Licht vom Anfang der Welt

Können Sternexplosionen das Universum vermessen?

Wolfgang Hillebrandt
MPI für Astrophysik
Garching

Licht vom Anfang der Welt

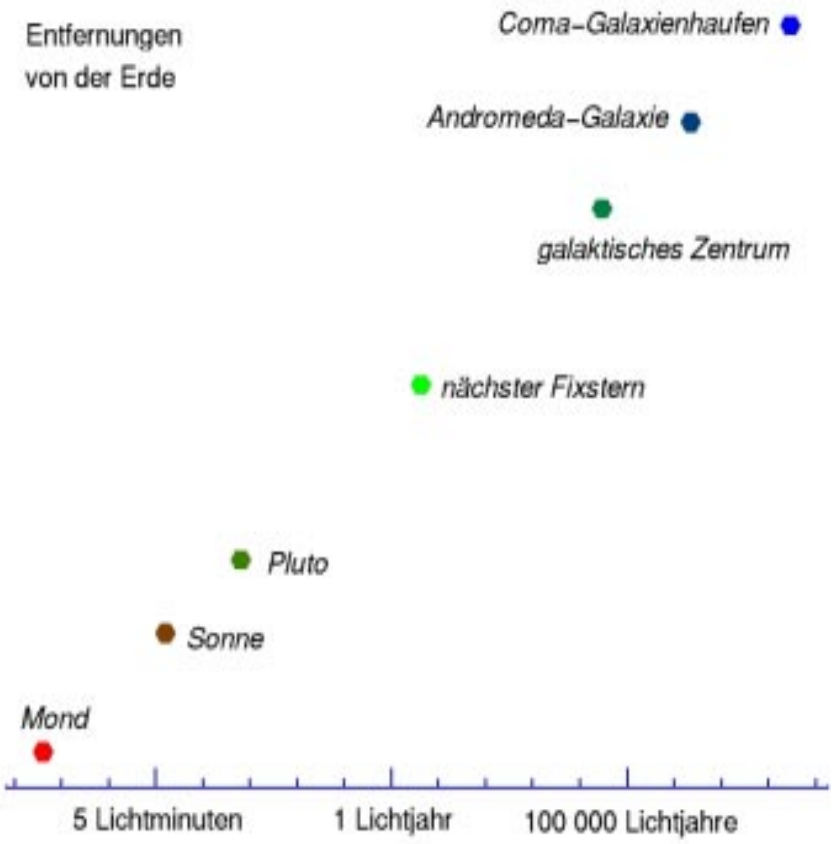
- *Licht ist die kürzeste Verbindung zweier Ereignisse in Raum und Zeit.*

  →

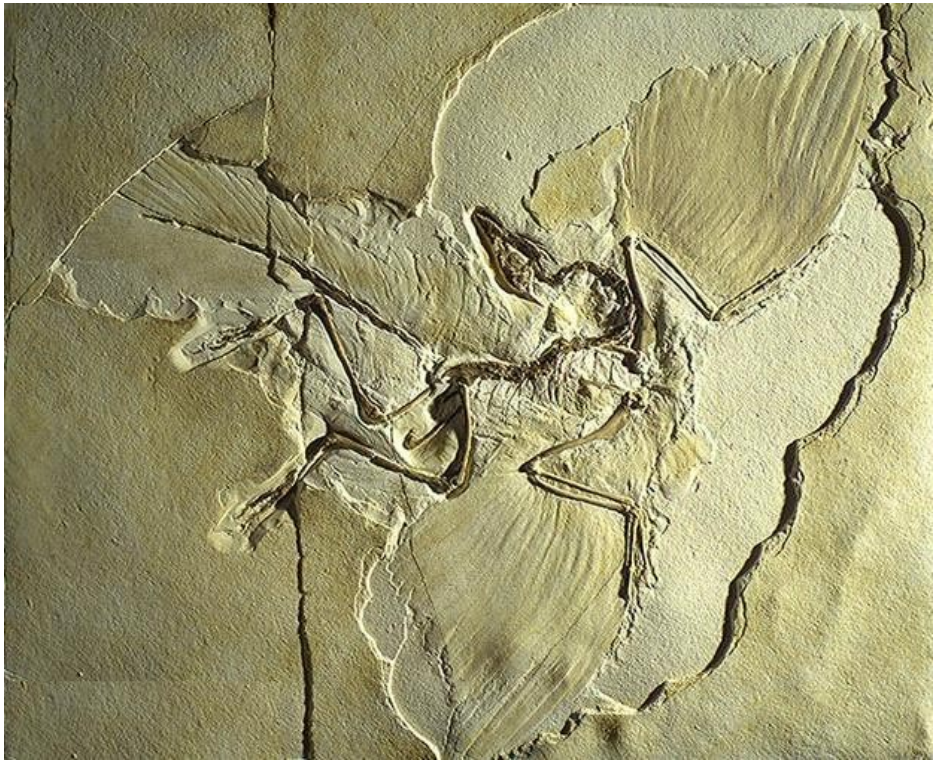
- *Licht vermisst die Geometrie des Universums!*

Unsere kosmische Nachbarschaft:

1 Lichtjahr = 9,46 Billionen km!



Astronomie: Blicke in die Vergangenheit!

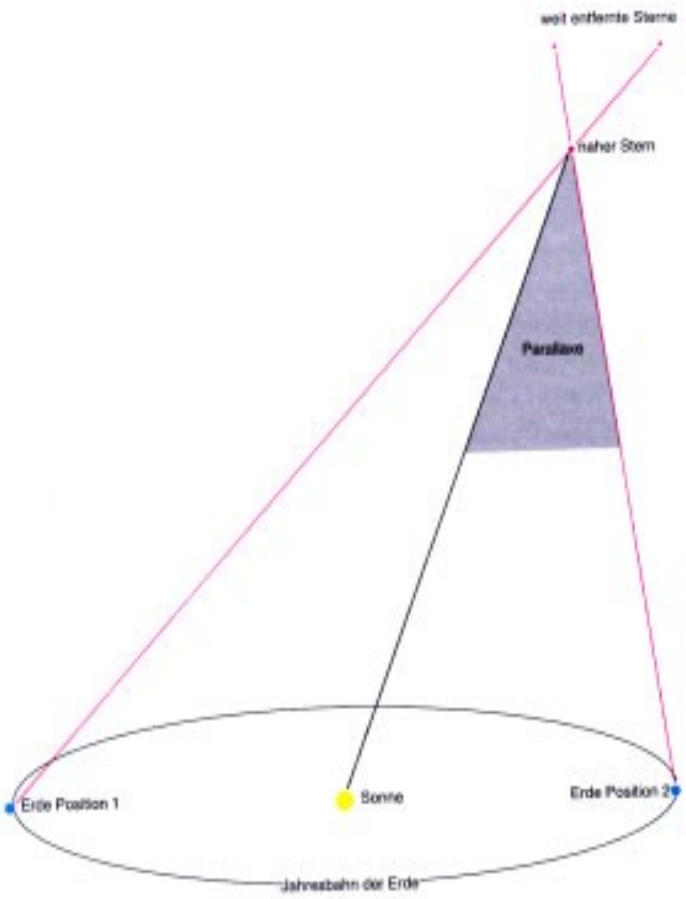


Galaktisches Zentrum:
Auf der Erde lebten Neandertaler

Andromeda-Galaxie:
Die Alpen entstehen

Der Coma-Haufen:
Archeopterix flog

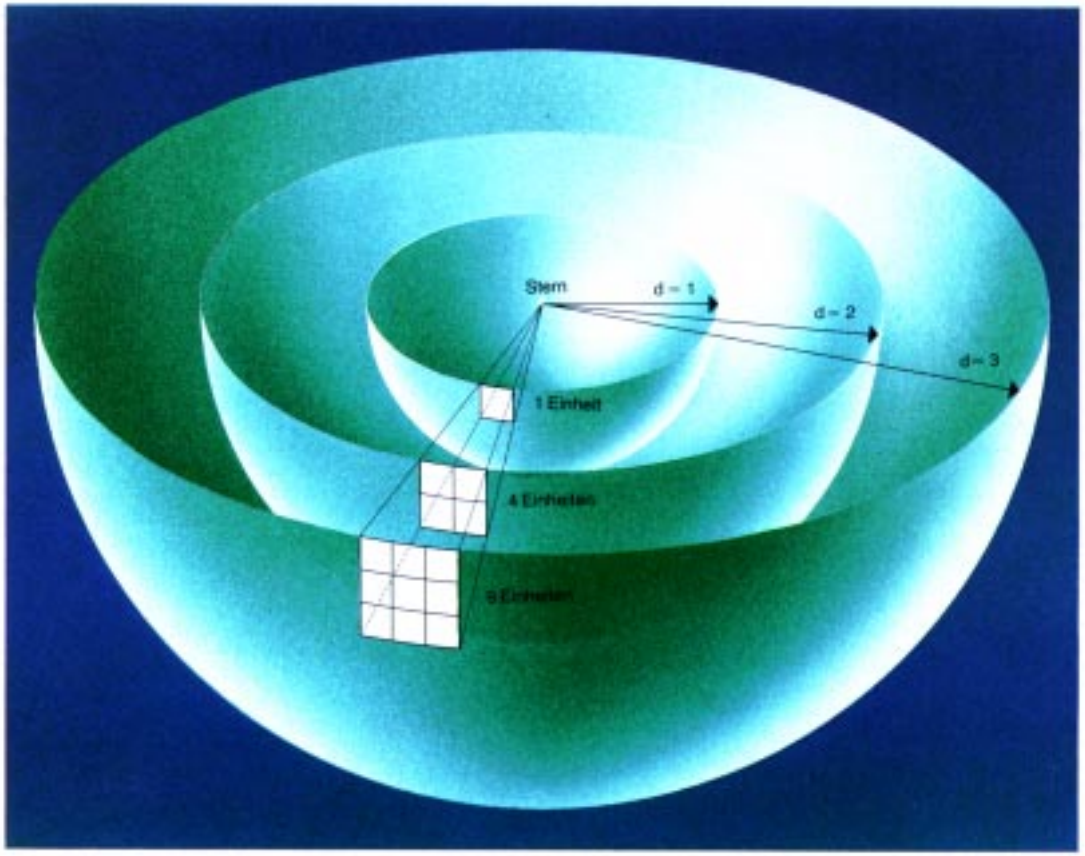
Kosmische Entfernungsmessungen



Die Paralaxe:

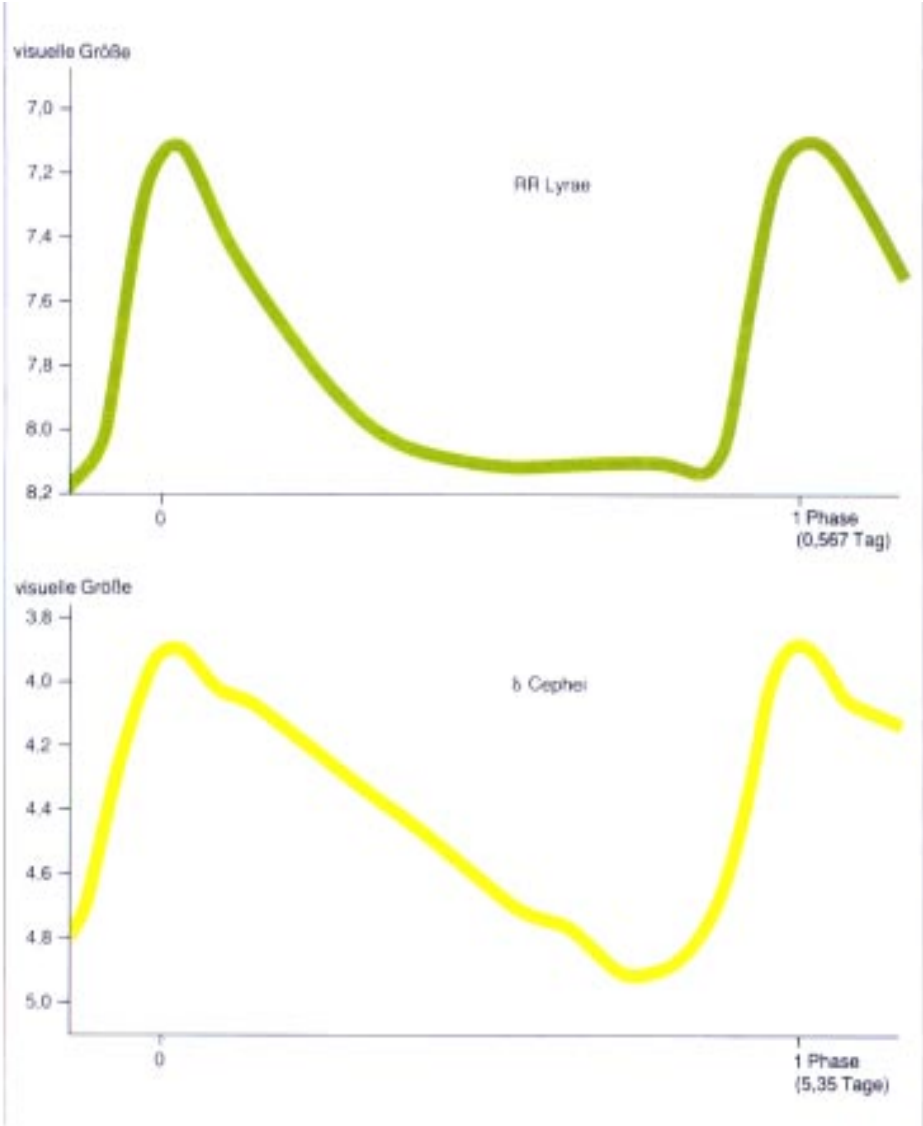
Entfernungen bis einige Tausend Lichtjahre.

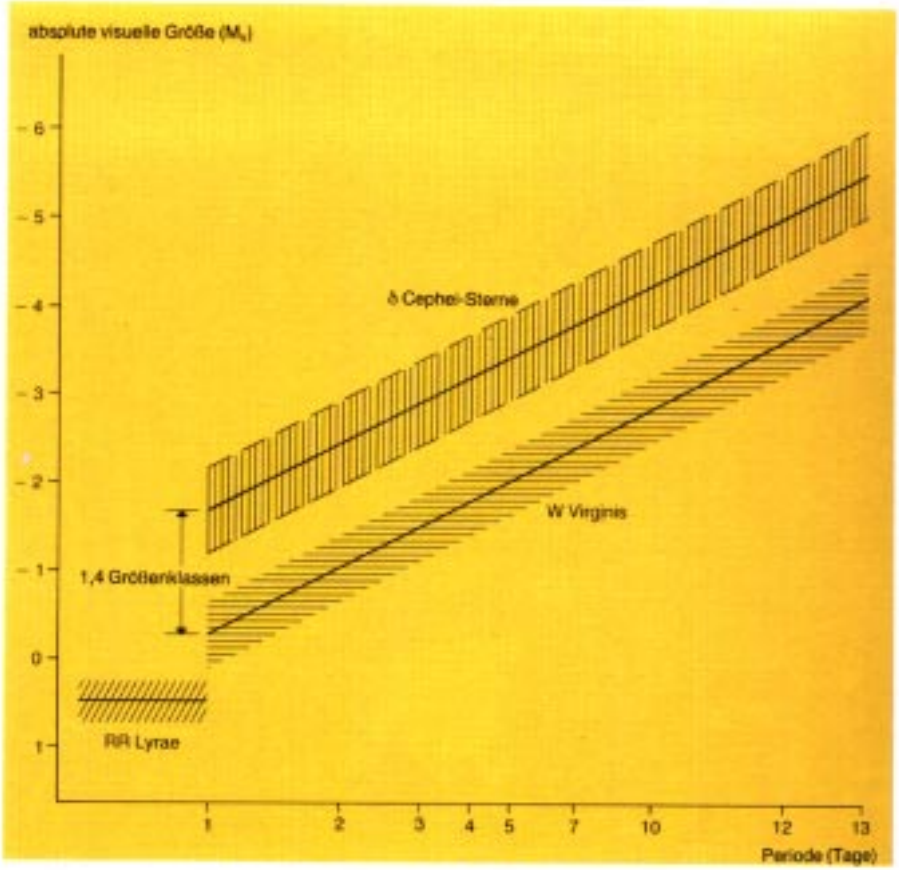
Kosmische Entfernungsmessungen



Das Prinzip der Standard-Kerzen

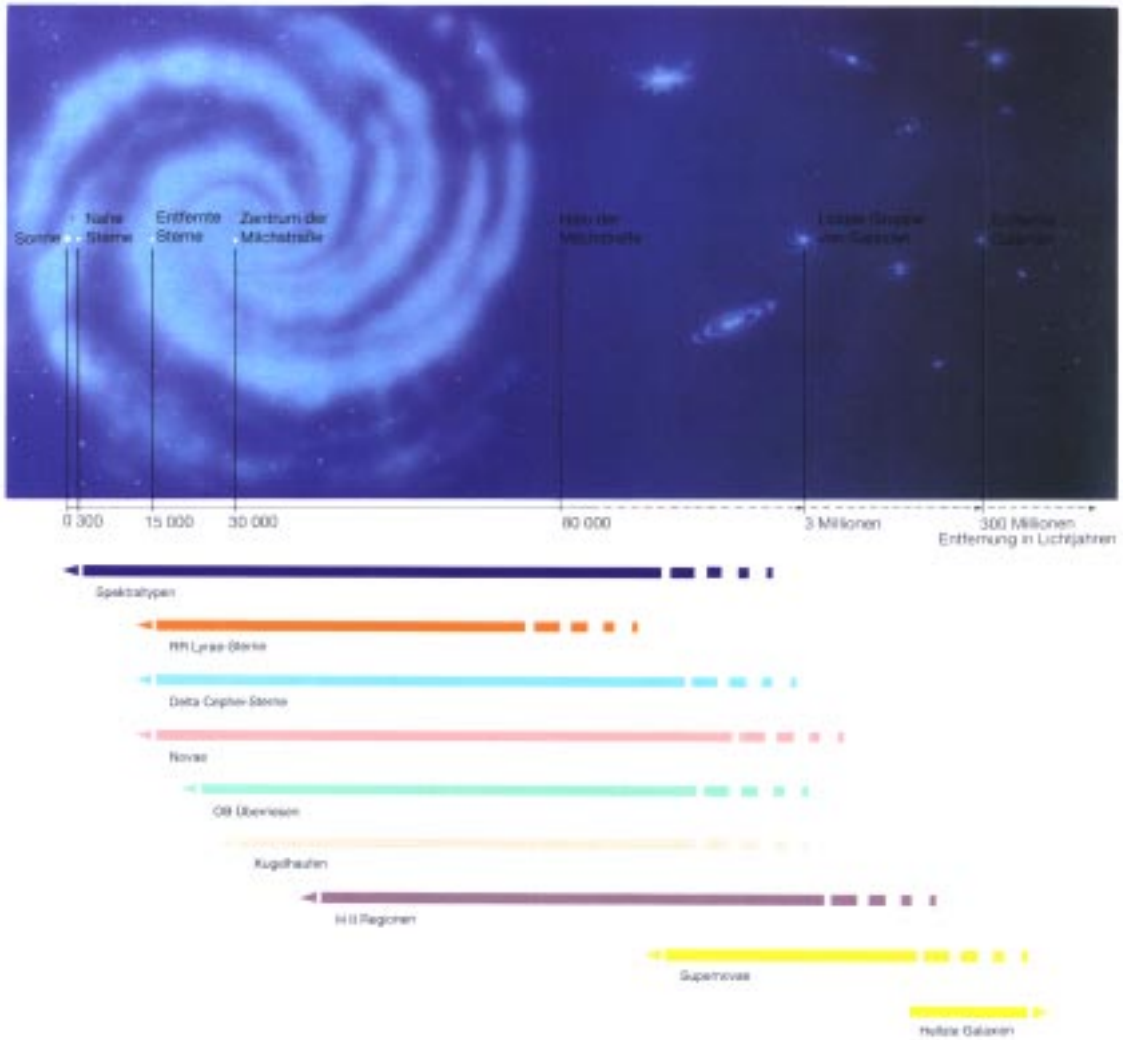
Kosmische Entfernungsmessungen



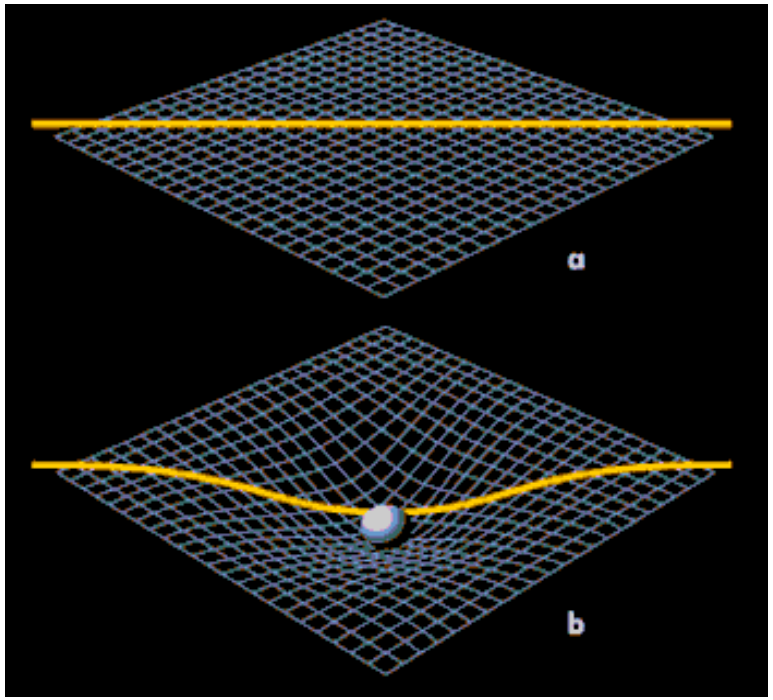


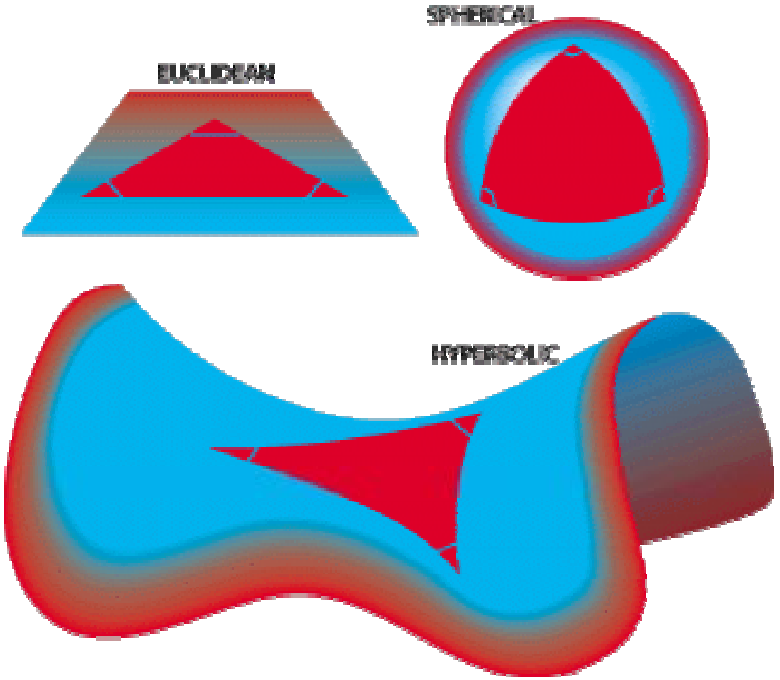
Variable Sterne:
"Kalibrierbare Standard-Kerzen".

Kosmische Entfernungsmessungen



Die Geometrie des Universums





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

Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?

Typ Ia
Supernova 1994D

Allgemeine Eigenschaften:

Helligkeit am Maximum:

10^{10} - 10^{11} $L_\odot$

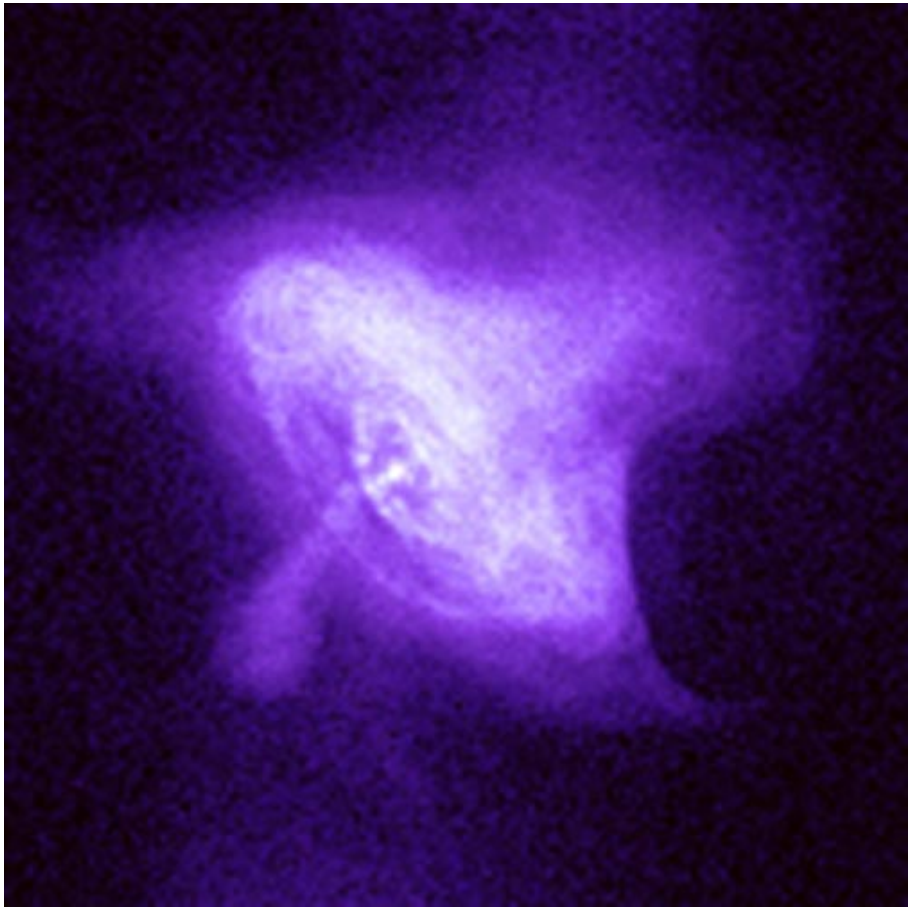
Temperatur am Maximum:

~ 15 000 K

Expansionsgeschwindigkeit:

~ 10 000 km/s

Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?



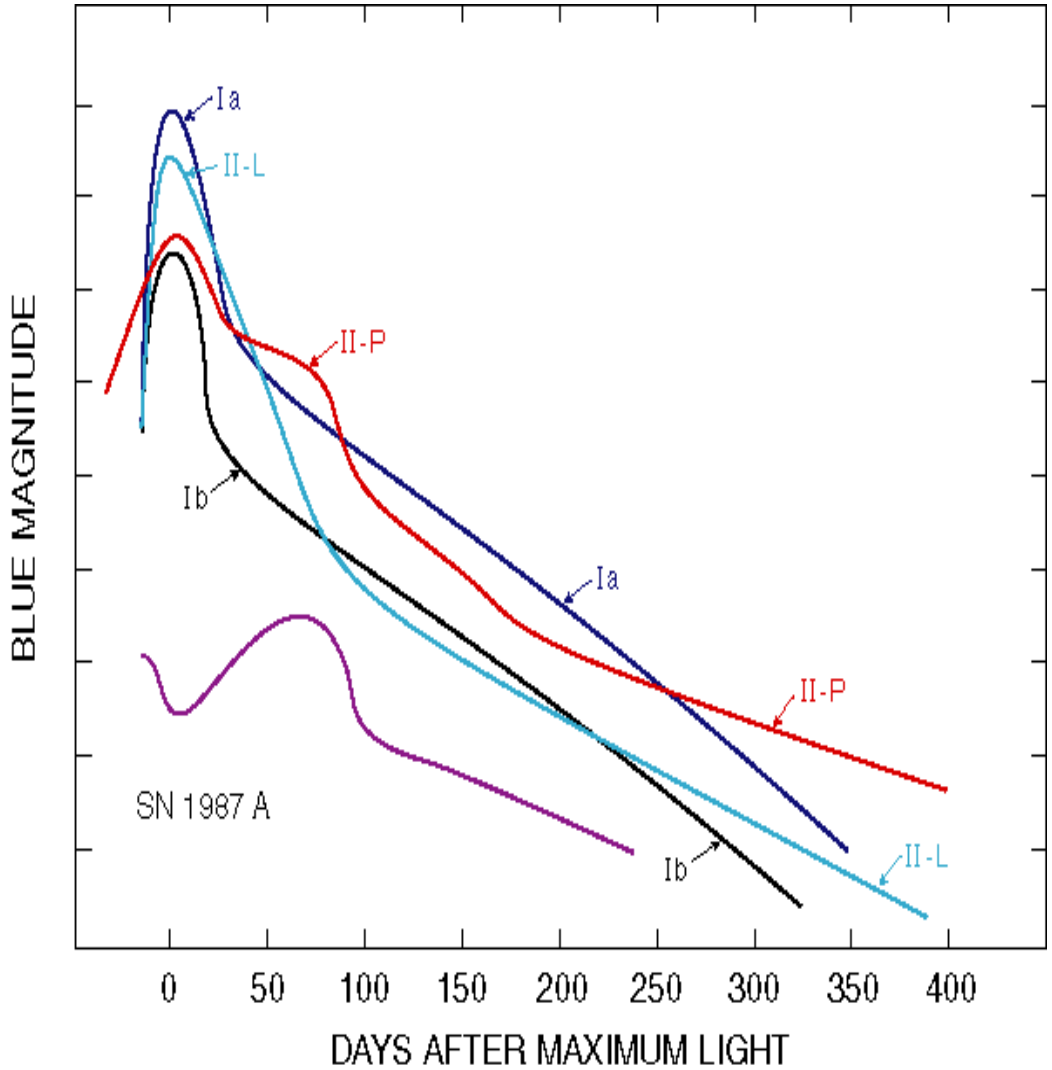
Typ II Supernova 1054
Krebs−Nebel

Gesamtenergie:

$\sim 10^{51}$ erg $\sim$
(einige 10^{-3} $M_\odot$ c^2)

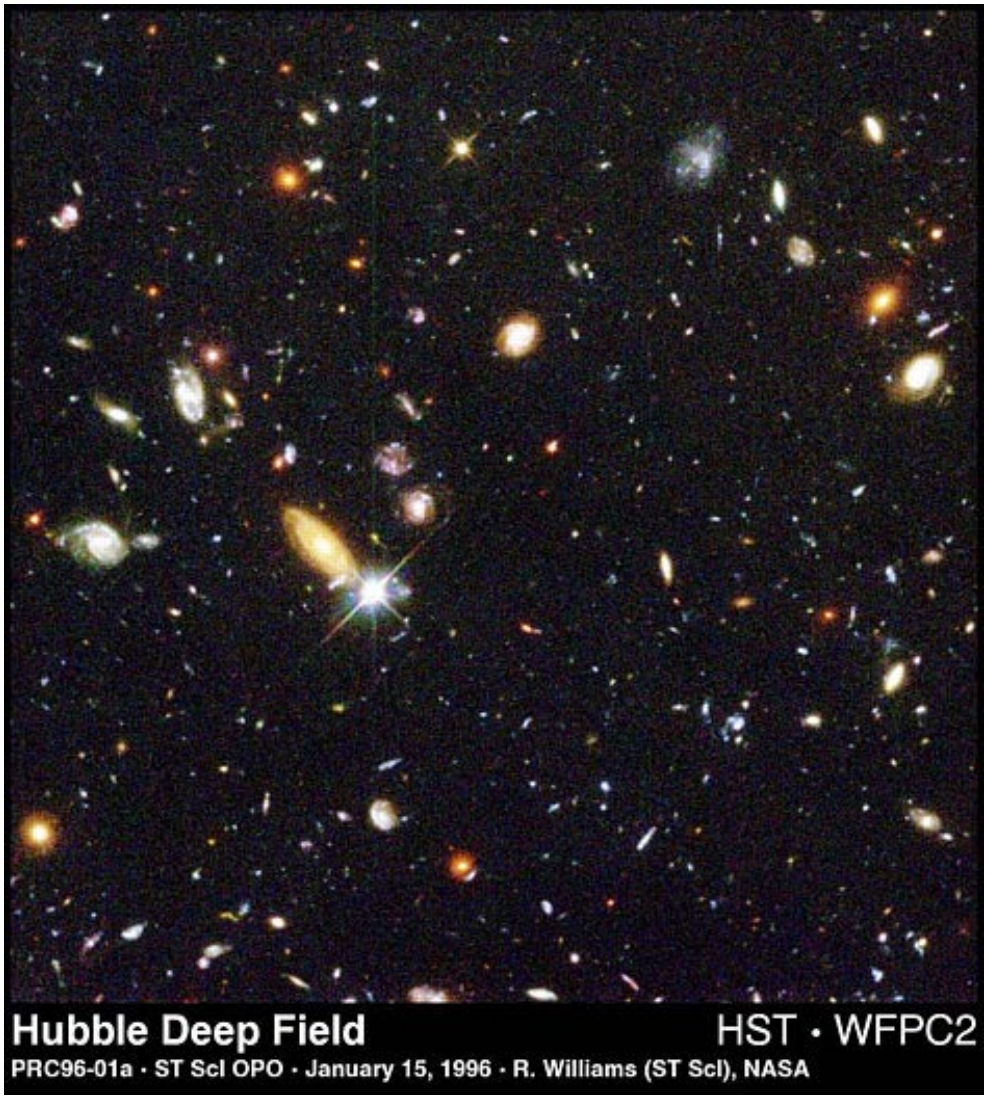
Überreste:
In einigen Fällen Neutronensterne, schwarze Löcher(?)

Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?



- Supernovae sind fast so hell wie eine Galaxie.
- Eine Unterklasse (Typ Ia) hat keine Wasserstofflinien im Spektrum.
- Diese Klasse ist sehr homogen (Helligkeit, Farbe und Spektren)!

Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?

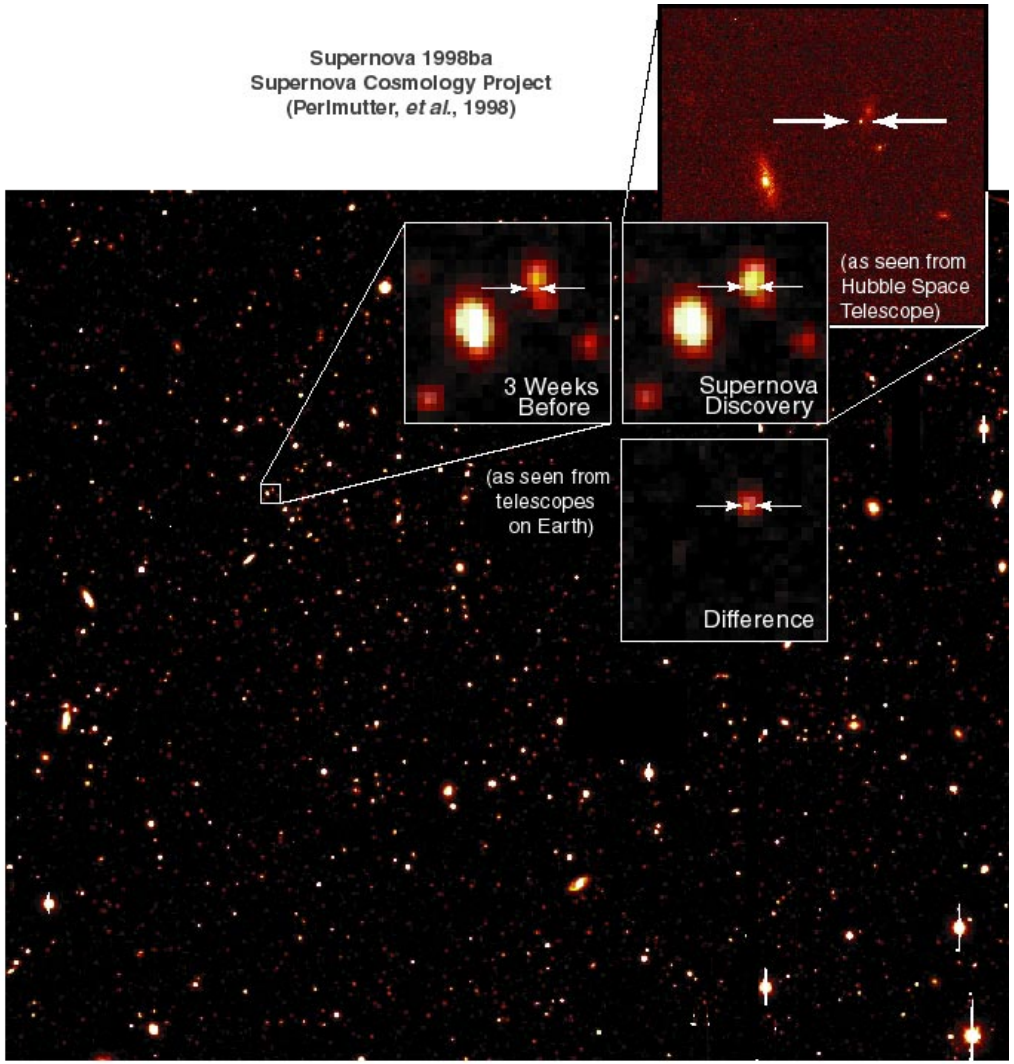


- Supernovae sind sehr selten, ca. 1 SN pro 100 Jahre und Galaxie.

→

- Man muß sehr viele Galaxien beobachten!

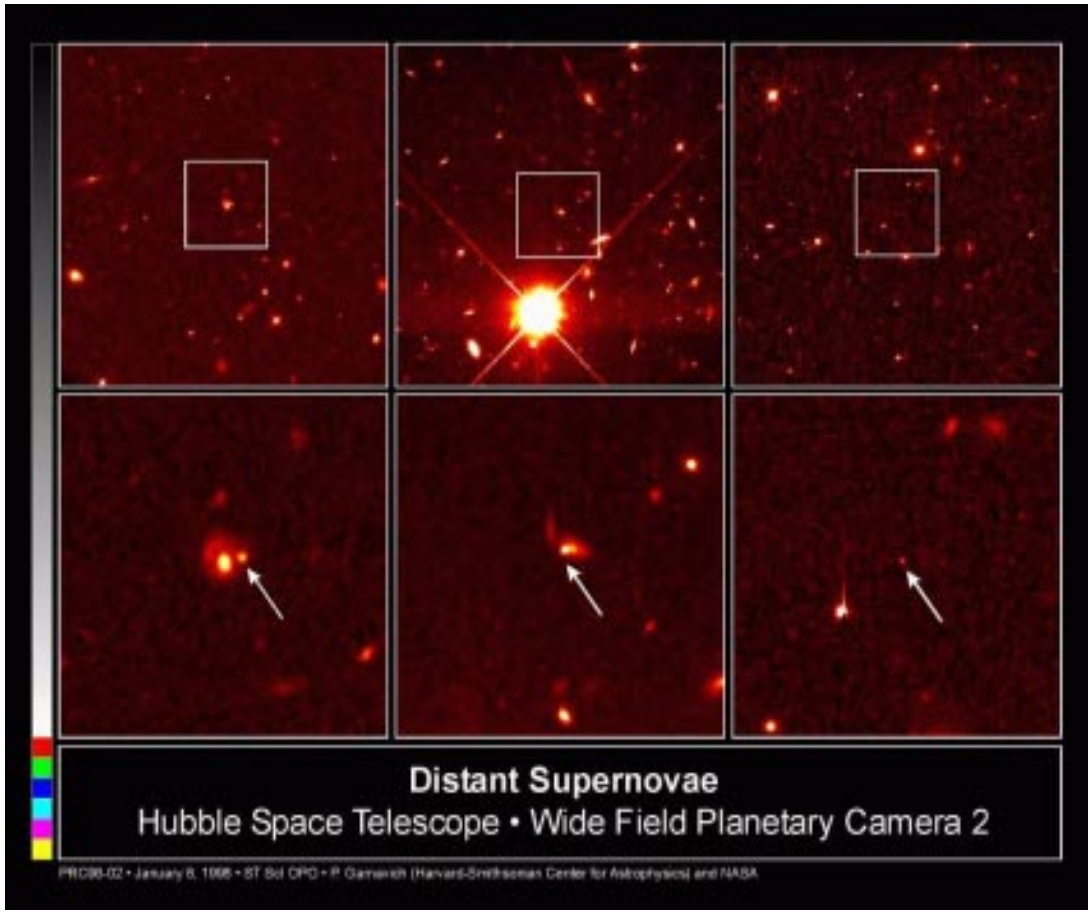
Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen "?



Suchstrategie:

1. Wiederholtes Scannen eines Feldes.
2. Elektronisches Auslesen der Daten.
3. Nachfolge-beoachtungen.

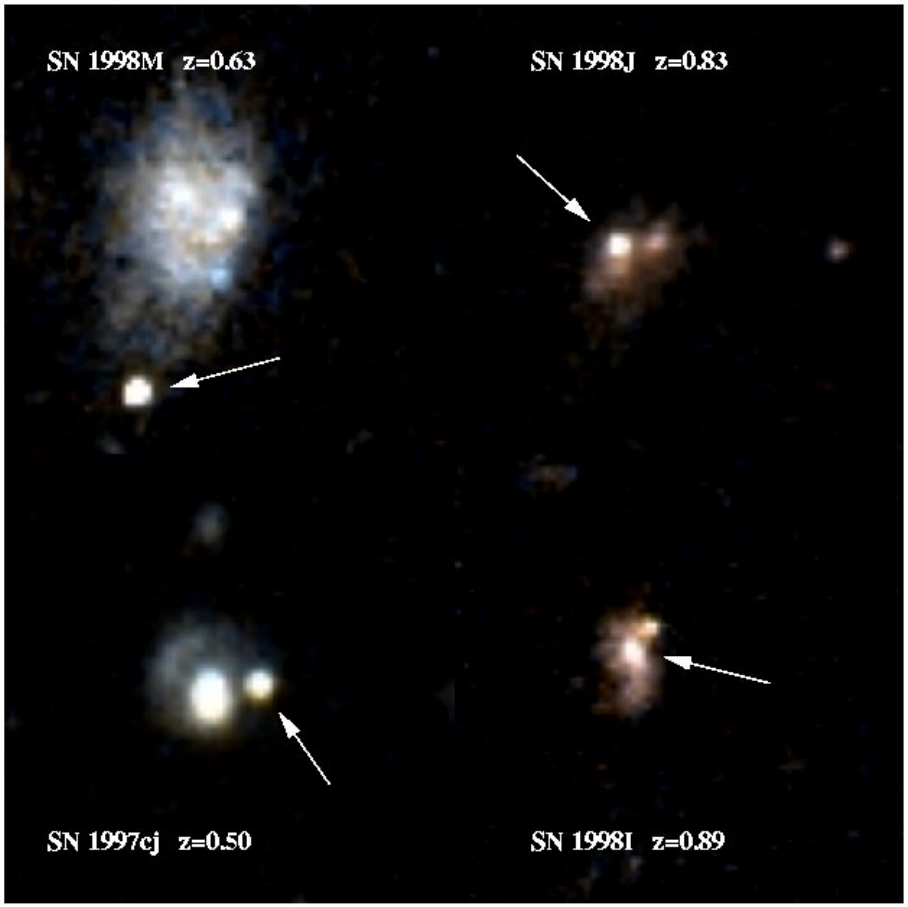
Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?

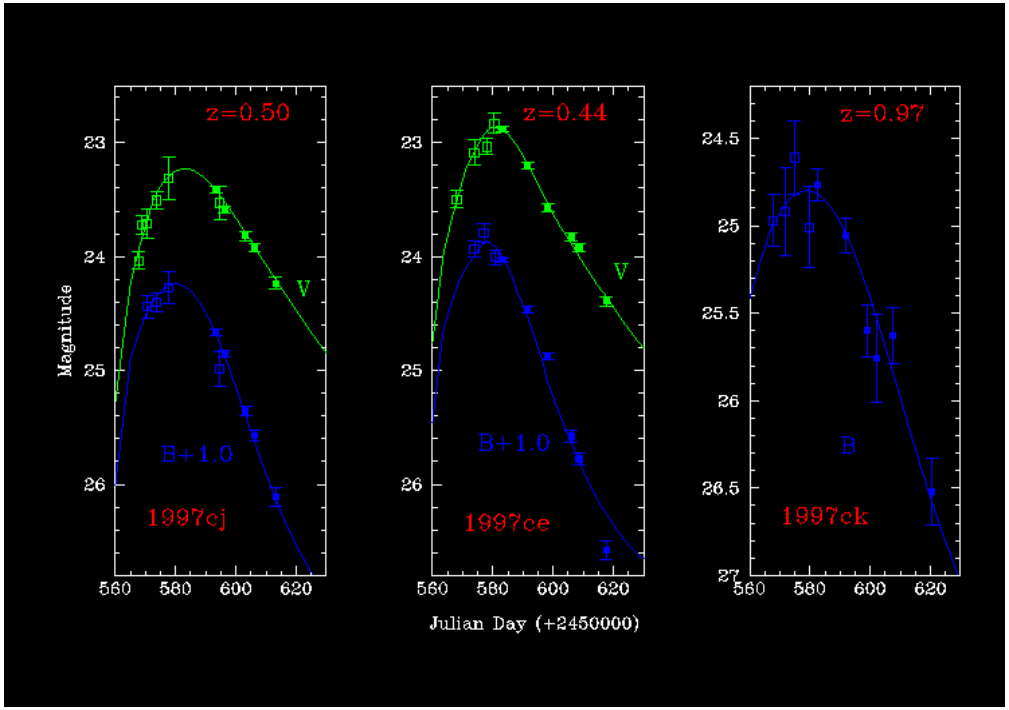


Typ Ia Supernovae bei hohen Rotverschiebungen

- Supernovae werden bei Z > 0.4 routinemäßig entdeckt.
- Für ca. 50 hat man Lichtkurven, Farben und Spektren.
- Sie unterscheiden sich nicht von nahen Supernovae.

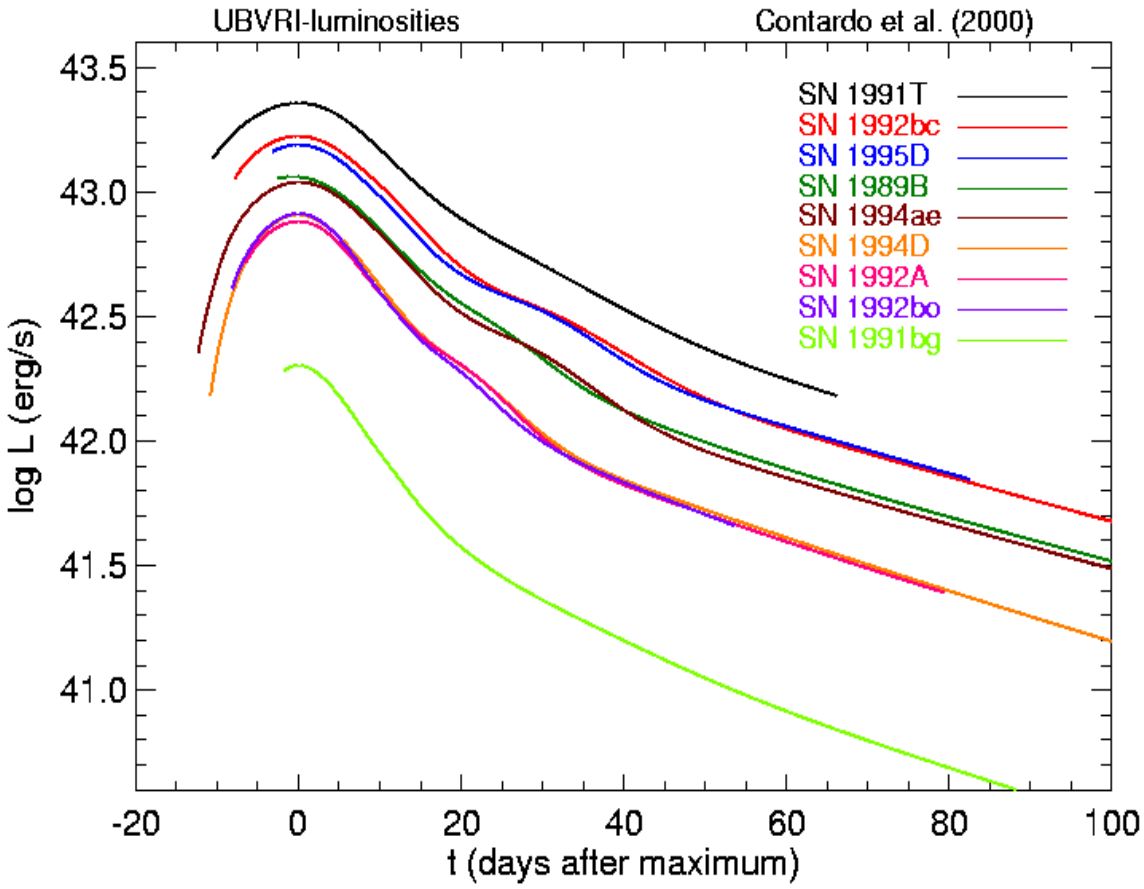
Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?





Typ Ia Supernovae bei hohen Rotverschiebungen; "High−Z Team", "Supernova Cosmology Project".

Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?



- Bolometrische Licht−kurven lokaler Super−novae:

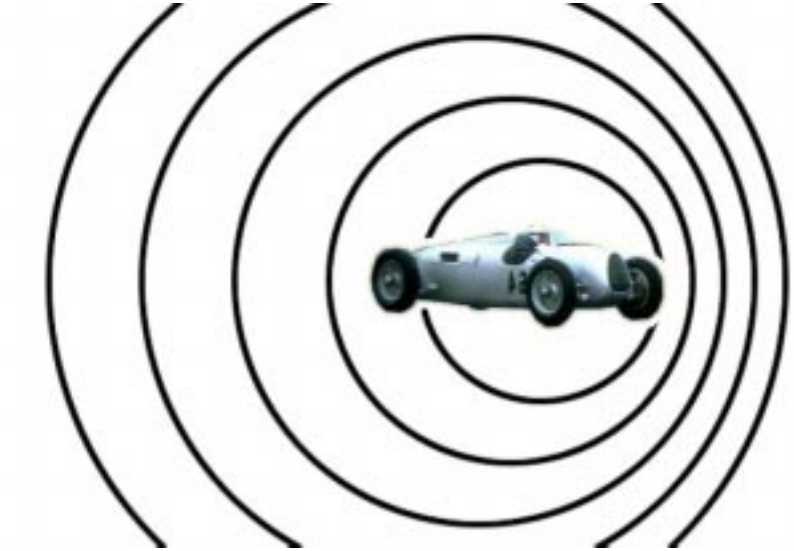
(1) Unterschiede in der Helligkeit ~ Faktor 10.

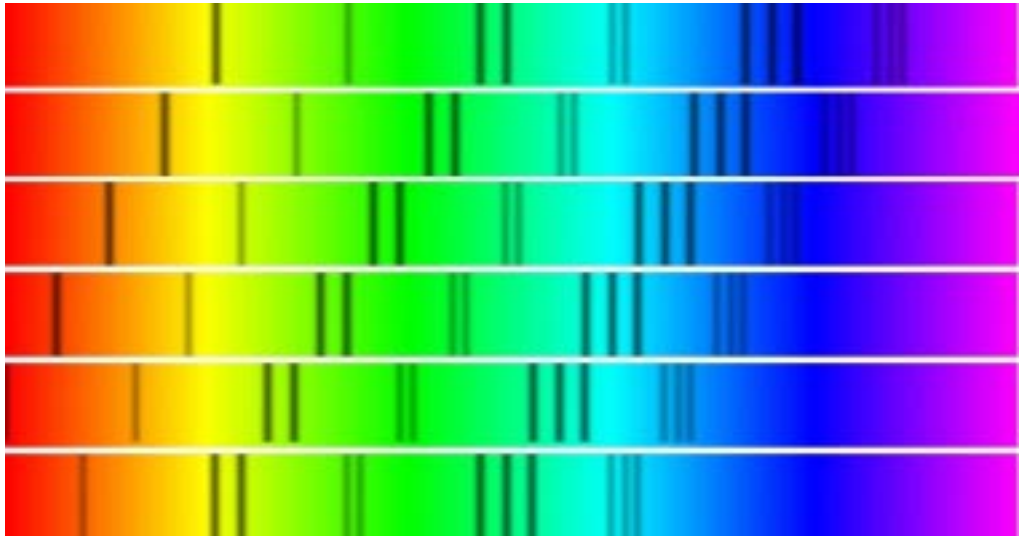
(2) Hellere Supernovae haben breitere Licht−kurve

→

Kalibration möglich?

Dopplereffekt und Galaxienflucht



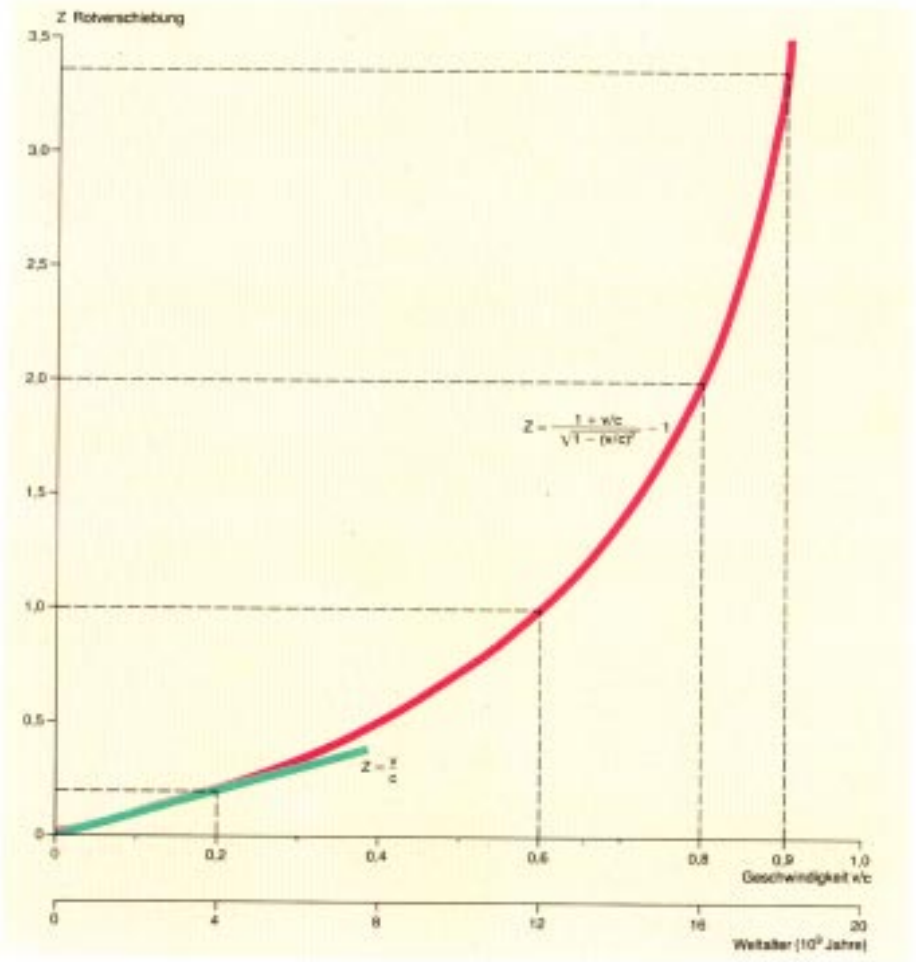


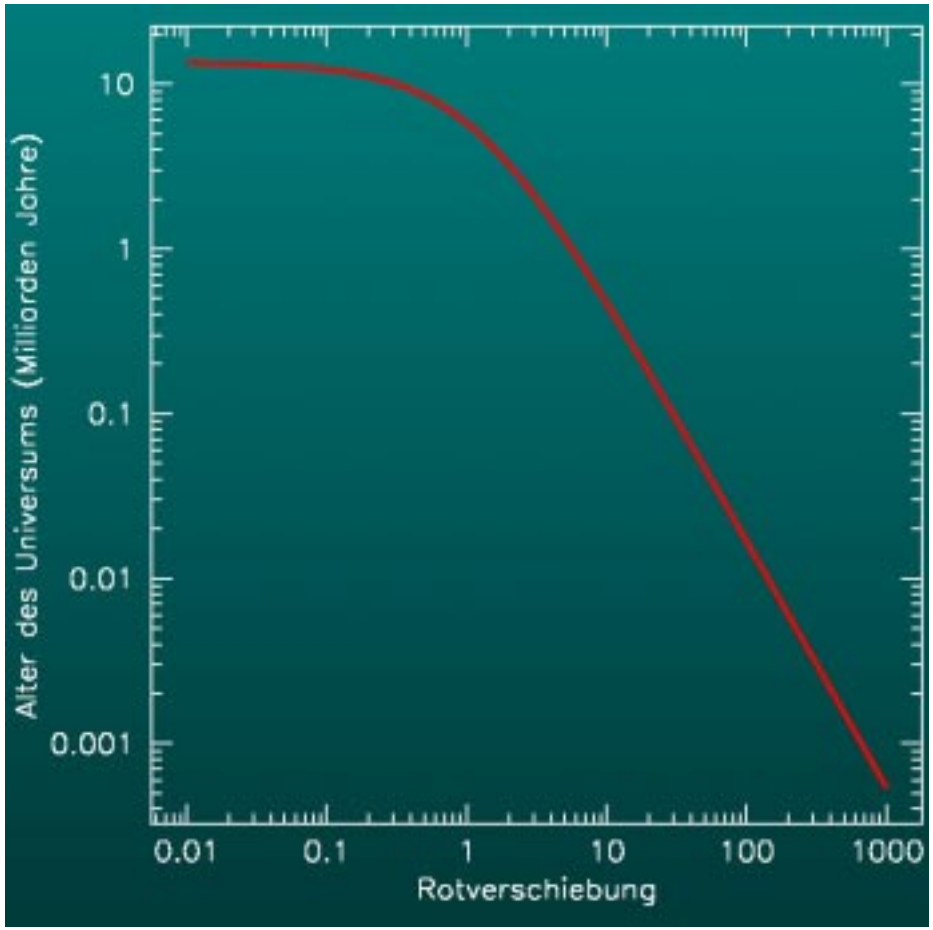
- Wenn sich ein Stern oder ein Galaxie von uns weg bewegen:

→

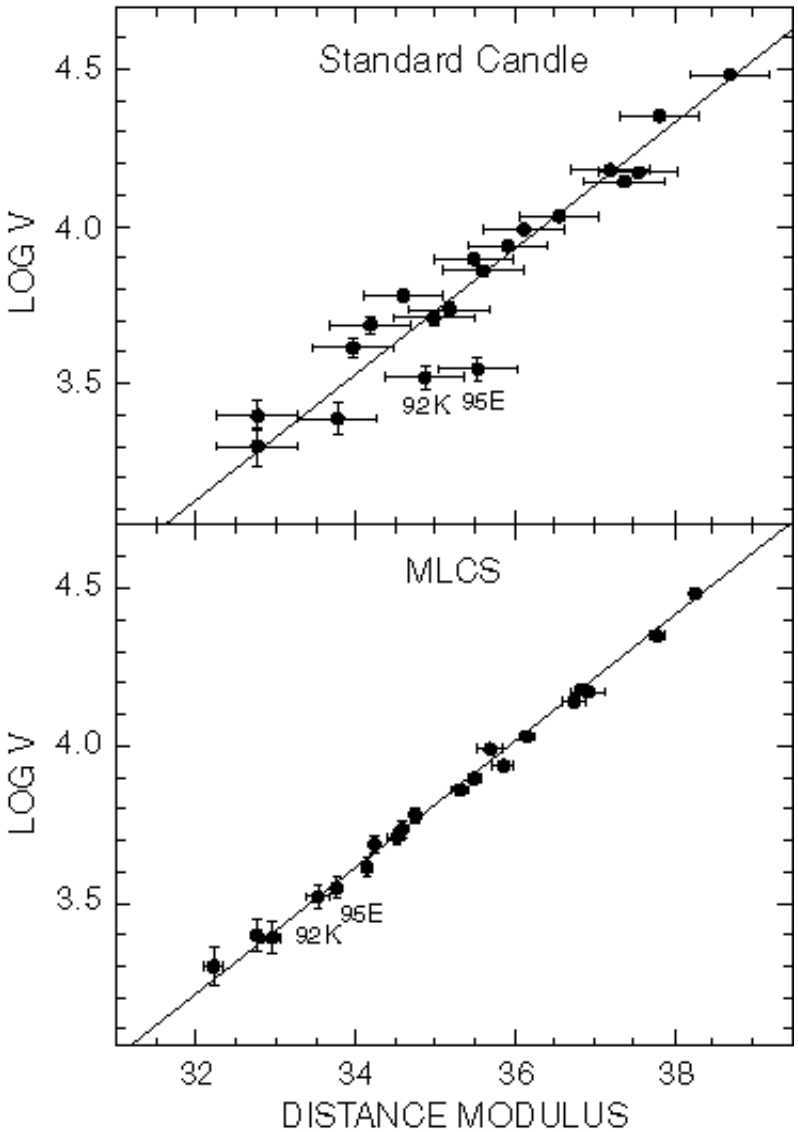
Das Licht erscheint *rot-verschoben!*

Dopplereffekt und Galaxienflucht





Typ Ia Supernovae als "Standard-Kerzen"?

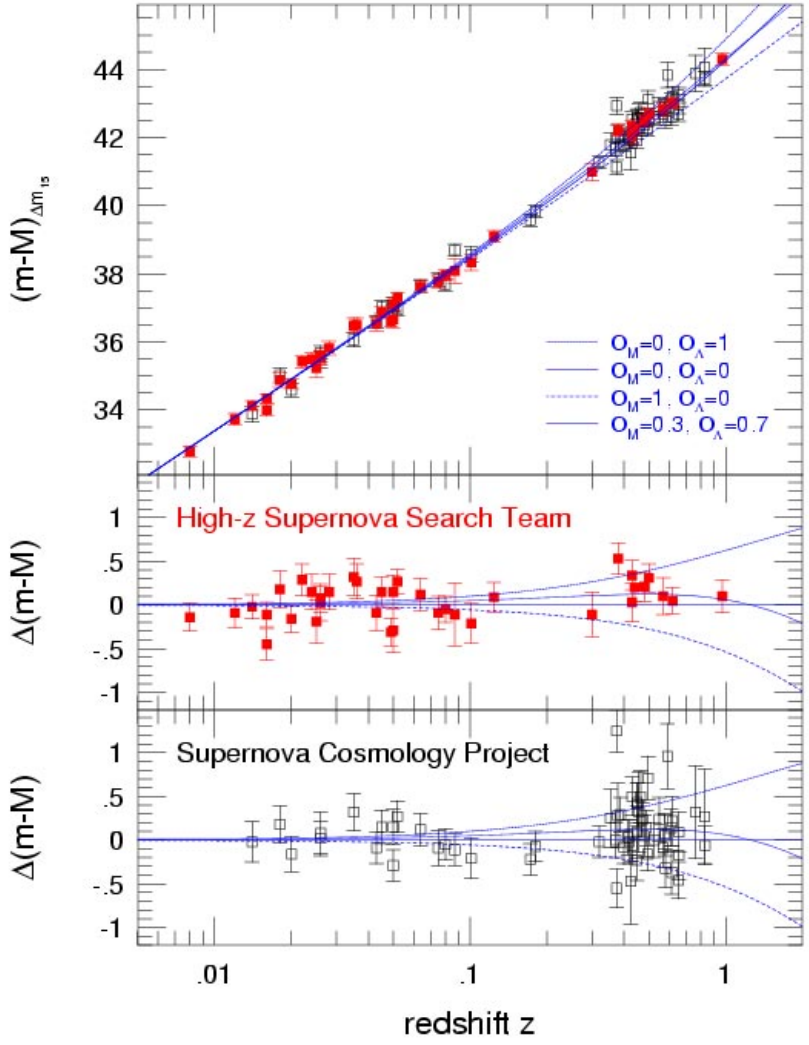


- Eine (empirische!) Kalibration der Lichtkuven ist möglich!
- Man erhält den besten Wert für die Hubble−Konstante:

H_0 = (67 ± 5) km/s/Mpc

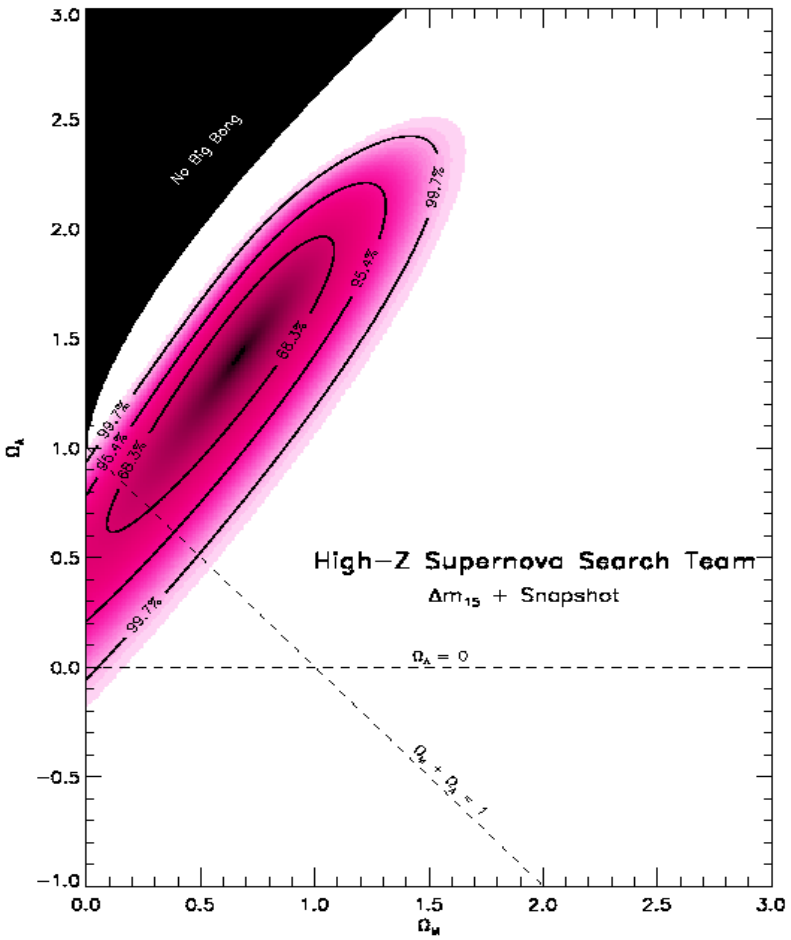
- Das "Alter" des Univerums (~ 10^{10} Jahre) ist etwas zu kurz!

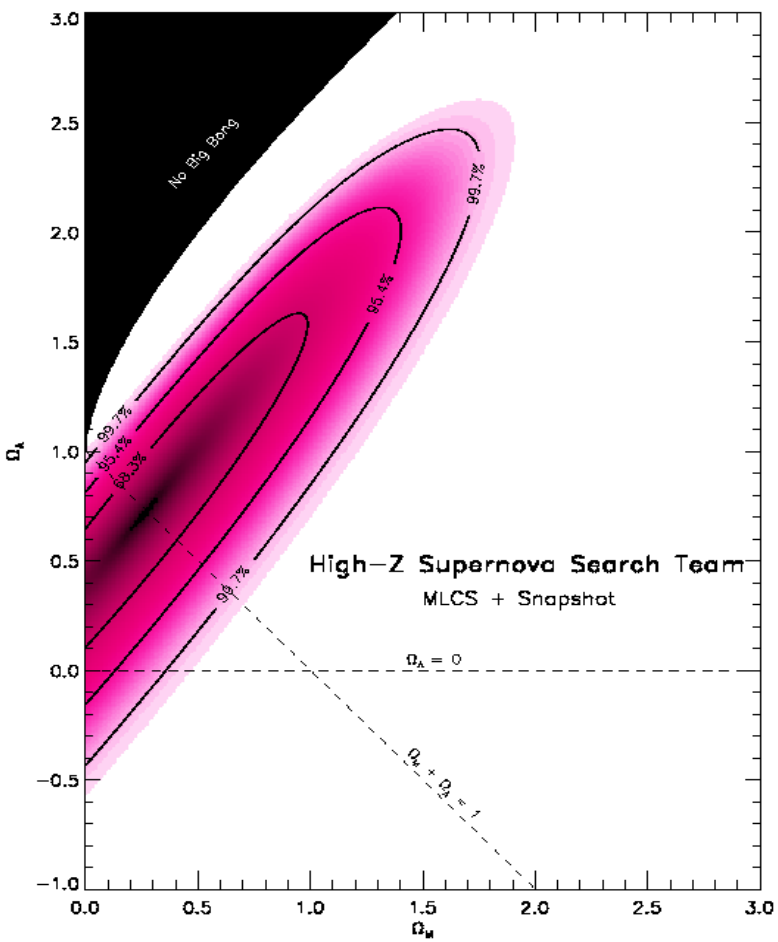
Supernovae bei hohen Rotverschiebungen



- Messen "Helligkeits−entfernungen".
- Nur relative Helligkeitsänderungen werden benötigt.
- Für gegebenen "Nullpunkt" (H_0): Nur von Ω_M und Ω_Λ abhängig.
- (Ω_M- Ω_Λ) wird bestimmt.

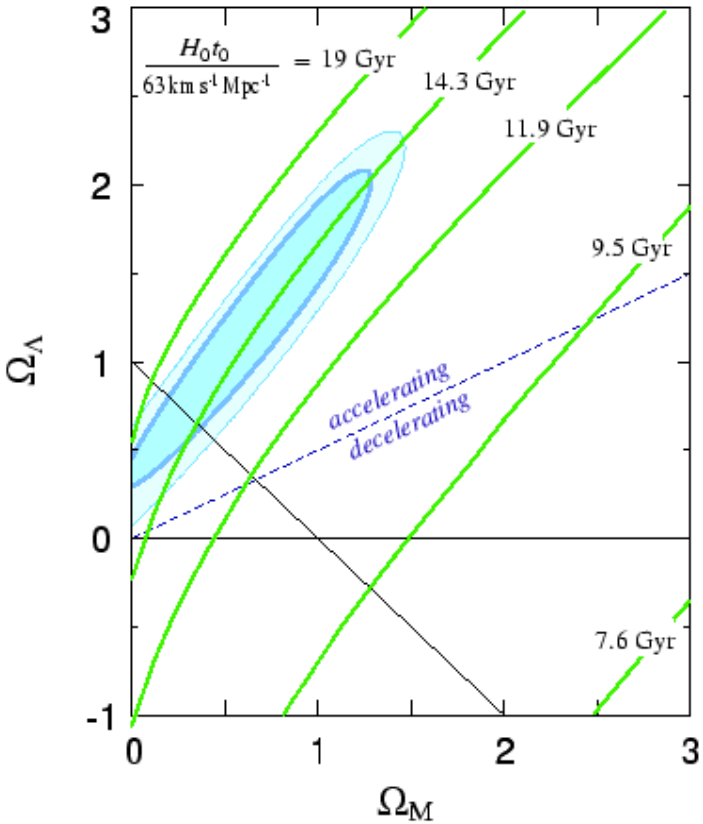
Supernovae bei hohen Rotverschiebungen

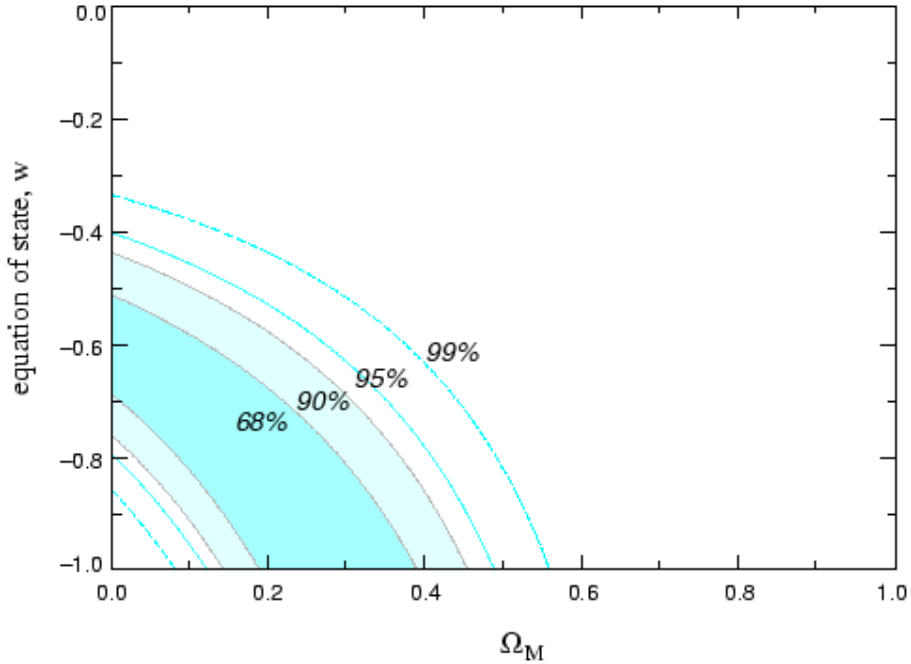




Unabhängig von der Kalibrierung: Ein flaches Universum ohne kosmologische Konstante ist ausgeschlossen!

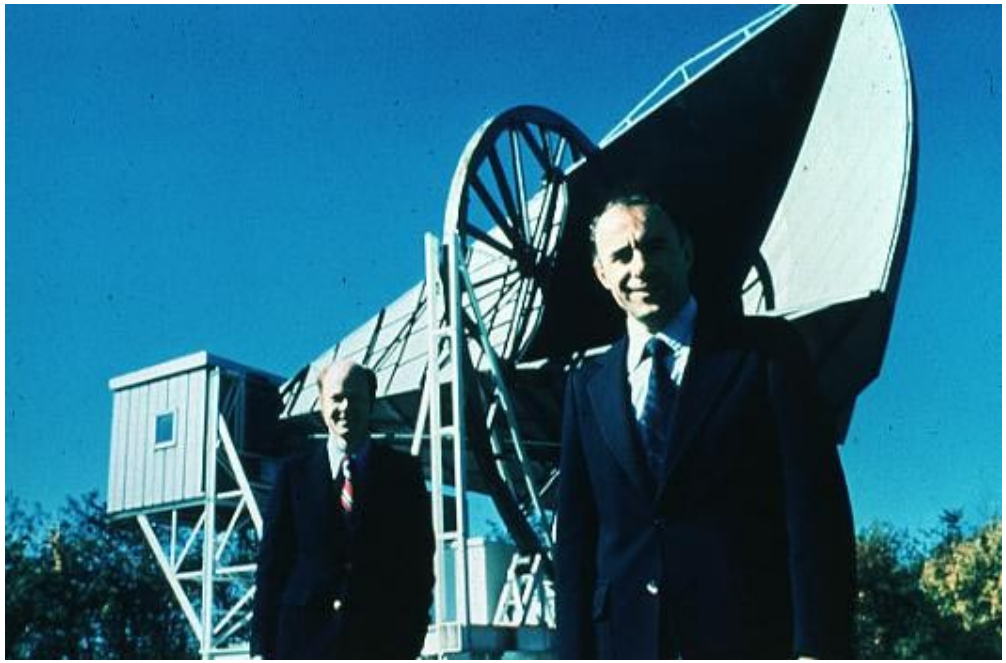
Supernovae bei hohen Rotverschiebungen





1. Das Universum ist mindestens 14 Milliarden Jahre alt.
2. Die Zustandsgleichung der "dunklen" Energie ist konsistent mit einer kosmologischen Konstante.

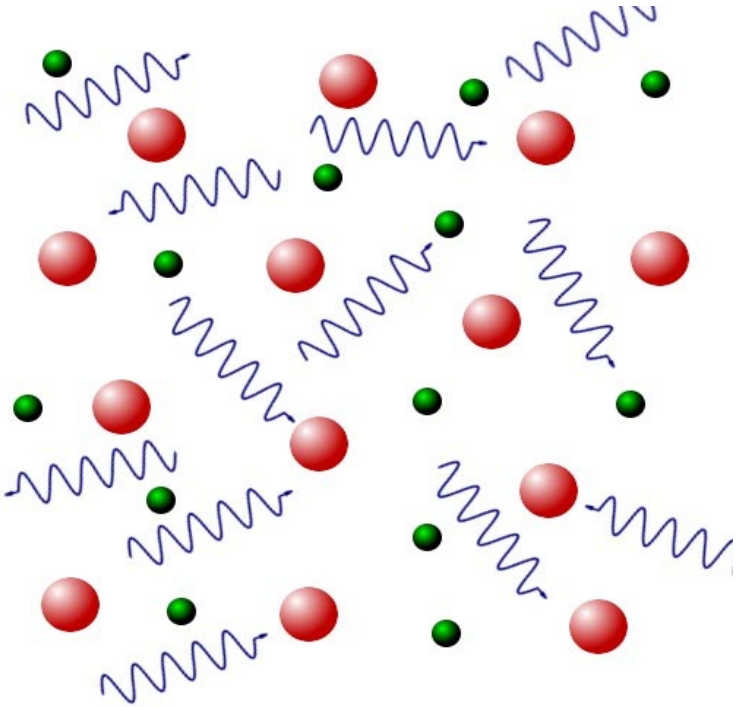
Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund

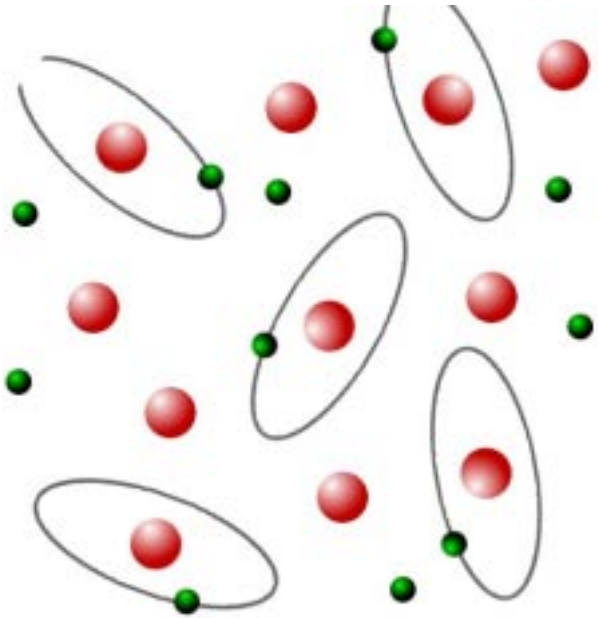


George Gamow (1946): *Es gibt ~ 400 Photonen pro Kubikzentimeter*

Arno Penzias und Robert Wilson: *Zufällige Entdeckung 1964*

Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund



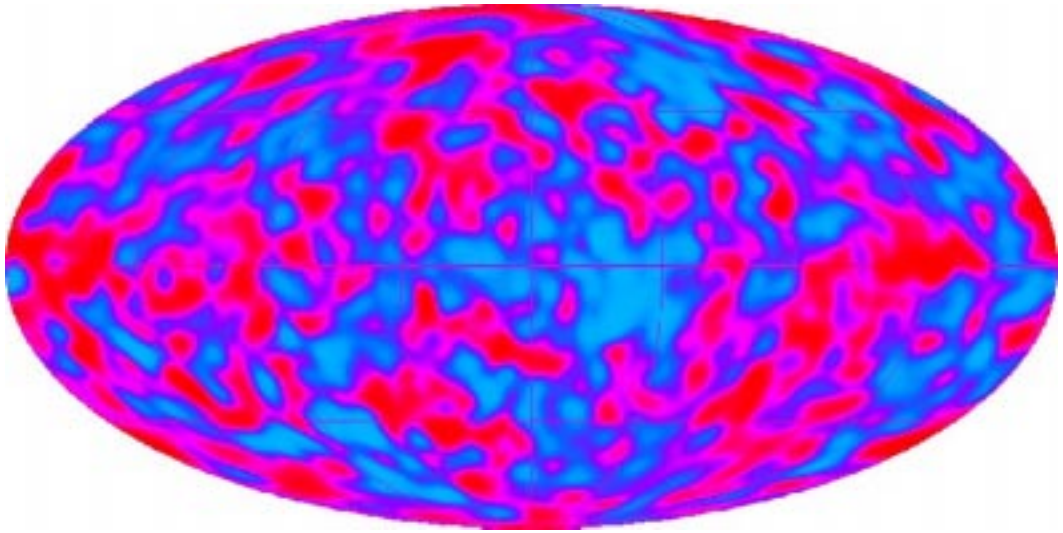


Vor der Rekombination: *Das Universum is undurchsichtig.*

Nach der Rekombination: *Das Universum ist durchsichtig.*

Übergang 300 000 Jahre nach dem Urknall!

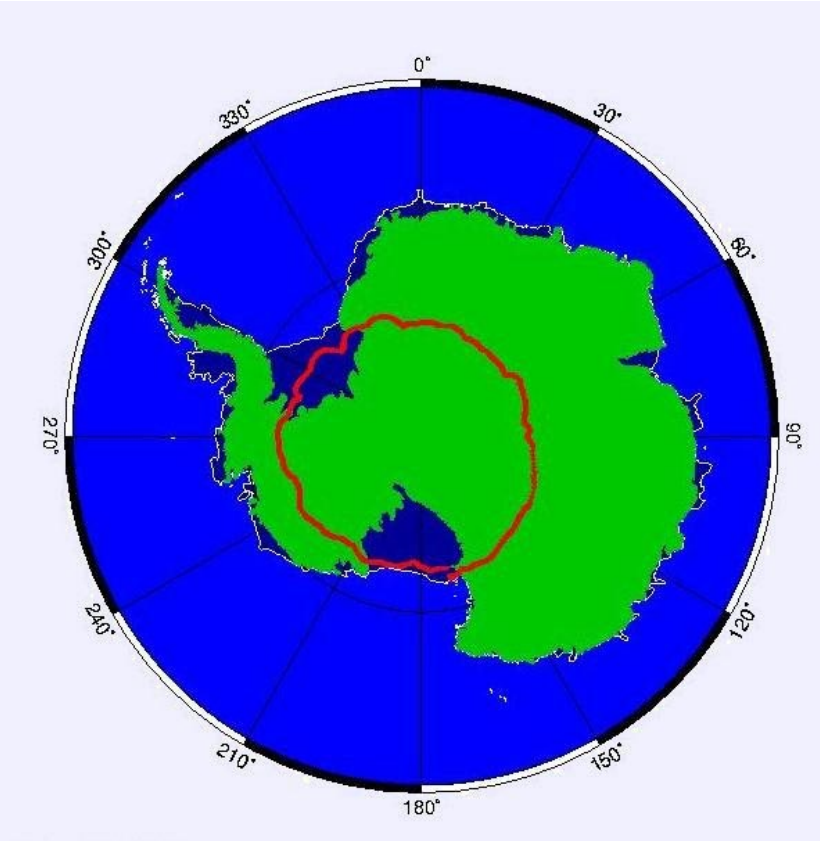
Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund

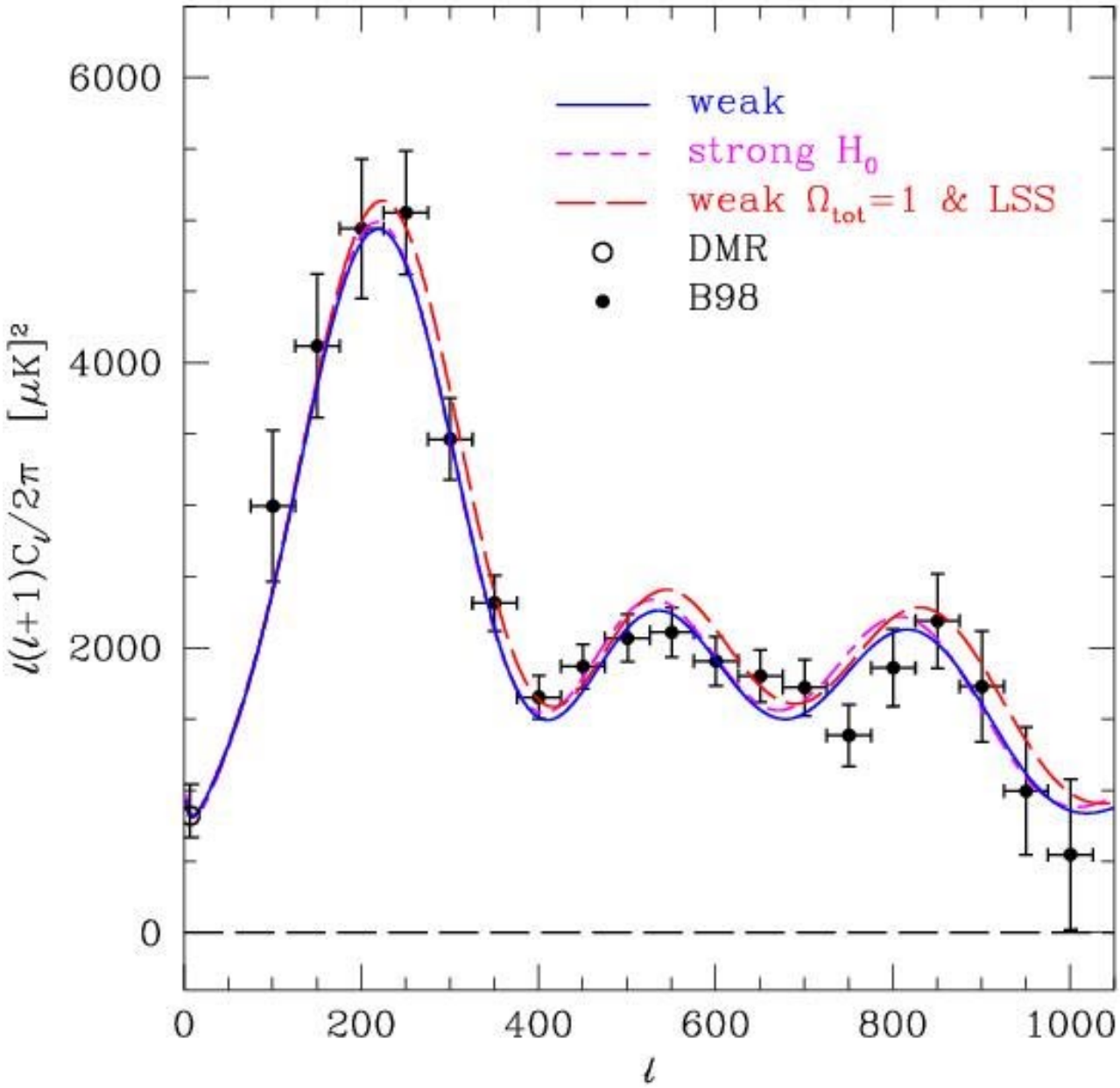


Alle Strukturen im Universum entstanden zu dieser Zeit.
Die Schwankungen im Mikrowellenhintergrund sind nur einige zehn Mikro-Kelvin!

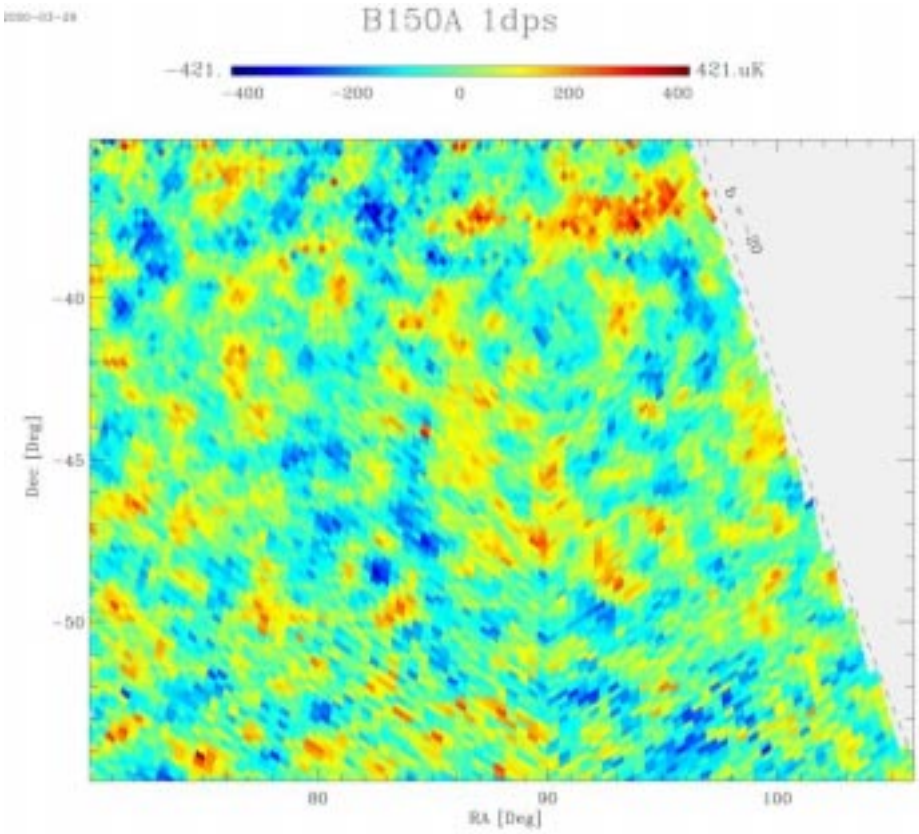
Ein neues Experiment: “Boomerang”

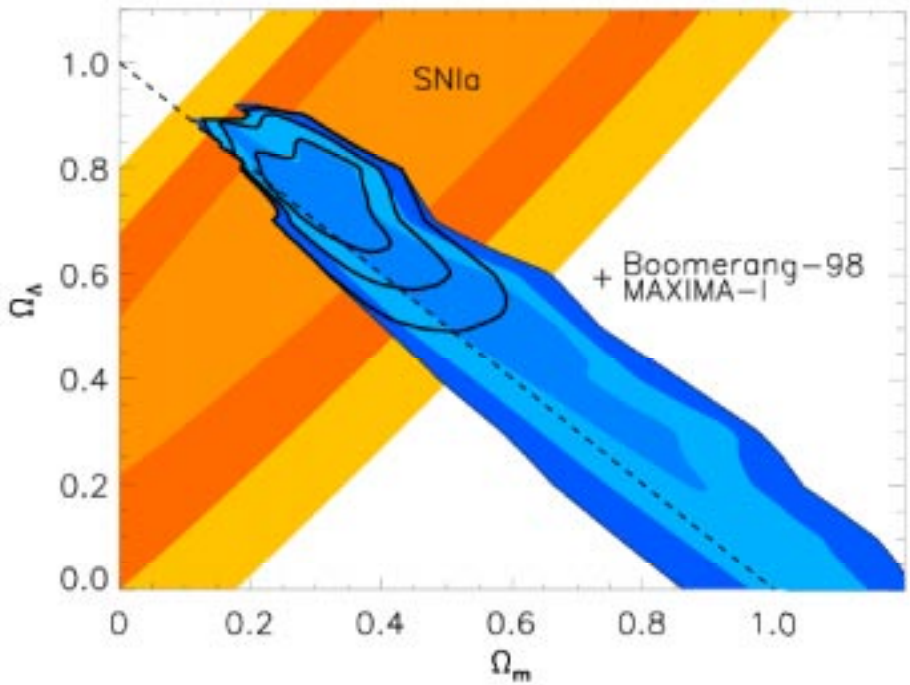
Der Cobe-Satellit konnte nur Strukturen “sehen”, die 7° Durchmesser hatten.
Benötigt wird ca. 100 mal bessere Auflösung!




weak
strong H_0
weak $\Omega_{tot}=1$ & LSS
DMR
B98
$\ell(\ell+1)C_\ell/2\pi$ $[\mu K]^2$
ℓ
0
2000
4000
6000
0
200
400
600
800
1000

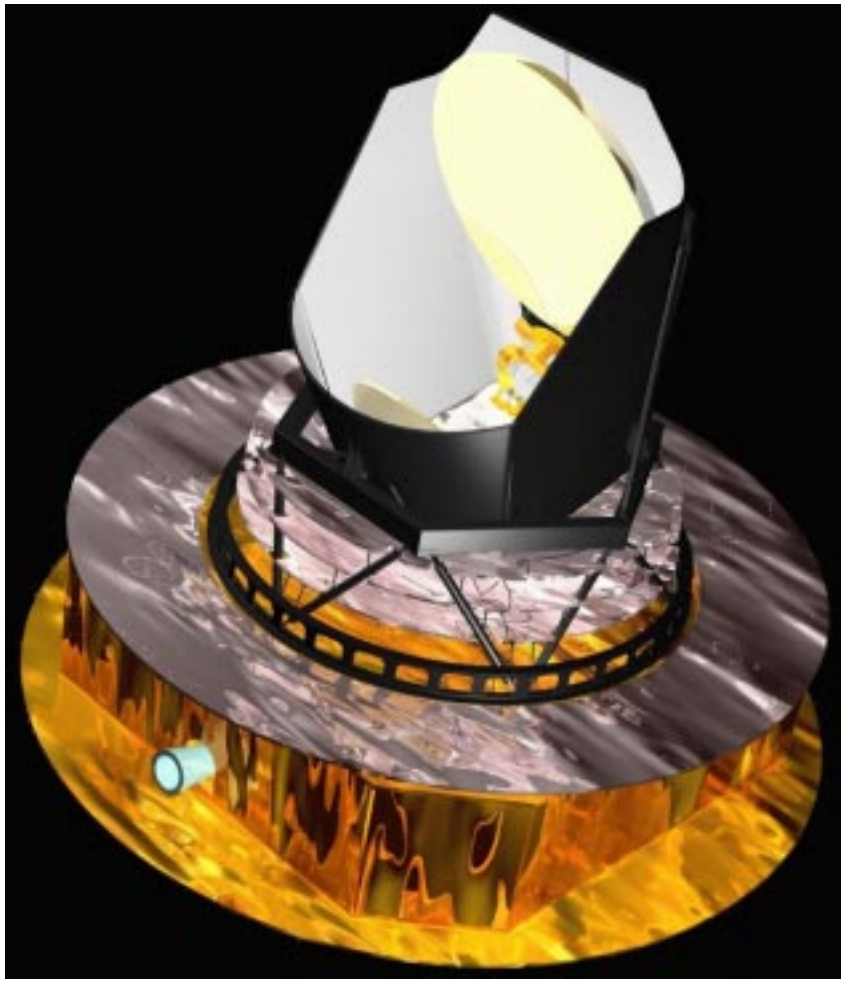
Supernovae bei hohen Rotverschiebungen und CMB-Daten

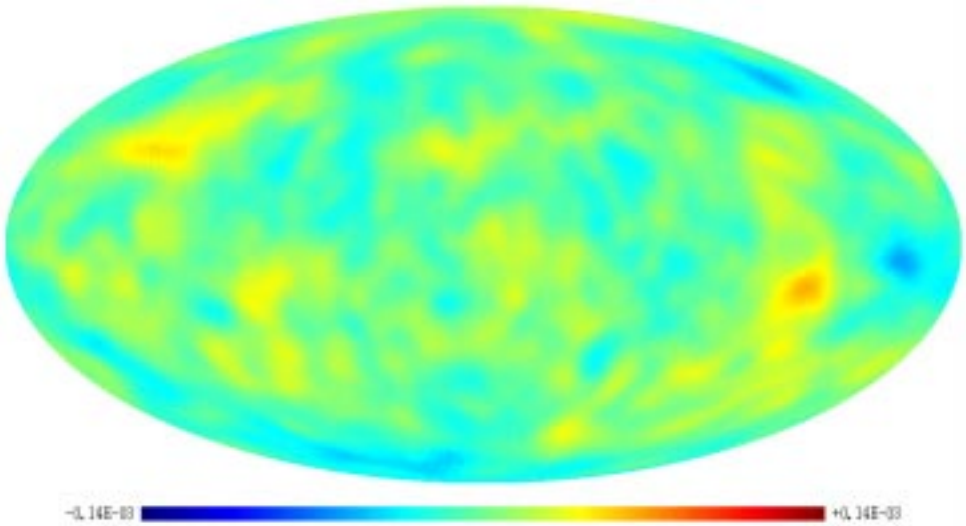


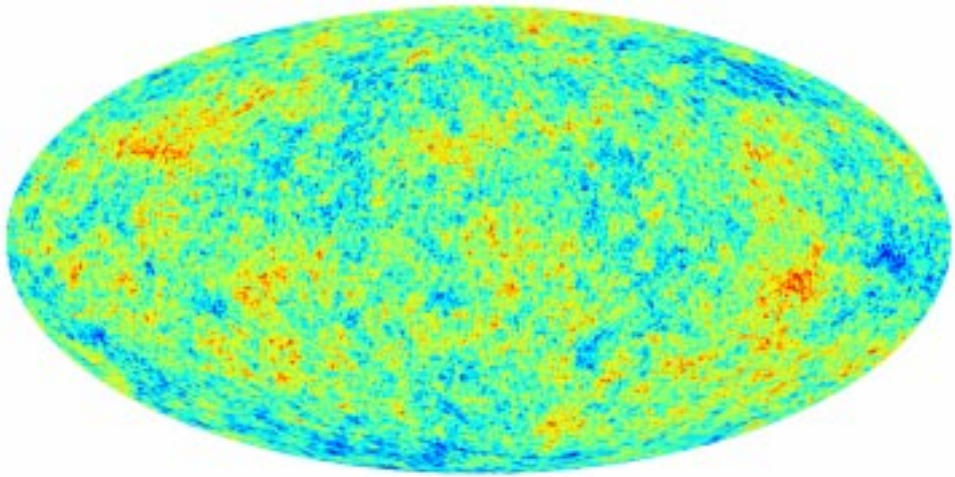


Zusammen mit dem Mikrowellenhintergrund: Das Universum ist flach und es gibt eine kosmologische Konstante!

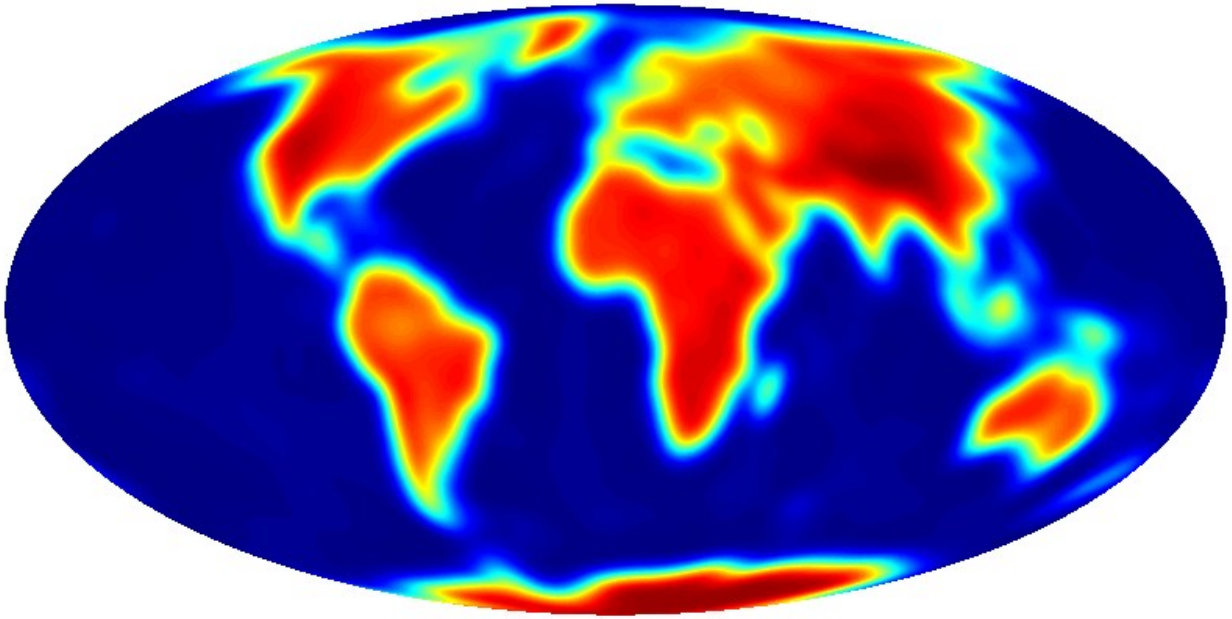
ESA's “Planck-Surveyor”

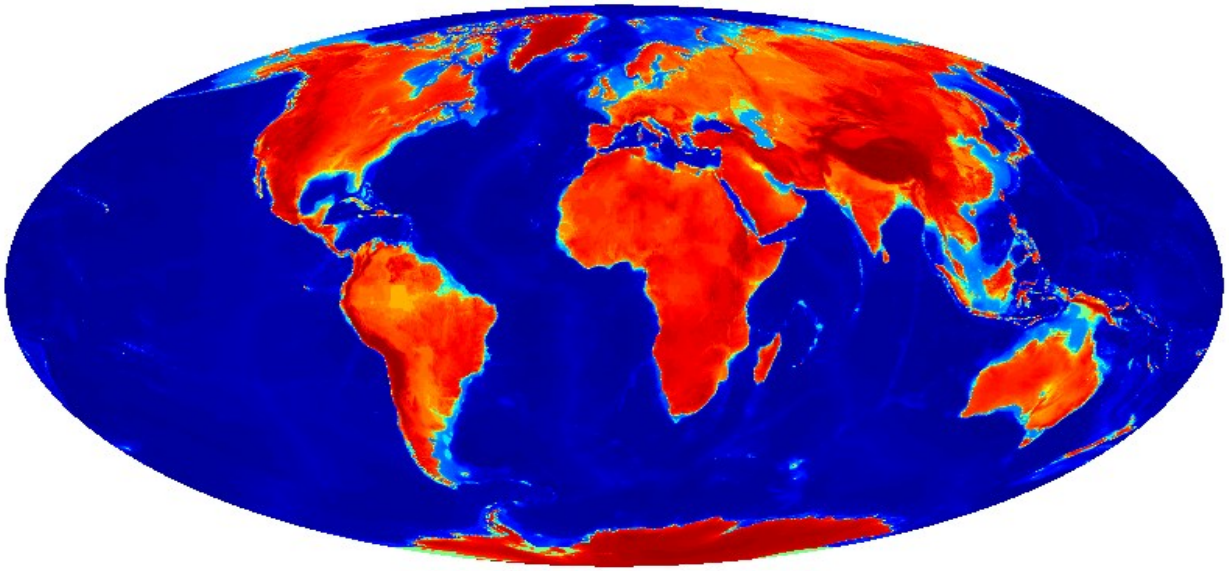






ESA's “Planck-Surveyor”





Supernova-Modelle: Verstehen wir die Explosion gut genug?

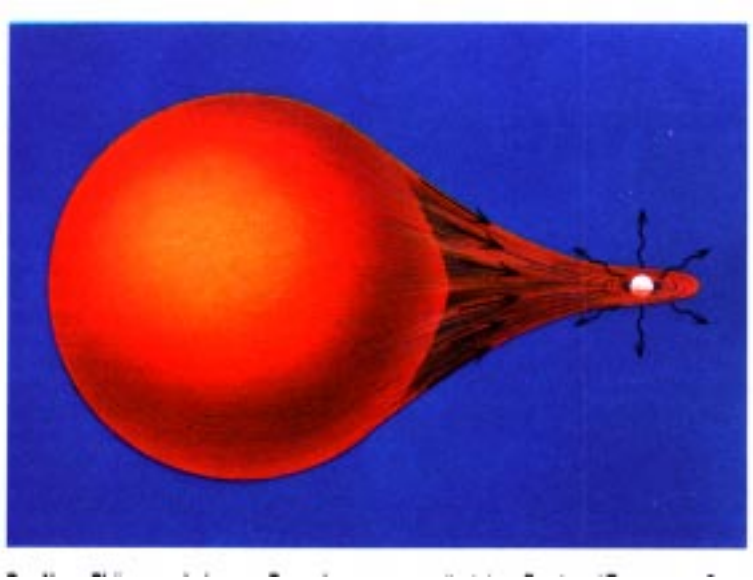
Extinktion/Rötung: Indikatoren?

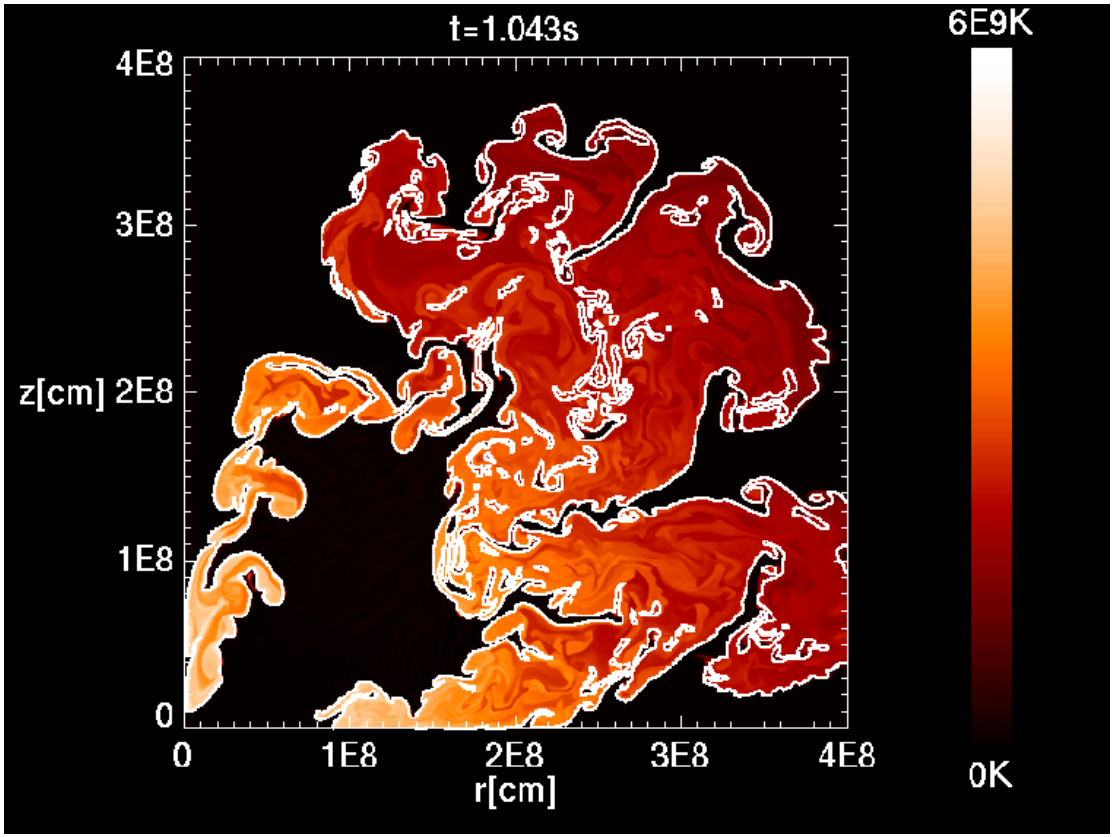
"Pekuliare" Typ Ia's: Spektroskopie? Globale Differenzen?

Evolution: Universum ~ 1/2 mal so alt wie heute; Frage an die Theorie!

Korrektur der Lichtkurven: Physikalische Interpretaton? Gültig bei Z > 0.5?

Supernova-Modelle: Verstehen wir die Explosion gut genug?

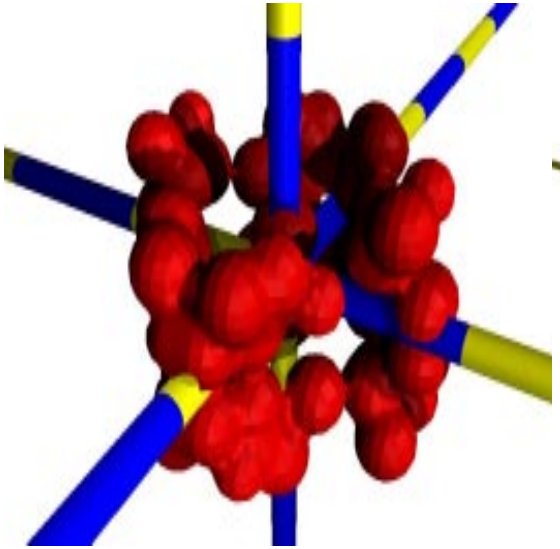


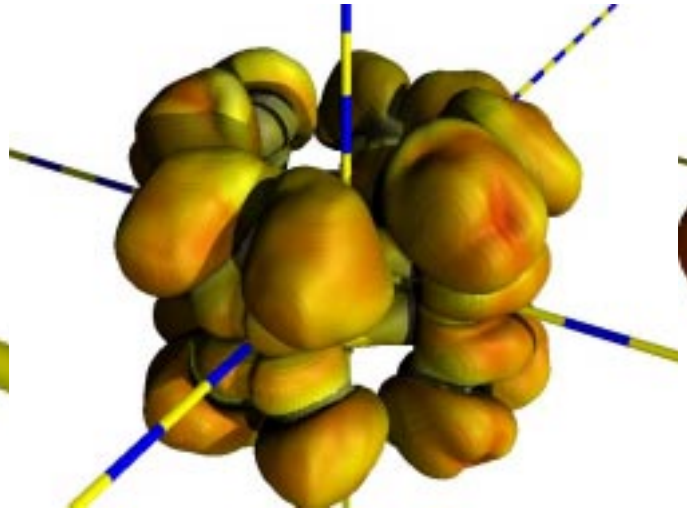


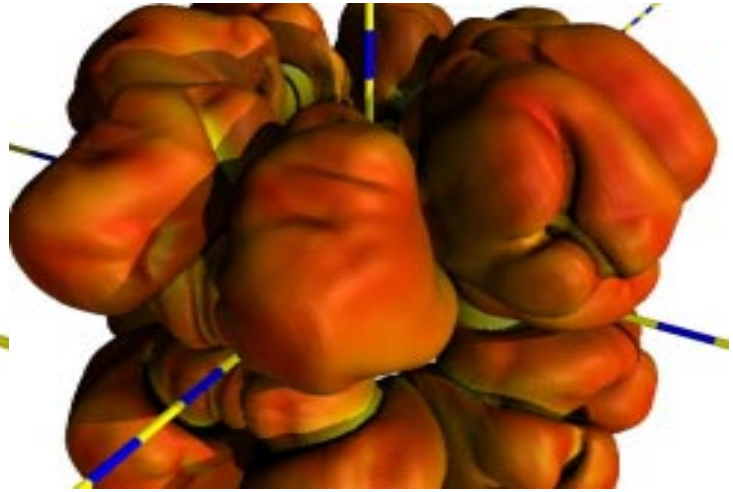
<u>Explosionsenergie:</u>

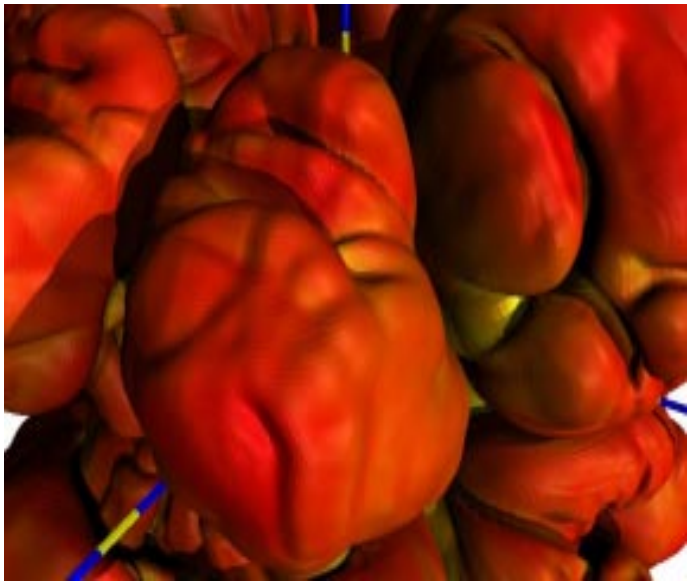
Fusion C+C, C+O, O+O → "Fe"

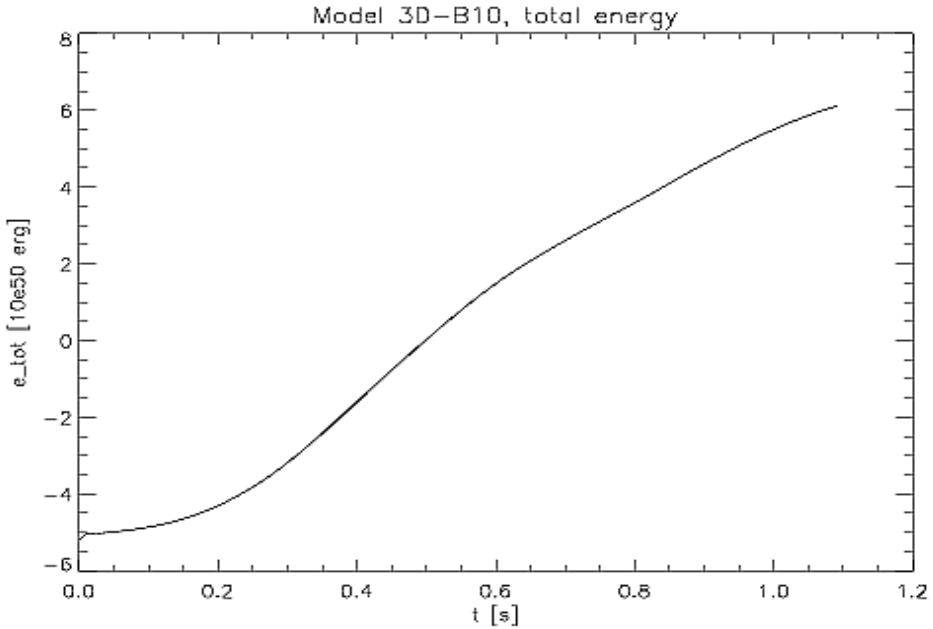
Flammenmodellierung in 3 Dimensionen









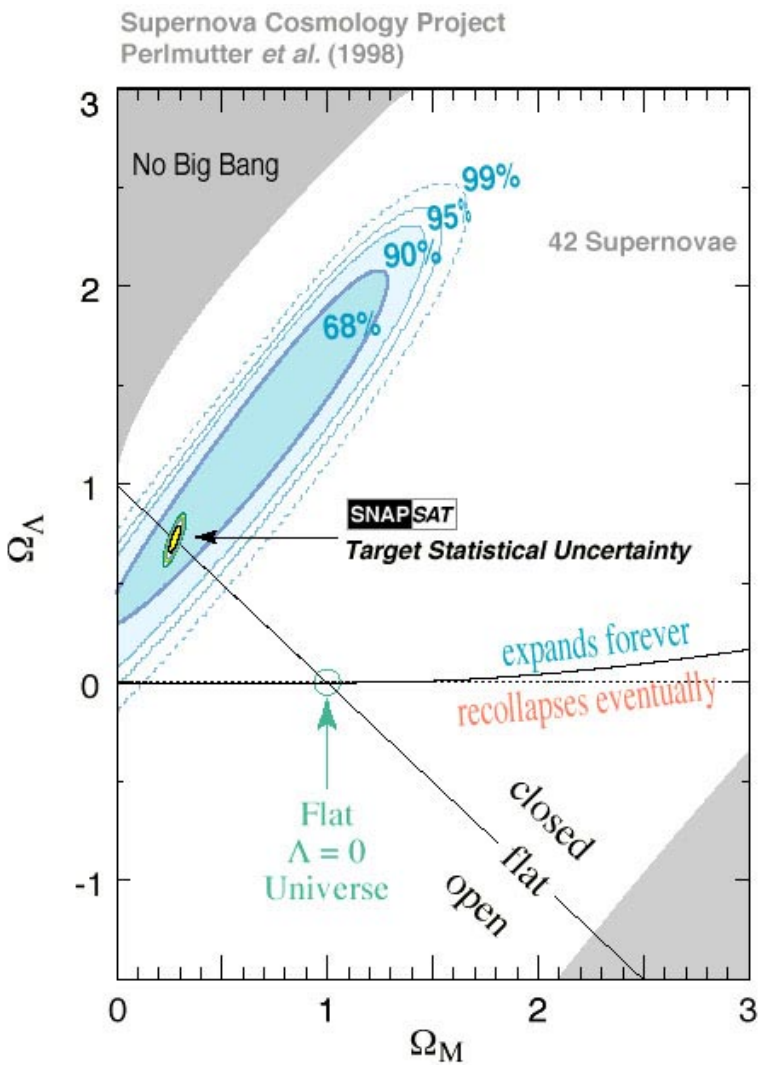


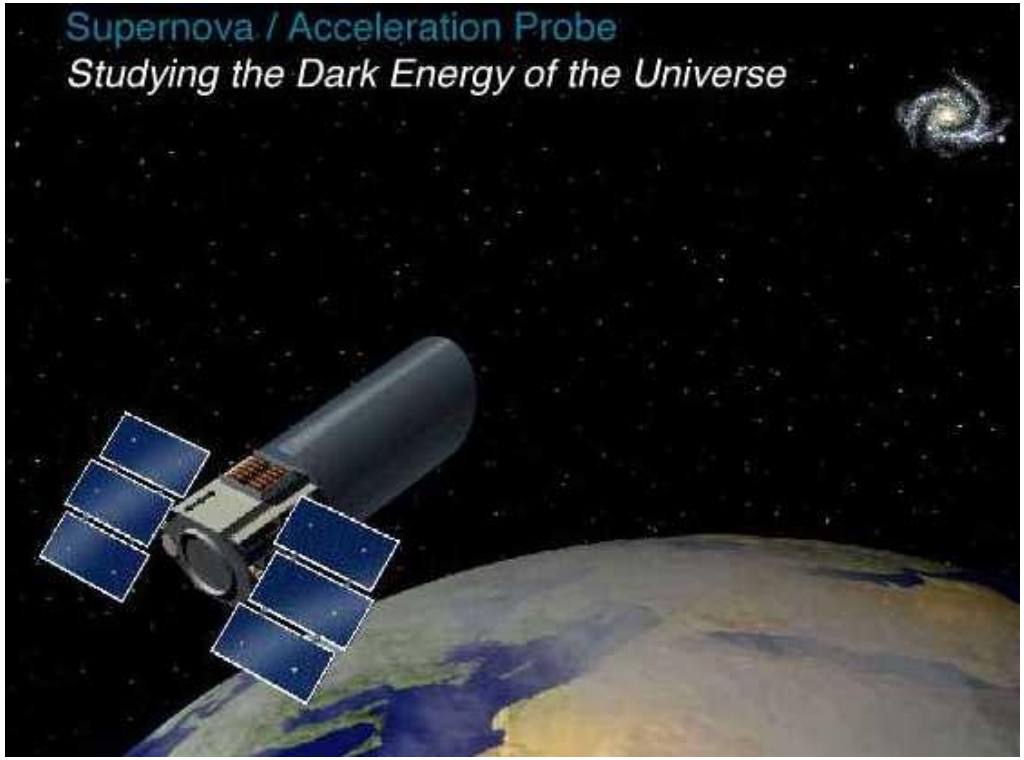
Zusammenfassung und Ausblick

- (Typ Ia) Supernovae können (empirisch) als "Standardkerzen" kalibriert werden.
- Die Beobachtungen geben *Evidenz* für eine von Null verschiedene *kosmologische Konstante* (oder "dunkle" Energie mit negativem Druck).
- Zusammen mit der kosmischen Mikrowellenstrahlung:

Wir leben in einem "flachen" Universum, das beschleunigt expandiert!

Zusammenfassung und Ausblick





SNAP: “Supernova/Acceleration Probe”