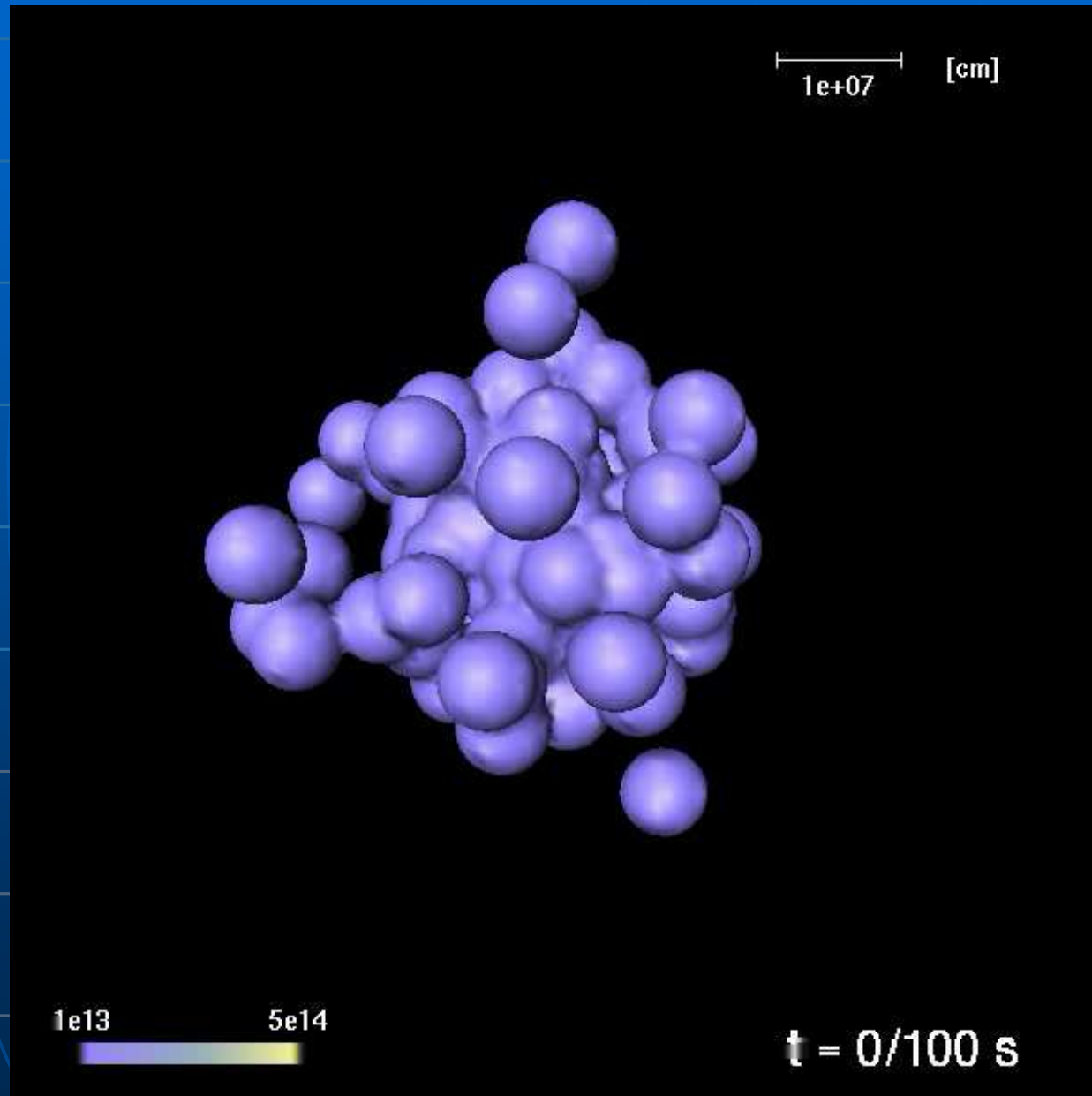
- ∅ Tägliche Erfahrung:  
*Turbulenz vergrößert die Brenngeschwindigkeit.*
- ∅ Im Grenzfall starker Turbulenz:  
 $U_B \sim V_T!$
- ∅ Physik  
thermonuklearen „Brennens“ ist sehr ähnlich der vorge-mischter chemischer Flammen.



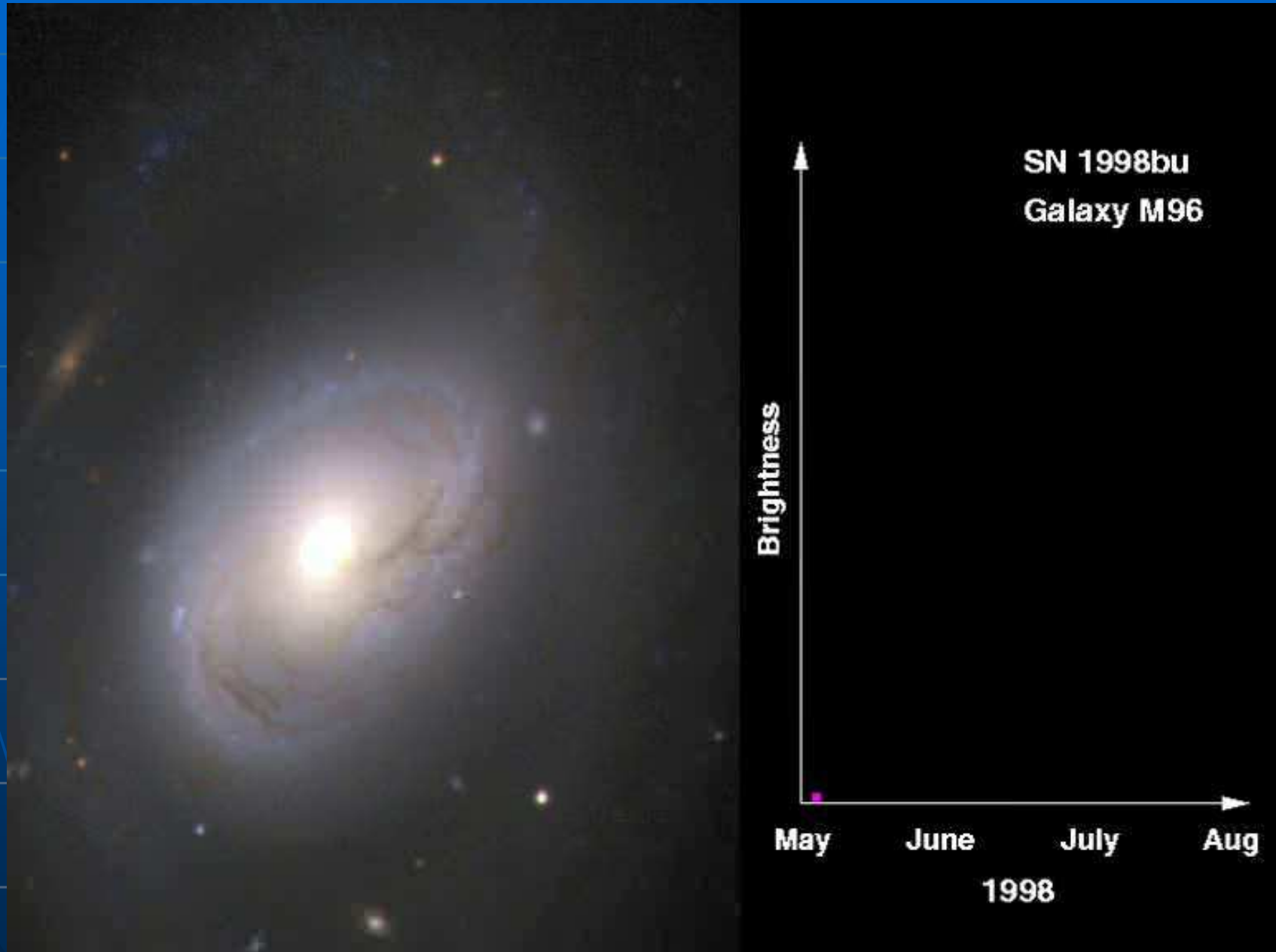




# ... und Supernova-Modellierung

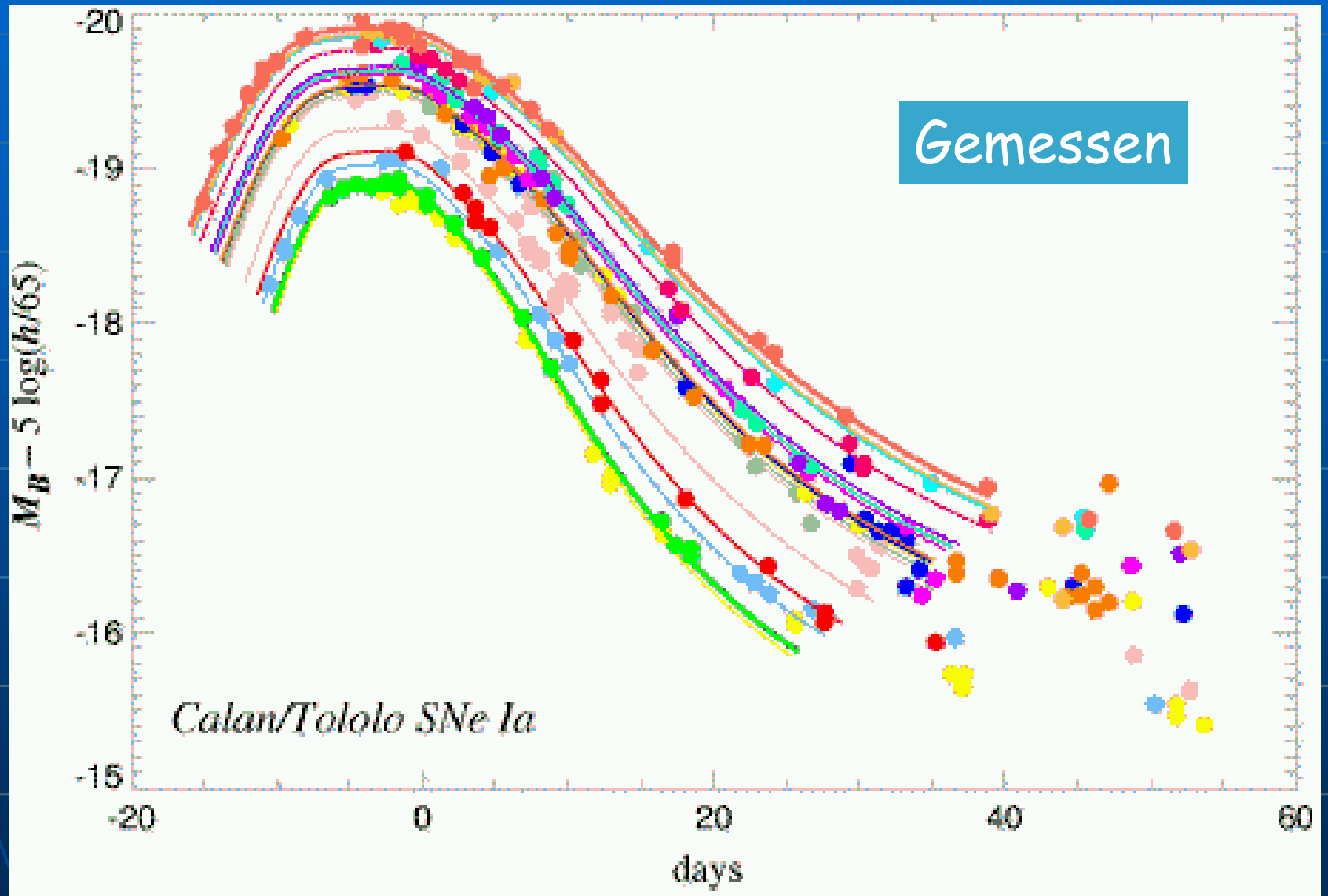


# Supernovae in entfernten Galaxien



# Lichtkurven von gut beobachteten SNe Ia

↑  
H  
E  
L  
L  
I  
G  
K  
E  
I  
T

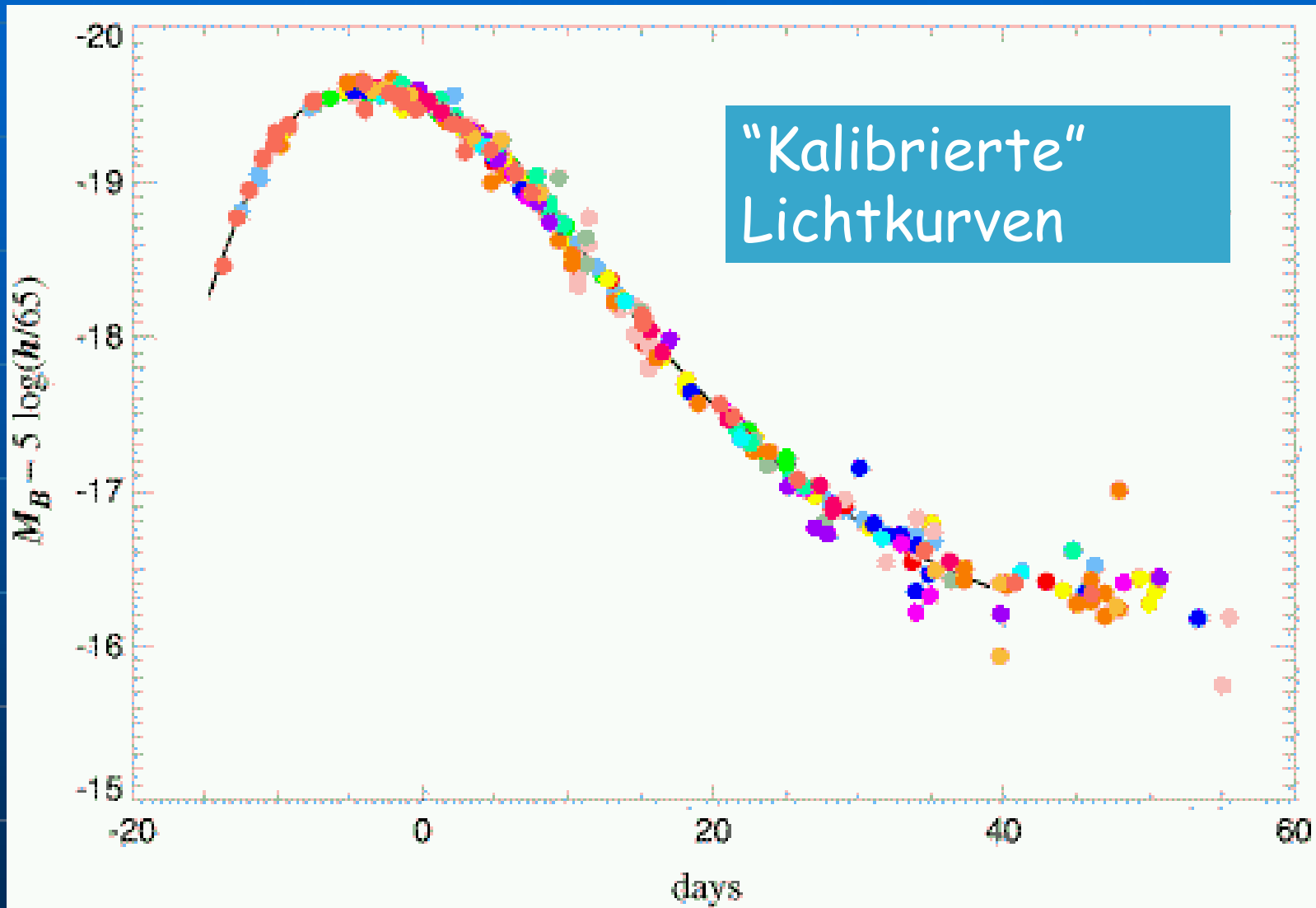


Zeit nach dem Maximum in Tagen



# Lichtkurven von gut beobachteten SNe Ia

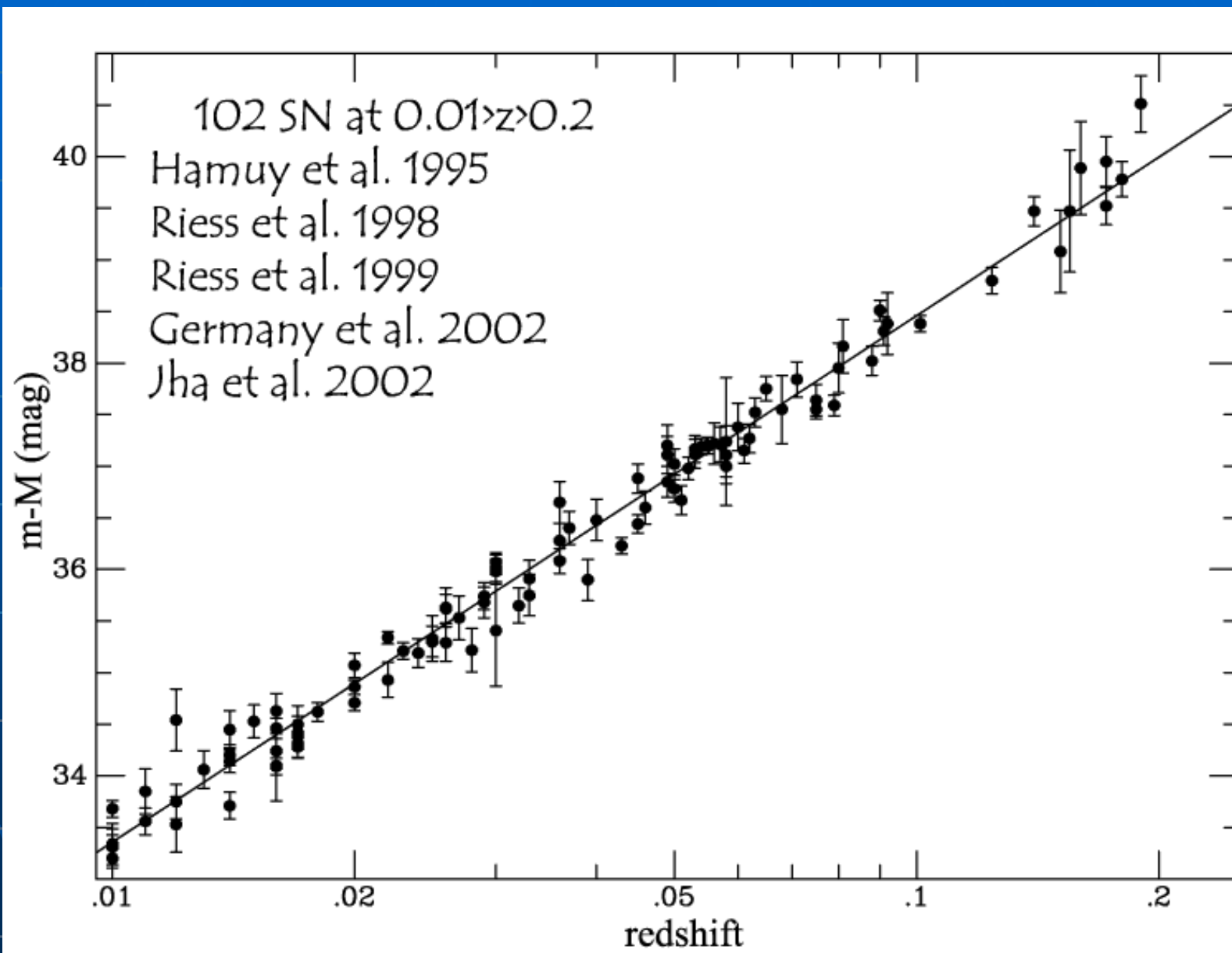
↑  
H  
E  
L  
L  
I  
G  
K  
E  
I  
T



Zeit nach dem Maximum in Tagen



# Das Hubble-Diagramm für nahe Supernovae



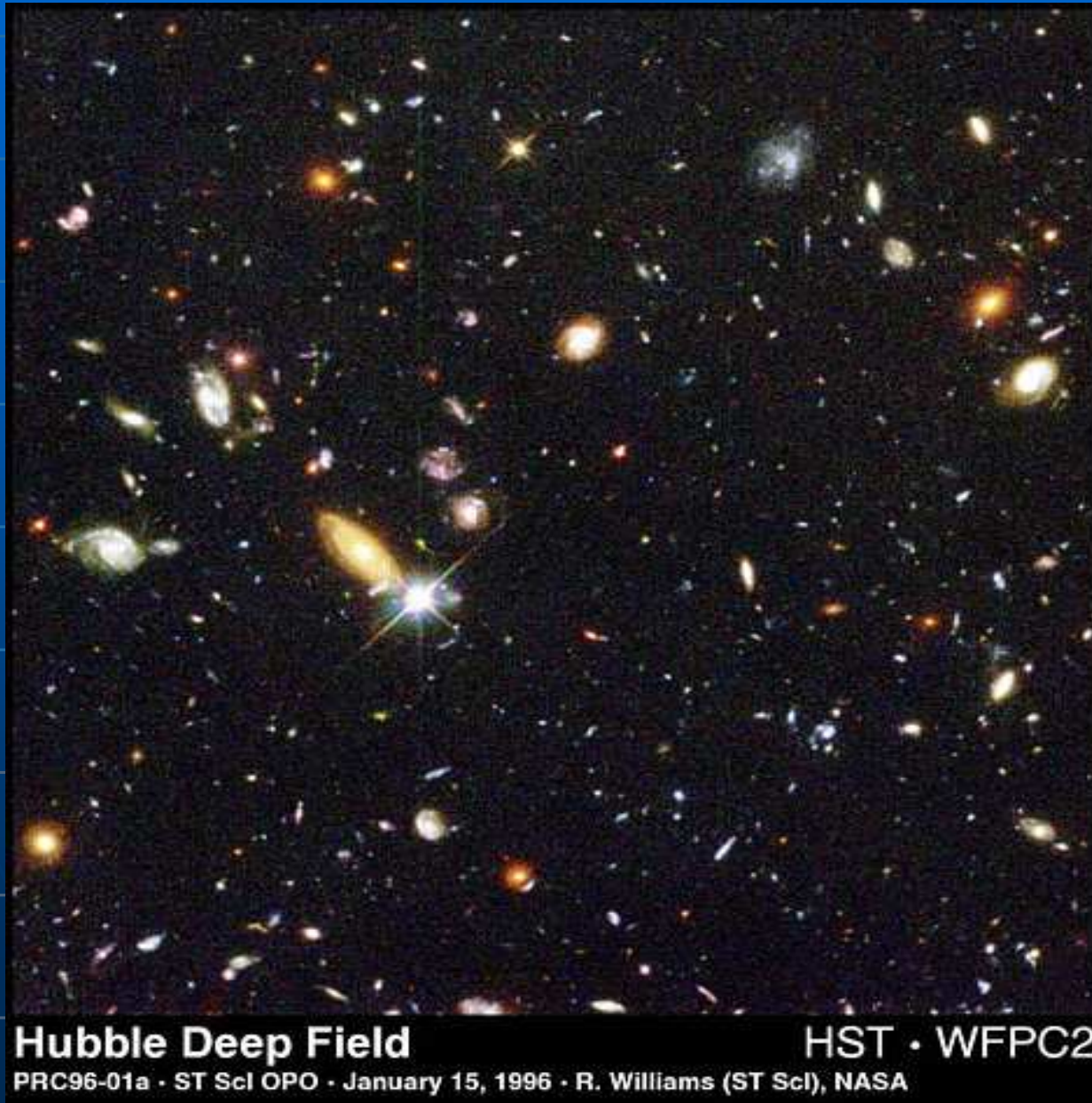
(nahe)

Rotverschiebung



(fern)

# Sehr weit entfernte Supernovae



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



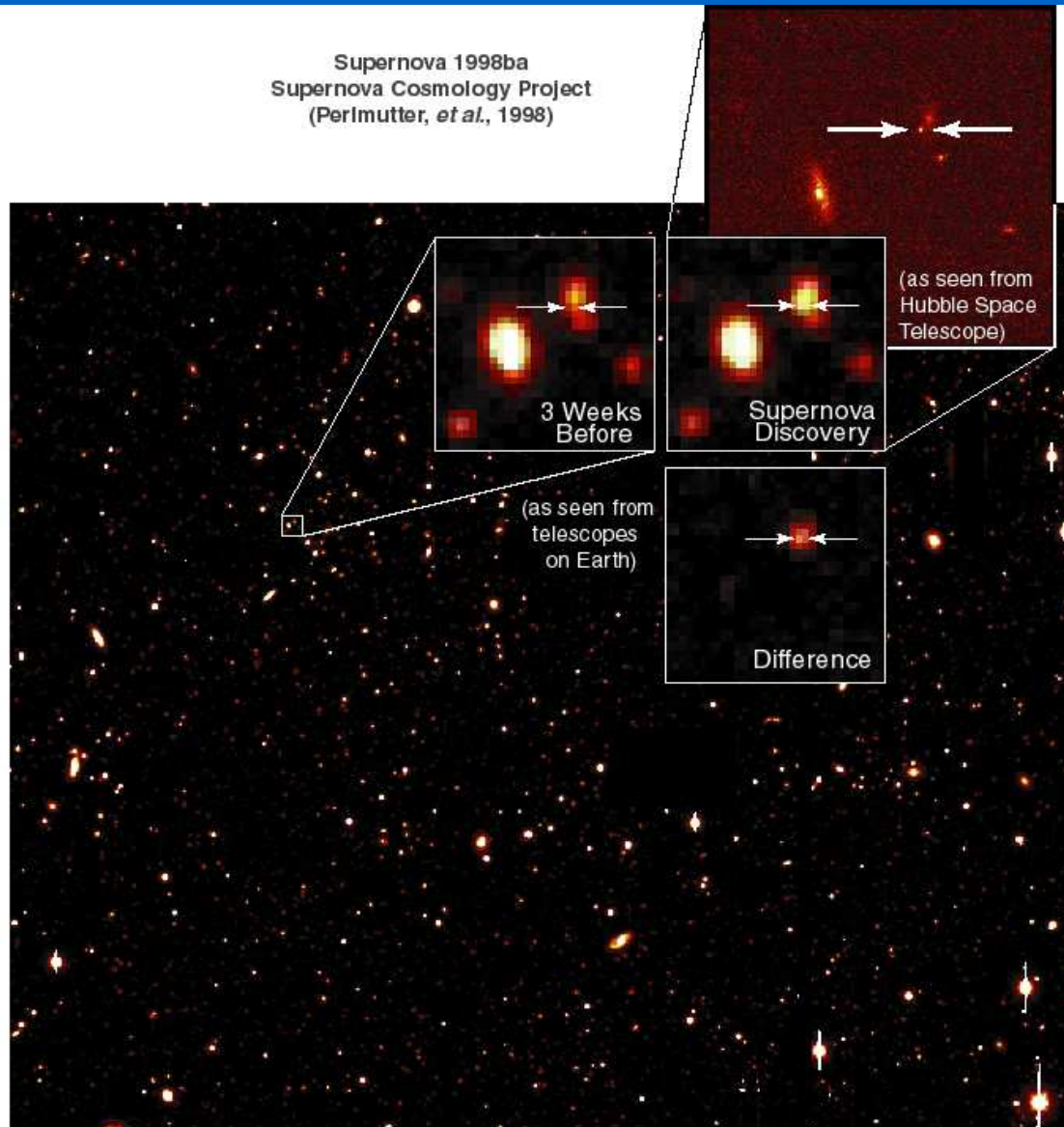
Man muß sehr viele Galaxien beobachten!

Hubble Deep Field

HST · WFPC2

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

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



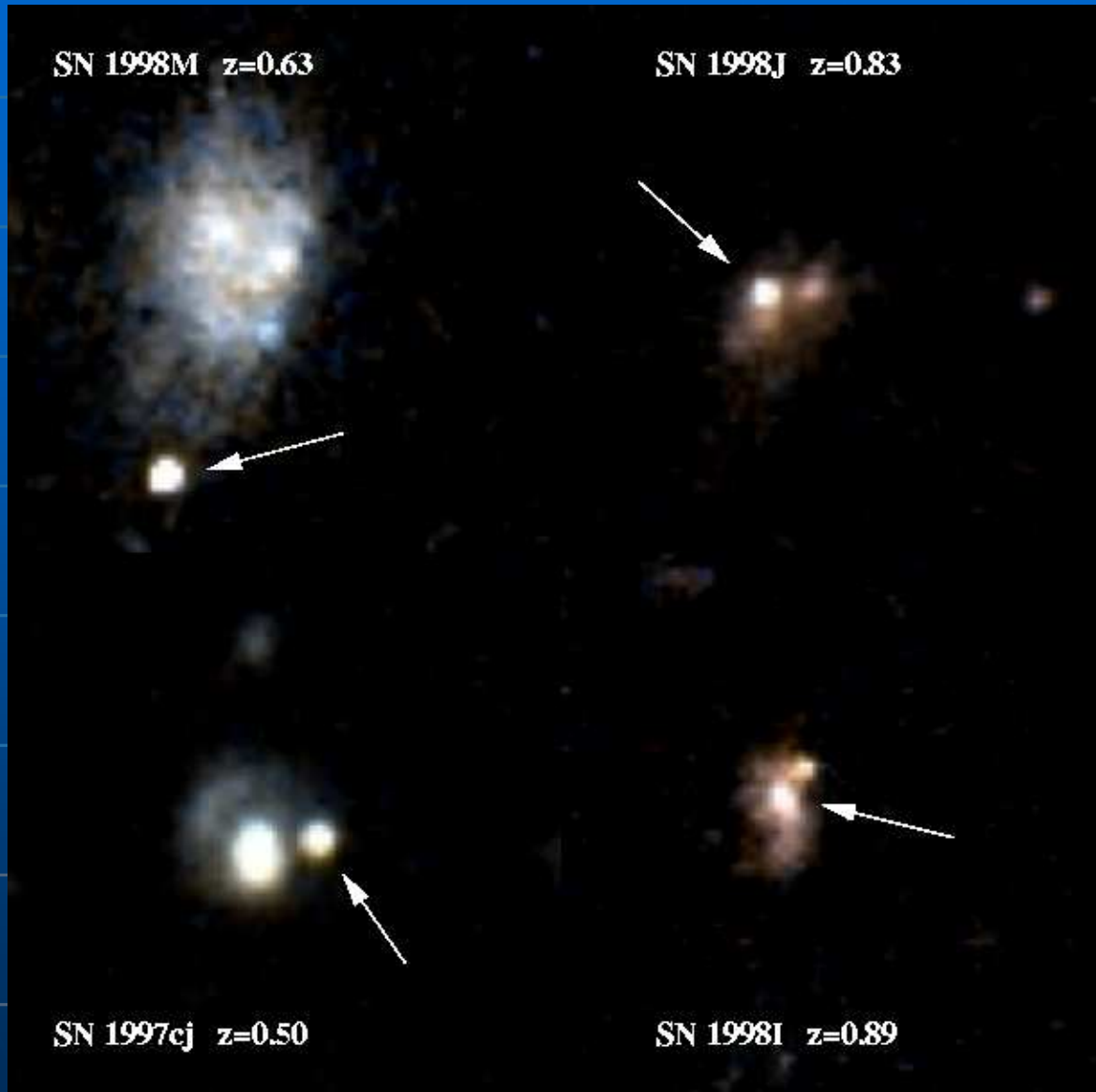
## Suchstrategie:

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

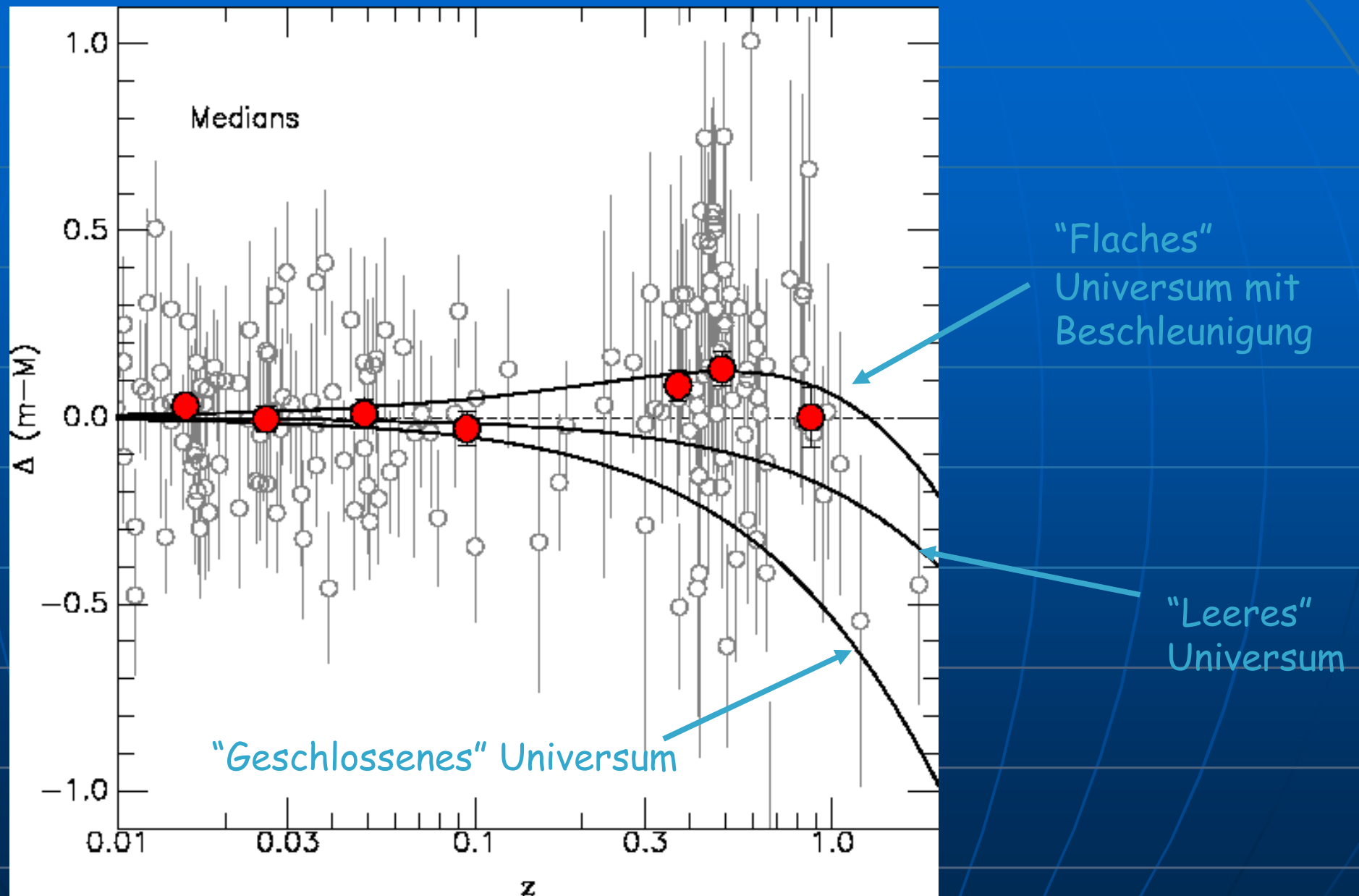


Supernovae werden bei Rotverschiebungen von  $Z > 0,4$  routinemäßig entdeckt:

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



# 209 SNe Ia und Mittelwerte



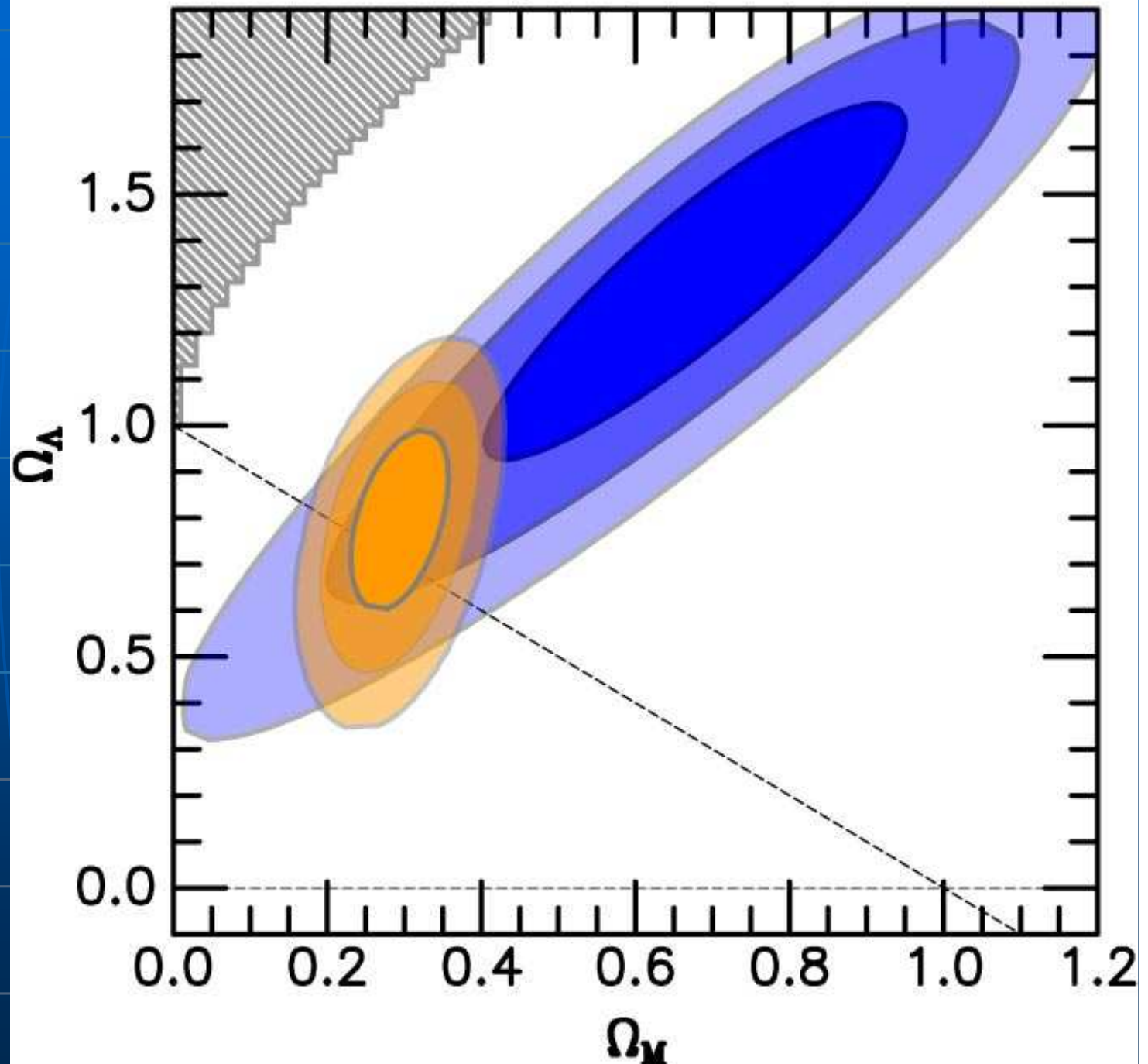
*Galaxien:*

$$\Omega_M = 0.2 \pm 0.03$$

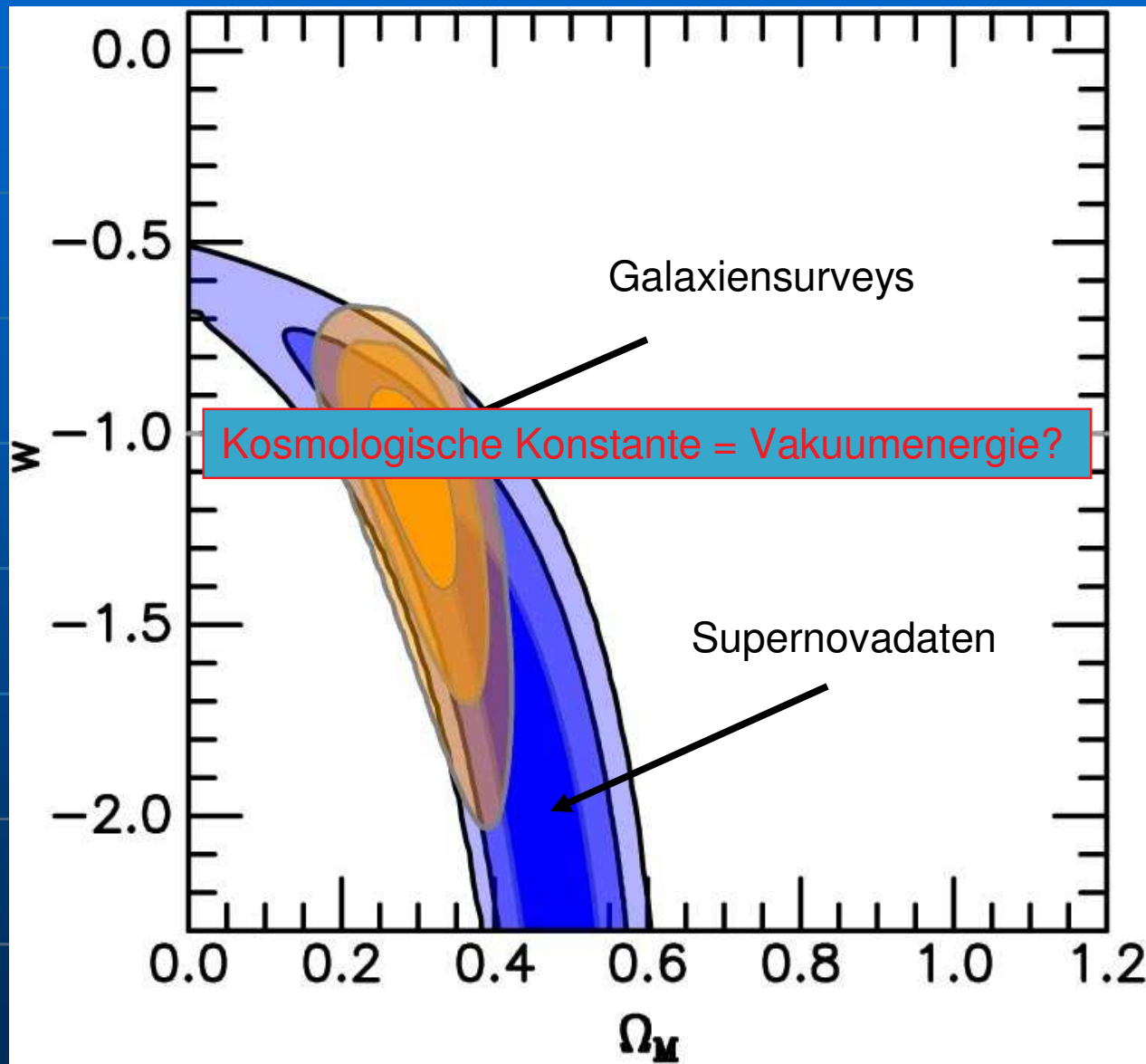
*Cepheiden:*

$$h = 0.72 \pm 0.08$$

Entire High-Z SN Ia Data Set



# Kosmologie und Typ Ia Supernovae



Die  
"Zustandsgleichung"  
des Universums:

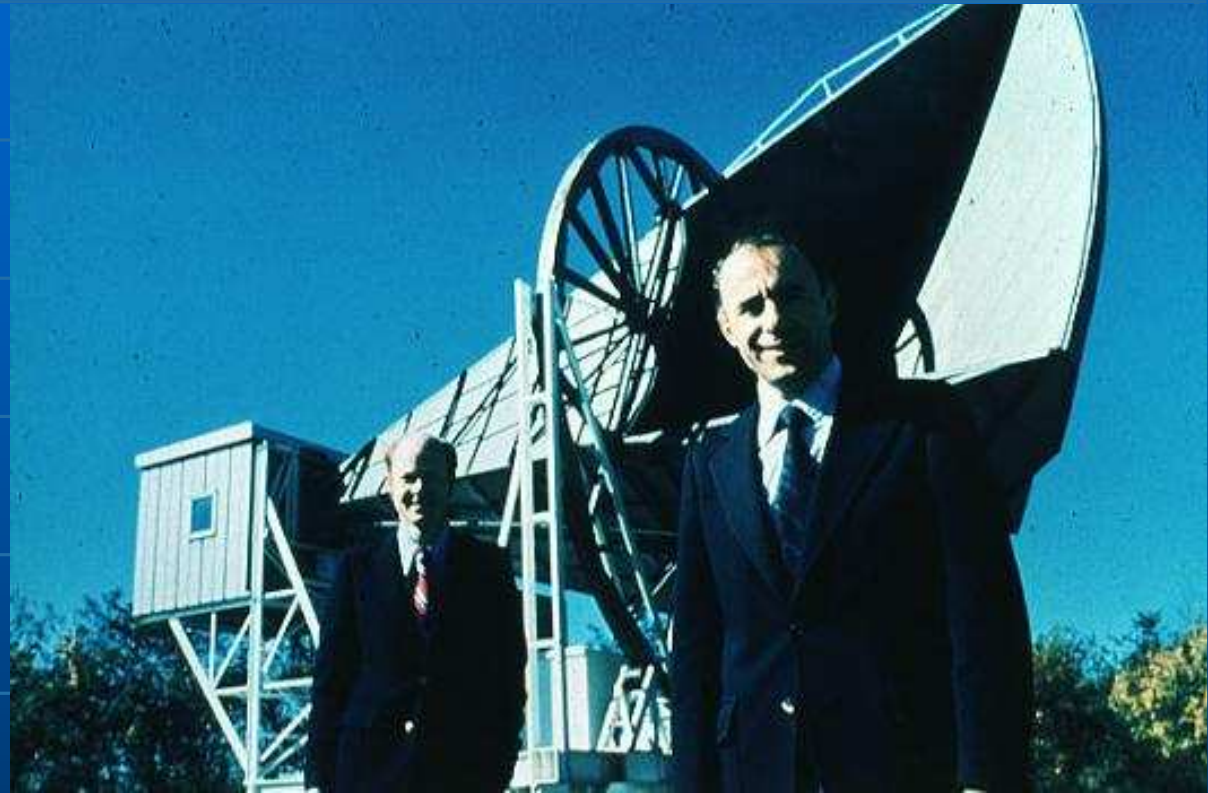
$$p = wp$$

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

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

Beschleunigung!

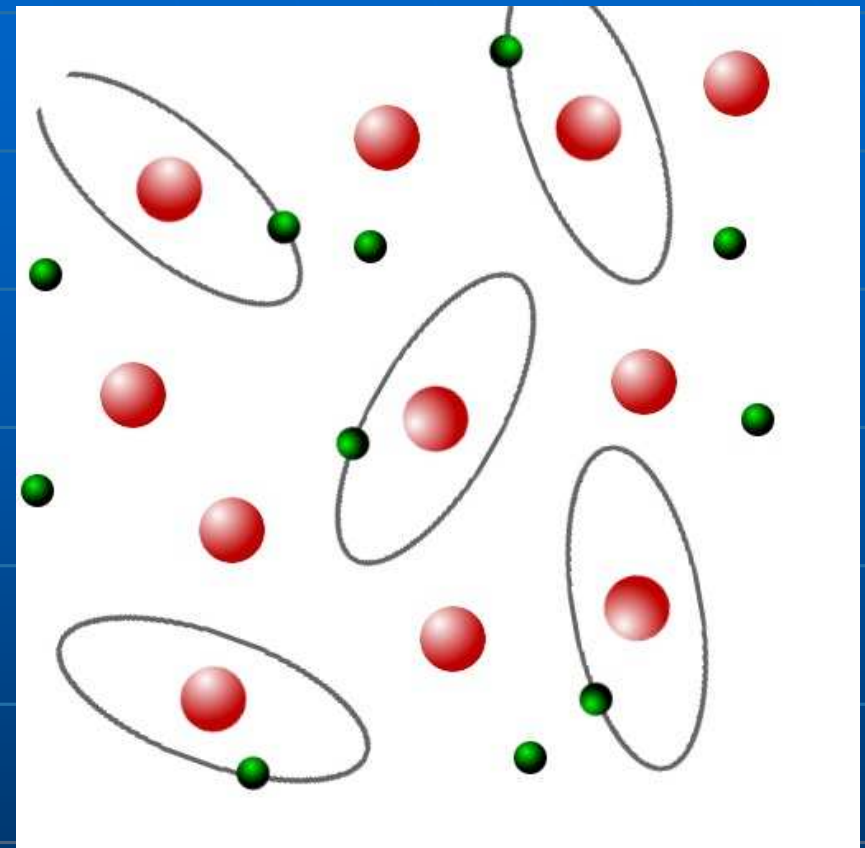
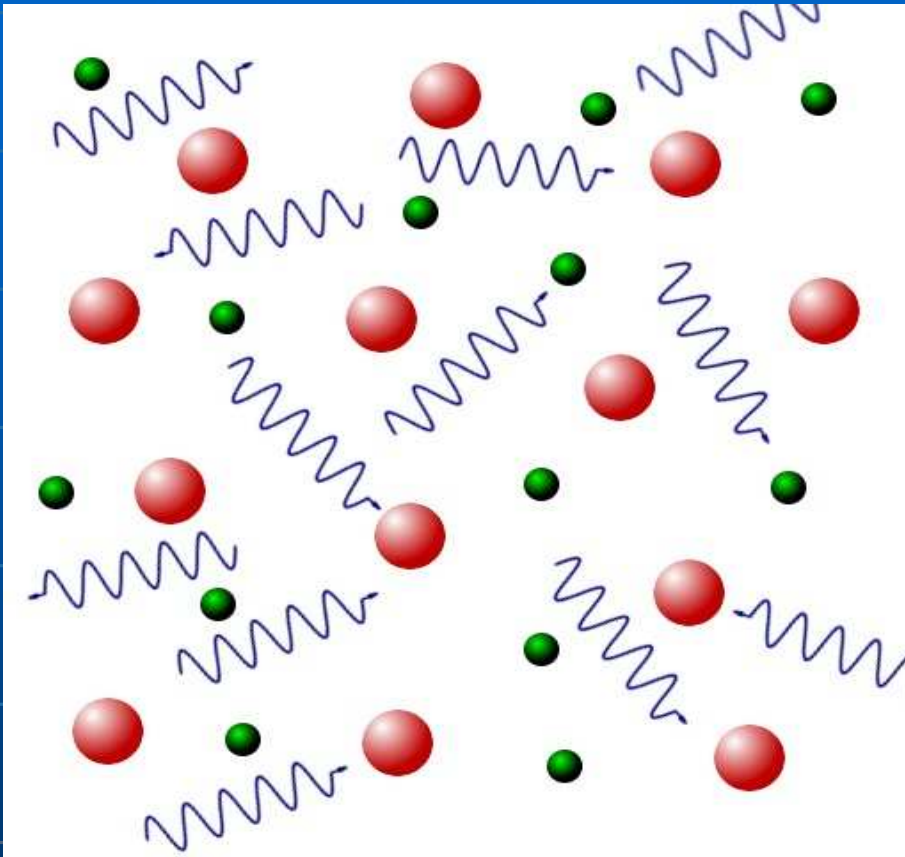
# Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund



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

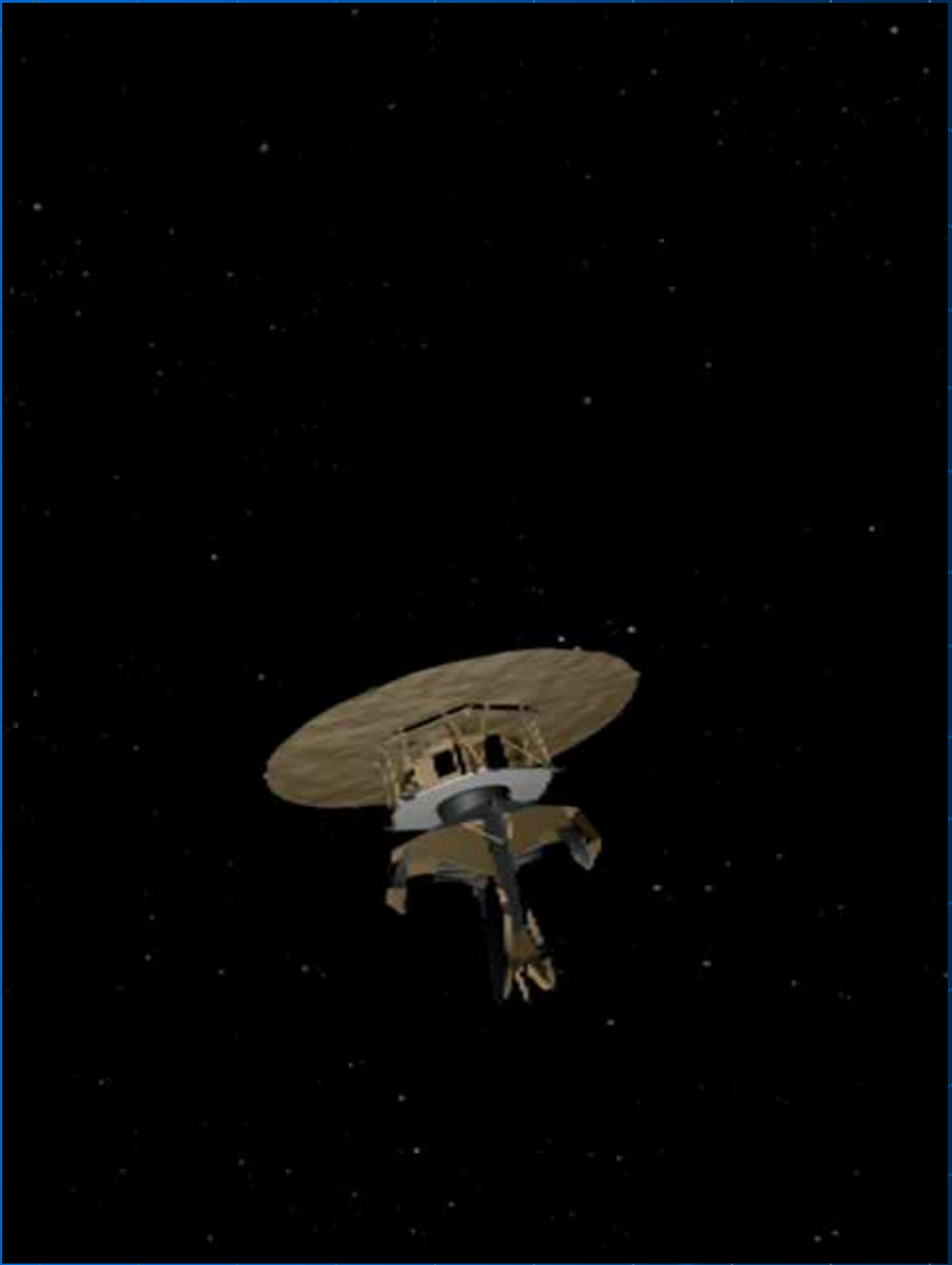
Arno Penzias und Robert Wilson: *Zufällige Entdeckung 1964*

# Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund



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

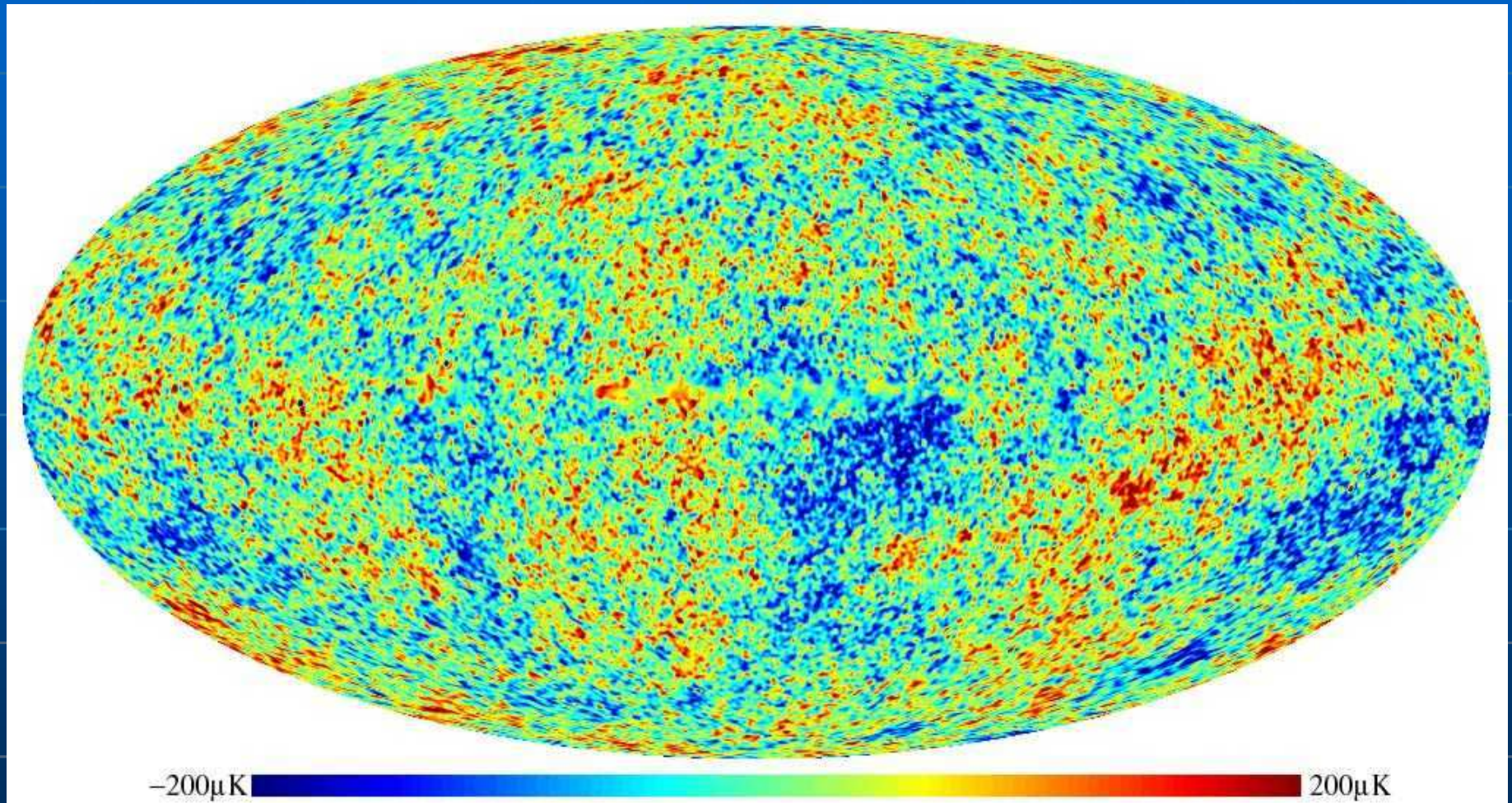
*Übergang ~300 000 Jahre nach dem Urknall!*







# 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%

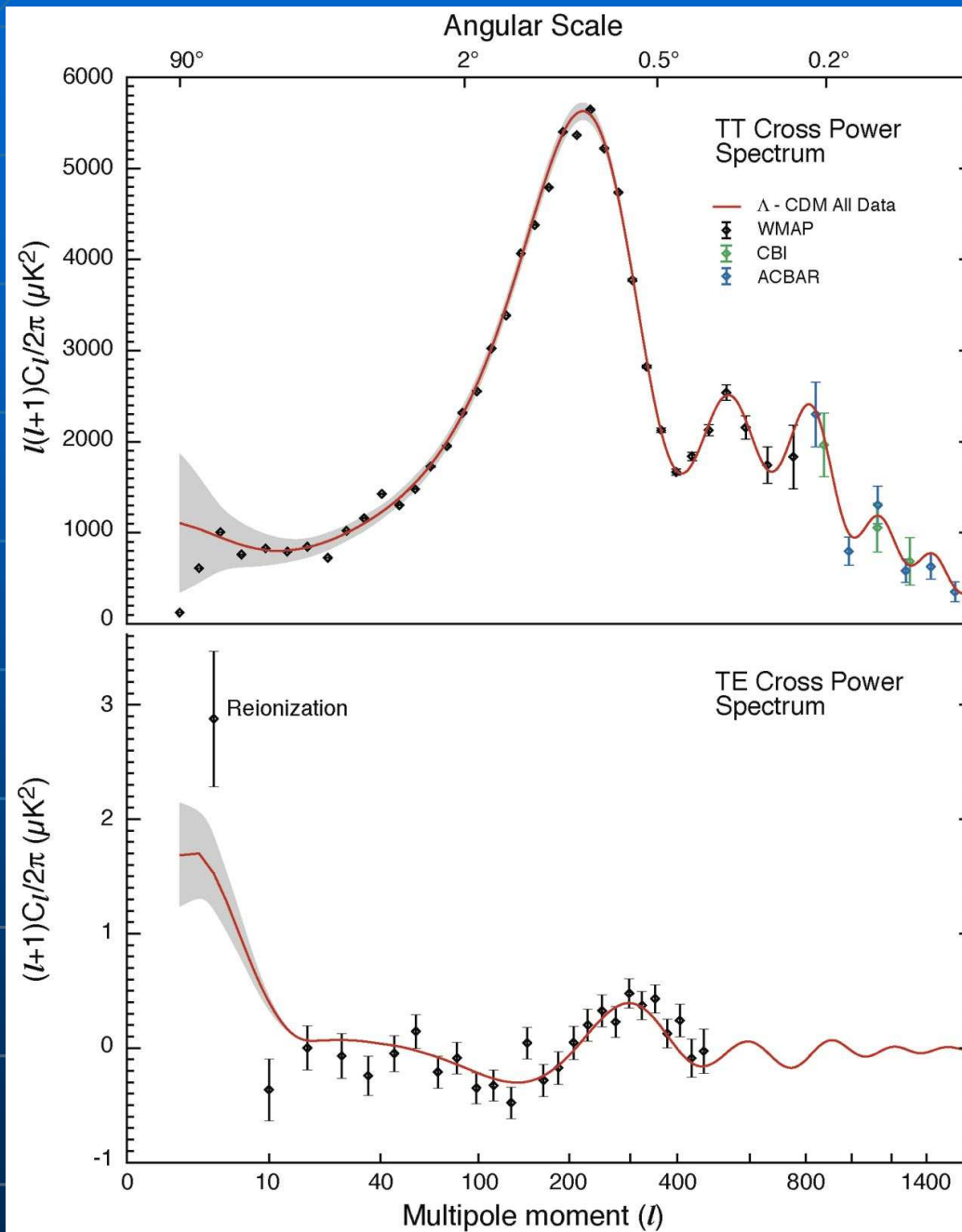
Baryonen:

4%

Alter des Universums:

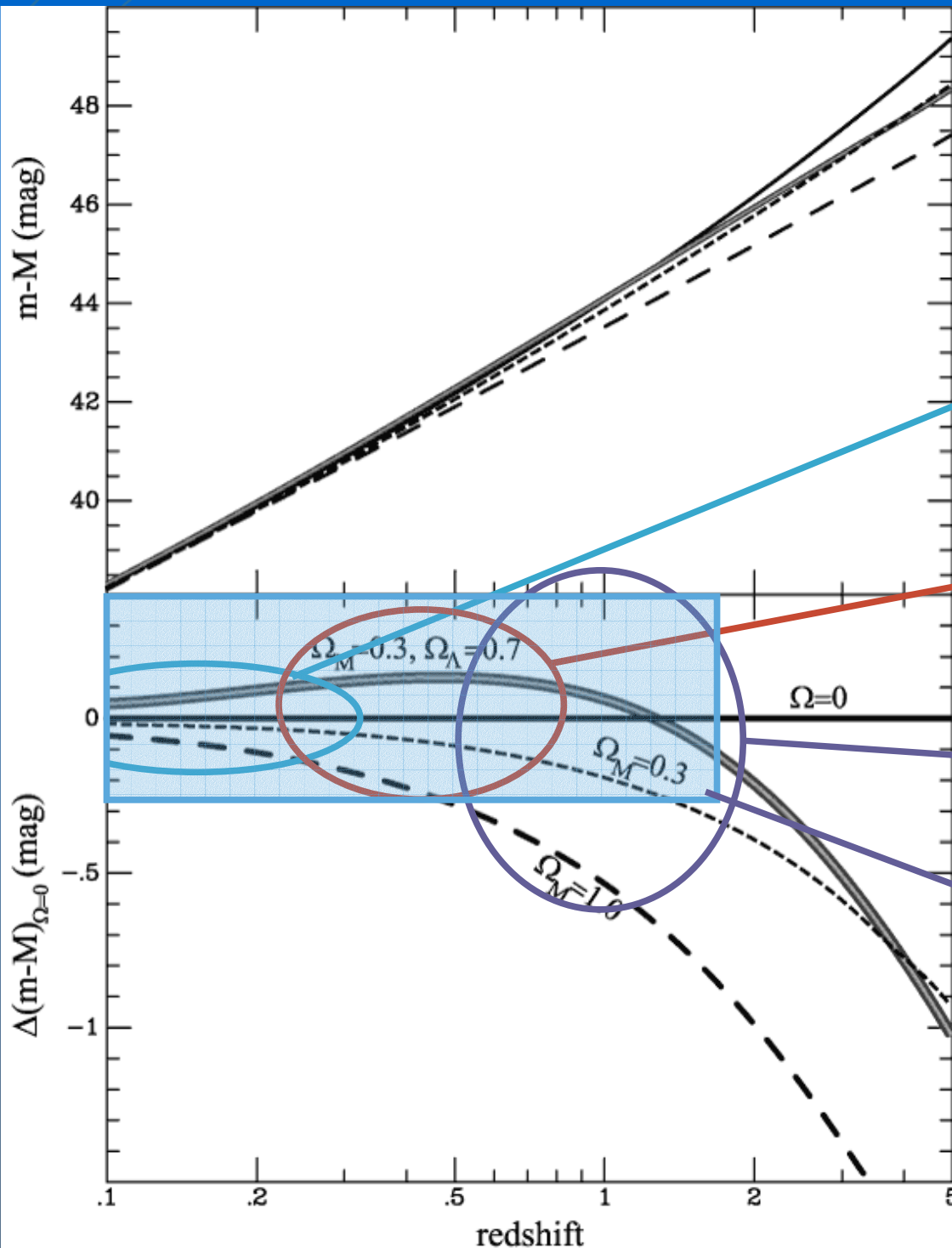
14 Milliarden Jahre

(Fehler < 5%)



Was bringt die Zukunft?

# SN Projekte



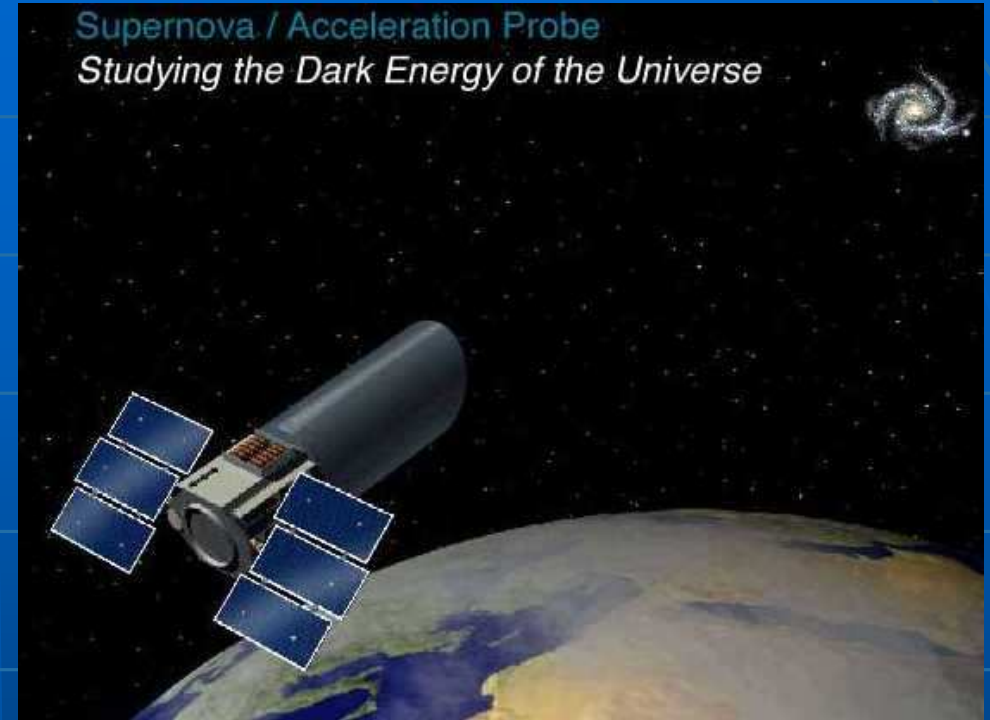
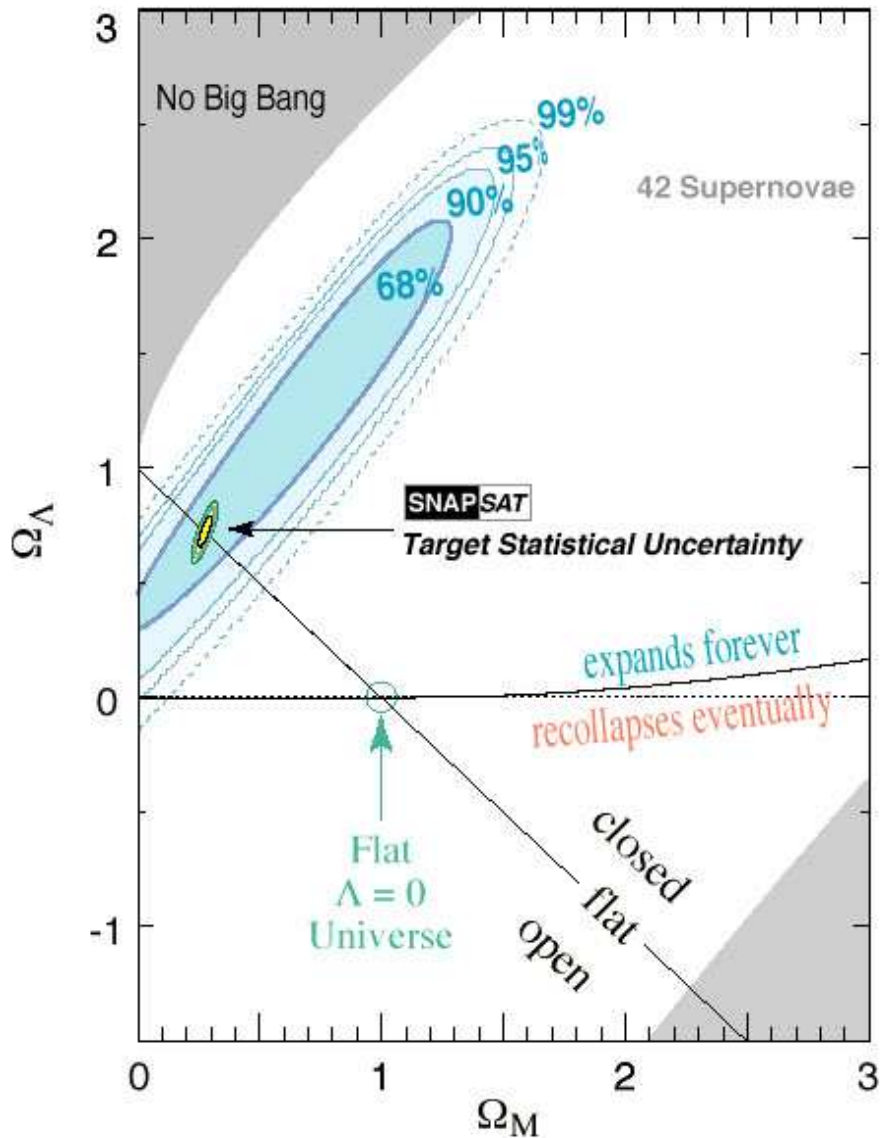
“SN Factory”  
Carnegie SN Projekt

“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, verschwindet es sofort und wird  
durch etwas ersetzt, das noch bizarrer und  
unerklärlicher ist.”**

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

**Douglas Adams**