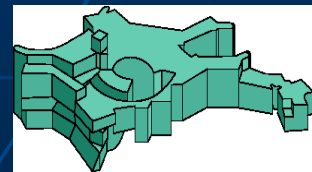


Viel Lärm um (das) Nichts: Neues von der dunklen Seite des Universums

Wolfgang Hillebrandt
MPI für Astrophysik
Garching



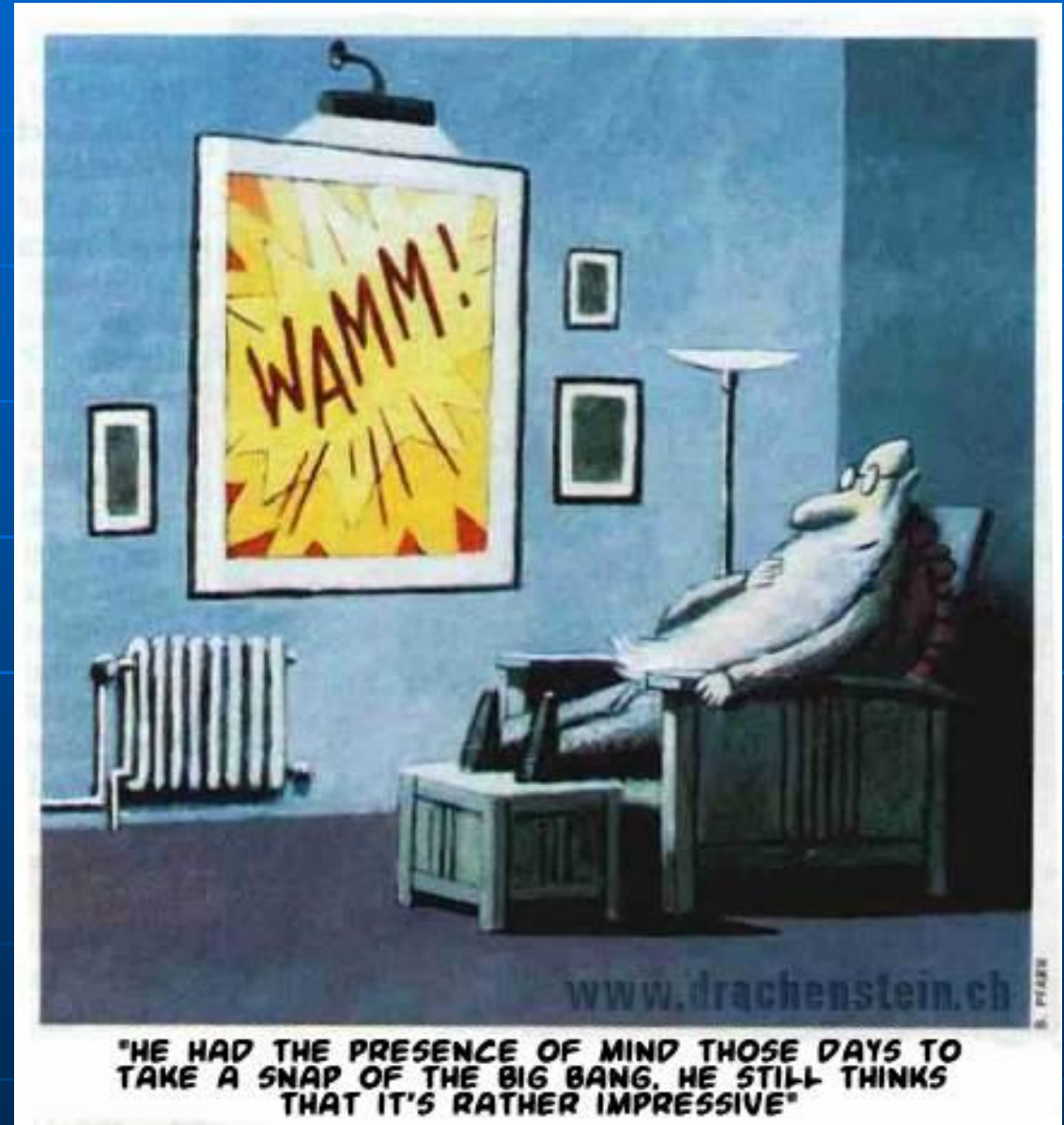
Forschungszentrum Jülich
19. September 2008



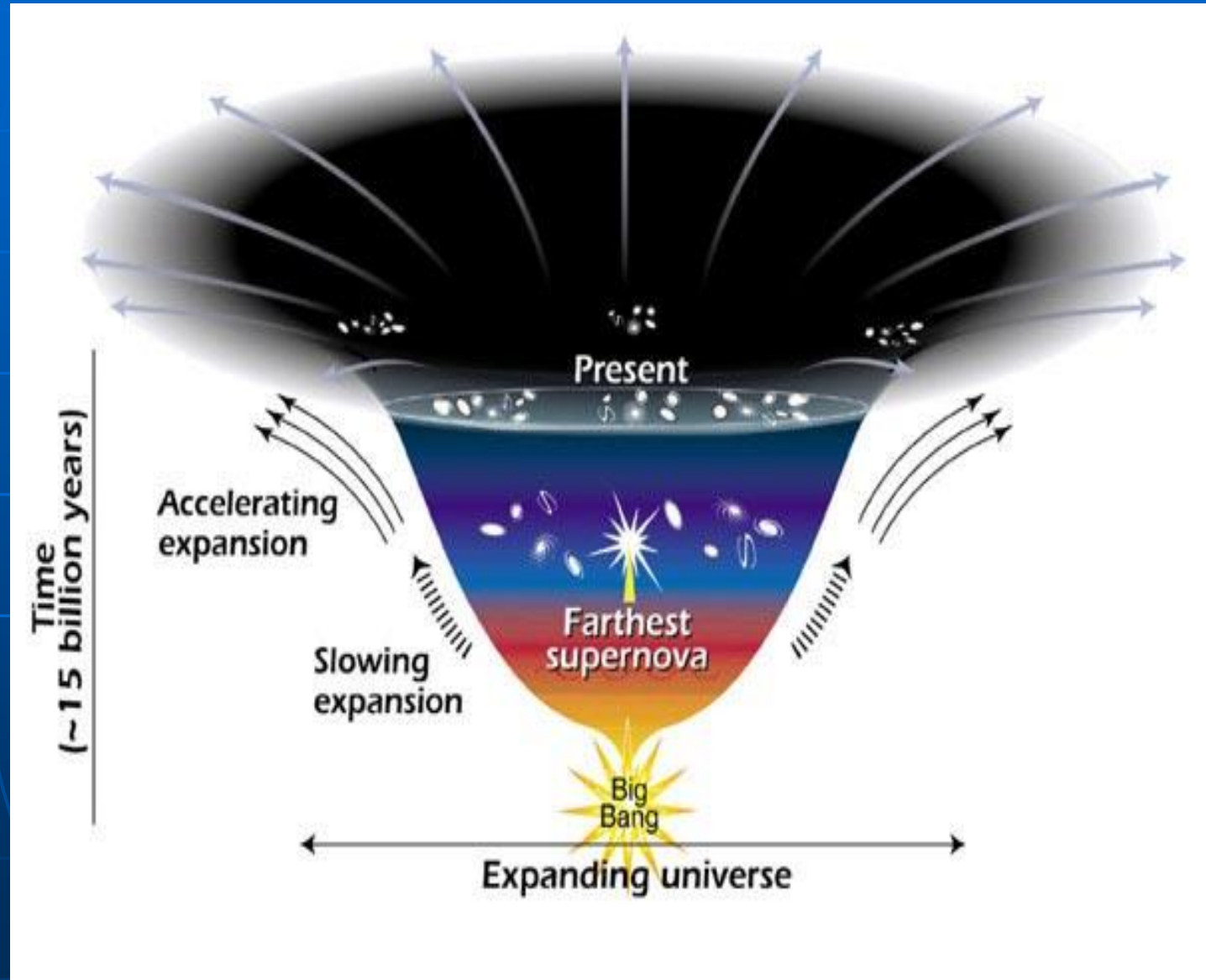
Worüber ich nicht sprechen will



Worüber ich nicht sprechen will



Das „neue“ kosmologische Weltbild



.... und wie alles
begann

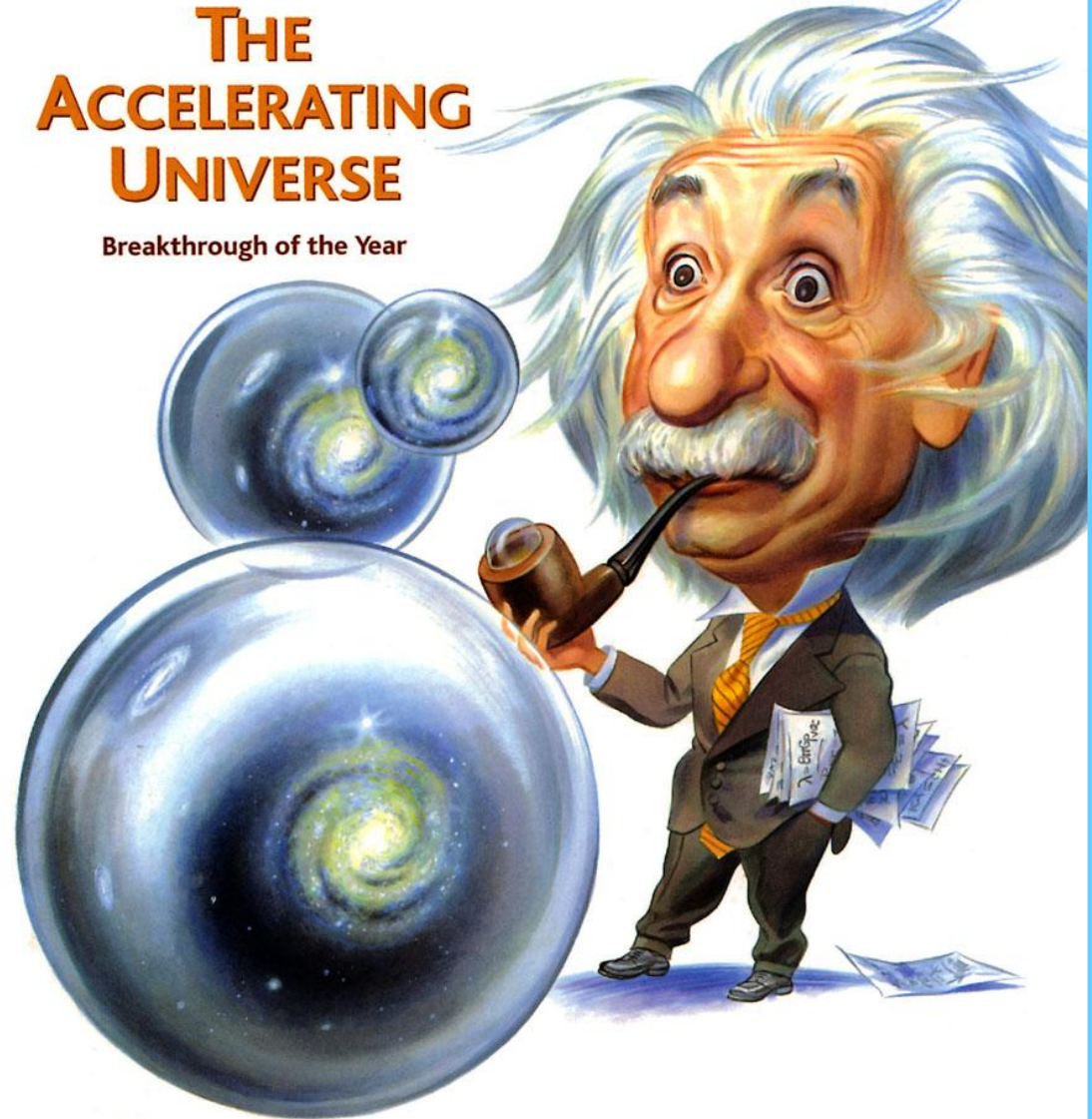
Science

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

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



WALL TO WALL
ALL BENEVOLENT
FOR WORLD
CUP
L10, MAM 2003

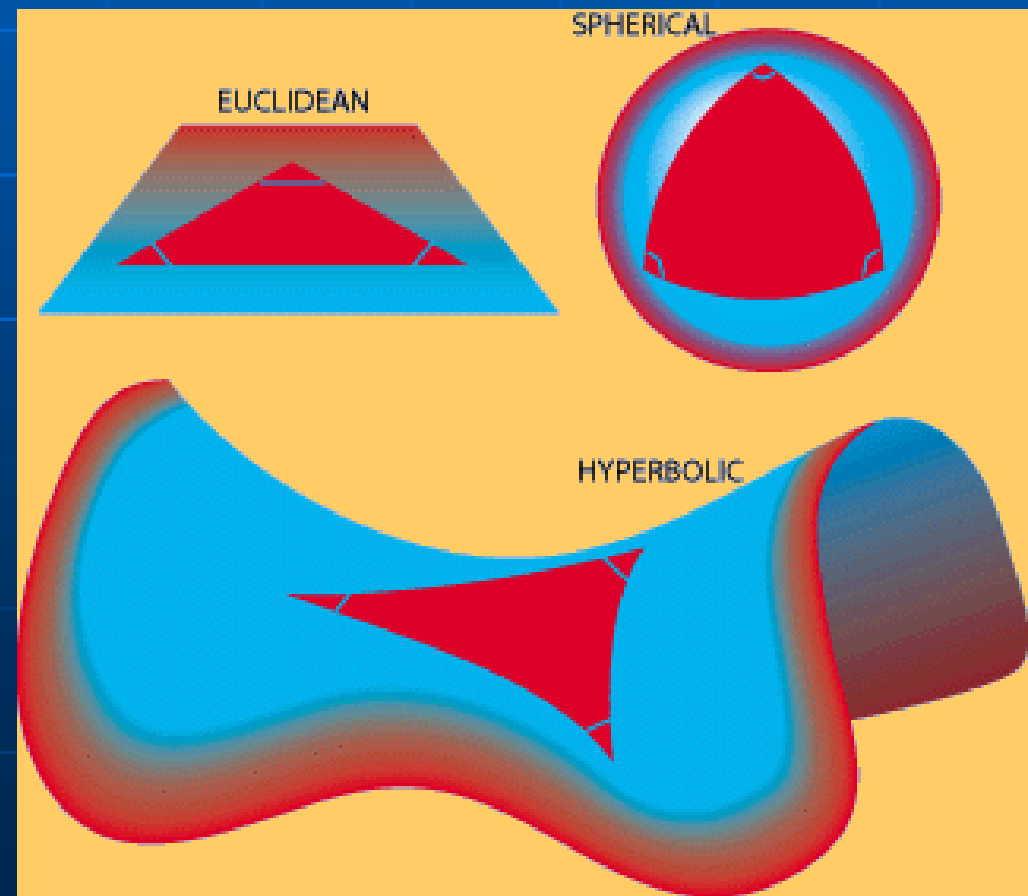
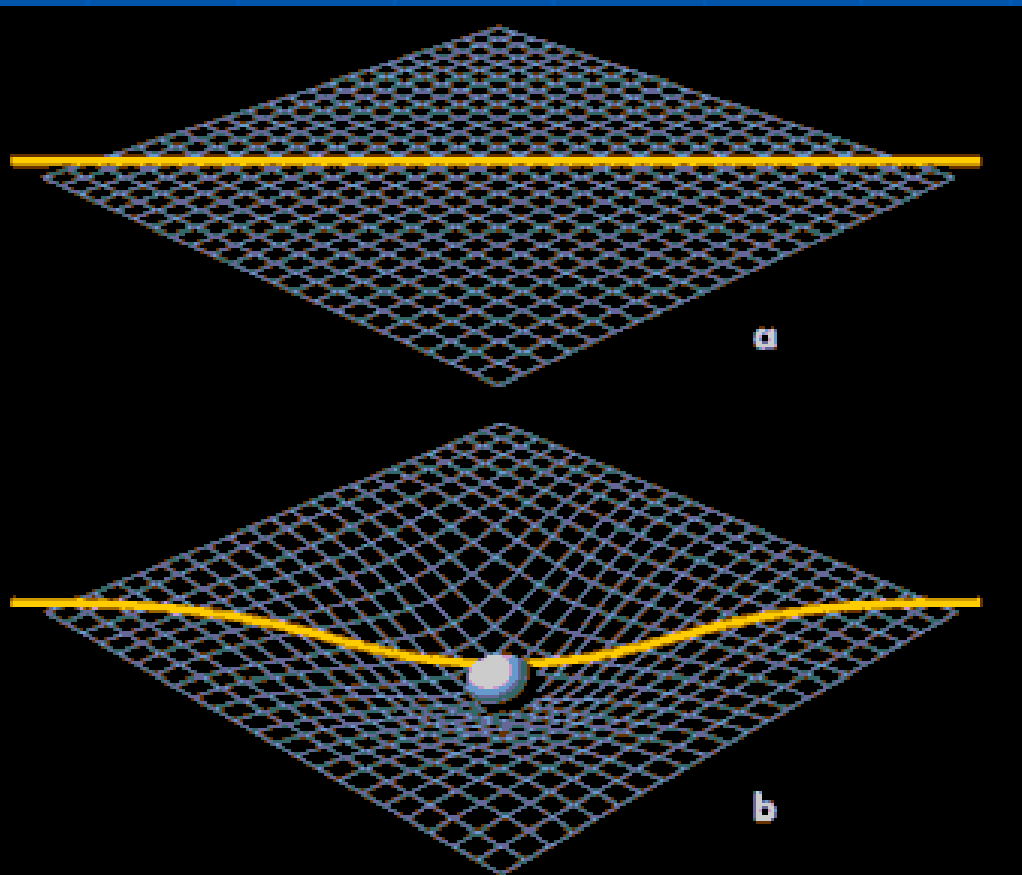
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
A. EINSTEIN

INDAM
VOL

E 1000 S ALBA

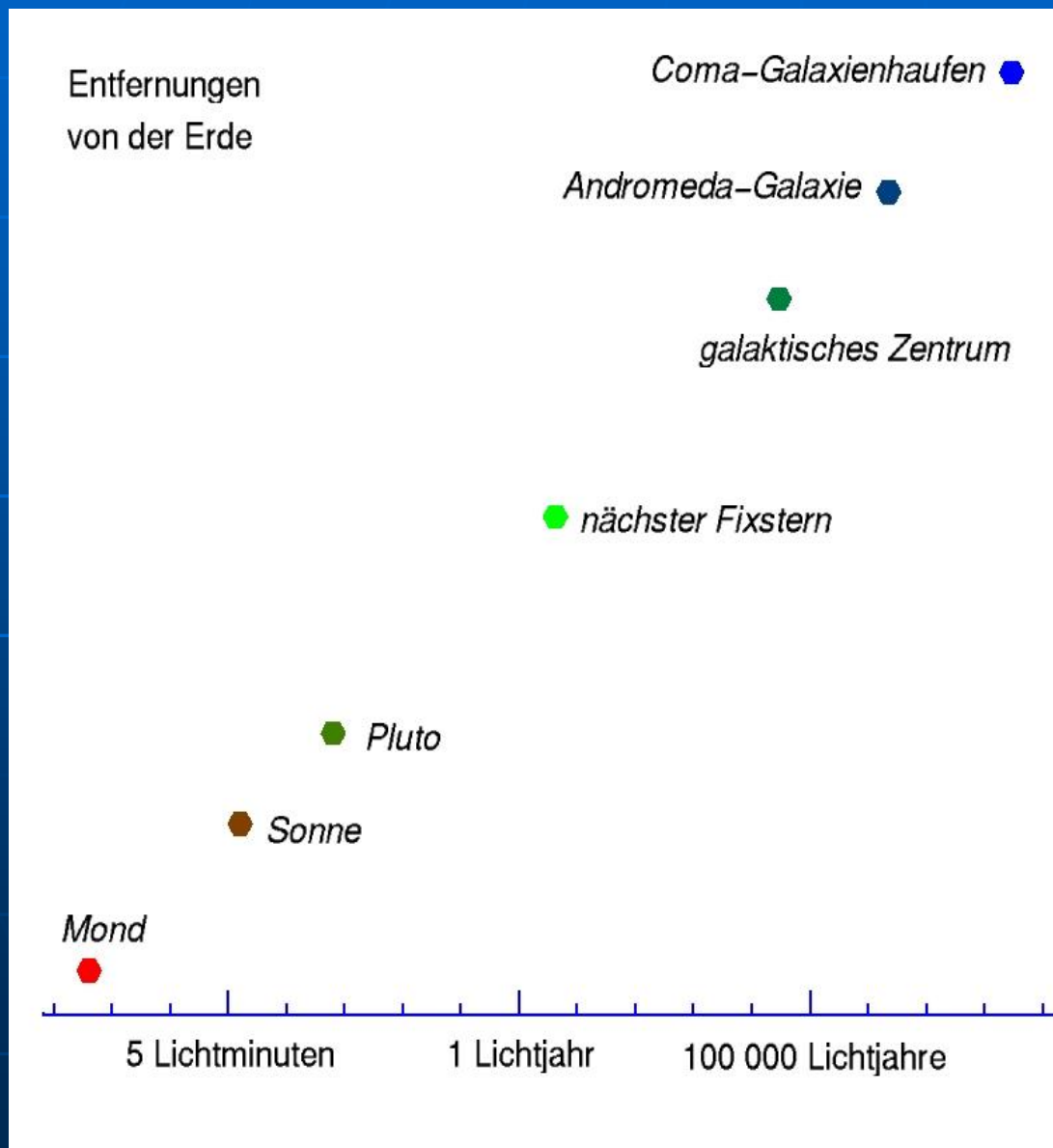
Wie kann man den Kosmos „vermessen“?

- Durch die Messung von Abständen und/oder
- durch die Messung von Winkeln.



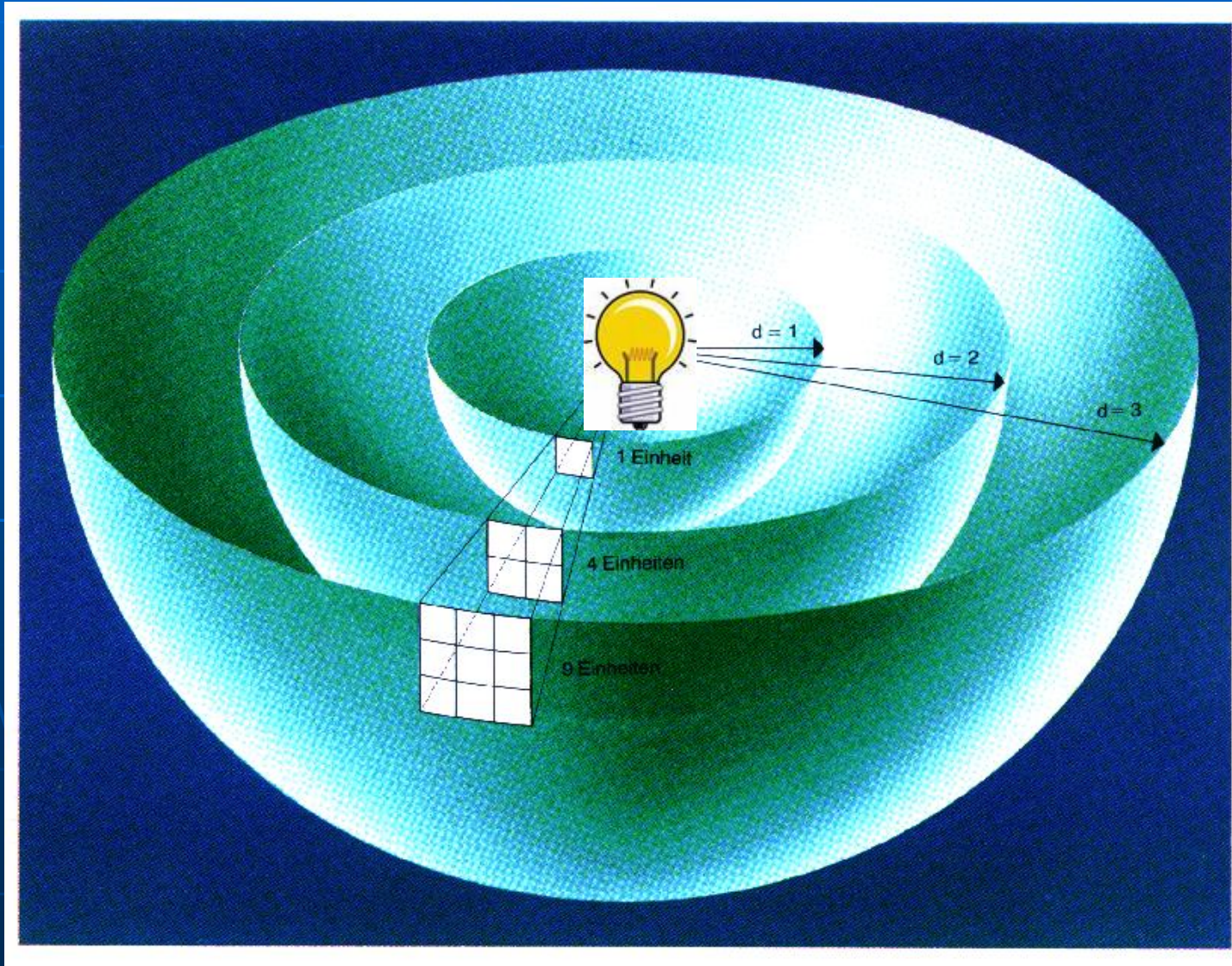
Entfernungsmessungen:

Unsere kosmische Nachbarschaft:
(1 Lichtjahr = 9,46 Billionen km!)

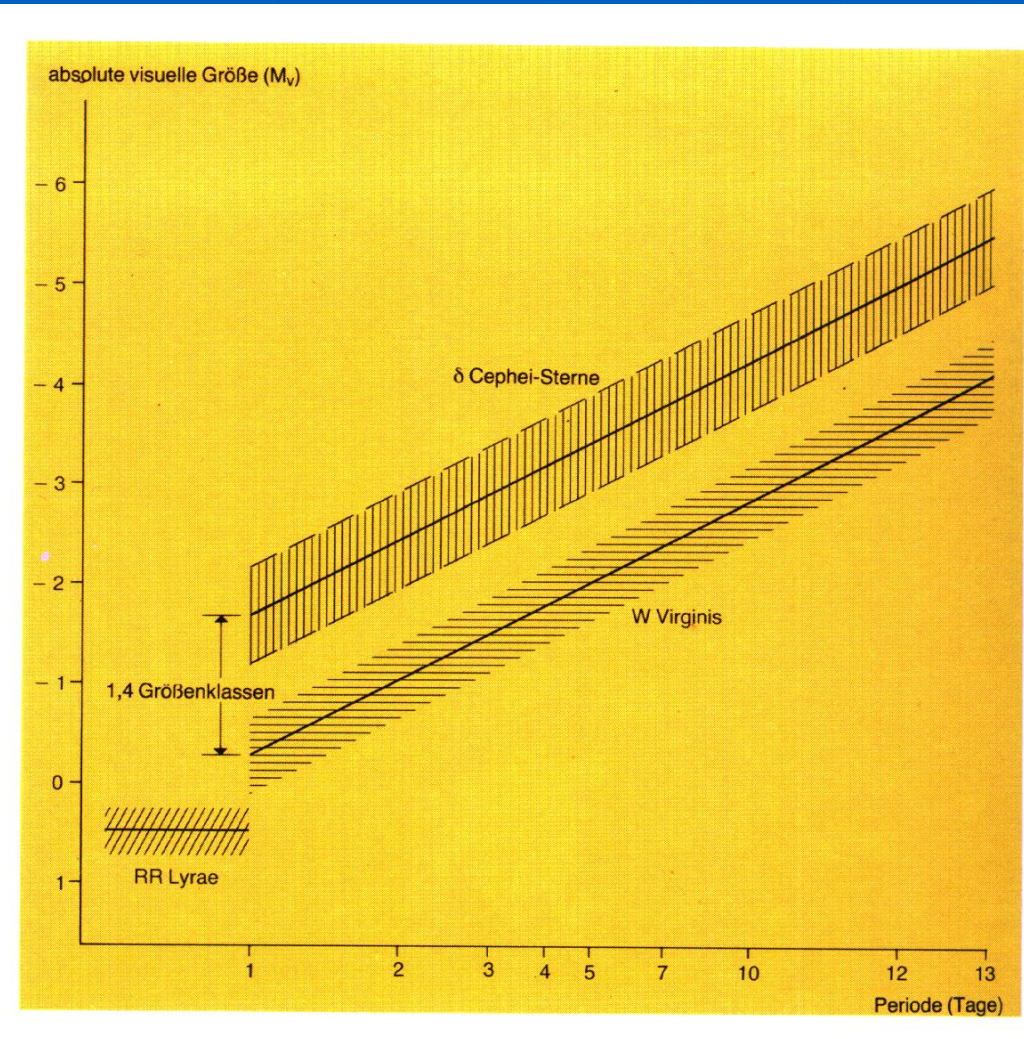
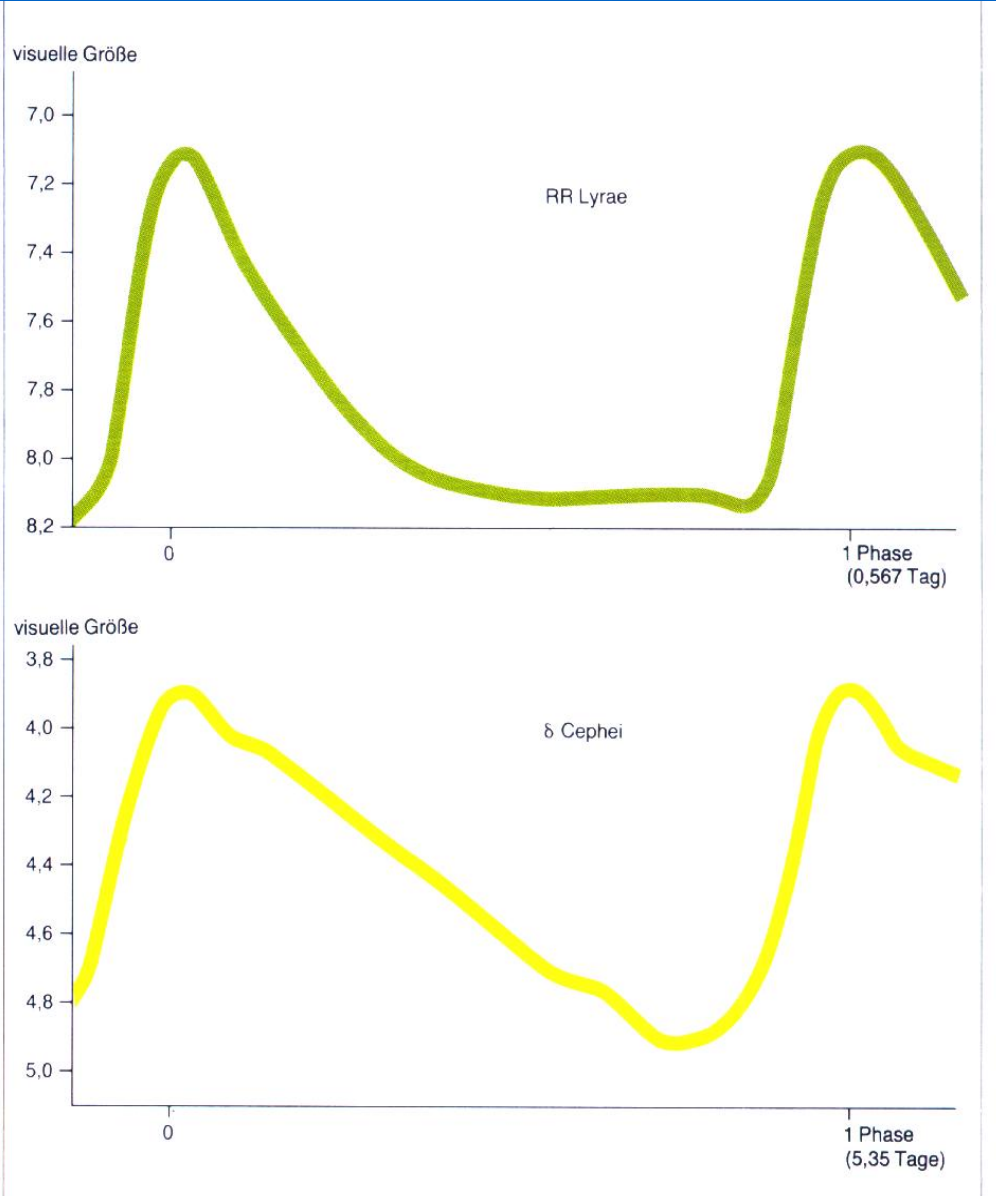


Methoden für kosmische Entfernungsmessungen

1. Die “Standardkerze”



2. Geeichte Standardkerzen: variable Sterne



3. Der Doppler-Effekt



Wenn sich ein Stern oder ein
Galaxie von uns wegbewegt:

*Das Licht erscheint
rot-verschoben!*

→ „Hubble-Gesetz“

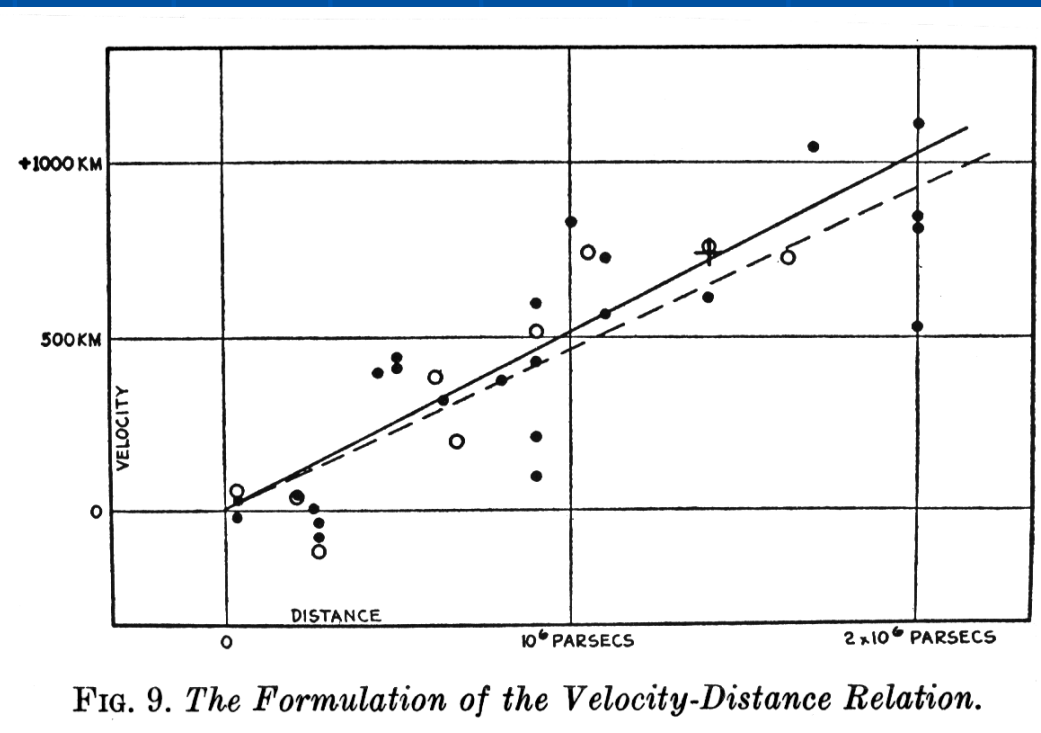
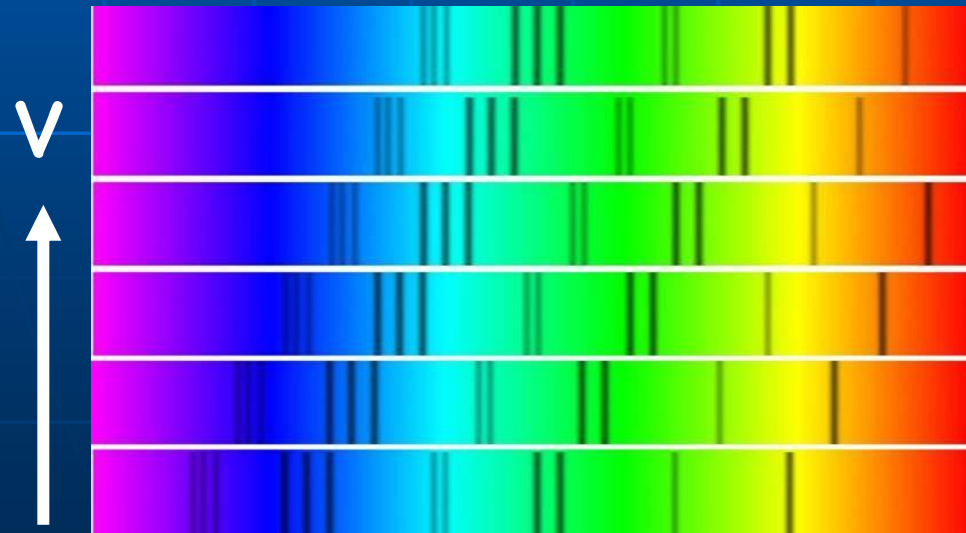
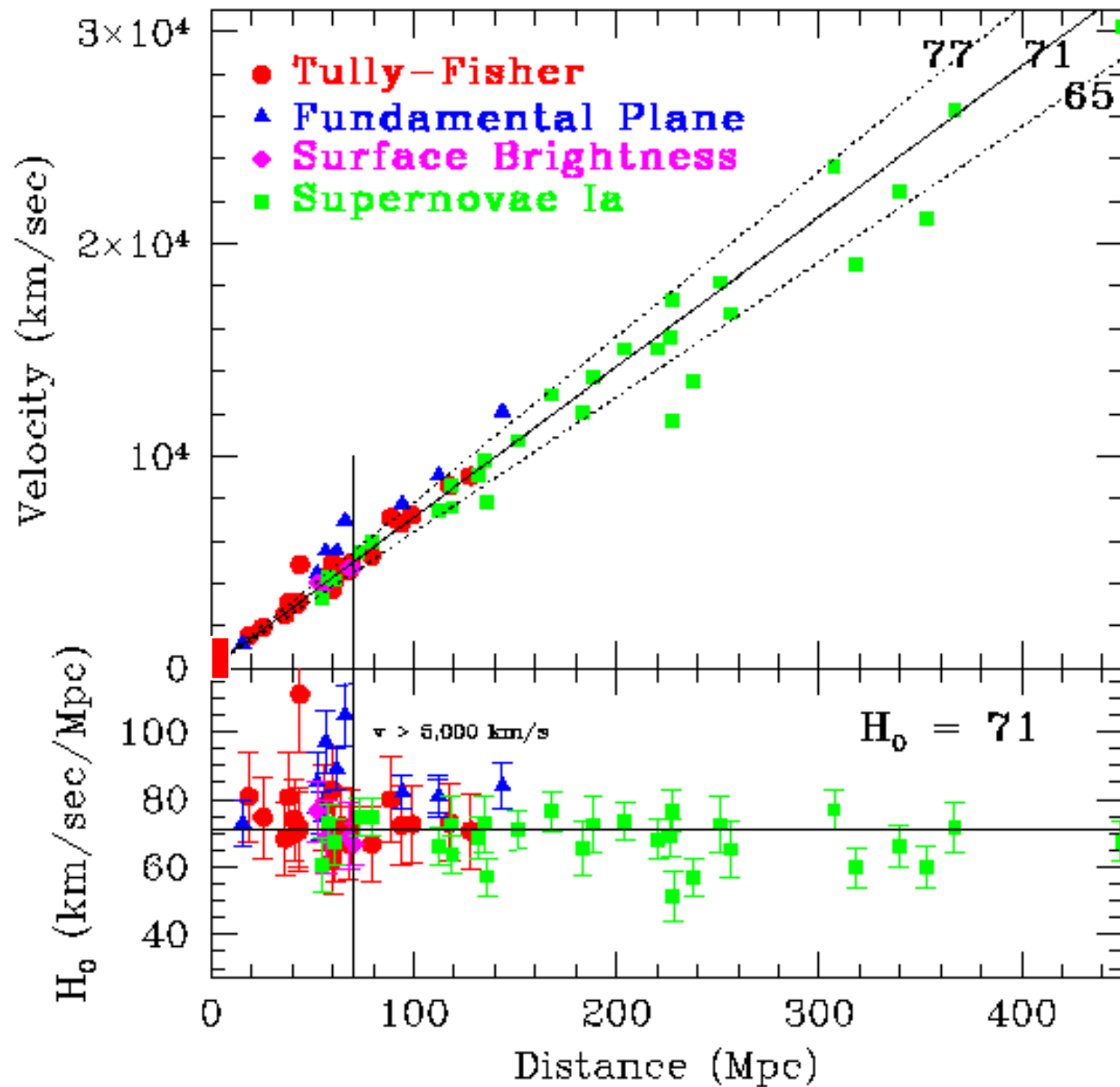


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

Ein "modernes" Hubble-Diagramm



Leuchtkraftabstände (ersetzt $1/r^2$ – Gesetz):

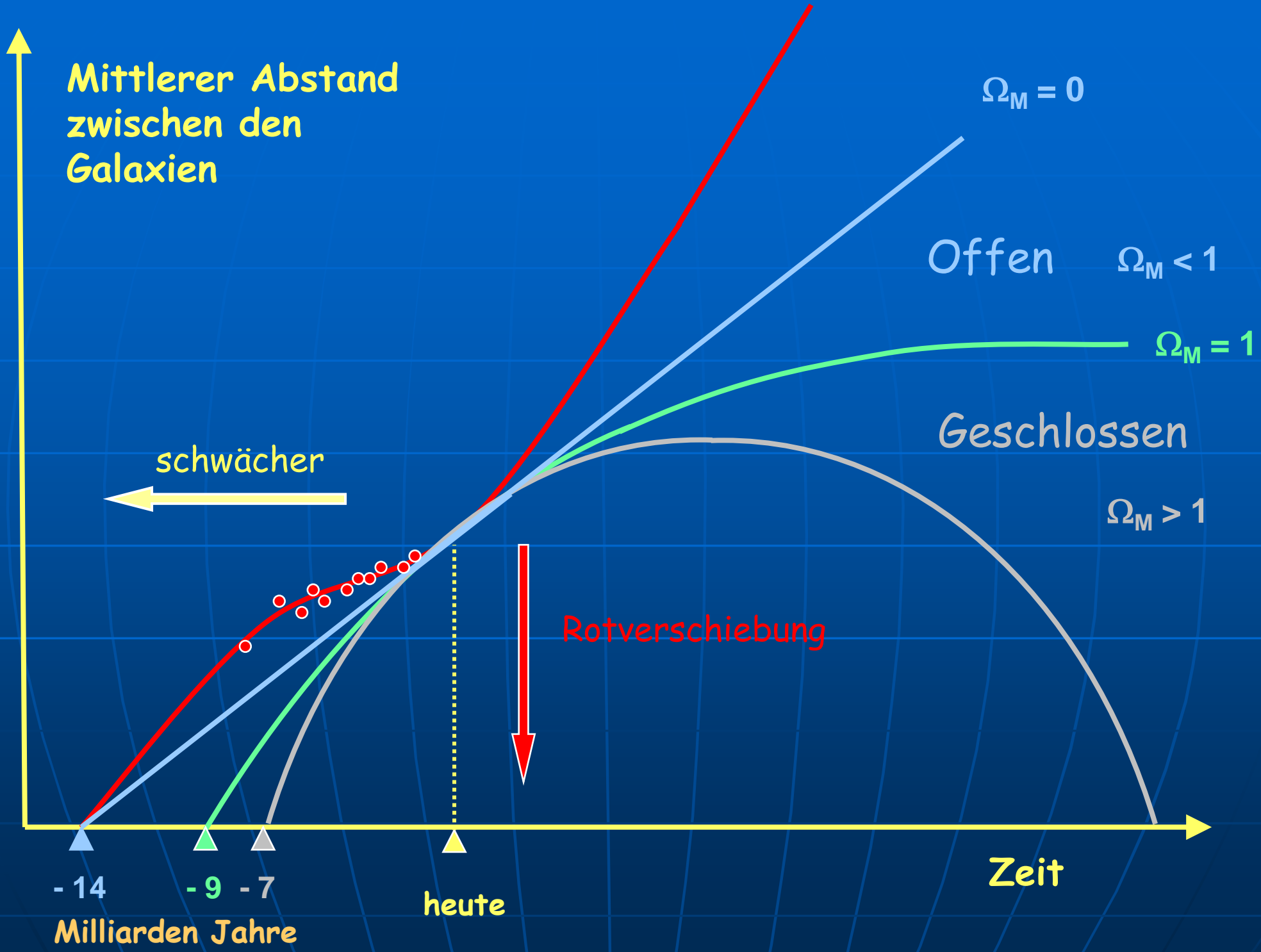
$$D_L = \frac{(1+z)c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} S \left\{ \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \left[\Omega_k (1+z')^2 + \sum_i \Omega_i (1+z')^{3(1+w_i)} \right]^{-1/2} dz' \right\}$$

• mit $\Omega_k = 1 - \sum_i \Omega_i$ und $w_i = \frac{p_i}{\rho_i c^2}$

$w_M = 0$ (Materie)

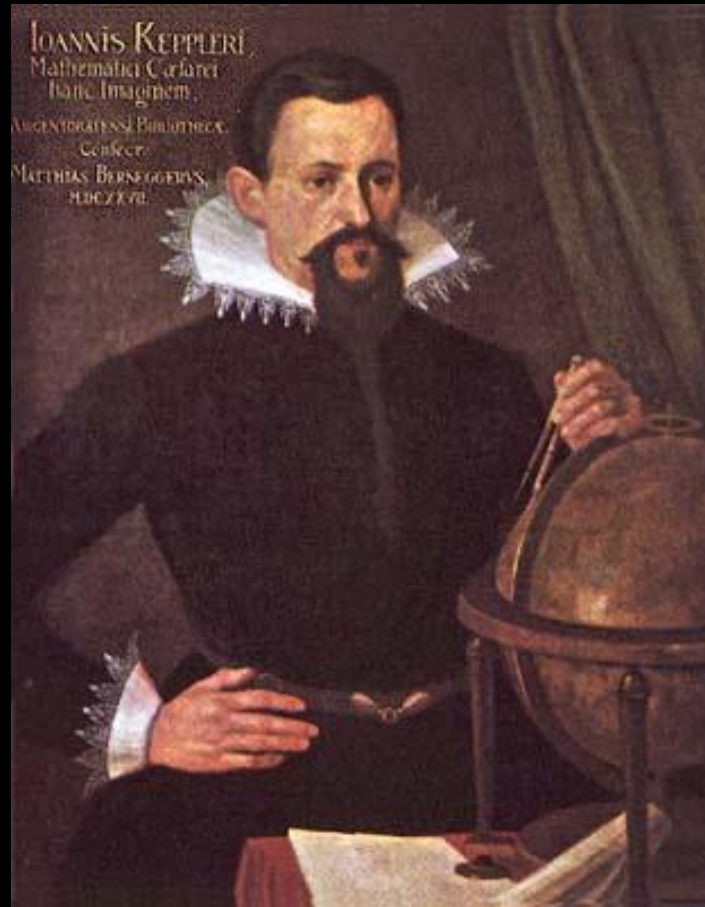
$w_R = 1/3$ (Strahlung)

$w_\Lambda = -1$ (Kosmologische Konstante/Vakuum)



Supernovae als Standardkerzen?

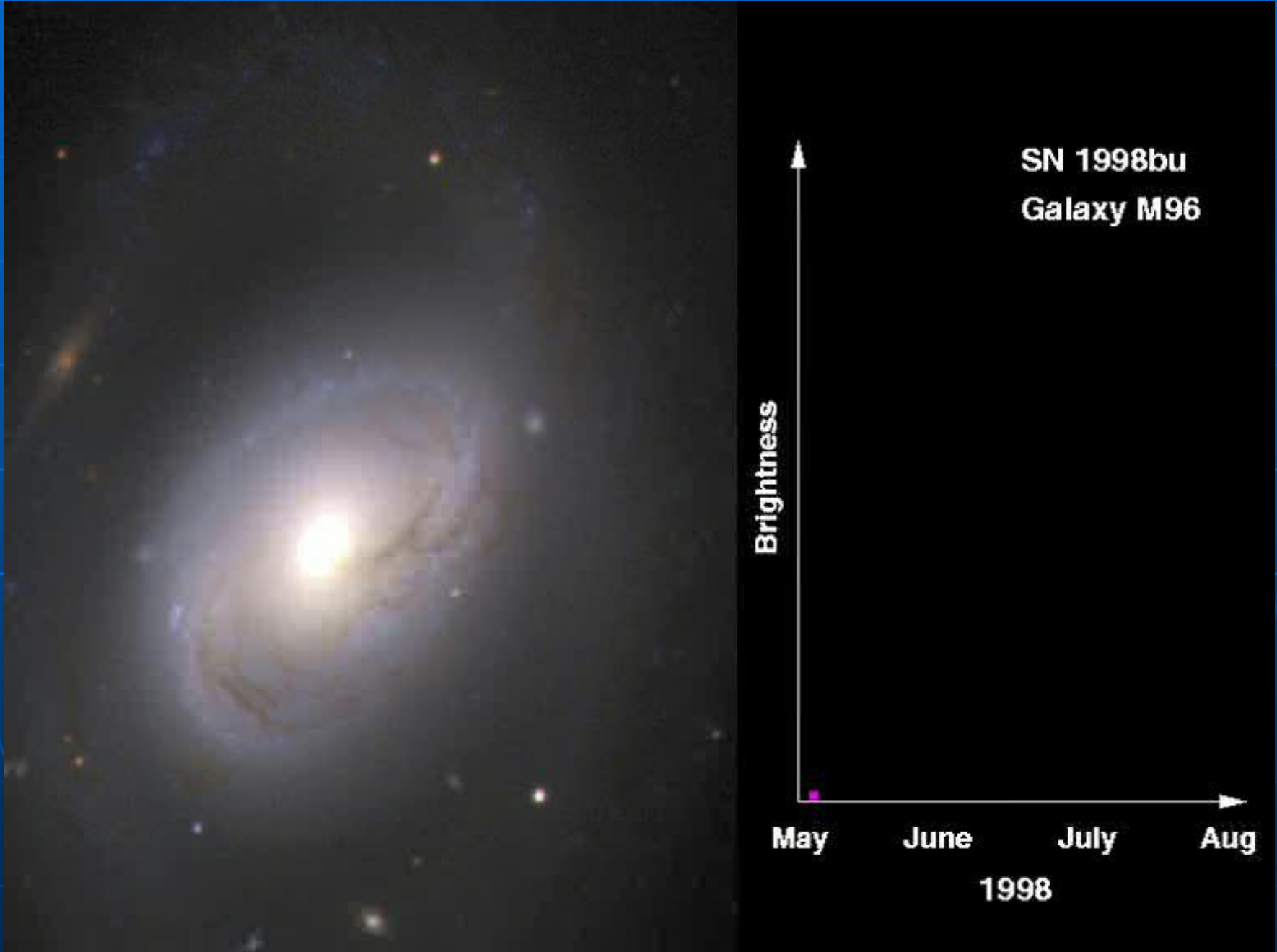
Supernova (SN) 1604 (“Keplers Supernova”)



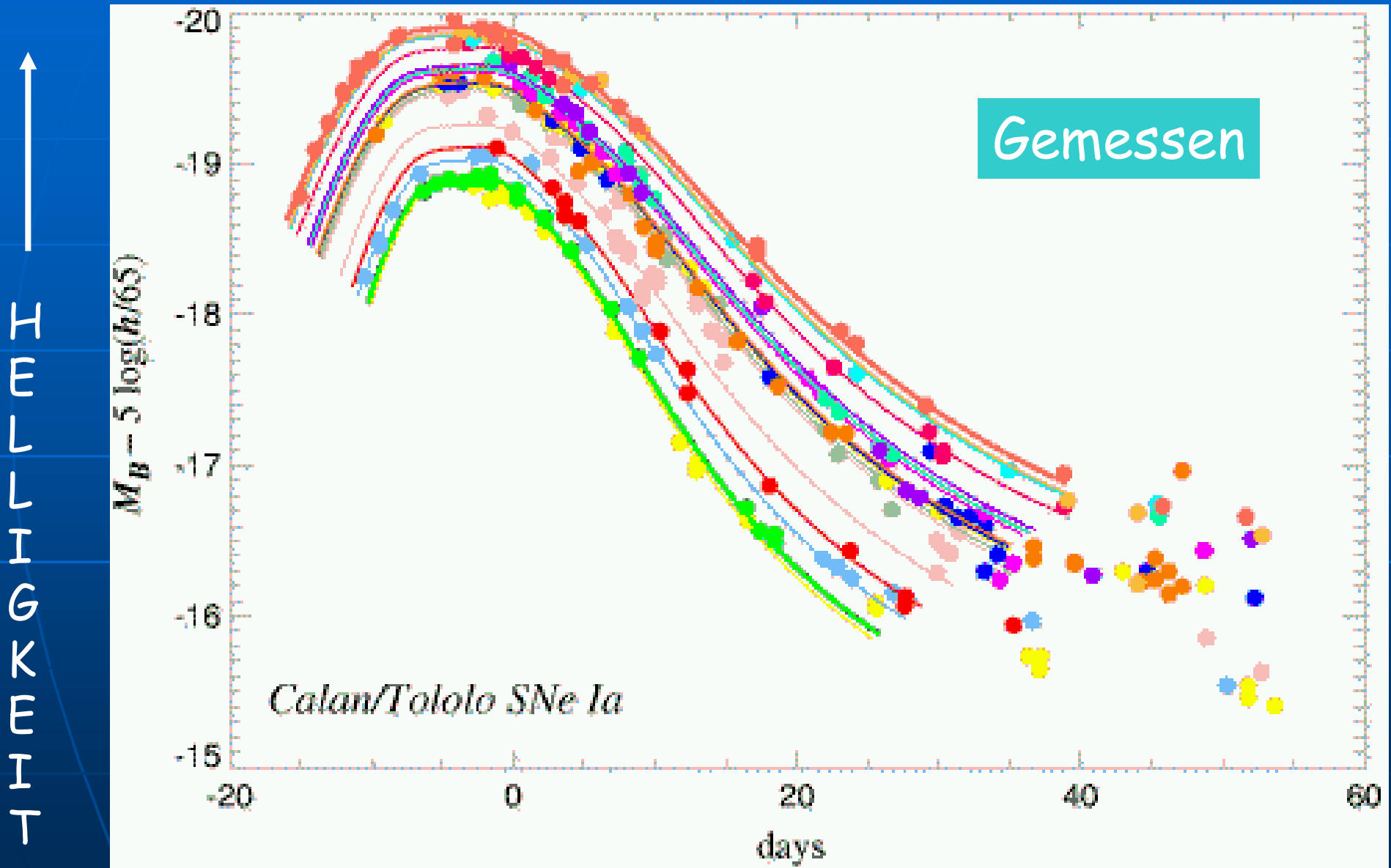
Was ist eine (Typ Ia) Supernova?



Supernovae in entfernten Galaxien



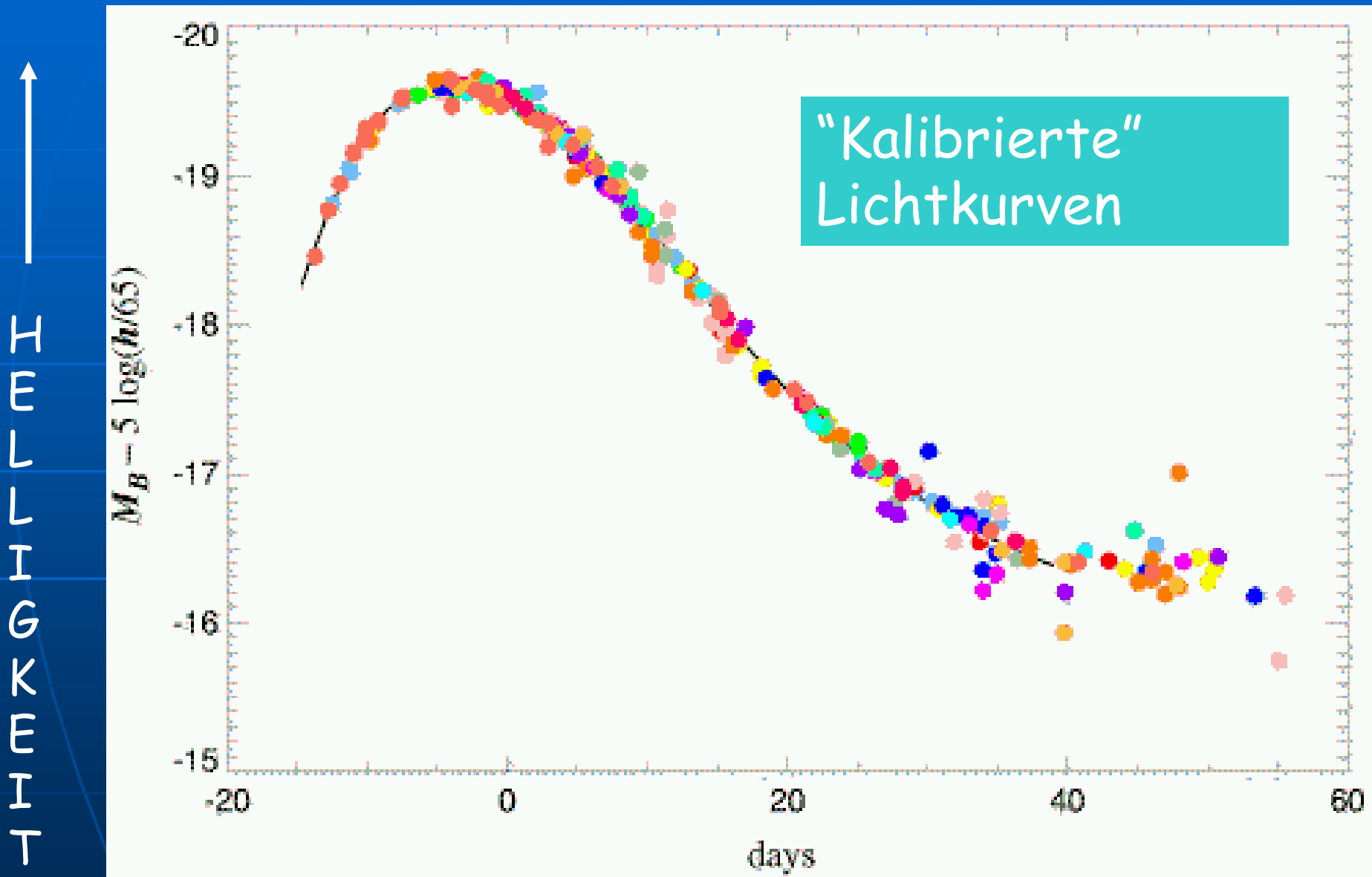
Lichtkurven von gut beobachteten SNe Ia



Zeit nach dem Maximum in Tagen



Lichtkurven von gut beobachteten SNe Ia



Zeit nach dem Maximum in Tagen

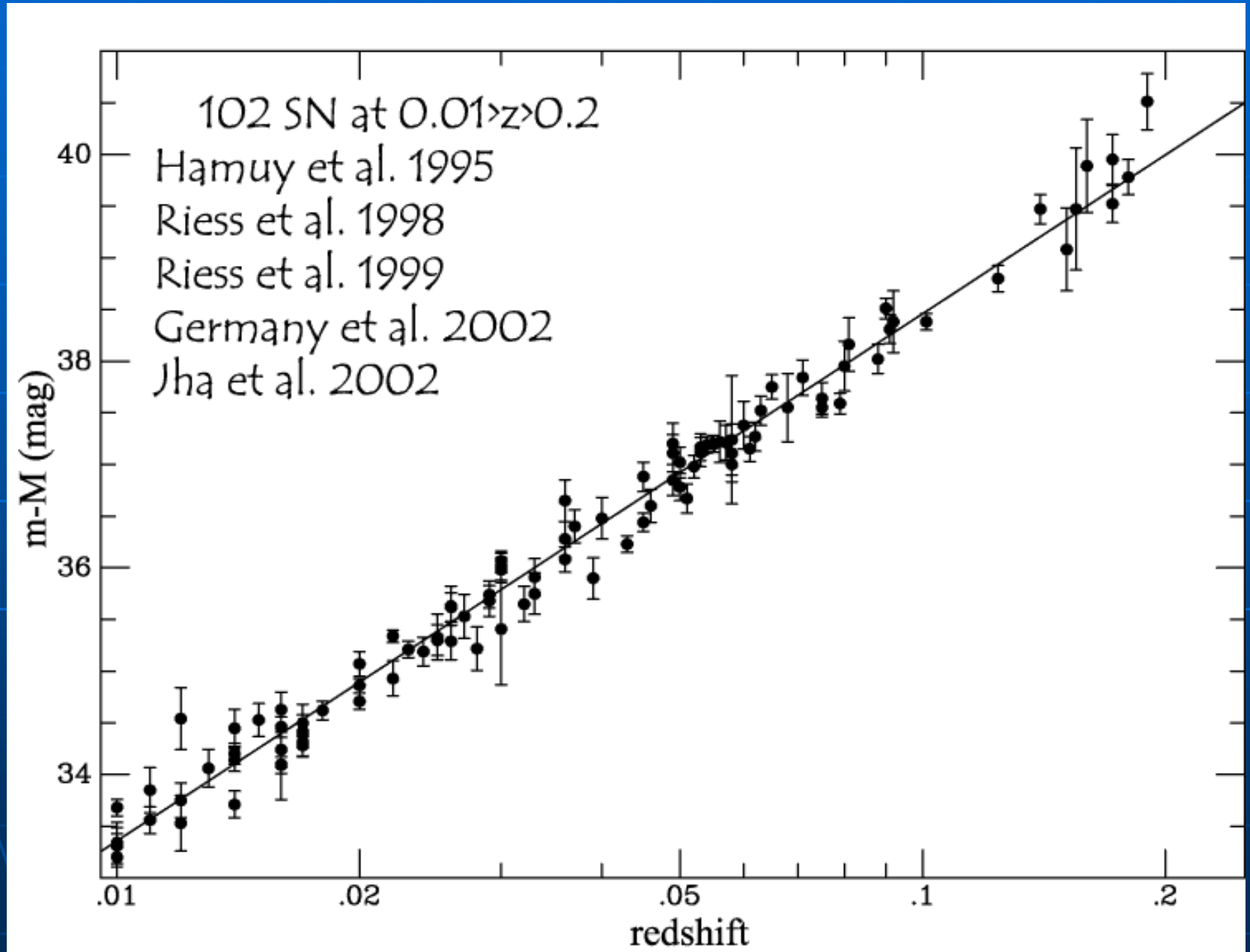
Das Hubble-Diagramm für nahe Supernovae

(dunkel)



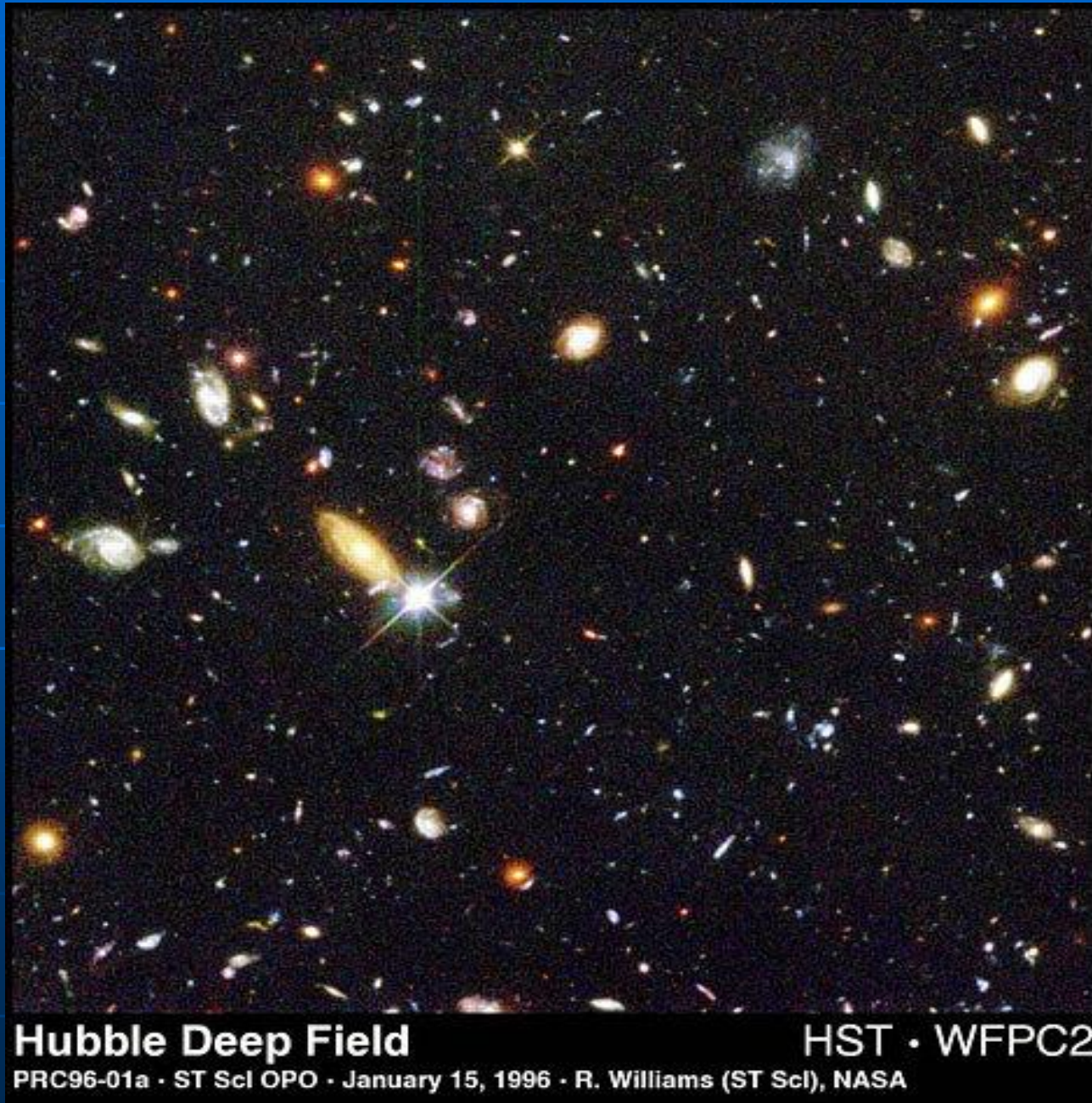
Scheinb.
minus
absolute
Größe

(hell)



(nahe) „Rotverschiebung“ \longrightarrow (fern)

Sehr weit entfernte Supernovae

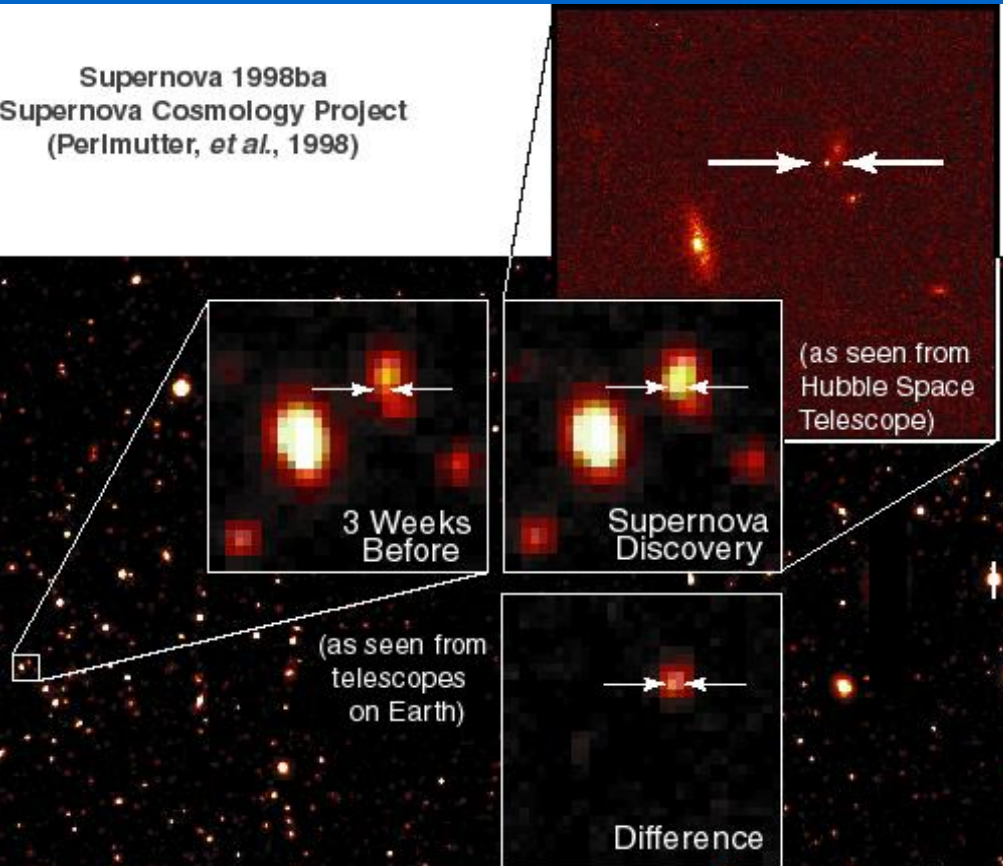


Supernovae sind sehr selten, ca. 1 SN pro 100 Jahre und Galaxie.



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.

SN 1998M $z=0.63$

SN 1998J $z=0.83$

SN 1997cj $z=0.50$

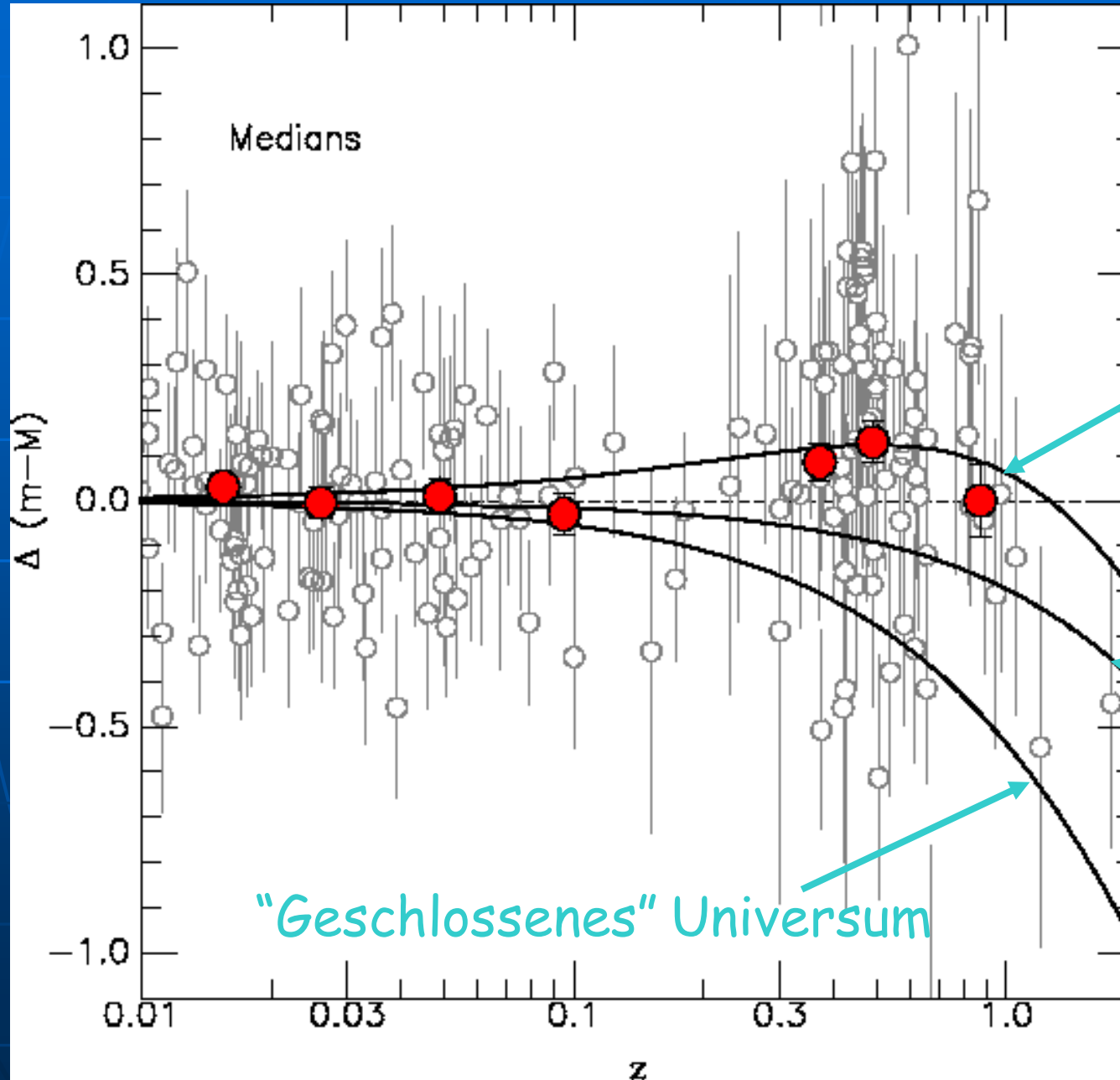
SN 1998I $z=0.89$

Supernovae
werden
heute bei
Rotverschie-
bungen von
 $Z > 0,4$
routinemäßig
entdeckt!

Die Ergebnisse

- Supernovae, die weit weg sind, also explodierten, als das Universum etwa halb so alt war wie heute (vor bis zu 8 Milliarden Jahren), sind etwas lichtschwächer als sie es sein sollten.
 - Sie sind weiter von uns entfernt als eine „normale“ Kosmologie erlaubt.
 - **Das Universum expandiert (heute) beschleunigt ! Warum???**

209 SNe Ia und Mittelwerte

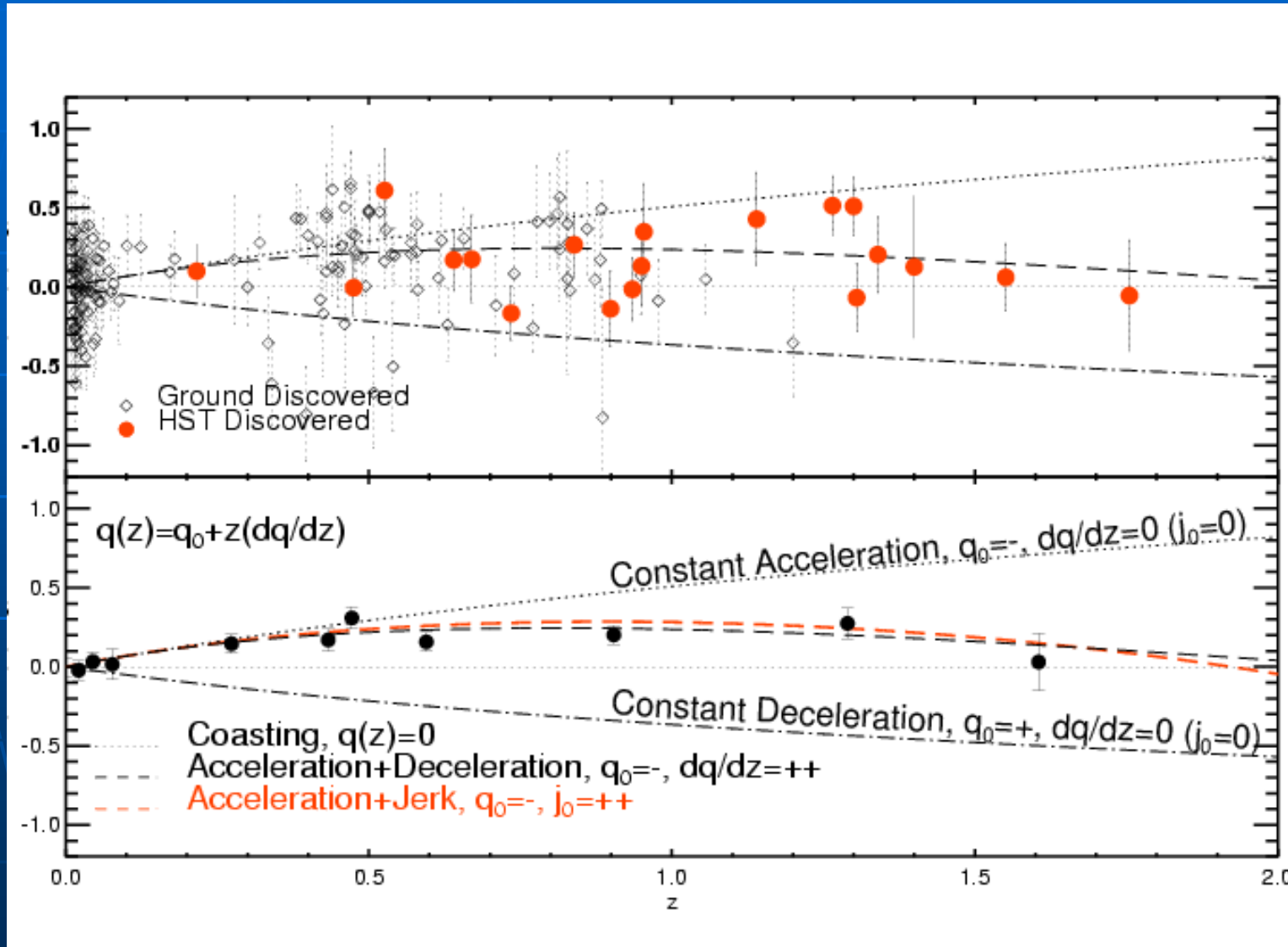


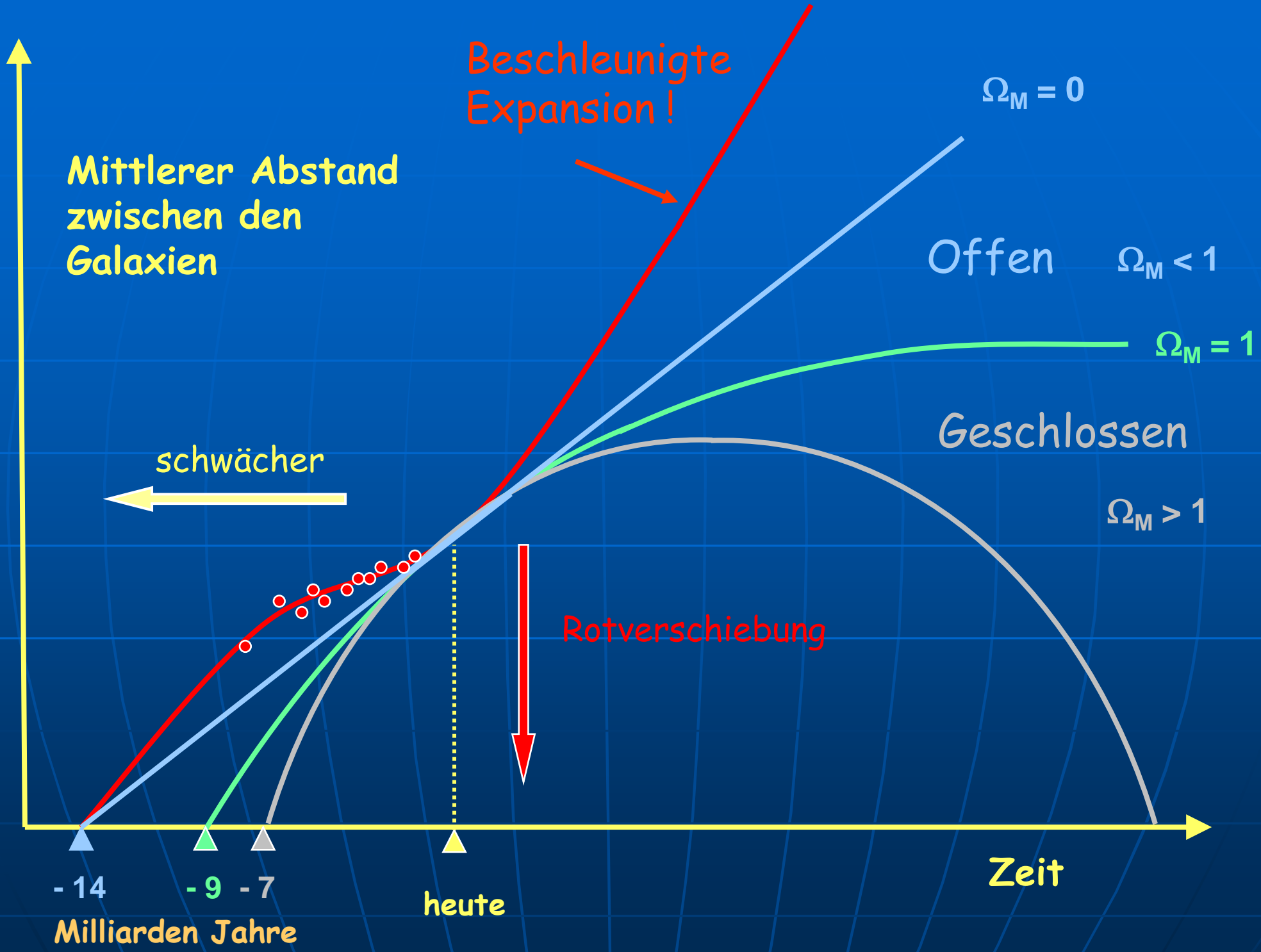
“Flaches”
Universum mit
Beschleunigung

“Leeres”
Universum

“Geschlossenes”
Universum

Bei hohen Rotverschiebungen





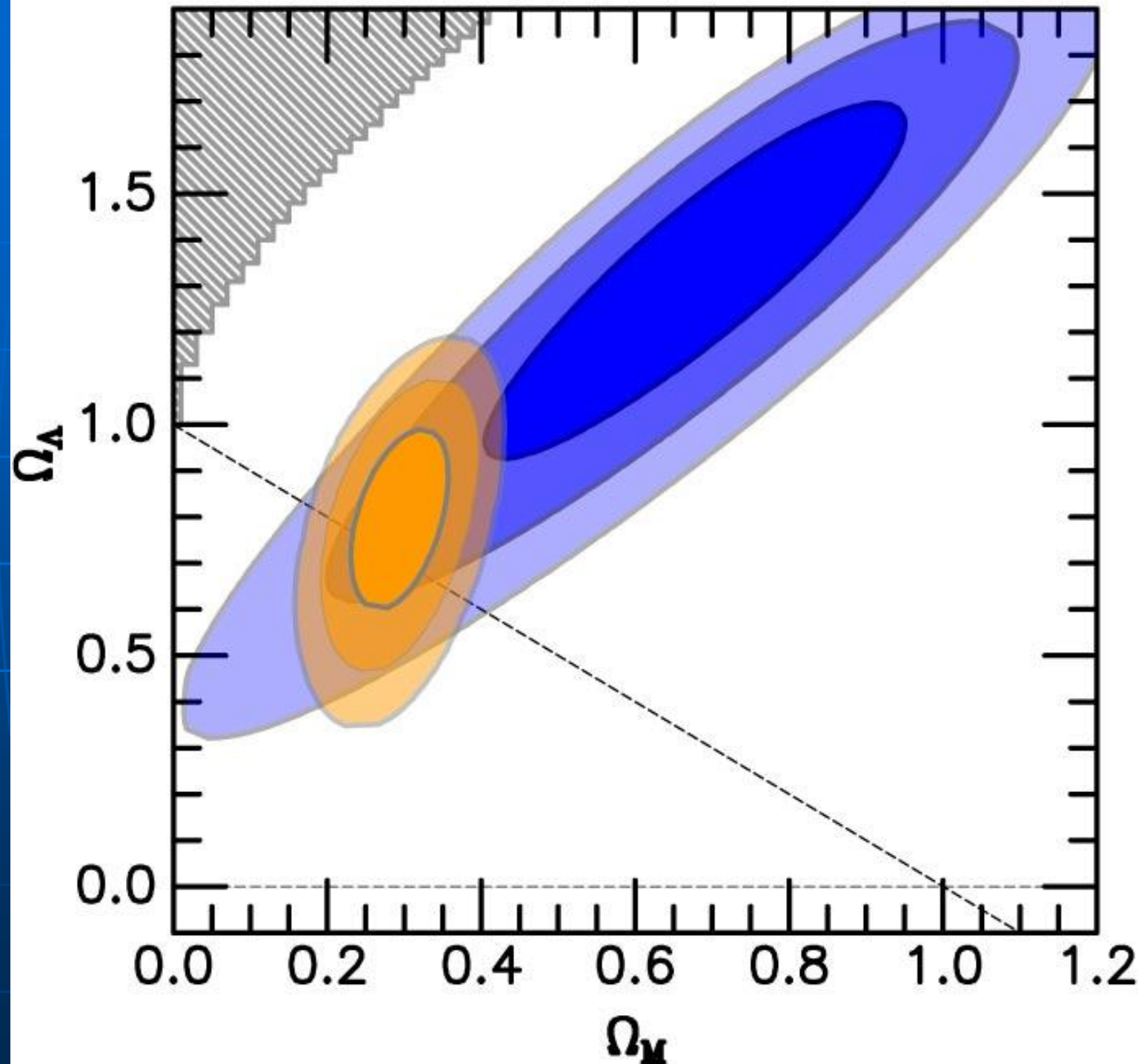
Entire High-Z SN Ia Data Set

Galaxien:

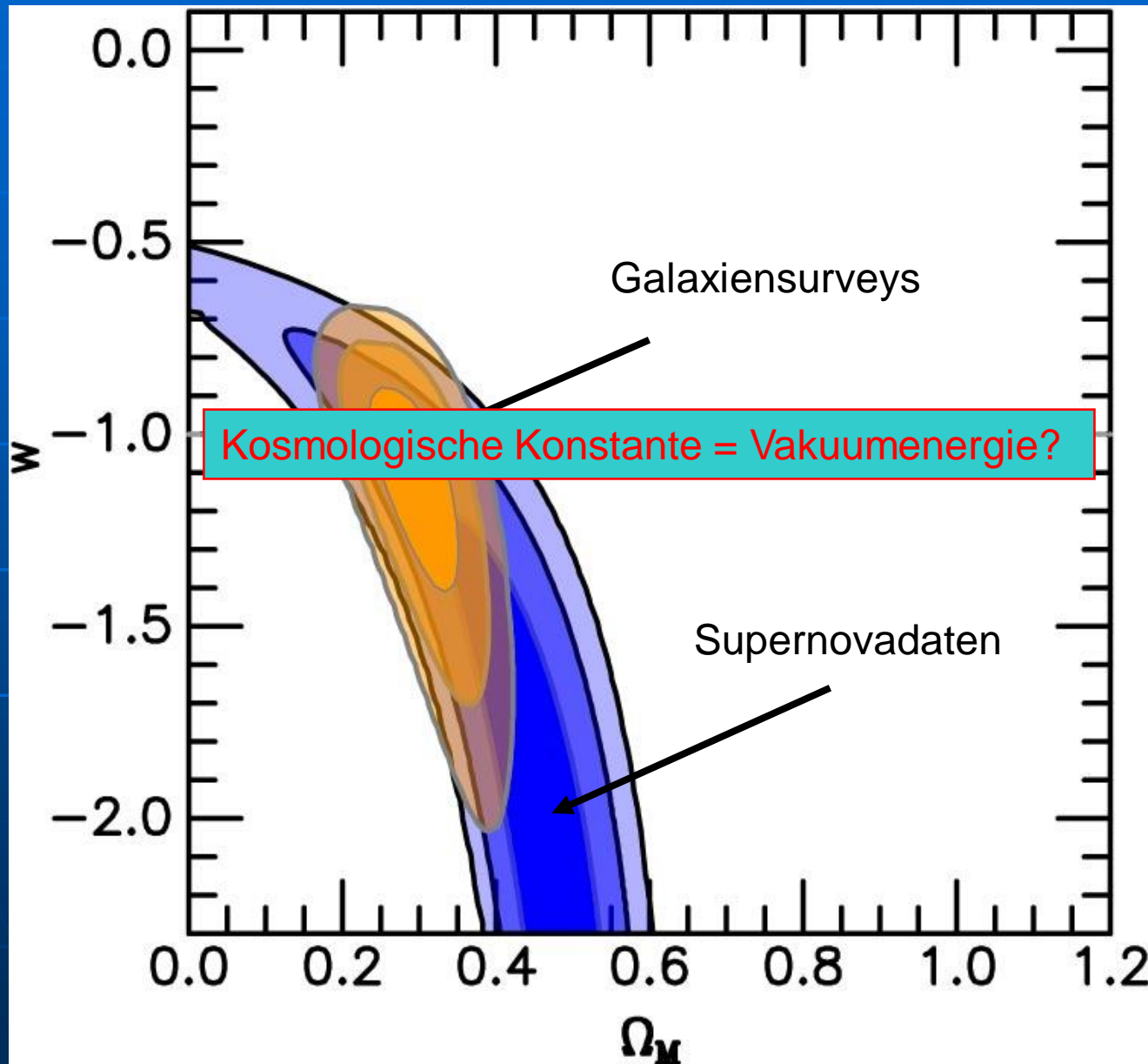
$$\Omega_M = 0.2 \pm 0.03$$

Cepheiden:

$$h = 0.72 \pm 0.08$$



Kosmologie und Typ Ia Supernovae



Die
"Zustandsgleichung"
des Universums:

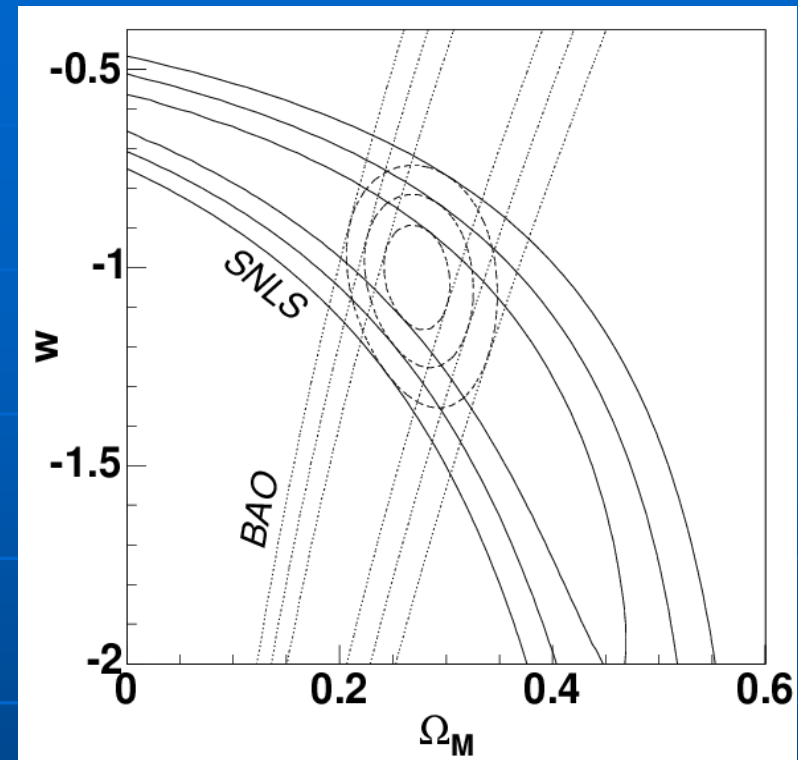
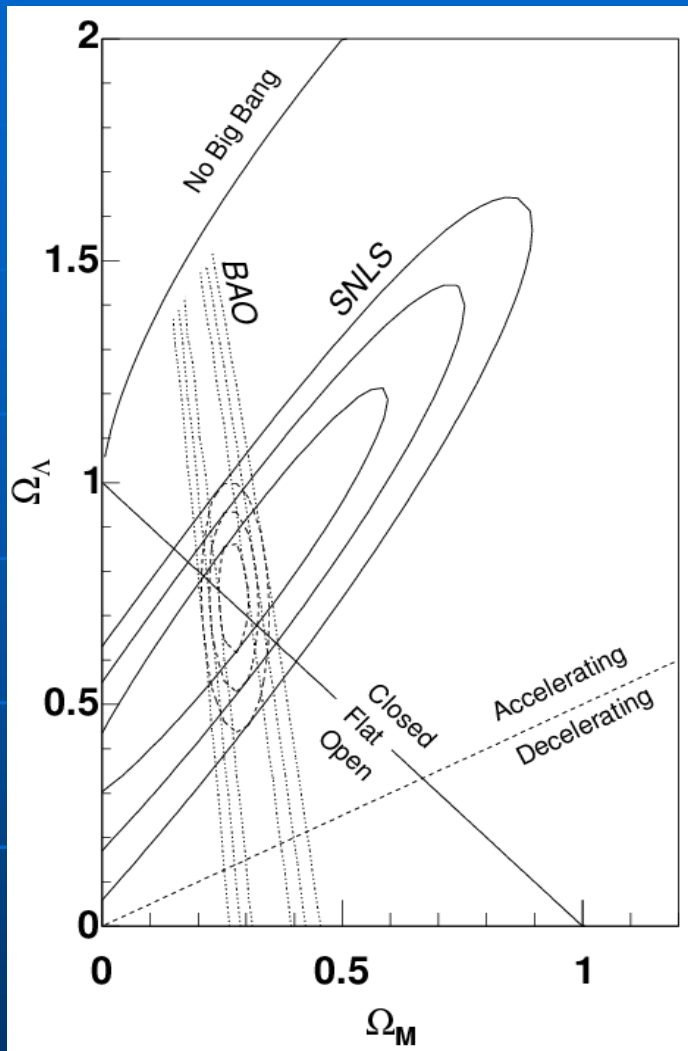
$$p = wp$$

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

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

Beschleunigung!

SNLS's kosmologische Parameter



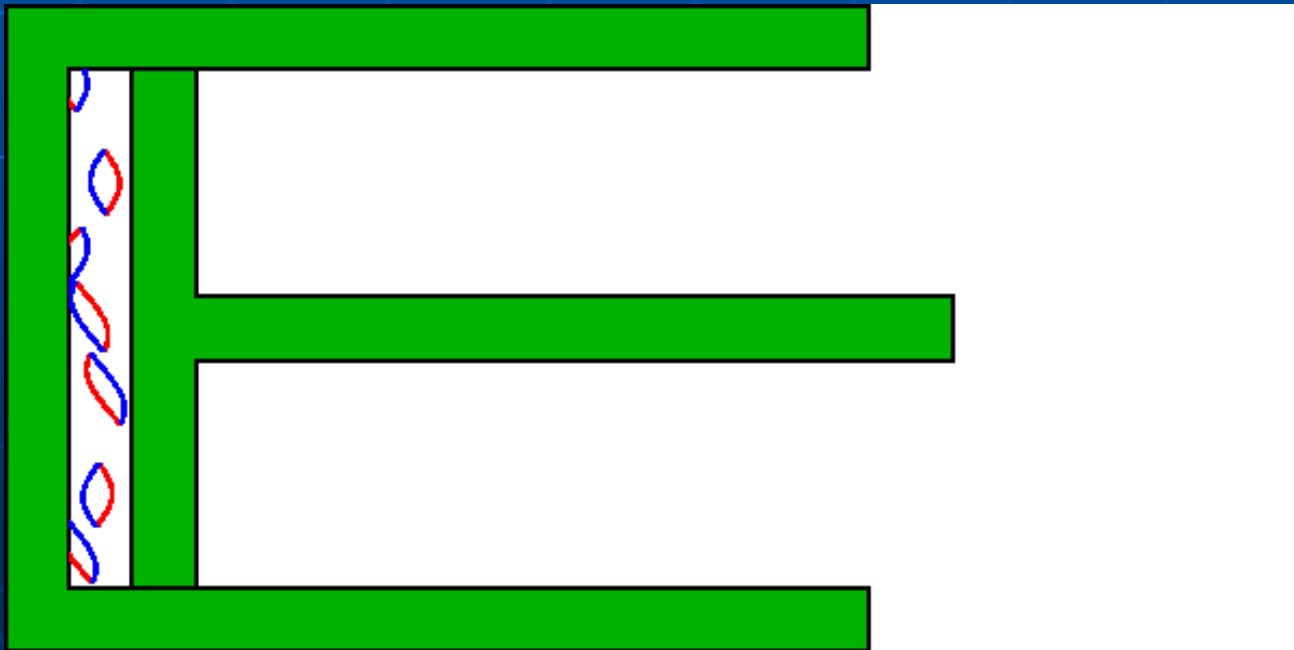
68.3, 95.5 und 99.7% CL
(Astier et al., 2006, 2007)

$$\Omega_M = 0.236 \quad 0.042 \text{ (stat)} \quad 0.032 \text{ (sys)} \text{ (flaches } \Lambda\text{CDM)}$$

$$w = -1.023 \quad 0.090 \text{ (stat)} \quad 0.054 \text{ (sys)}$$

Die „Dunkle Energie“

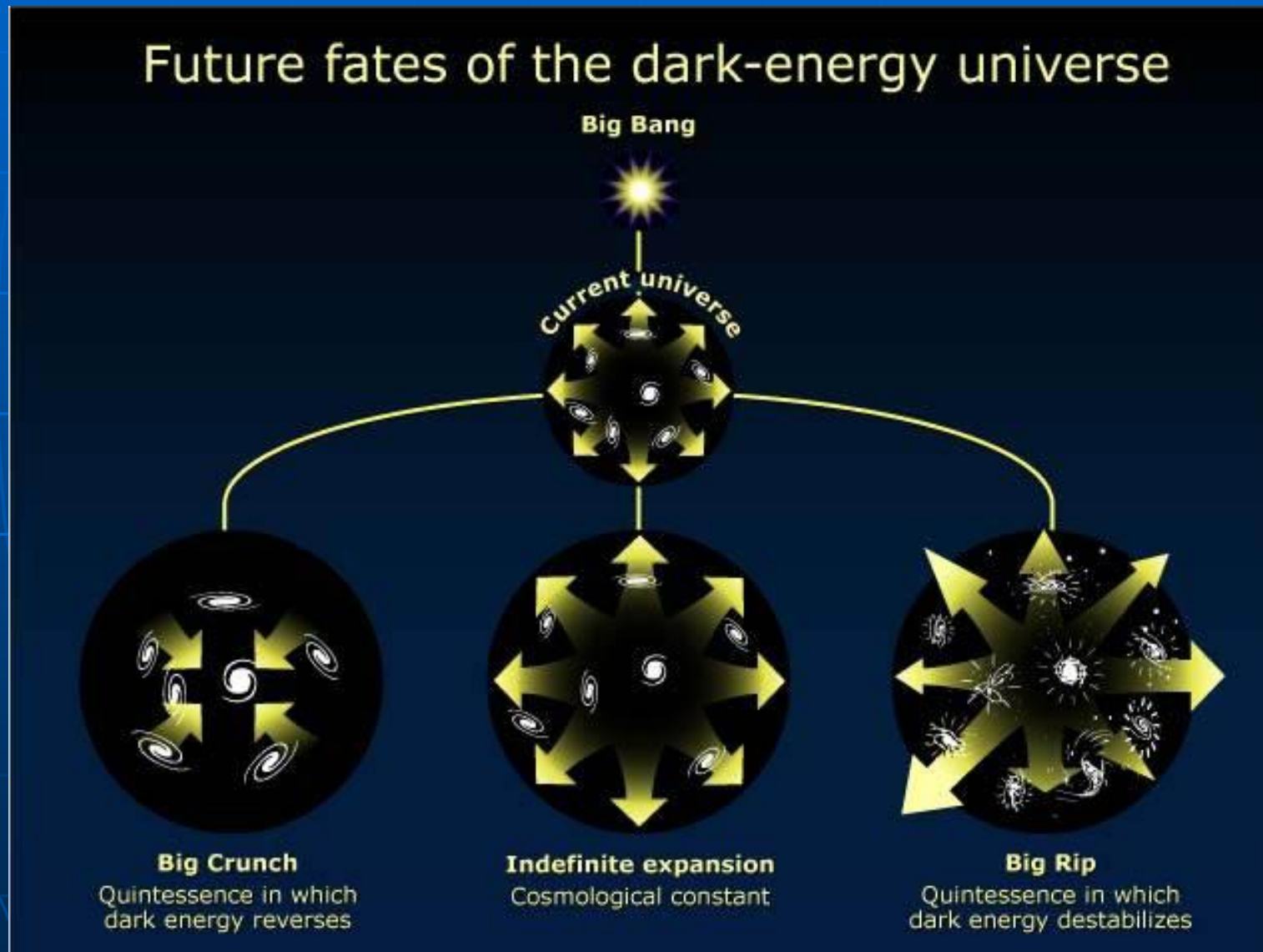
- „Kosmologische Konstante“ ?
- Energie des (Quanten-)Vakuums ?
- Ein neues unbekanntes Energiefeld ?



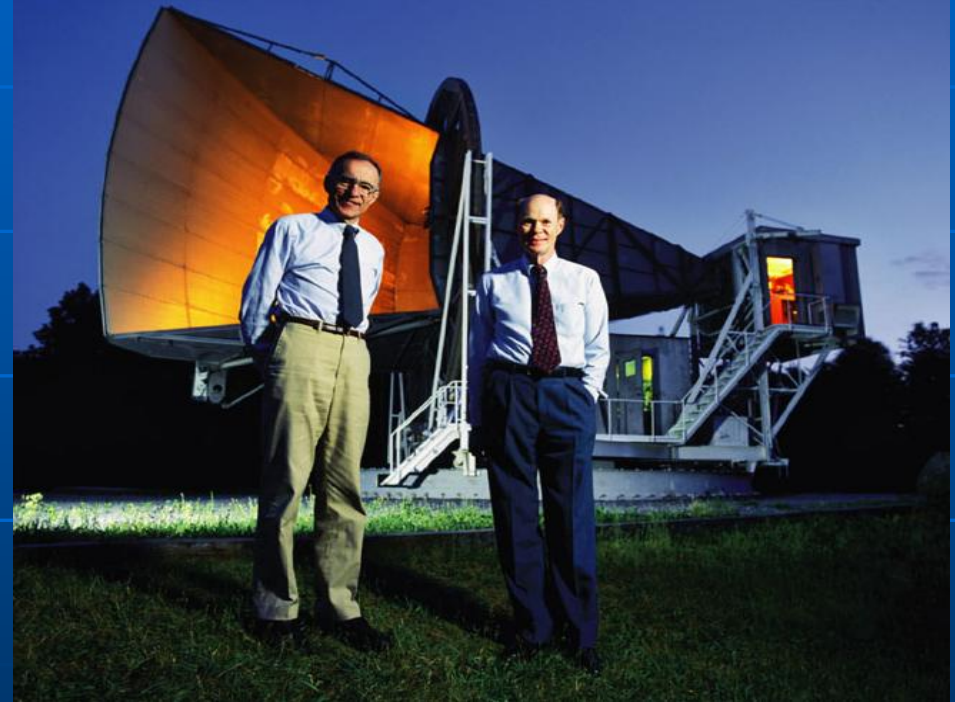
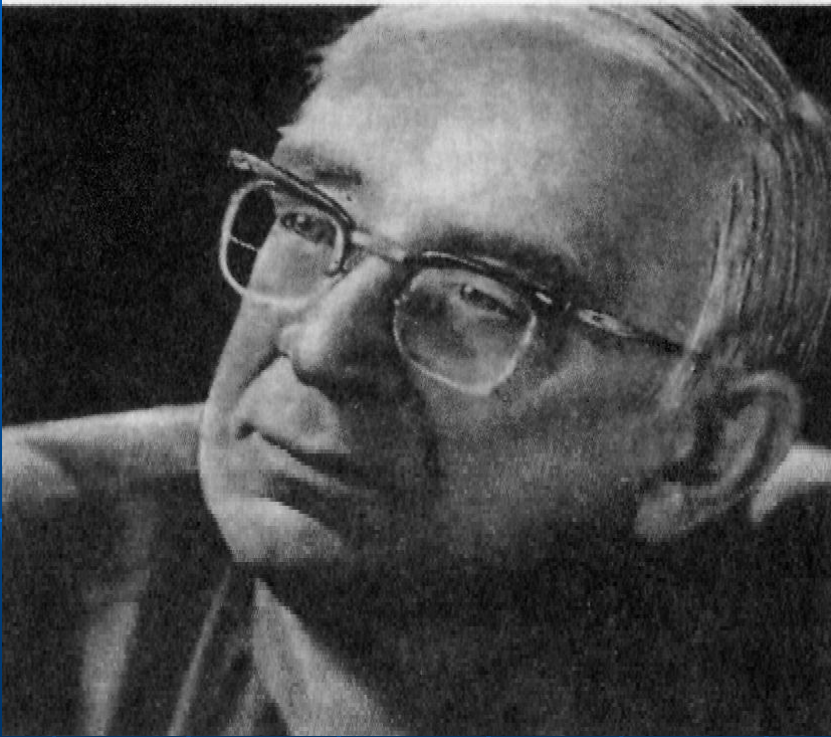
*Das Vakuum
wirkt wie ein
Gas mit
negativem
Druck!*

Was ist die Zukunft des Universums?

Hängt von der Natur der Dunklen Energie ab !



Ein unabhängiger Test: 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

300000 J

Vor der Rekombination:
*Das Universum is
undurchsichtig.*

Nach der Rekombination:
*Das Universum ist
durchsichtig.*

10^9 J

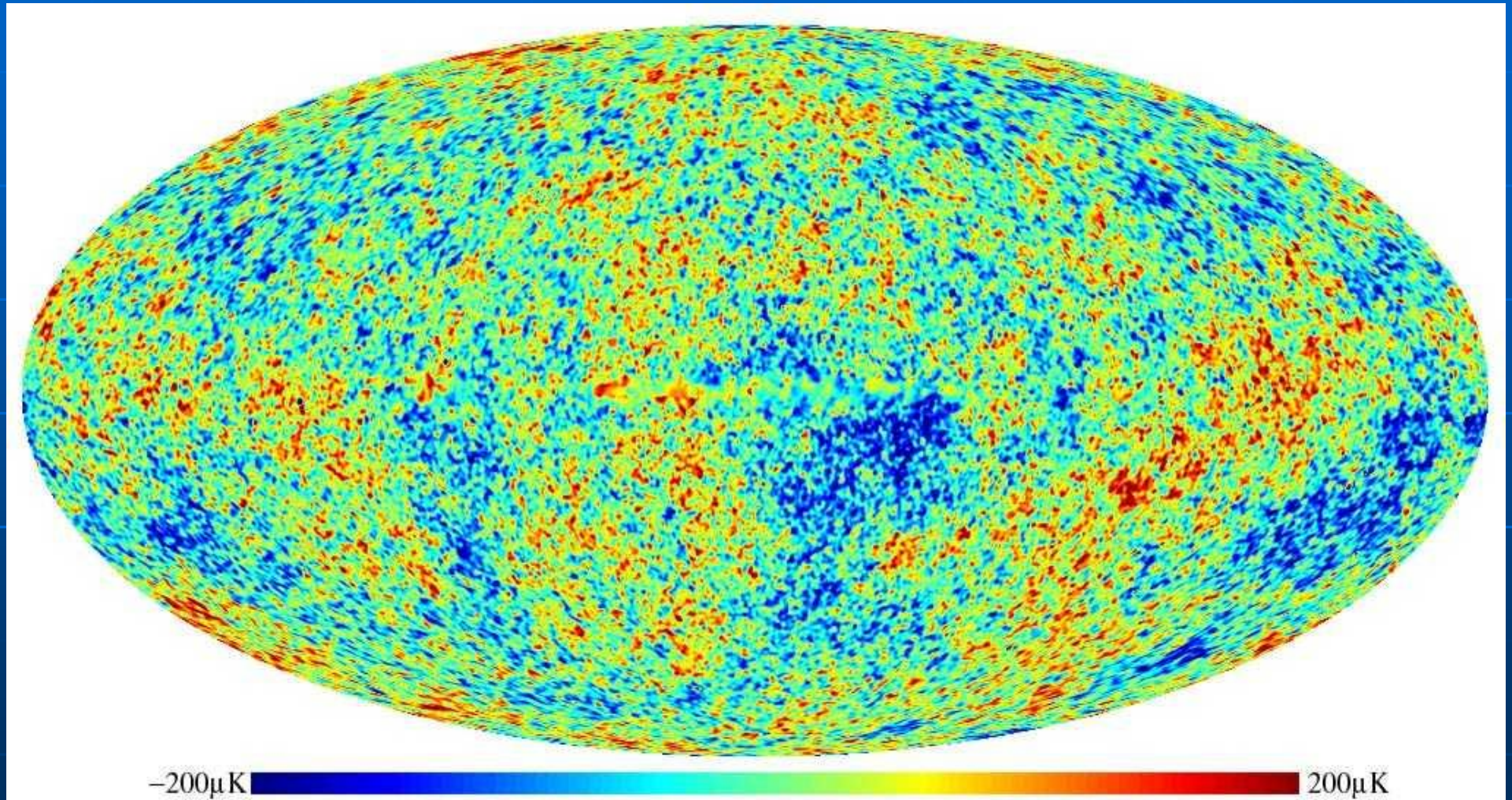
*Übergang ~300 000
Jahre nach dem Urknall!*

heute





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%

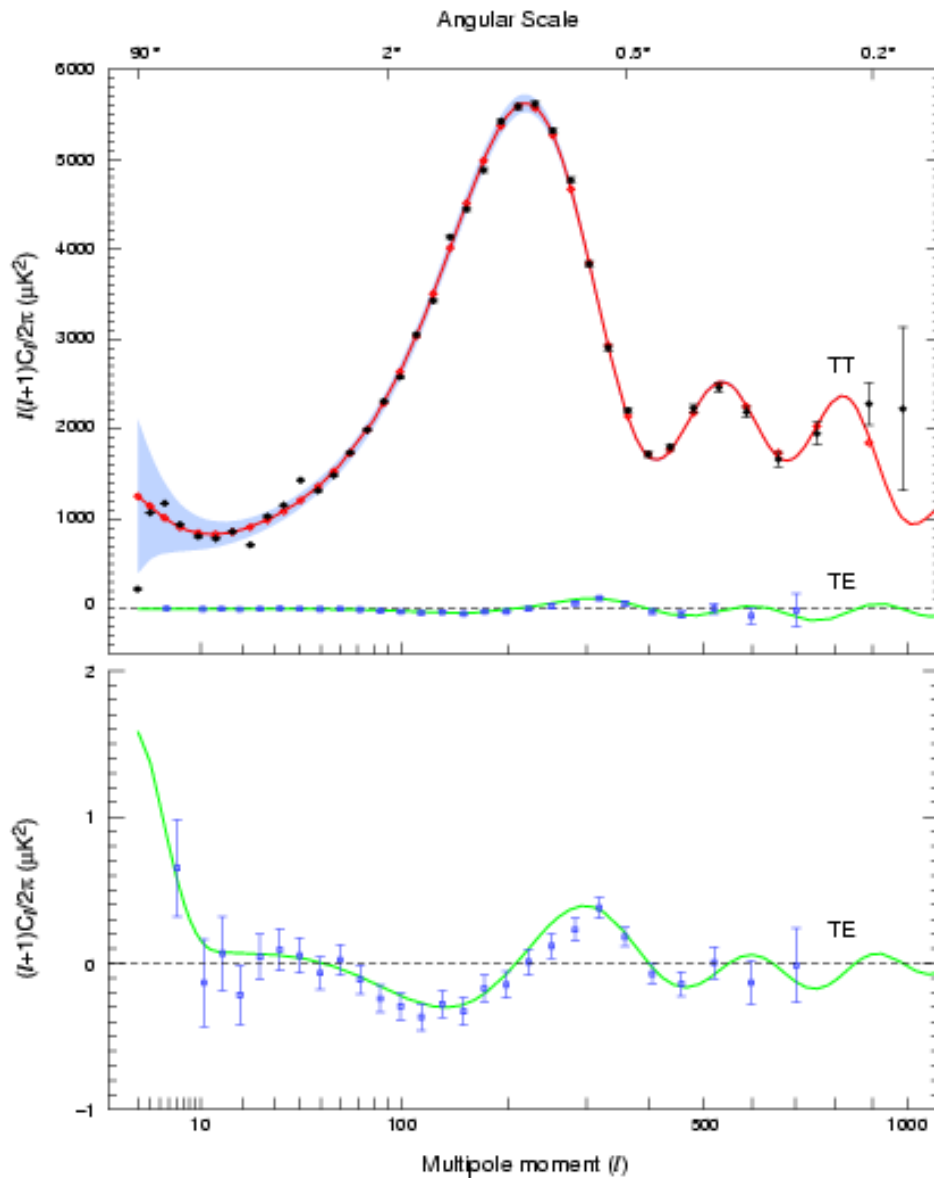
Baryonen:

~4%

Alter des Universums:

~14 Milliarden Jahre

(Fehler < 5%)

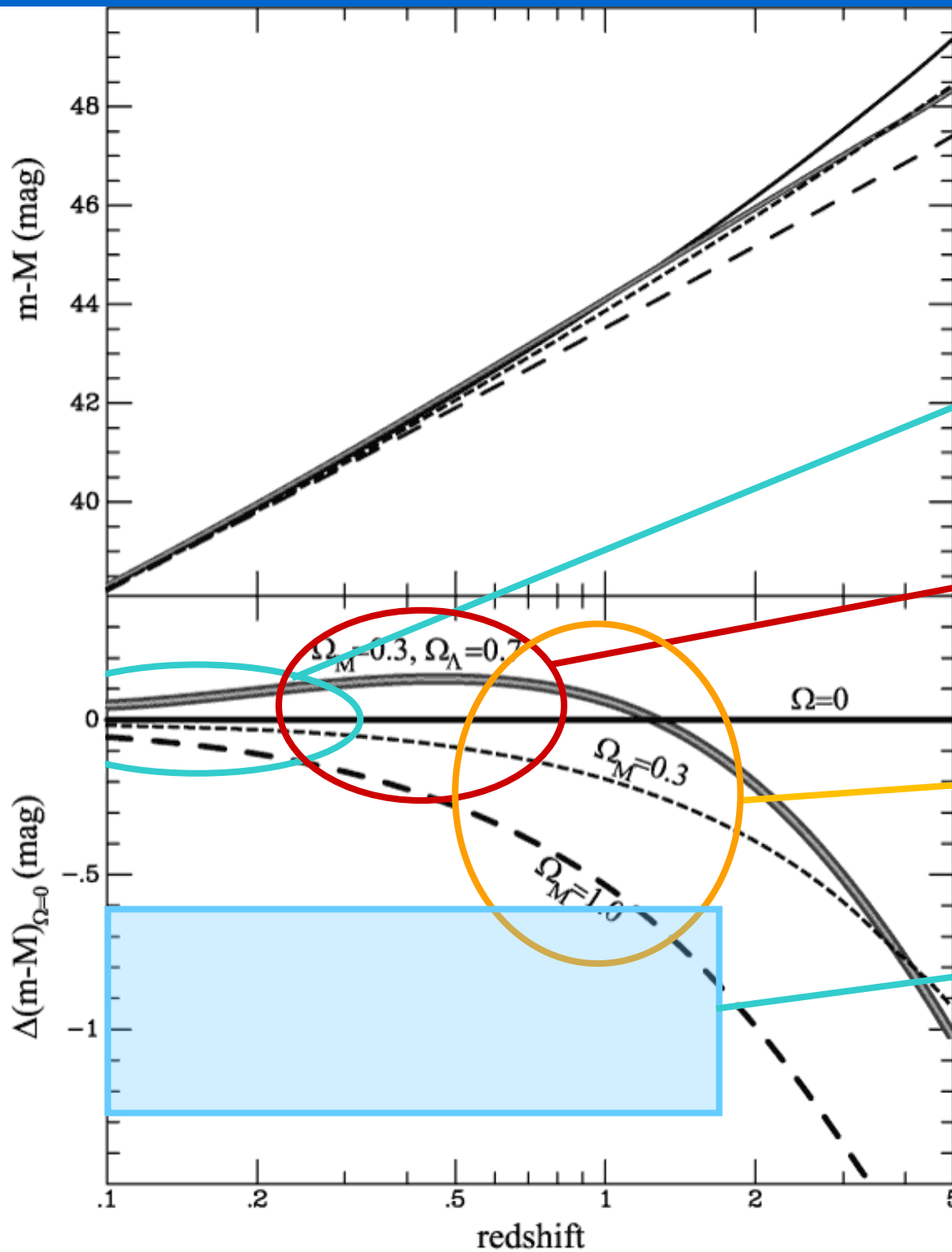


Was sind die möglichen Fehler?

Statistisch? → *sehr klein!*

Systematisch? → *kleiner als 2–3 % ?*

SN Projekte



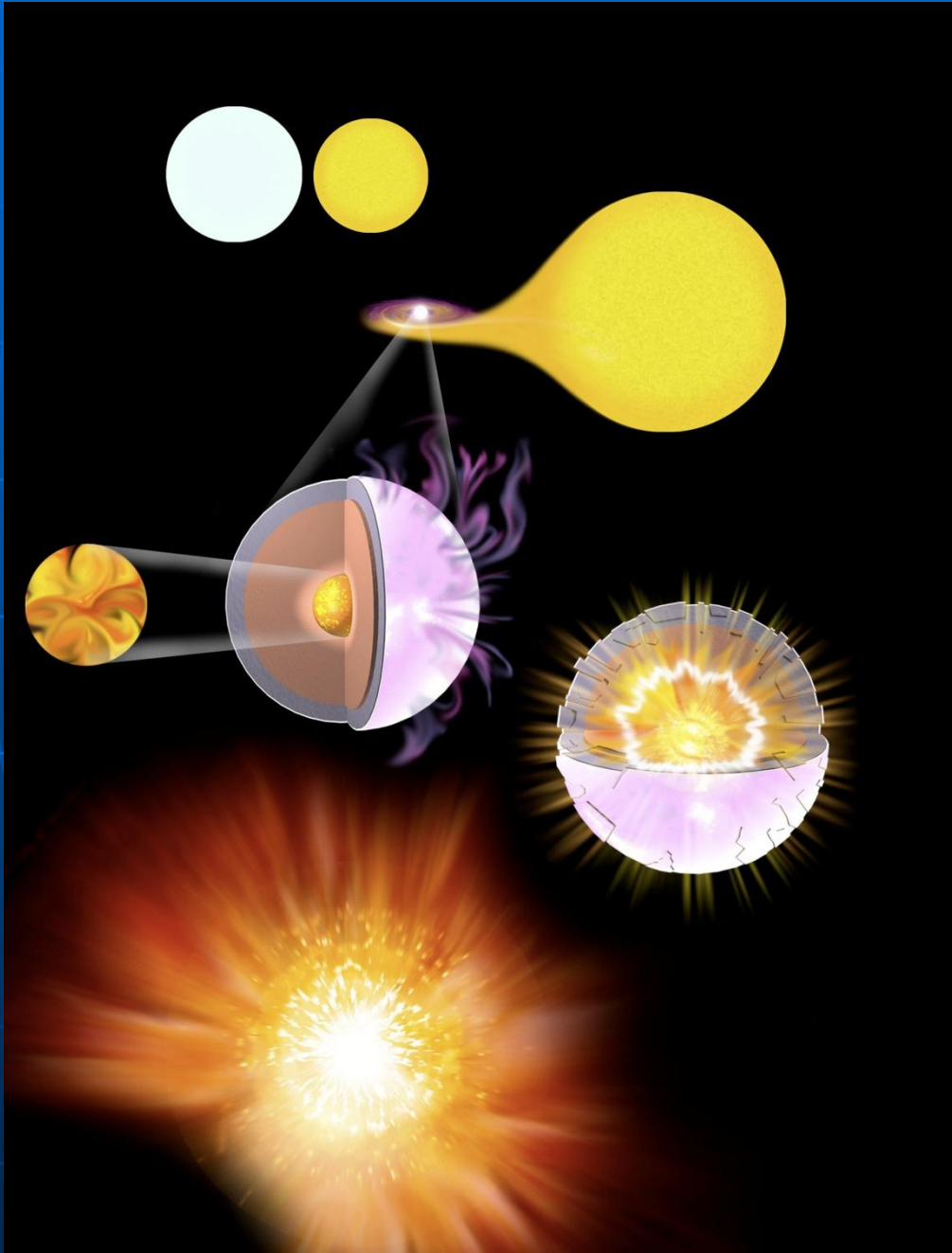
SN Factory
Carnegie SN Projekt

ESSENCE
CFHT Legacy Survey

Hohe-z SN Suche
(GOODS)

SNAP
(Supernova
Acceleration
Probe)

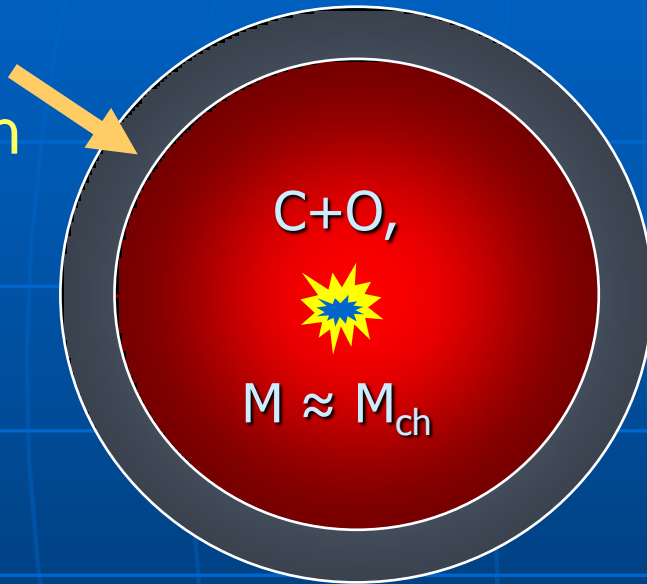
Das 'Standard-Model' für Typ Ia Supernovae



- Weißer Zwerg in Binärsystem
- Anwachsen der Masse zu M_{Chan} ($\approx 1,4 M_{\text{Sonne}}$) durch Massentransfer
- Zerstörung durch eine thermonukleare Explosion

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...

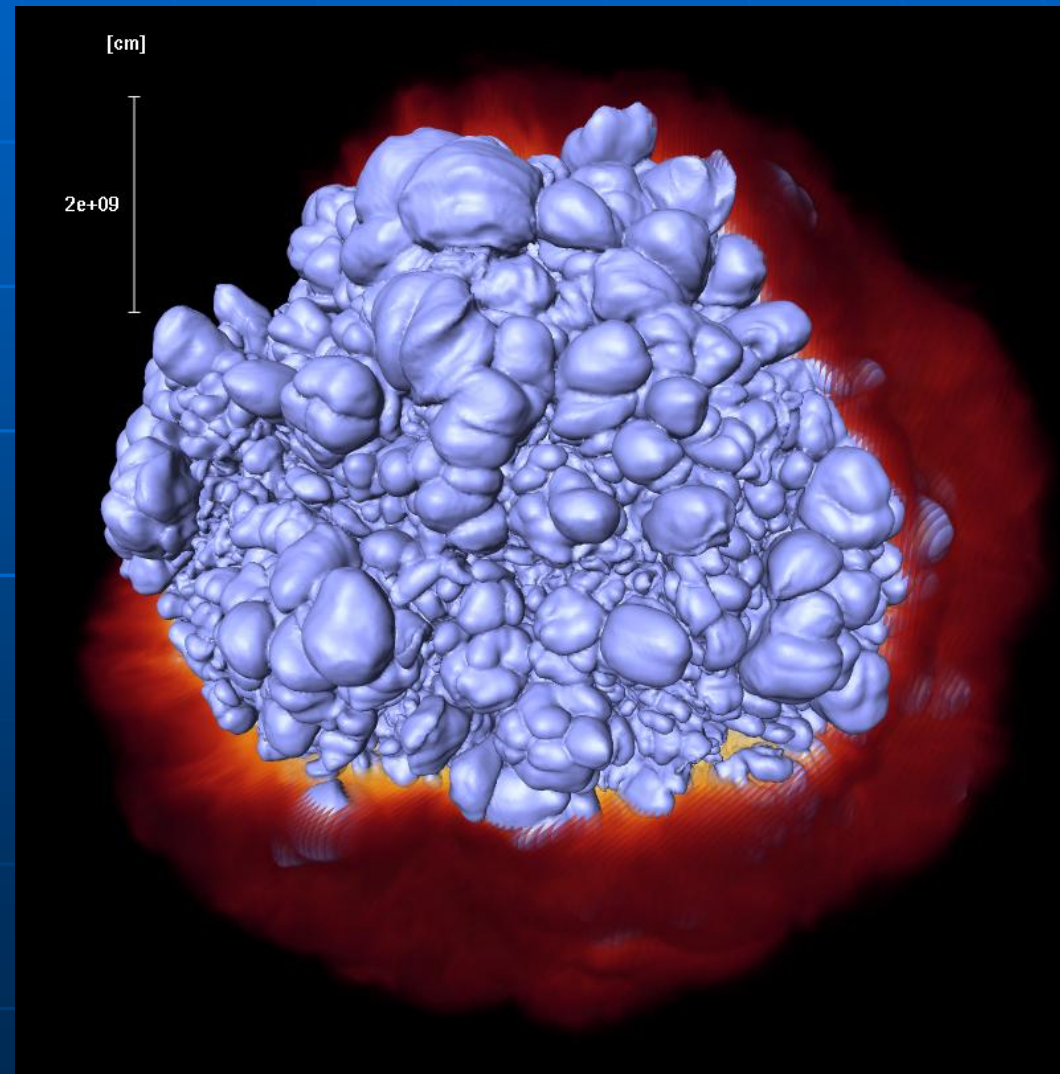
- Tägliche Erfahrung:
Turbulenz vergrößert die Brenngeschwindigkeit.
- Im Grenzfall starker Turbulenz:
 $U_B \sim V_T!$
- Physik
thermonuklearen
„Brennens“ ist sehr
ähnlich der vorge-
mischter chemischer
Flammen.

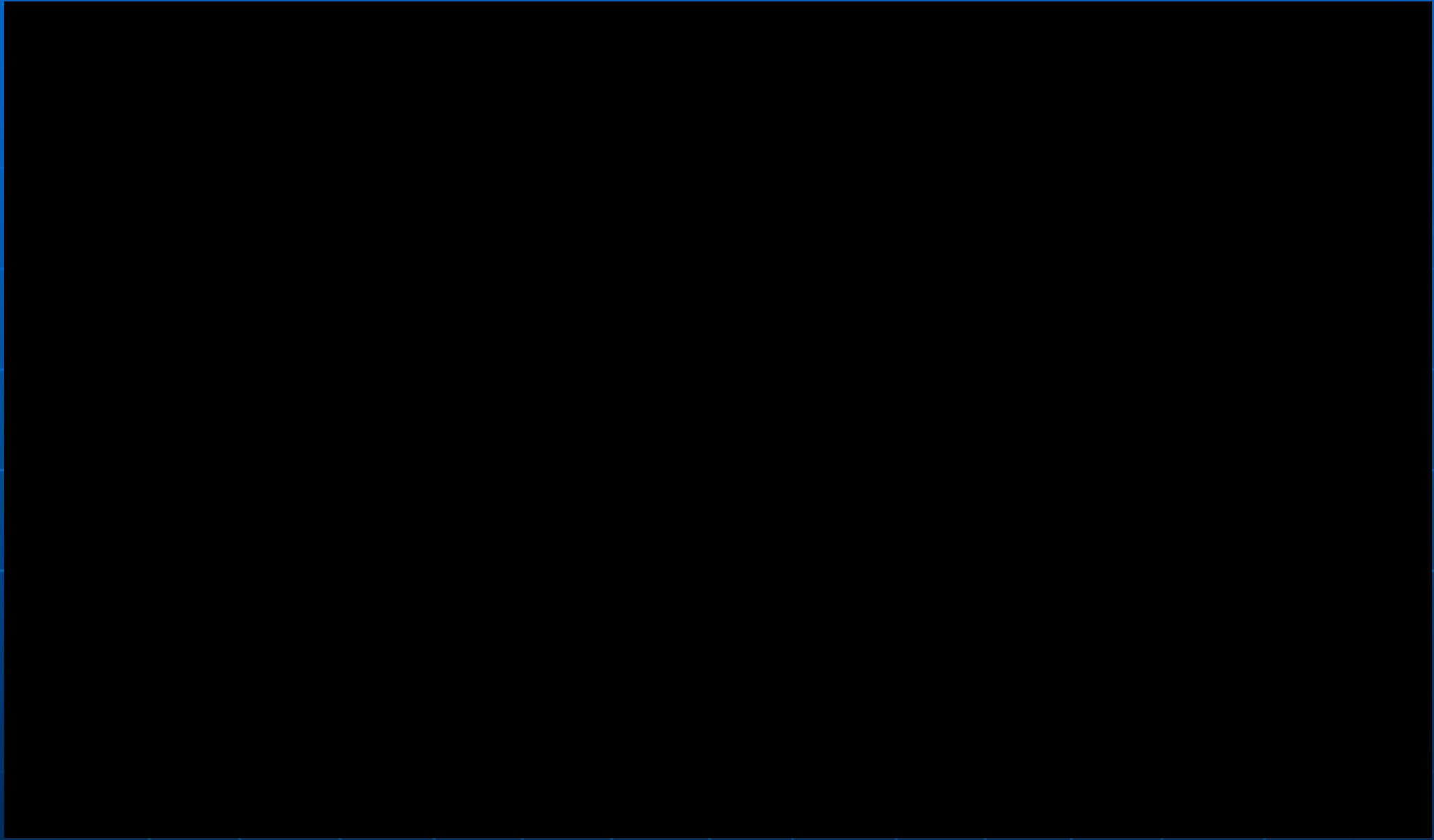


Die größte bisher durchgeführte Rechnung:

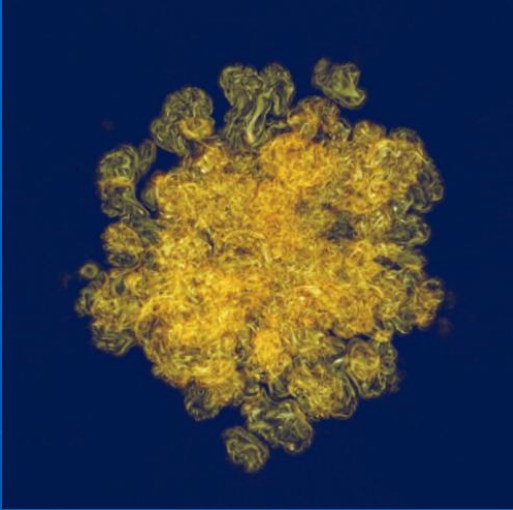
- “ 4π ”
- 1024^3 Gitter
- Anfangsauflösung nahe dem Zentrum $\approx 800\text{m}$
- Bewegtes Gitter
- Lokales & dynamisches
- SGS-Model

(Röpke et al., 2007)

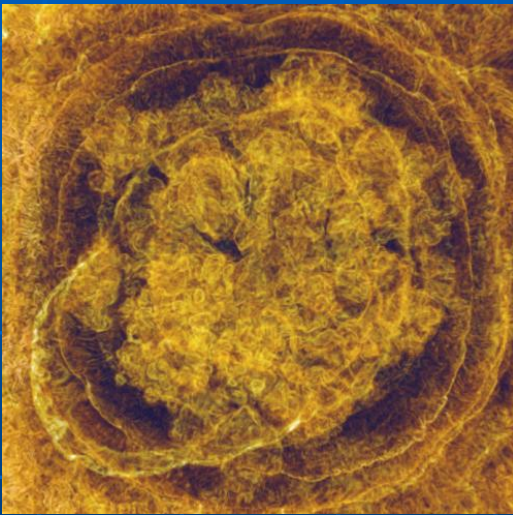




Voll-entwickelte Turbulenz?



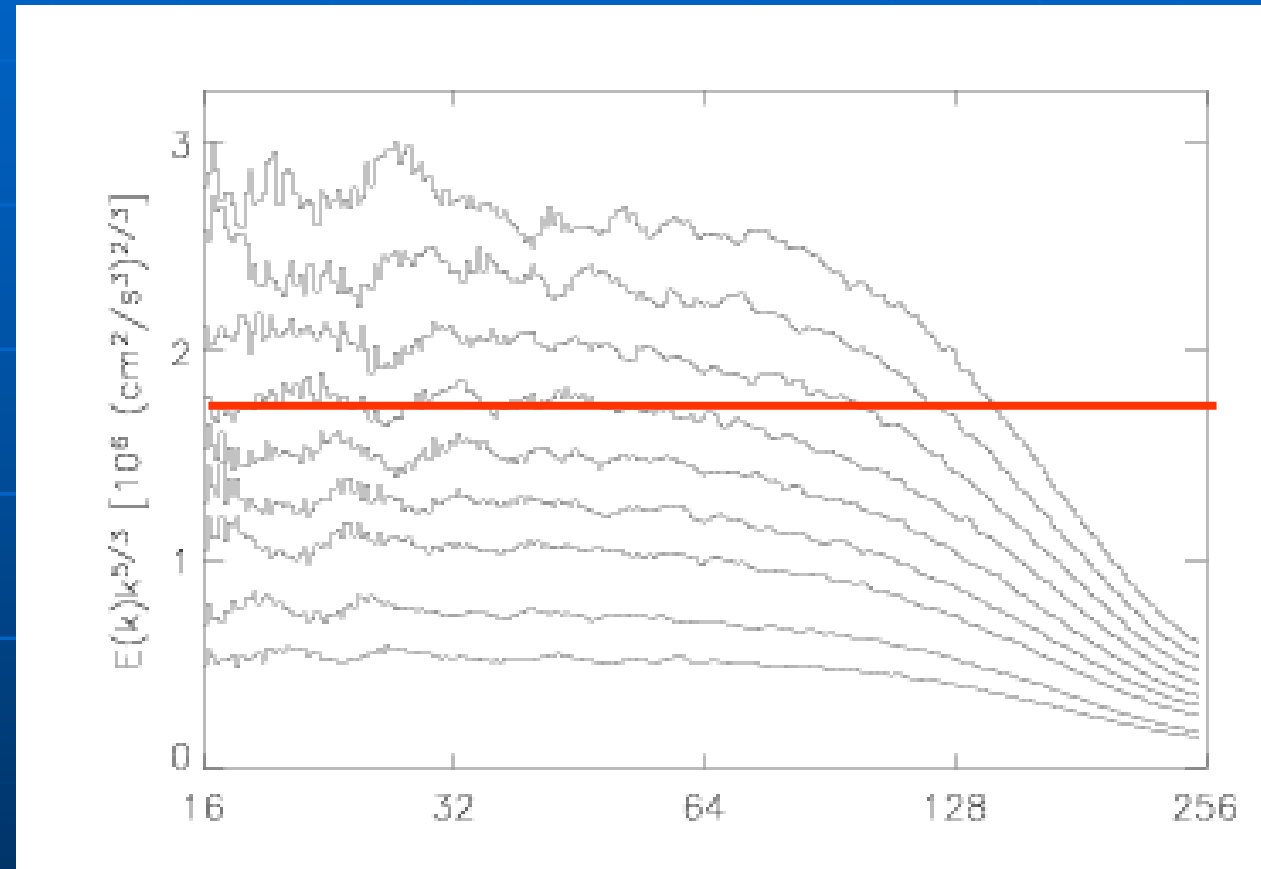
0.25s



0.50s



0.75s



Wellenzahl k \longrightarrow

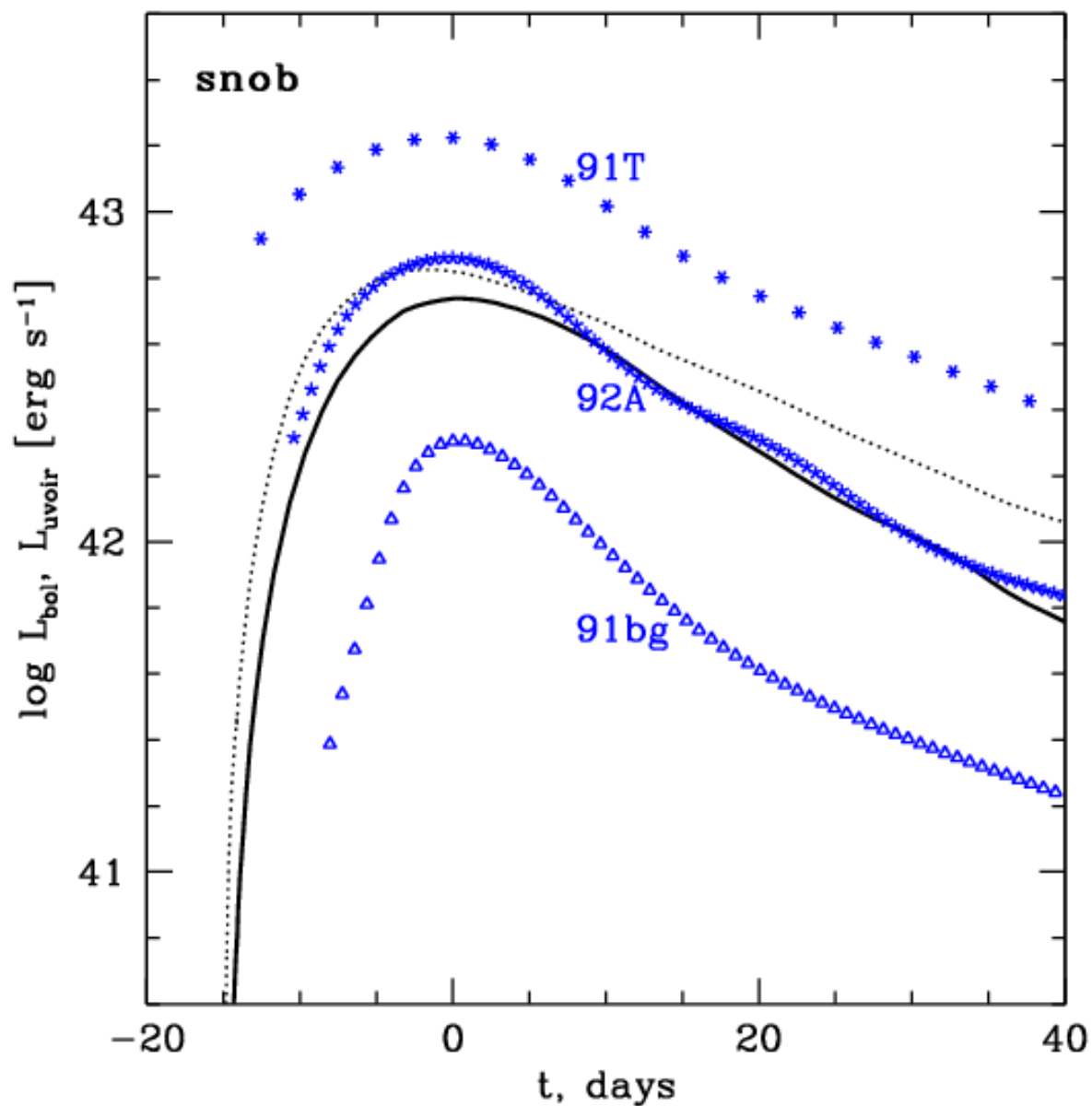
Röpke et al. (2008)

Einige Ergebnisse:

- $E_{\text{kin}} = 8.1 \cdot 10^{50} \text{ erg}$ (= 0.81 *Bethe*)
- Eisengruppenelemente: $0.61 M_{\text{sun}}$ ($\sim 0.41 M_{\text{sun}} {}^{56}\text{Ni}$)
- Mittelschwere Kerne: $0.43 M_{\text{sun}}$
- Unverbrannt C+O: $0.37 M_{\text{sun}}$
(weniger als $0.08 M_{\text{sun}}$ bei $v < 8000 \text{ km/s}$)
- $V_{\text{max}} \approx 17,000 \text{ km/s}$

In sehr guter Übereinstimmung mit den
Beobachtungen von Typ Ia Supernovae!

Ein Beispiel: Bolometrische Lichtkurven



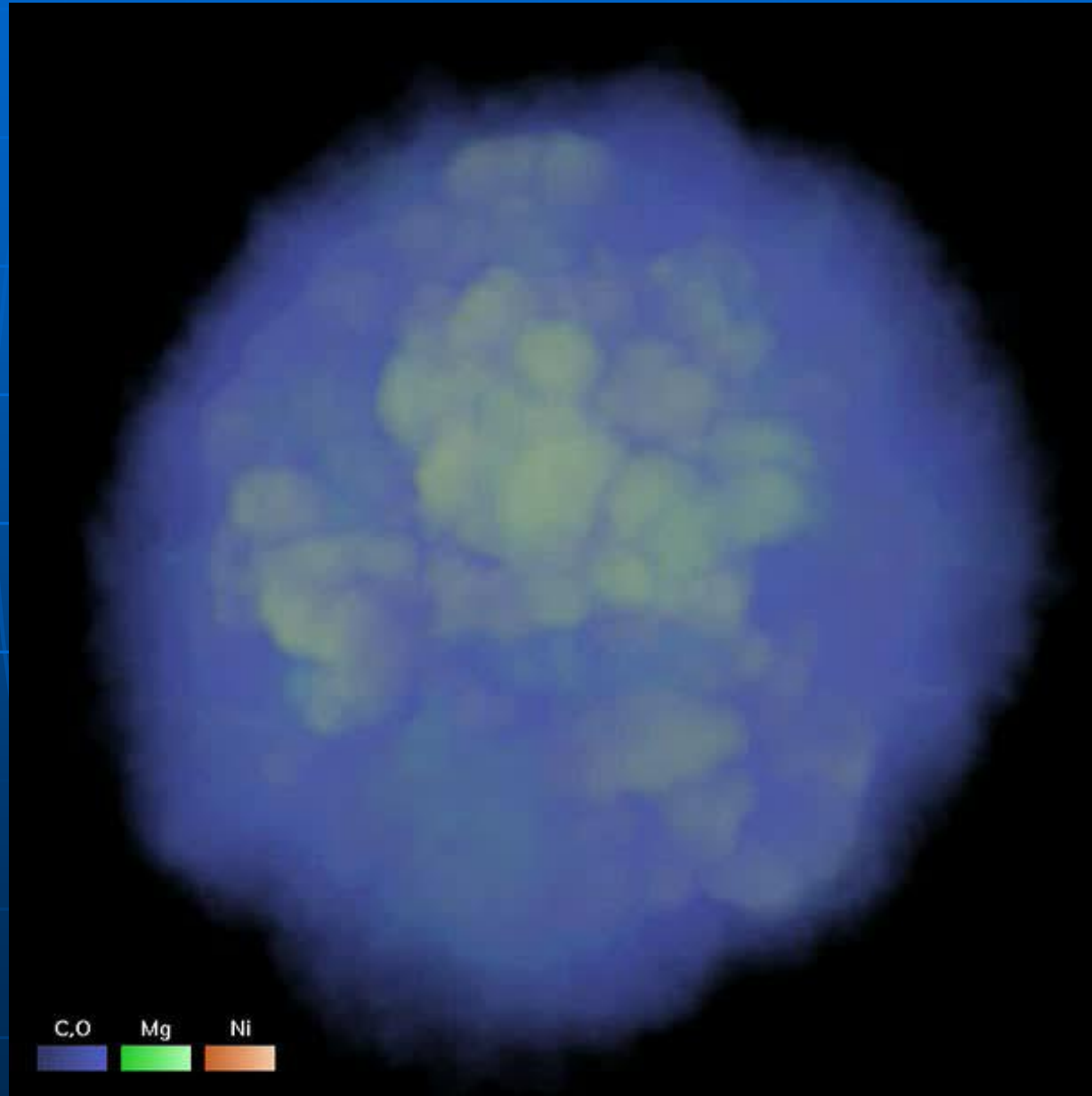
Man beachte:

Dies ist eine Vorhersage, kein Fit!

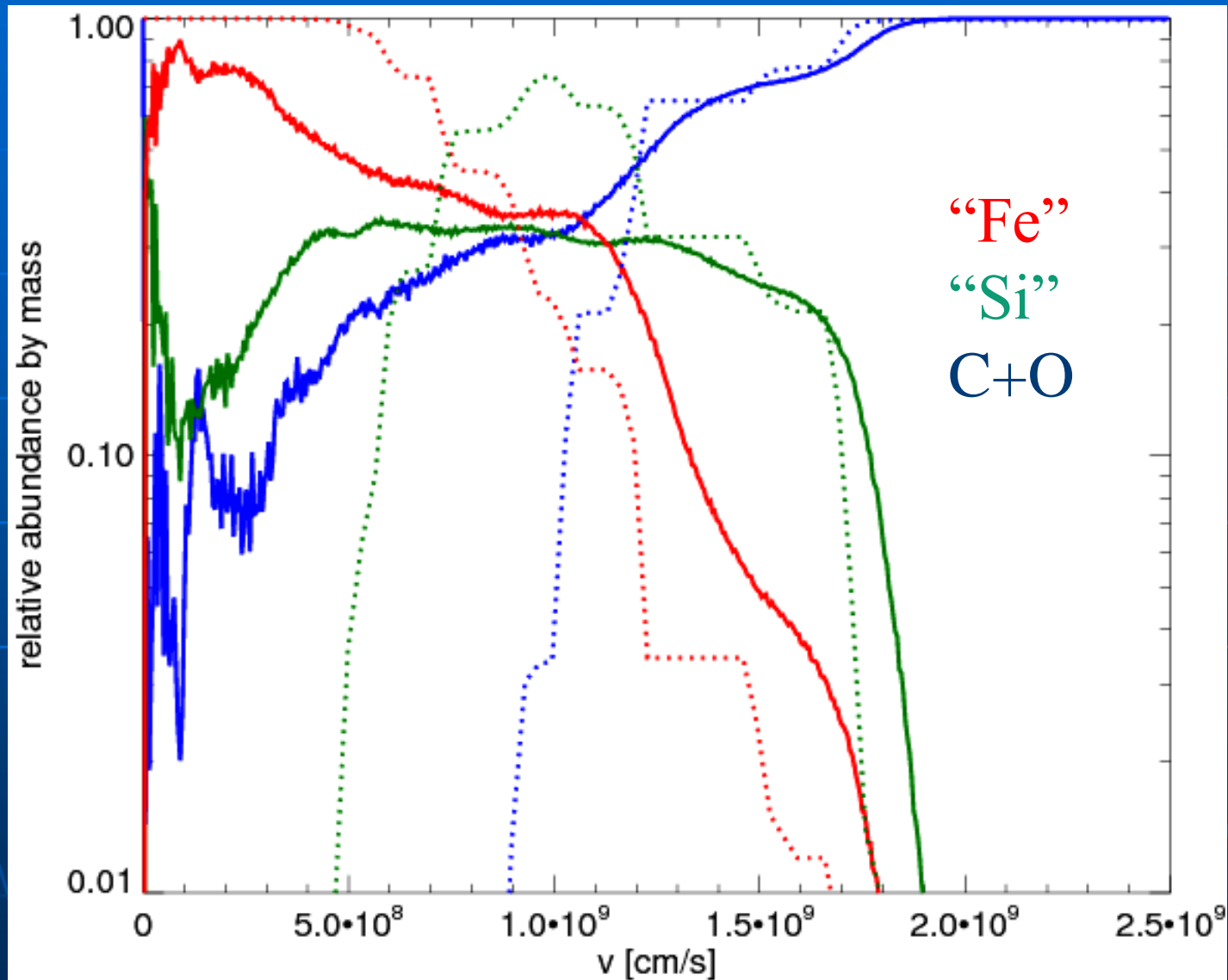
Röpke et al. (2008)

Ein weiteres Beispiel:

Die Elementhäufigkeiten im SNOB run...

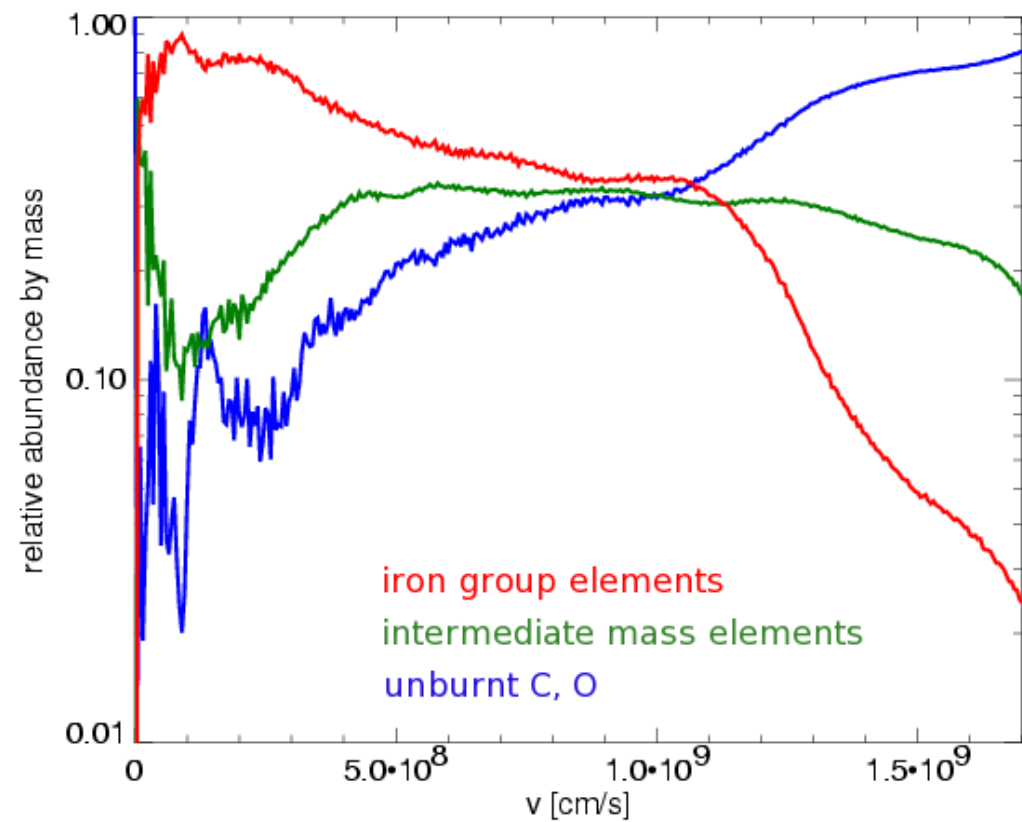
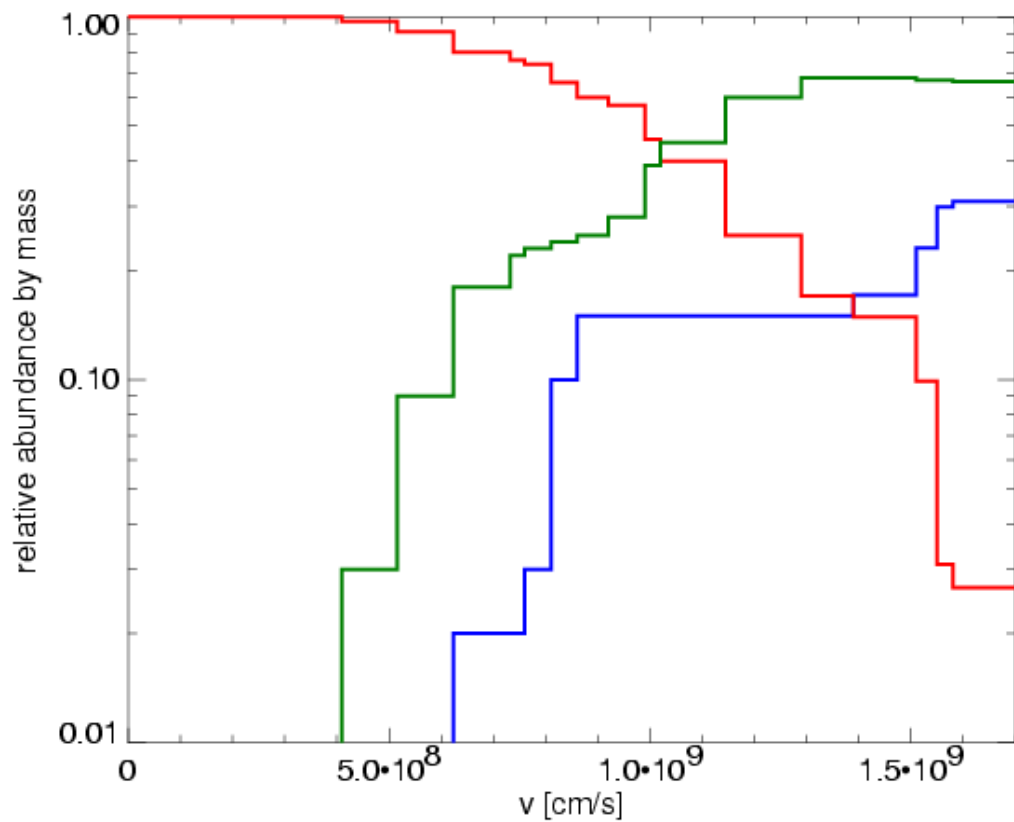


... und Häufigkeitstomographie



SN 2004eo vs. SNOB (Mazzali et al., 2008)

.... und ein anderes Beispiel



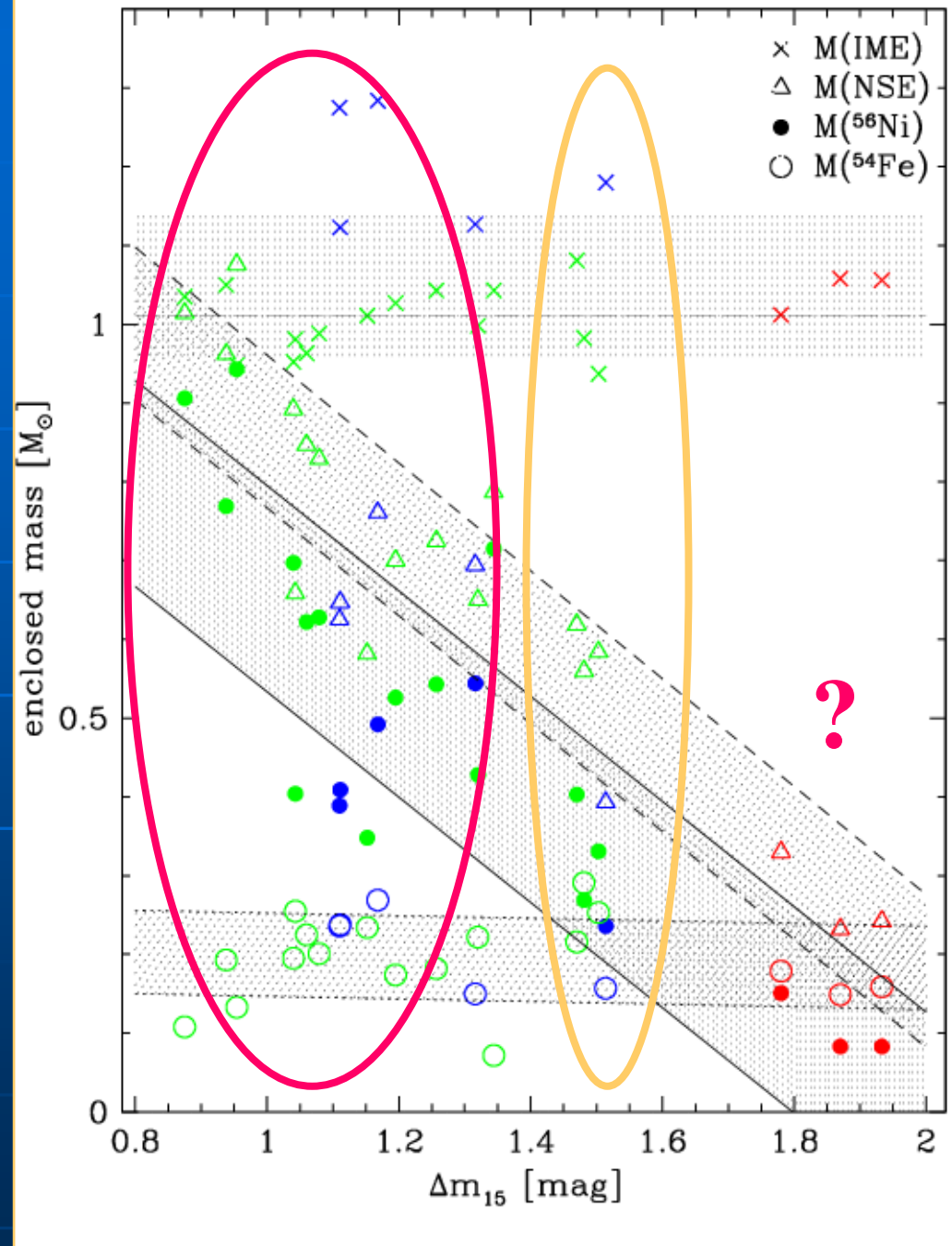
Beobachtet (SN 2002bo)

SNOB

Verstehen wir die Helligkeitsunterschiede?

Das "Zorro" Diagramm

(Mazzali et al., 2007)

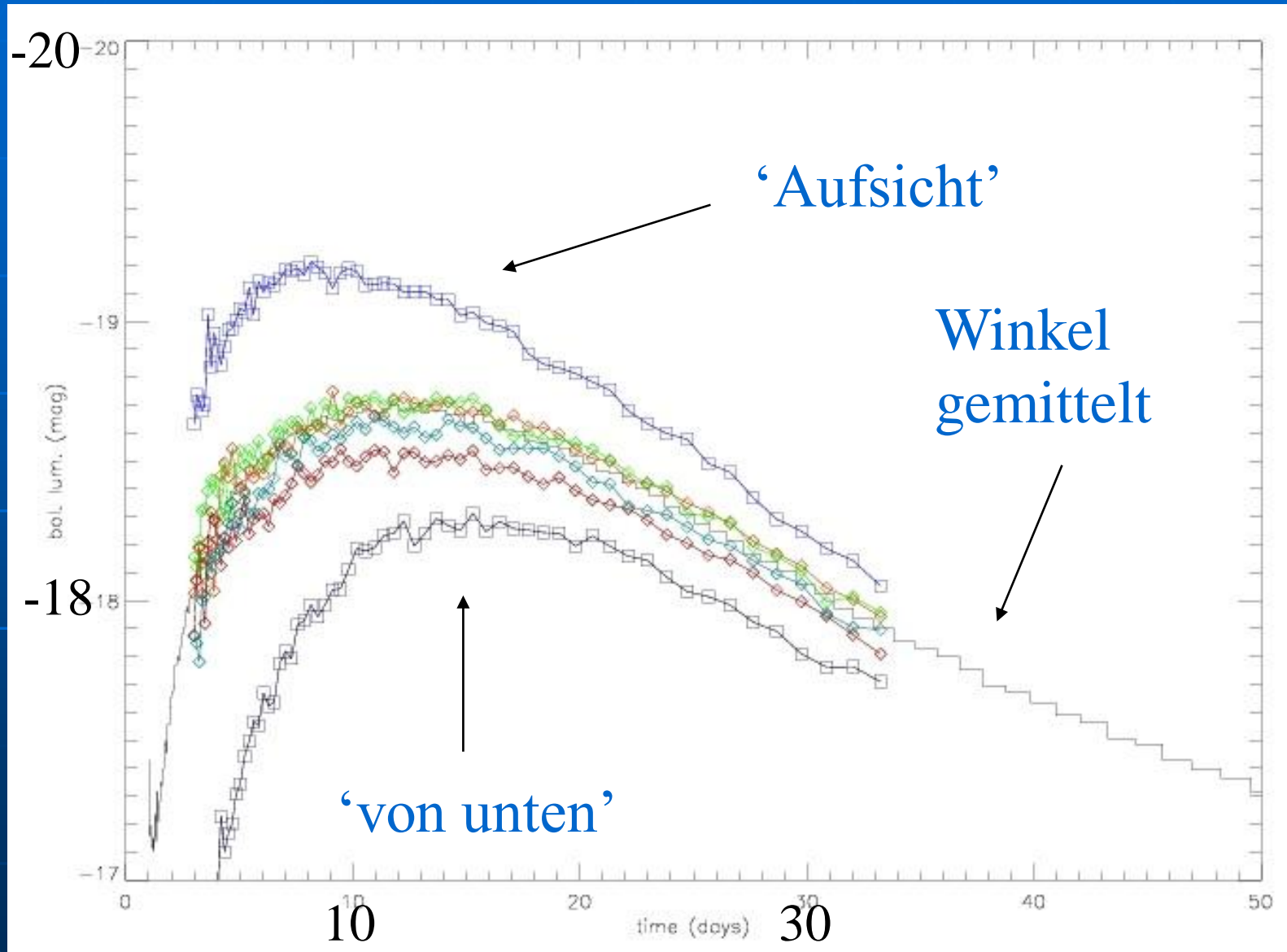


Sehr hell \longrightarrow lichtschwach

Was sind also mögliche
Fehler?

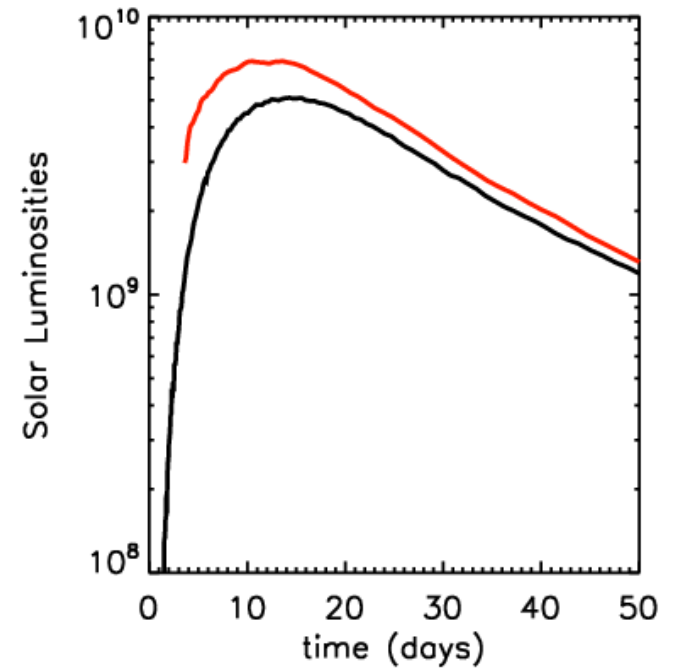
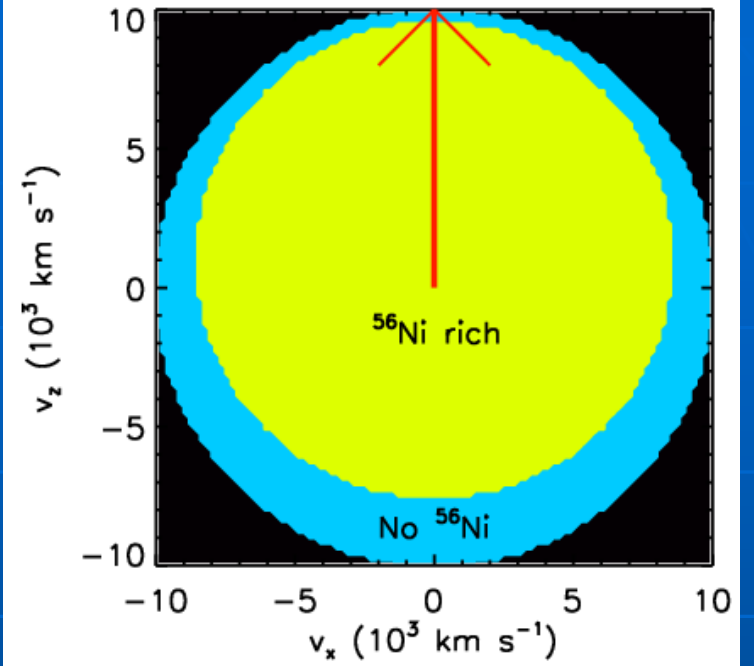
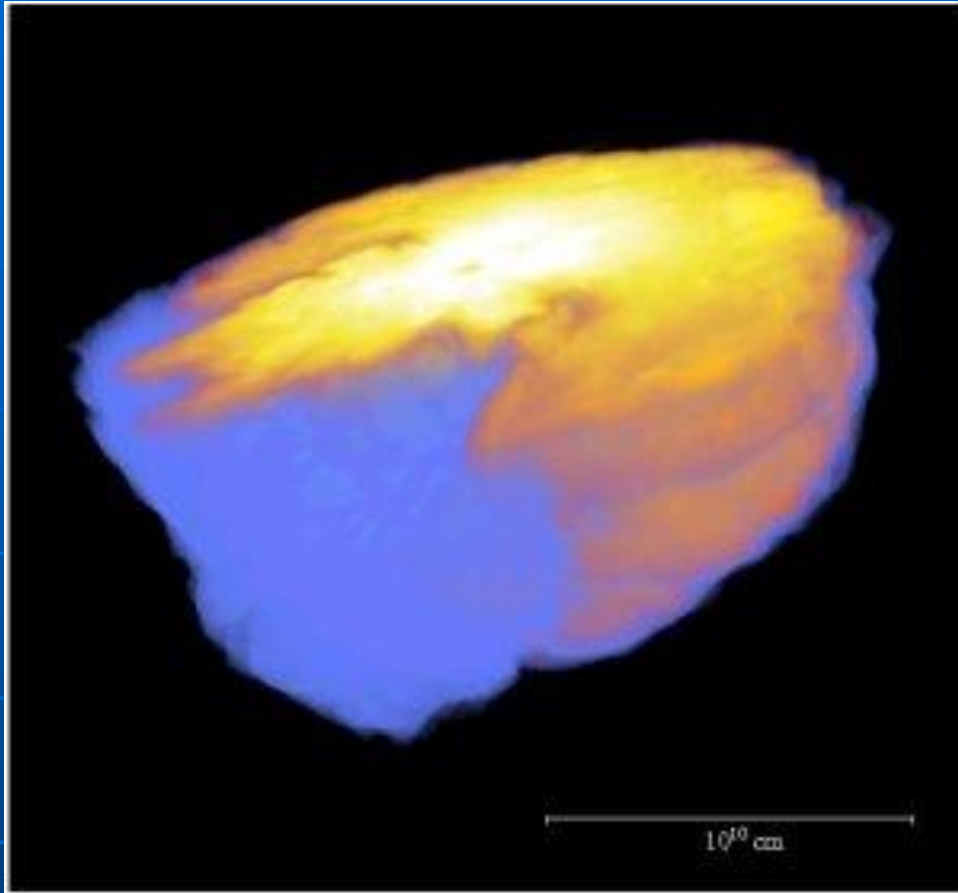
Zum Beispiel: asymmetrische Explosionen?

L
E
U
C
H
T
K
R
A
F
T



Zeit in Tagen

(Sim et al., 2007)



Soweit es um die Kosmologie geht:

Systematik!



Die Hoffnung verbleibt in der Dose der Pandora!

COSMOLOGY MARCHES ON



“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