

Supernovae

Bruno Leibundgut

European Southern Observatory

Programm

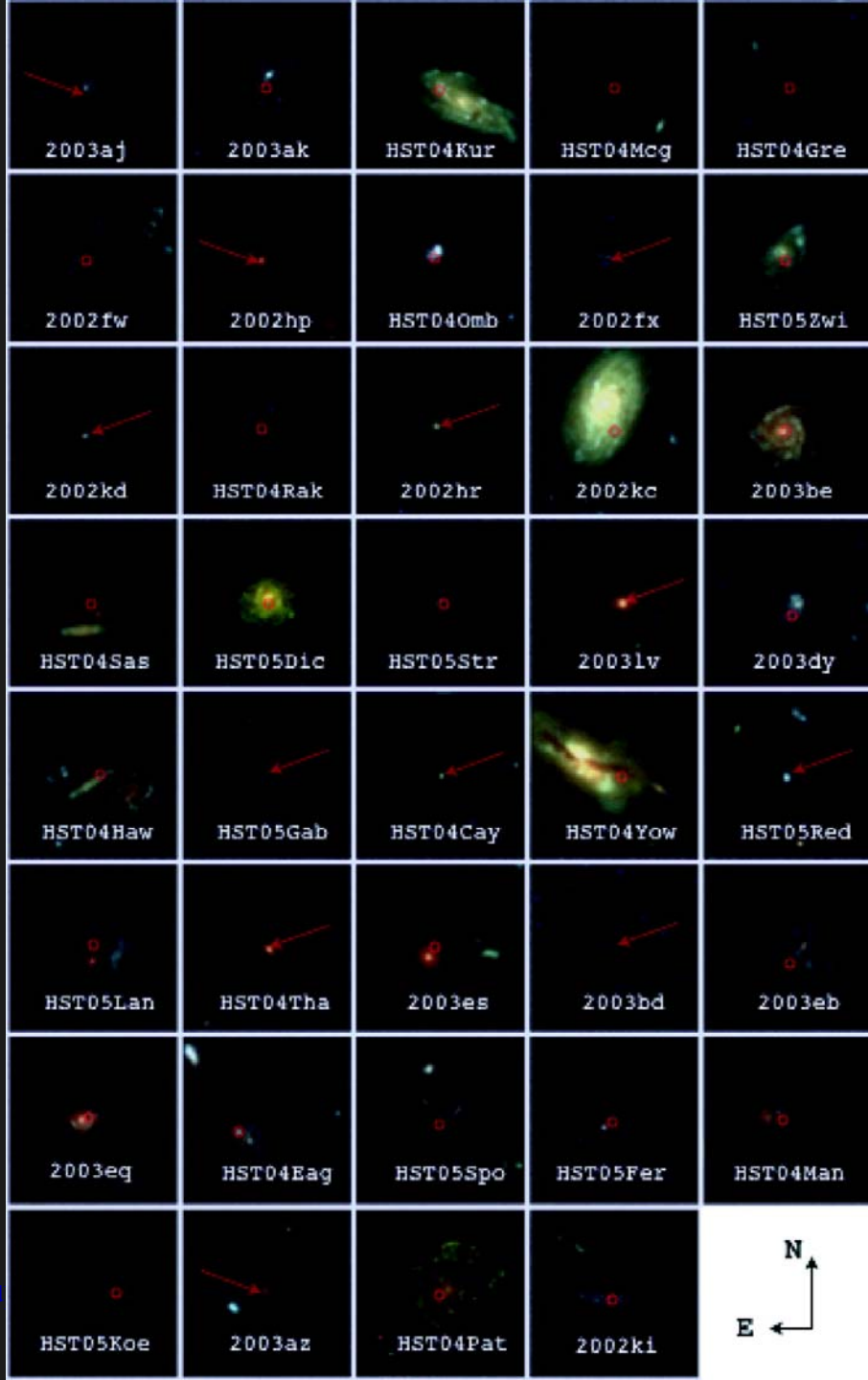
- Supernovae
 - Supernova Typen
 - Supernovae von Massiven Sternen
 - Thermonukleare Supernovae
- Supernova Kosmologie
 - Die universelle Expansiongeschichte

Supernova!



Supernovae!





Su

Riess et al. 2007

Supernovae

• Physik

- Explosion
- Nukleosynthese
- Strahlungstransport
- Schocks
- Evolution des Vorgängersternes

Astrophysik

Anreicherung des Universums mit höheren Elementen

Sternentwicklung

Sternentstehung

Galaxienentwicklung

Schwarze Löcher

Neutronensterne

Staubentstehung

“Instrumente”

Kosmologie

Sternentstehungsraten

Staubverteilung in anderen Galaxien

Beobachtungsgrößen

- Licht- und Farbkurven
(elektromagnetische Strahlung)
- Spektrale Entwicklung
- Umgebung
 - Muttergalaxie
 - interstellares Material
- Vorgängerstern
- Überreste
- Raten
- Neutrinos und Kosmische Strahlung

Definition (1)

- Was ist eine Supernova?

Eine **Supernova** (Plural: Supernovae) ist das schnell eintretende, helle Aufleuchten eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit durch eine Explosion, bei der der Stern selbst vernichtet wird. Die Leuchtkraft des Sterns nimmt dabei millionen- bis milliardenfach zu, er wird für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie, bei einer Hypernova sogar das Billiardenfache, also so hell wie ein Galaxienhaufen.

(Wikipedia)

Definition (2)

- Was ist eine Supernova?
 - Vollständige Zerstörung eines Sternes in einer Explosion
 - Jede Sternexplosion, die mehr als $\sim 10^{39}$ erg/s (10^{31} Joule/s) während mehrerer Wochen erzeugt

Definition (3)

- Was ist eine Supernova?

Eine Supernova ist ein Ereignis, bei dem ein Stern das meiste seines Material in einer gewaltigen Explosion verliert und seine Existenz als Stern endet. Dies ist eine physikalische Beschreibung. Die Beobachtungen lassen oft eine solch eindeutige Zuordnung oft nicht zu. Nichtsdestotrotz, eine Supernova kann definitionsgemäss nicht wiederkehrend sein.

Leibundgut (2008)

Supernova Nomenklatur

Supernova Namen werden gebildet aus der Zusammenfassung des Jahres und mit der alphabetischen Reihenfolge der Entdeckung.

Wenn **Z** erreicht ist, wird mit **aa, ab, ac** weitergefahren. Nach **az** kommt **ba, bb, bc**, etc.

Damit können ein Maximum von 676 SNe pro Jahr benannt werden.

SN 1987A → erste Supernova im Jahre 1987

SN 1999em → 143 Supernova in 1999

Supern

Historische Supernovae

SN 1006 (in Lupus)

SN 1054 (Krebs Nebel)

SN 1181 (in Cassiopeia)

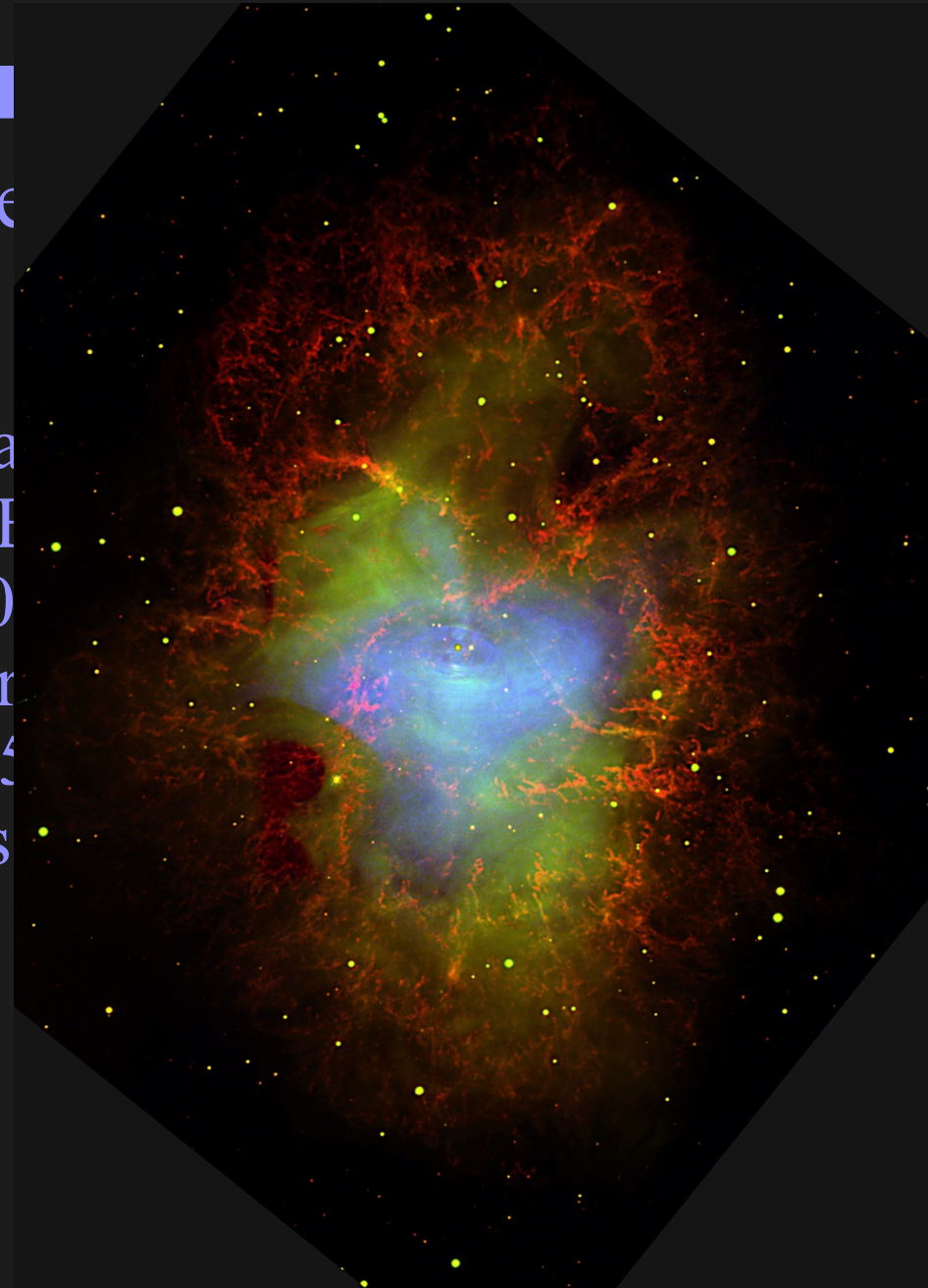
De stella nova (Tycho B)

Keplers Supernova 160

Cassiopeia A (ungefähr

S Andromeda (SN 1885)

SN 1987A (in der Gros



Die Supernova von 1054



Historis

SN 10

SN 10

SN 10

De st

Keple

Cassi

S An

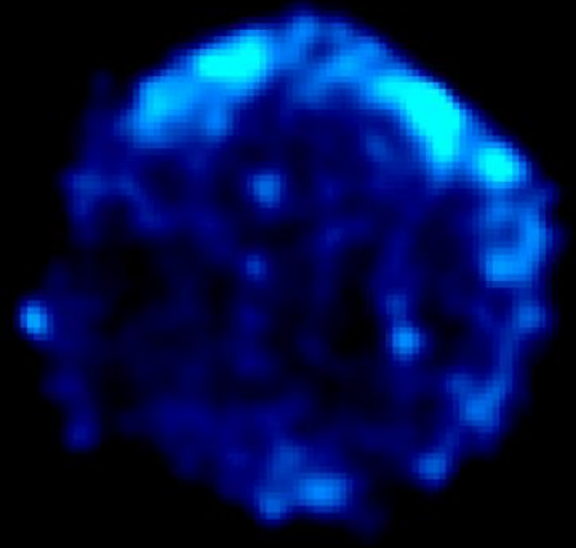
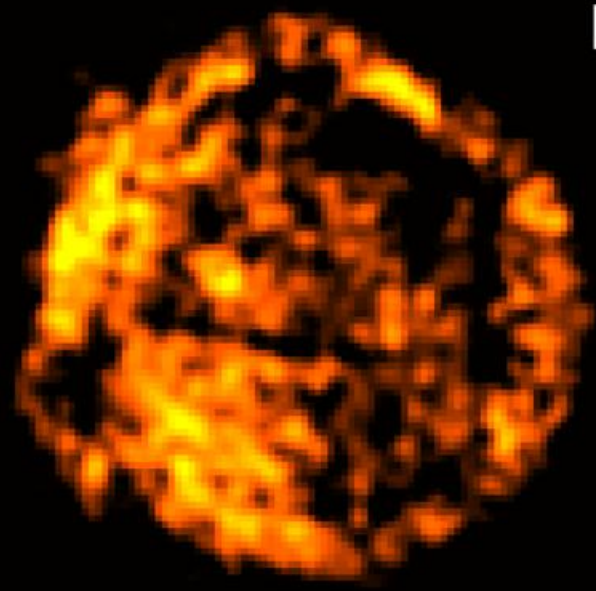
SN 10

Magnesium

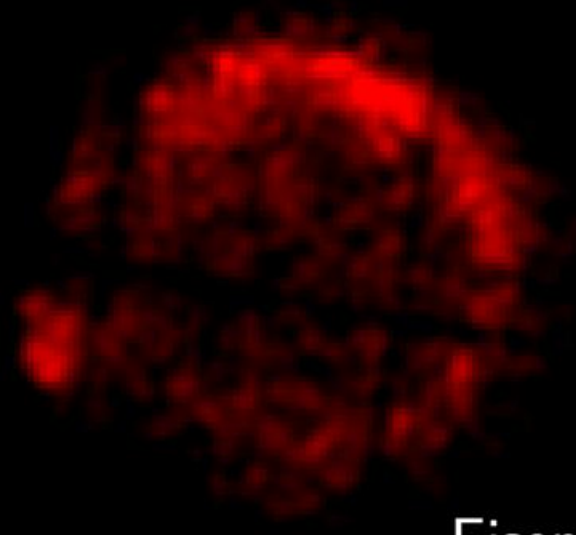
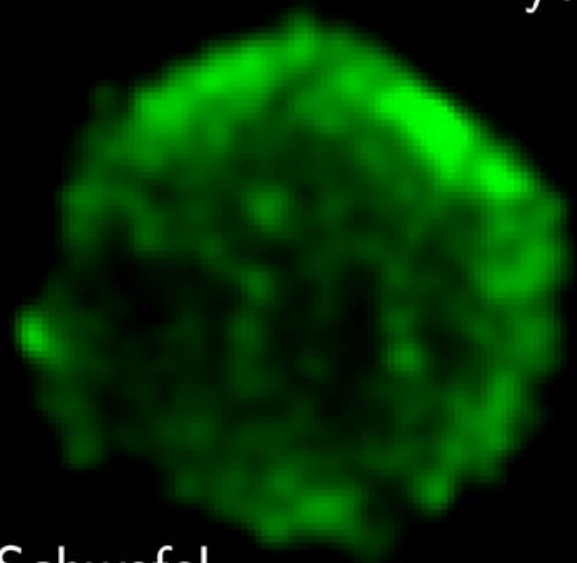
XMM-Newton

Silizium

EPIC



Tycho's SNR



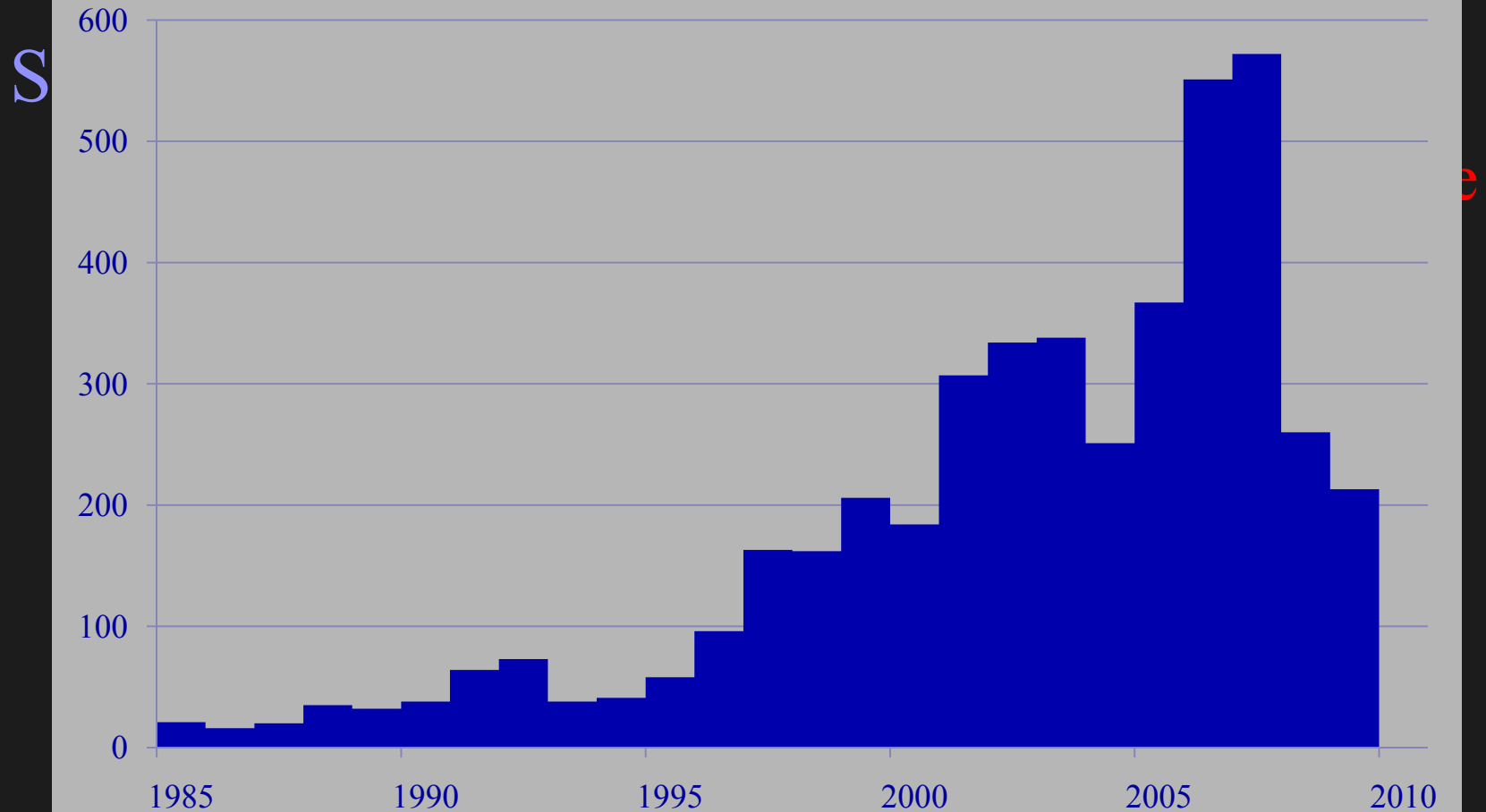
Schwefel

Eisen



Supernova Statistik

Supernovae pro Jahr



Supernovae

group 1* Ia**	2 IIa	3 IIIa	4 IVa	5 Va	6 VIa	7 VIIa	8 VIIIa	9 IXa	10 Xa	11 XIa	12 XIIa	13 IIIb	14 IVb	15 Vb	16 VIb	17 VIIb	18 0
1 H												3 B	4 C	5 N	6 O	7 F	8 Ne
2 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
3 Na	12 Mg											31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
4 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
5 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
6 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	113 *** (Uub)	114 *** (Uuq)	115 *** (Uup)	116 *** (Uuh)		118 *** (Uuo)
7 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 *** (Uub)	113 *** (Uuq)	114 *** (Uup)	115 *** (Uuh)			
lanthanide series		6	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
actinide series		7	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

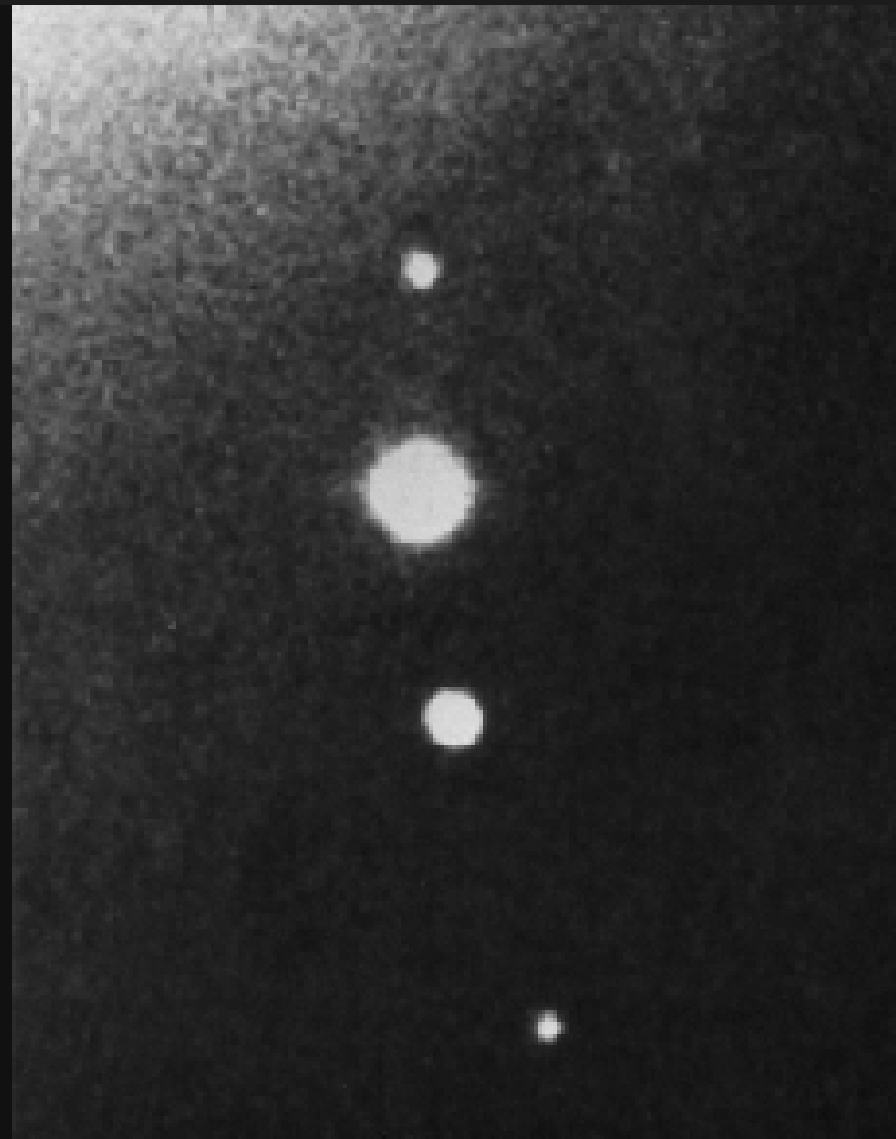
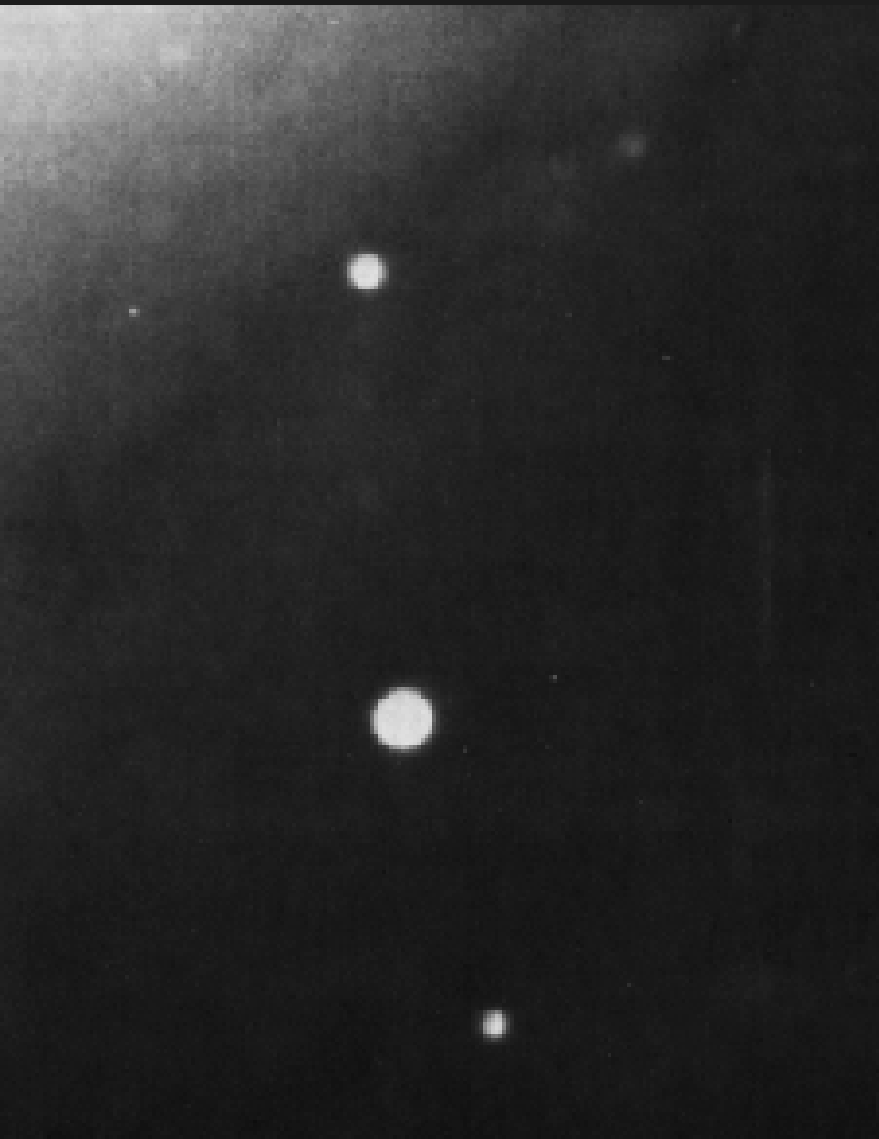
Urknall

Sterne

Supernovae

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
 ** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.
 *** Discoveries of elements 112–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

SN 1993J

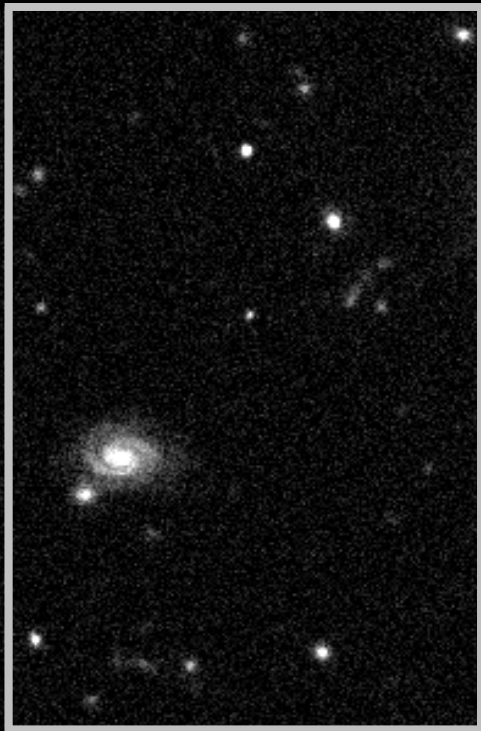


SN 1994D

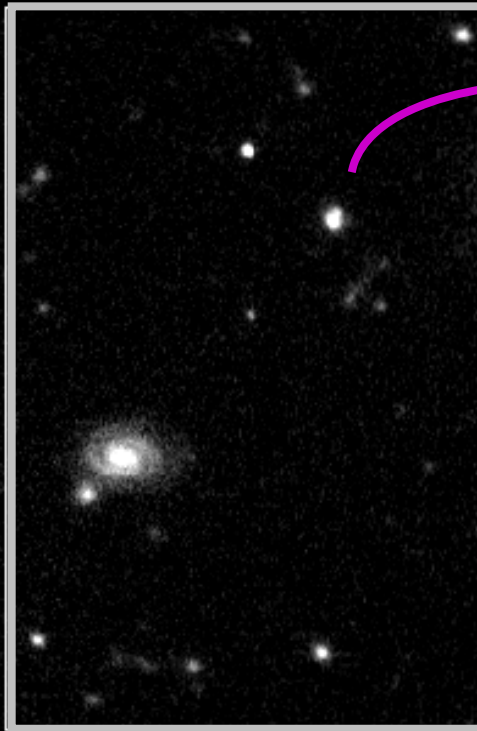


Supernova Suche

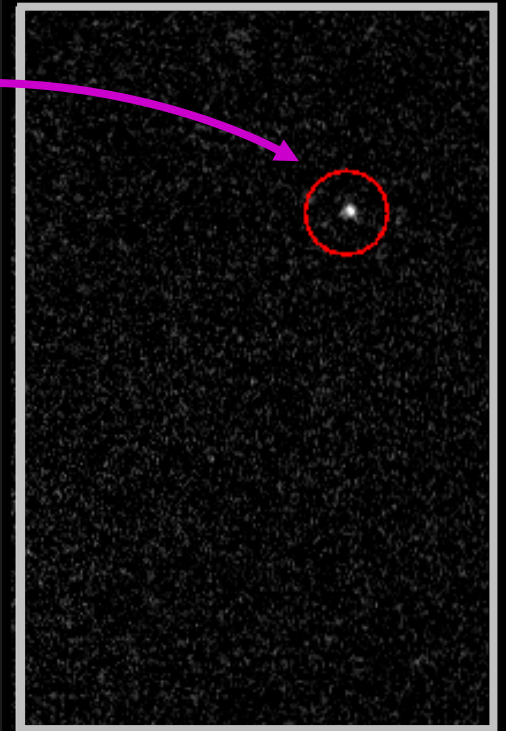
Epoch 1



Epoch 2 (3 weeks later)



Epoch 2 - Epoch 1



(High-z Supernova Team)

Supernovae

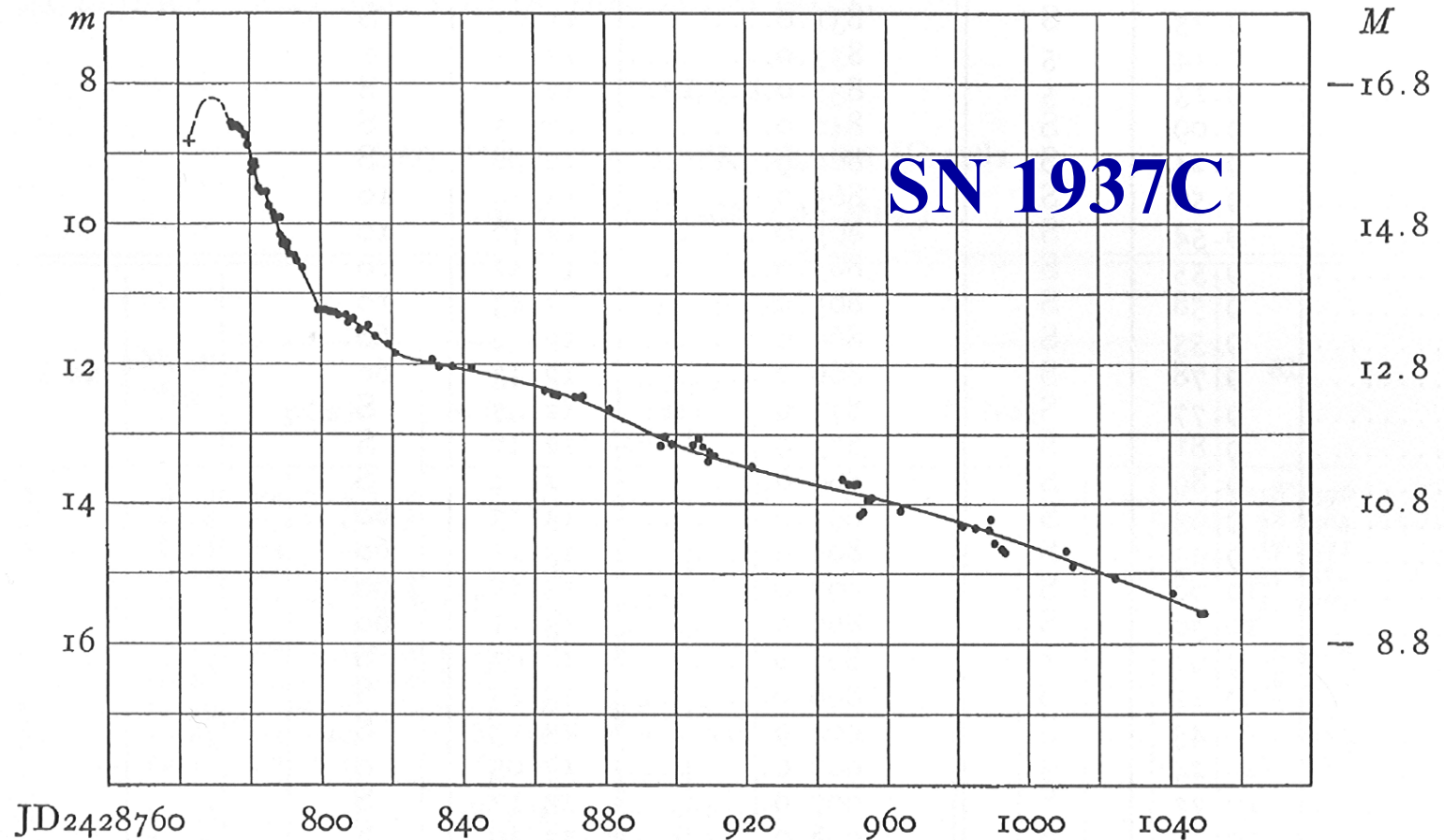
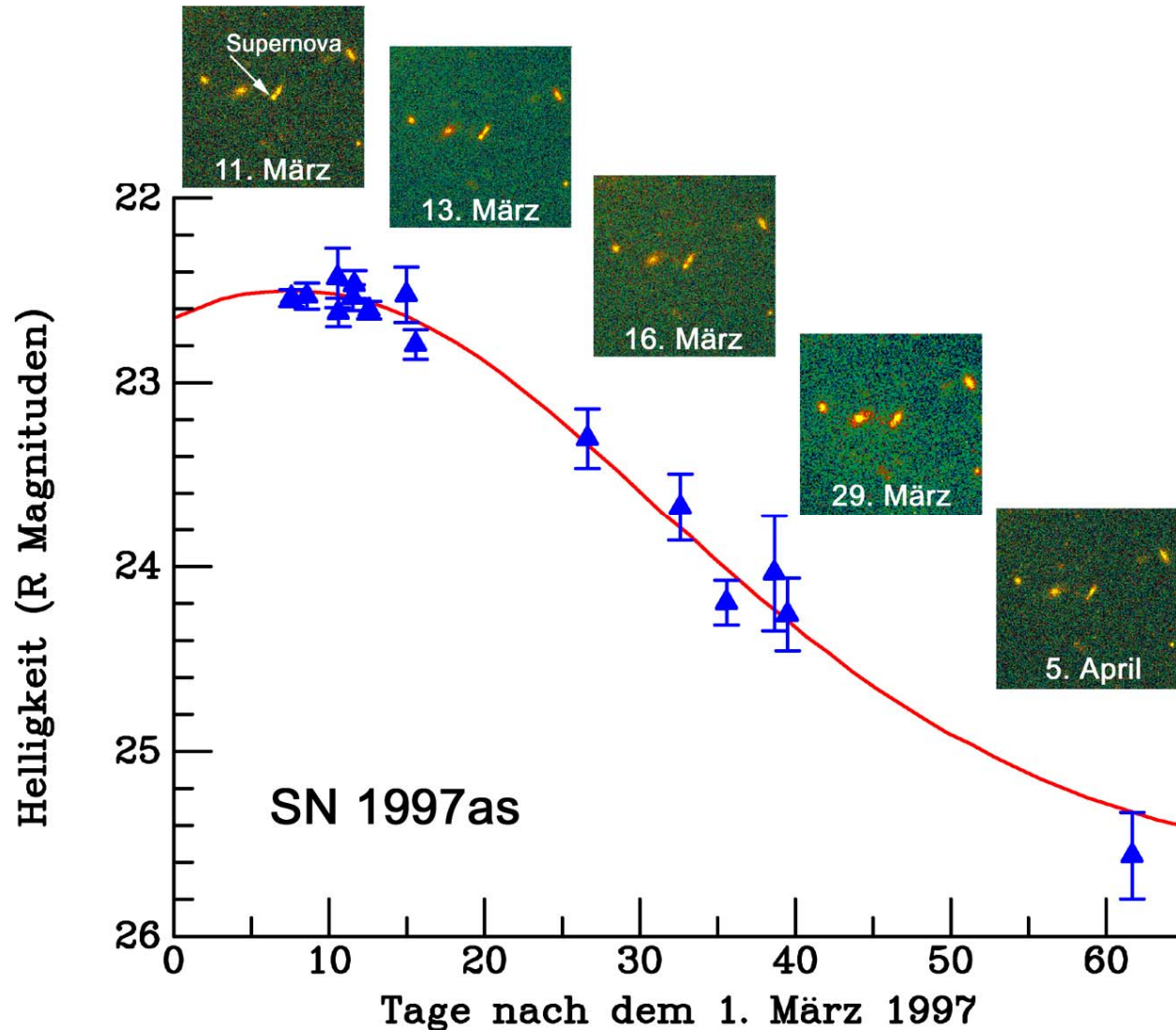


FIG. 1.—Photographic light-curve of supernova in IC 4182

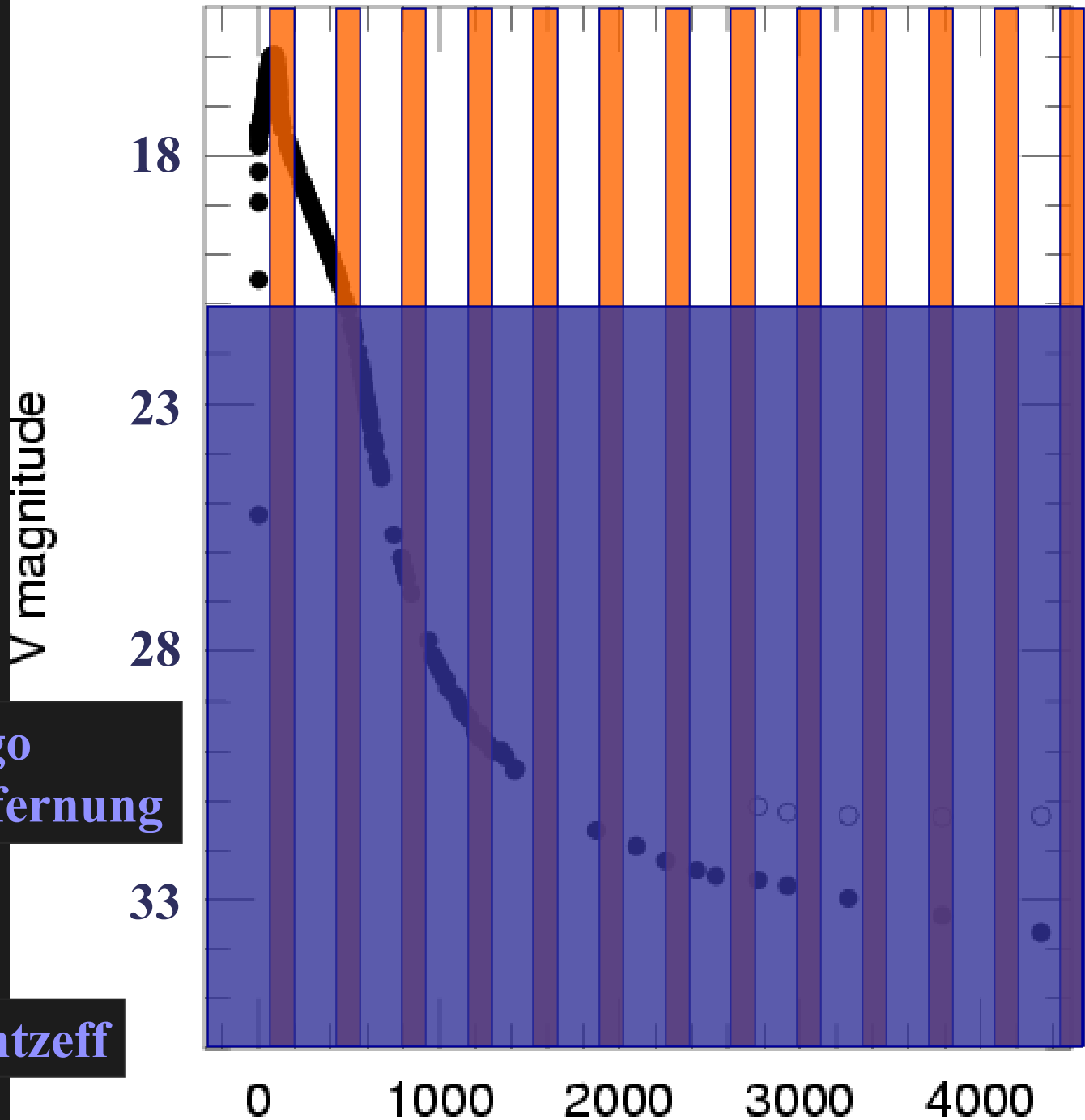
Supernova Lichtkurve



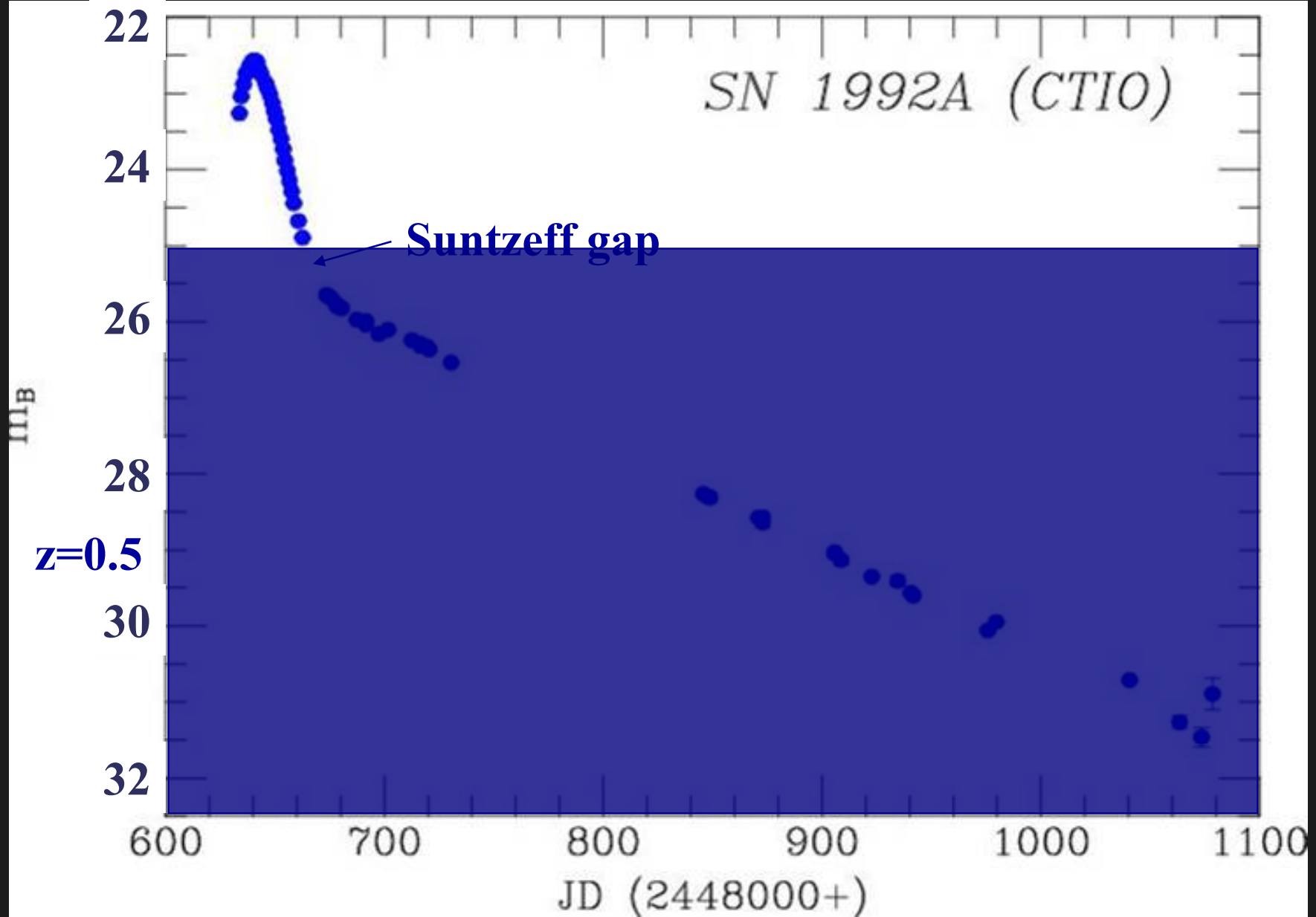
Supernova Beobachtungen

Virgo
Entfernung

Suntzeff



Supernova Beobachtungen



Supernova Klassifizierung

Aufgrund der optischen spektroskopischen
Erscheinung

**Kernkollaps
in massiven Sternen**

SN II (Wasserstoff H)

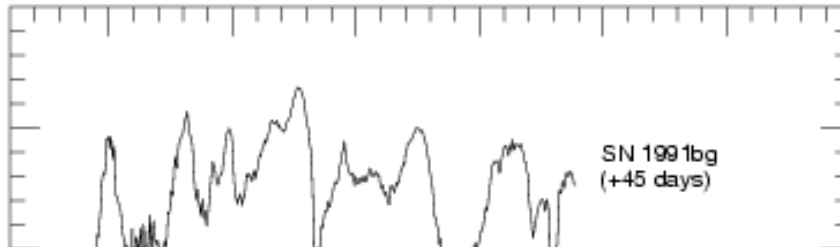
SN Ib/c (kein H/He)

Hypernovae/GRBs

SN Ia (kein H)

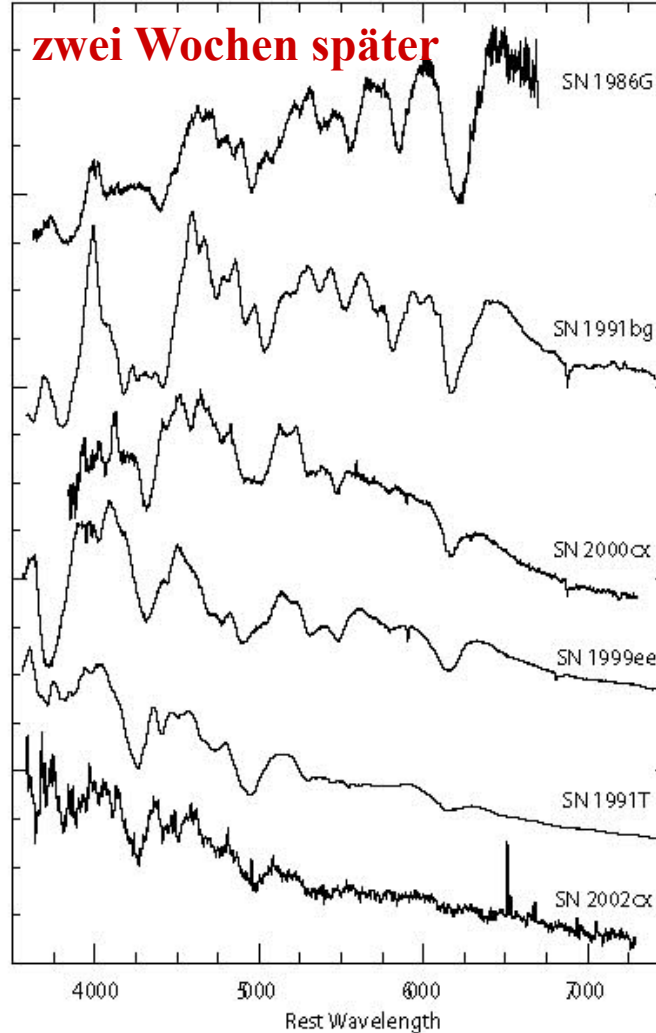
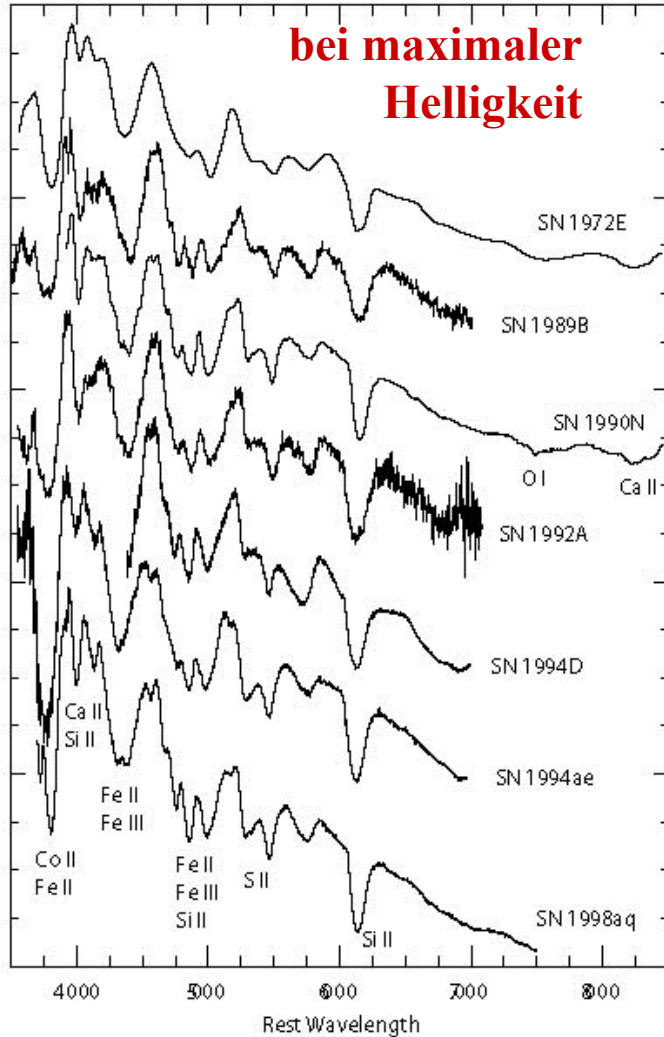
**Thermonukleare
Explosionen**

(Leibundgut et al. 1993)



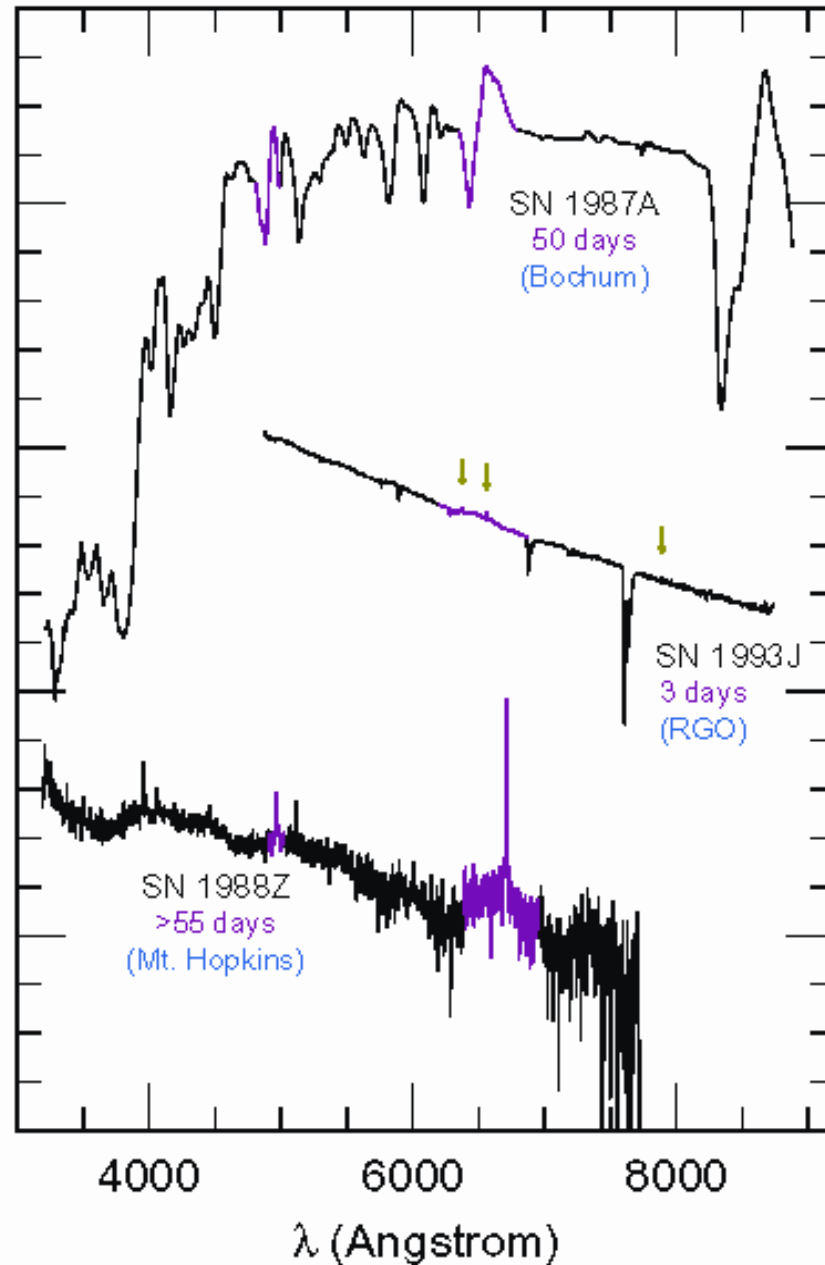
Supernova Spektroskopie

Typ Ia



Blondin

Type II Supernovae



Supernova Spektroskopie

Typ II

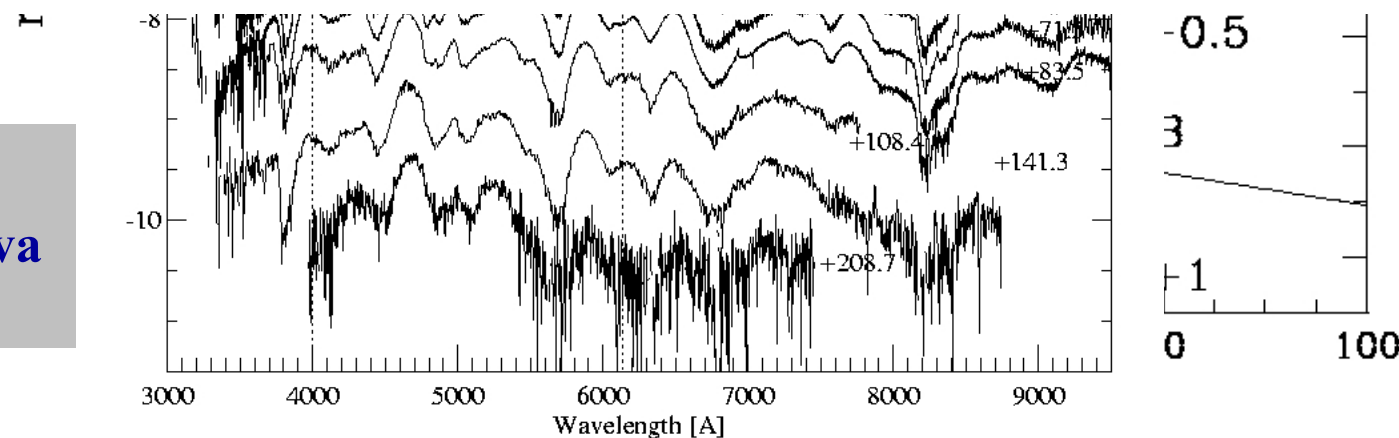
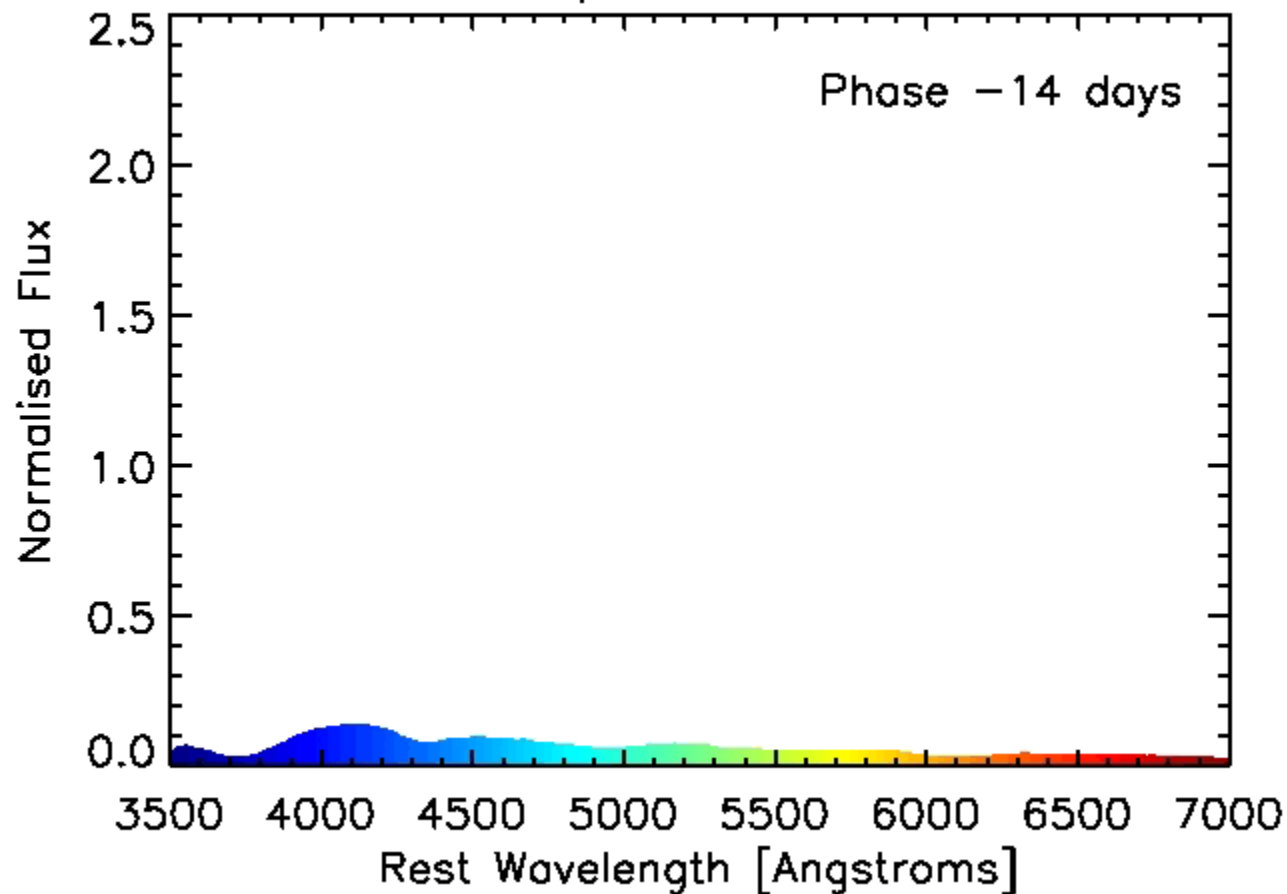
Nahe SNe

einige wenige
ausgezeichnete

–detaillierte V
Modellen m

SN 2003du
European Supernova
Collaboration

SN Ia spectral evolution



Supernova Typen

Thermonukleare SNe

- Vorgängersterne haben **kleine** Massen ($<8M_{\odot}$)
- weit entwickelte Sterne (Weisse Zwerge)
- Explosives C und O Brennen
- Doppelsternsysteme
- Vollständige Zerstörung

Kernkollaps SNe

- Vorgängersterne haben **grosse** Massen ($>8M_{\odot}$)
- große Sternhülle (Kernfusion noch im Gange)
- Brennen wegen der hohen **Dichte und Kompression**
- Einzelsterne (Doppelsterne für SNe Ib/c)
- Neutronenstern als Überrest

Energie Quellen

- Gravitation → Typ II Supernovae
 - Kollaps einer Sonnenmasse oder mehr in einen Neutronenstern

Gamows Bild einer
Kernkollaps Supernova

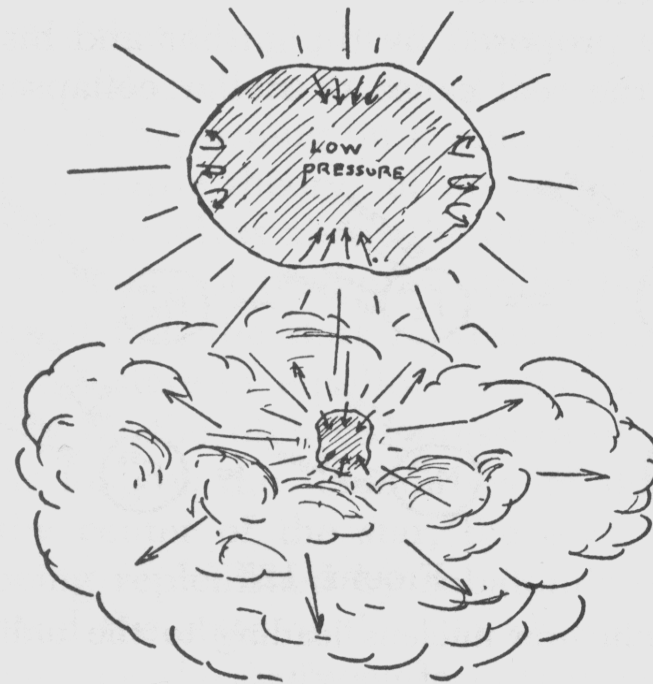
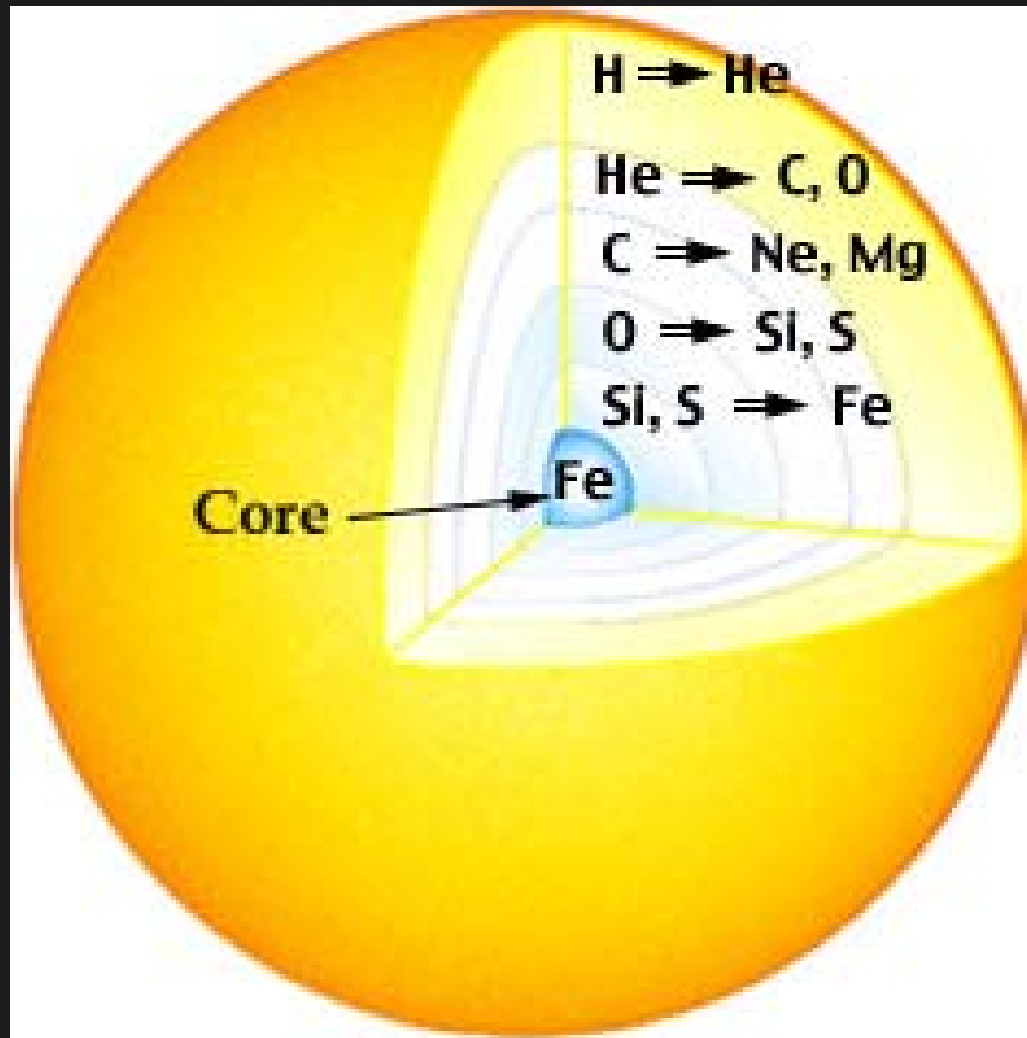


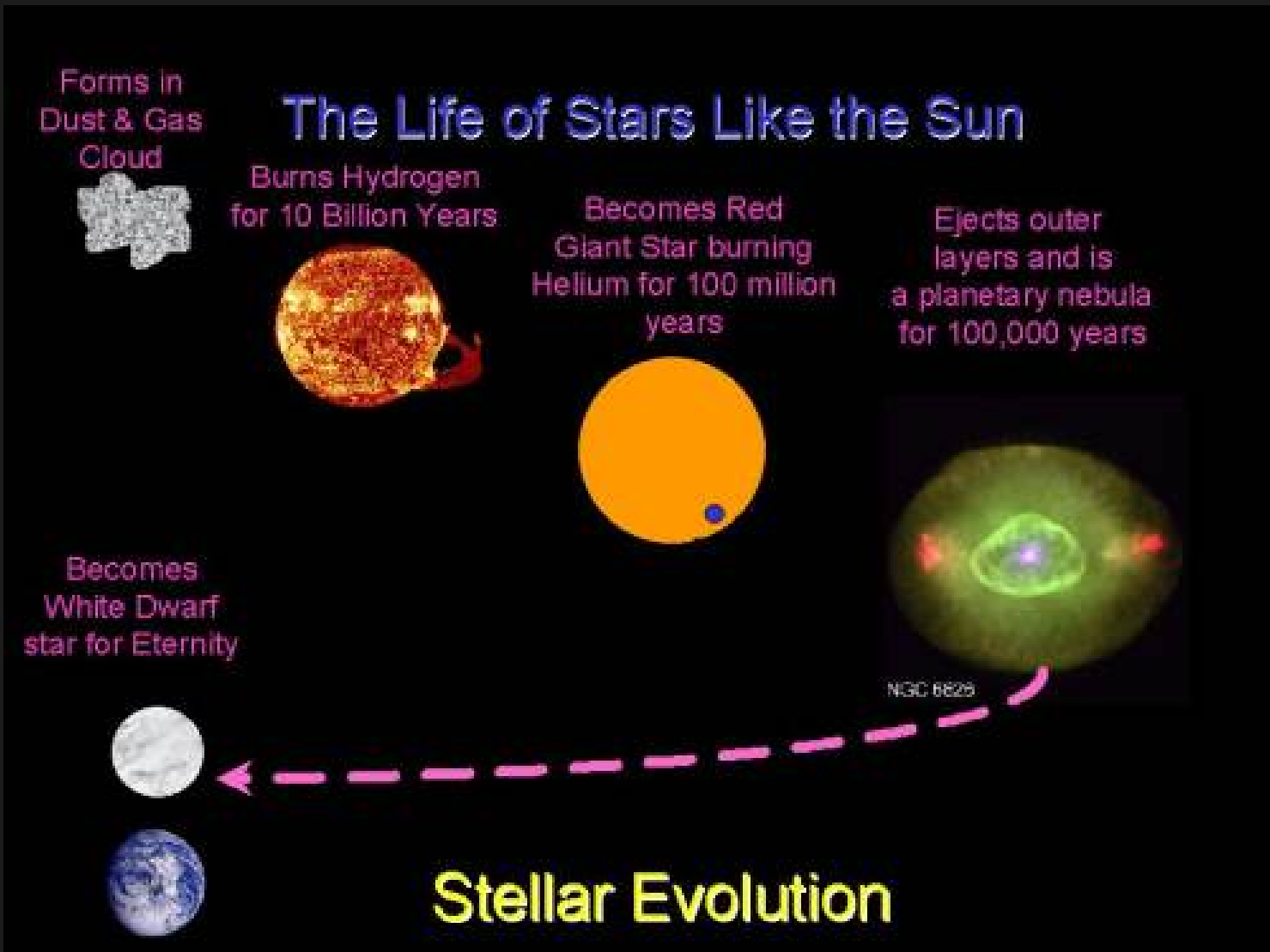
FIGURE 126

An early and a late stage of a supernova explosion.

Struktur eines Vorgängersterne von Kernkollaps Supernovae



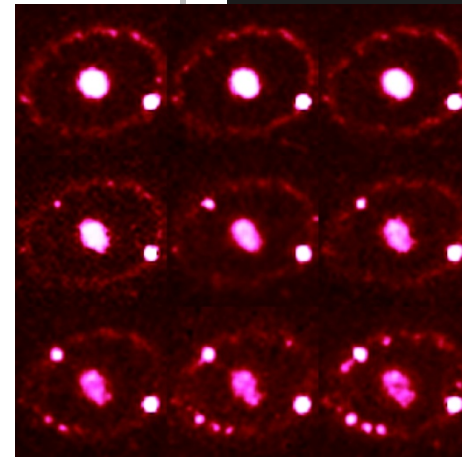
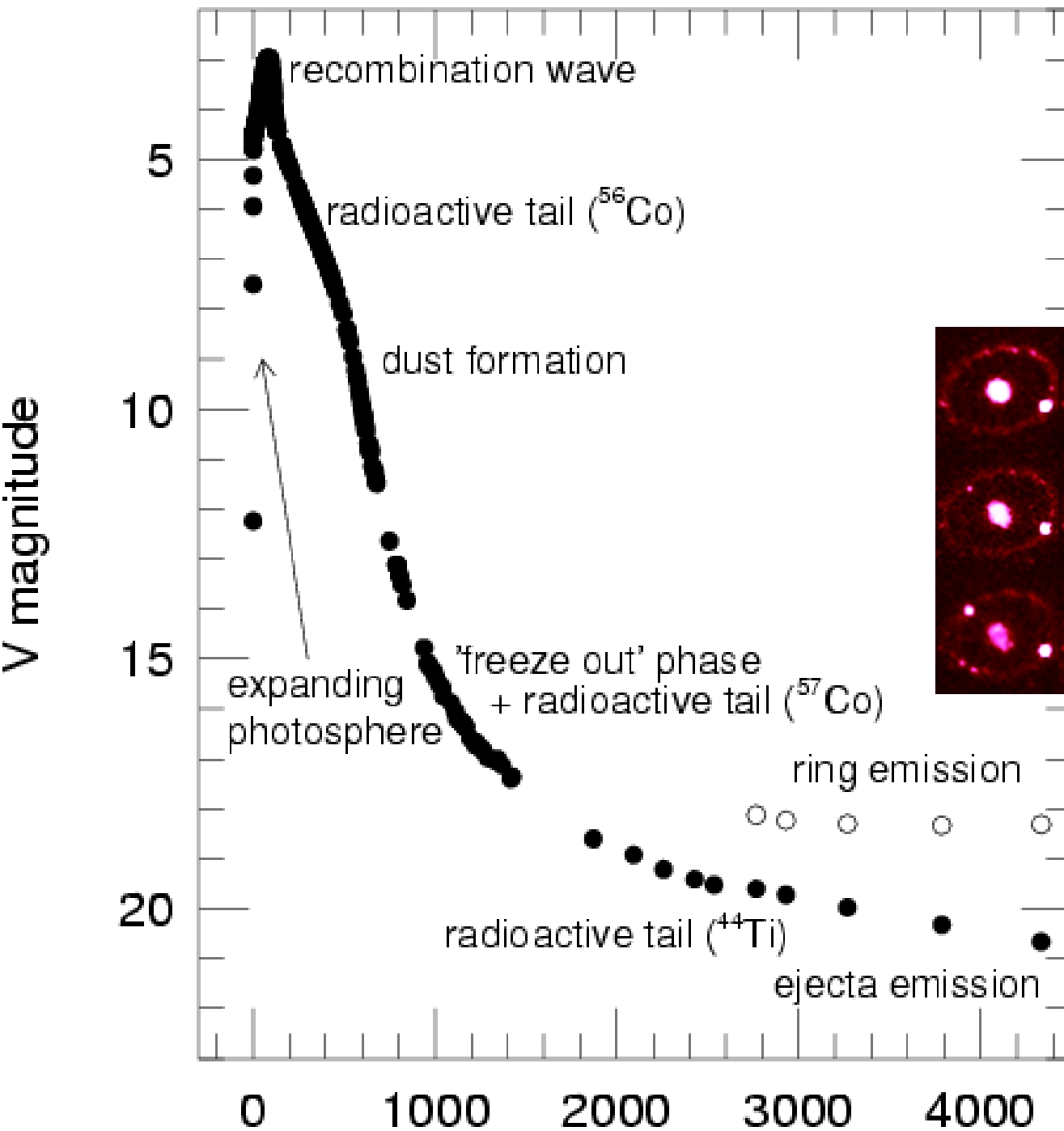
Die Entwicklung eines Sternes



Energie Quellen

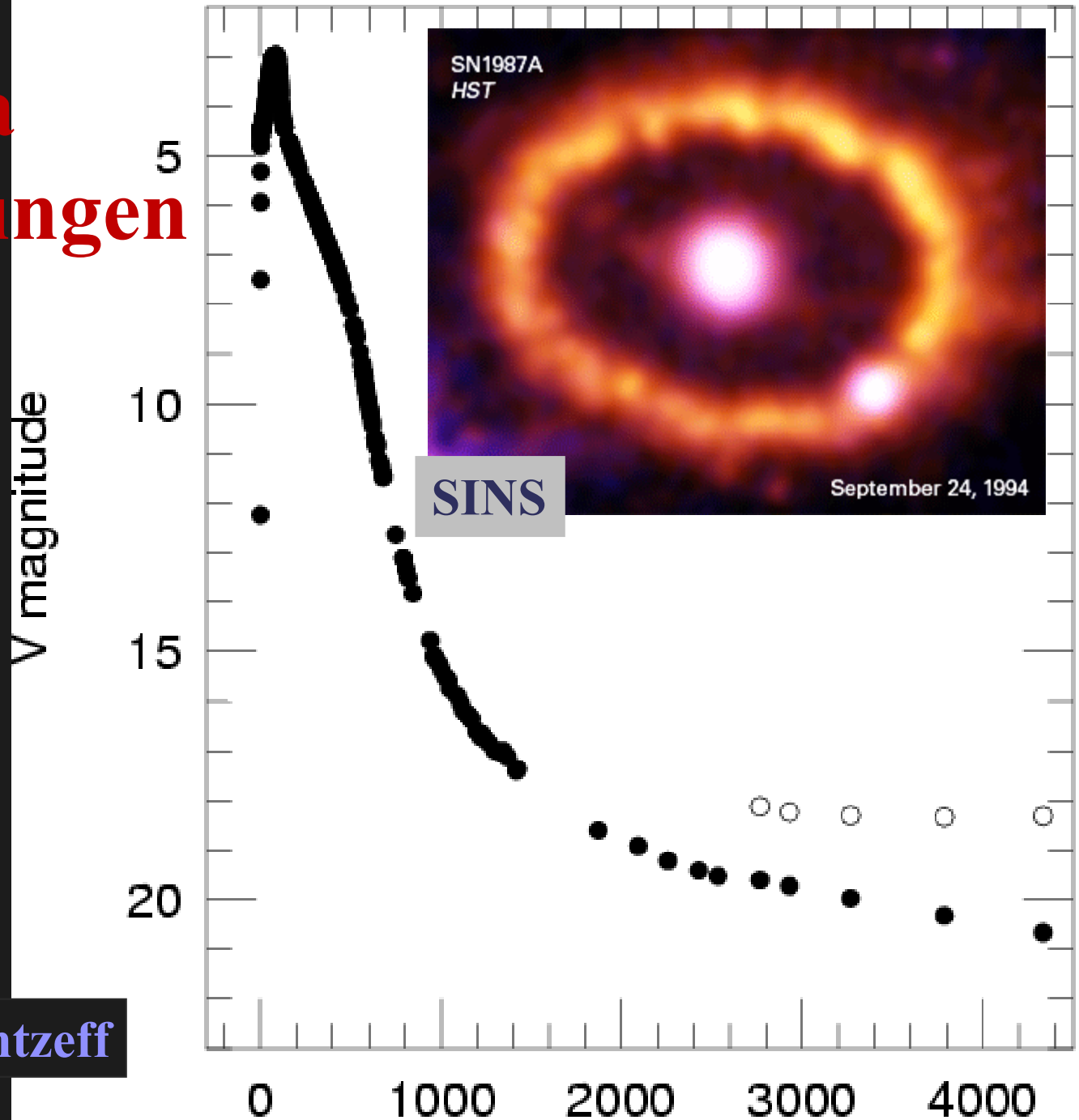
- Schocks
 - Ausbruch an der Sternoberfläche
 - Kinetische Energie
- Kühlung
 - adiabatisch aufgrund der Expansion der Ejecta
- Radioaktivität
 - Nukleosynthese
- Rekombination
 - Atome im vom Schock ionisierten Material rekombinieren

SN 1987A



Suntzeff (2003)

Supernova Beobachtungen



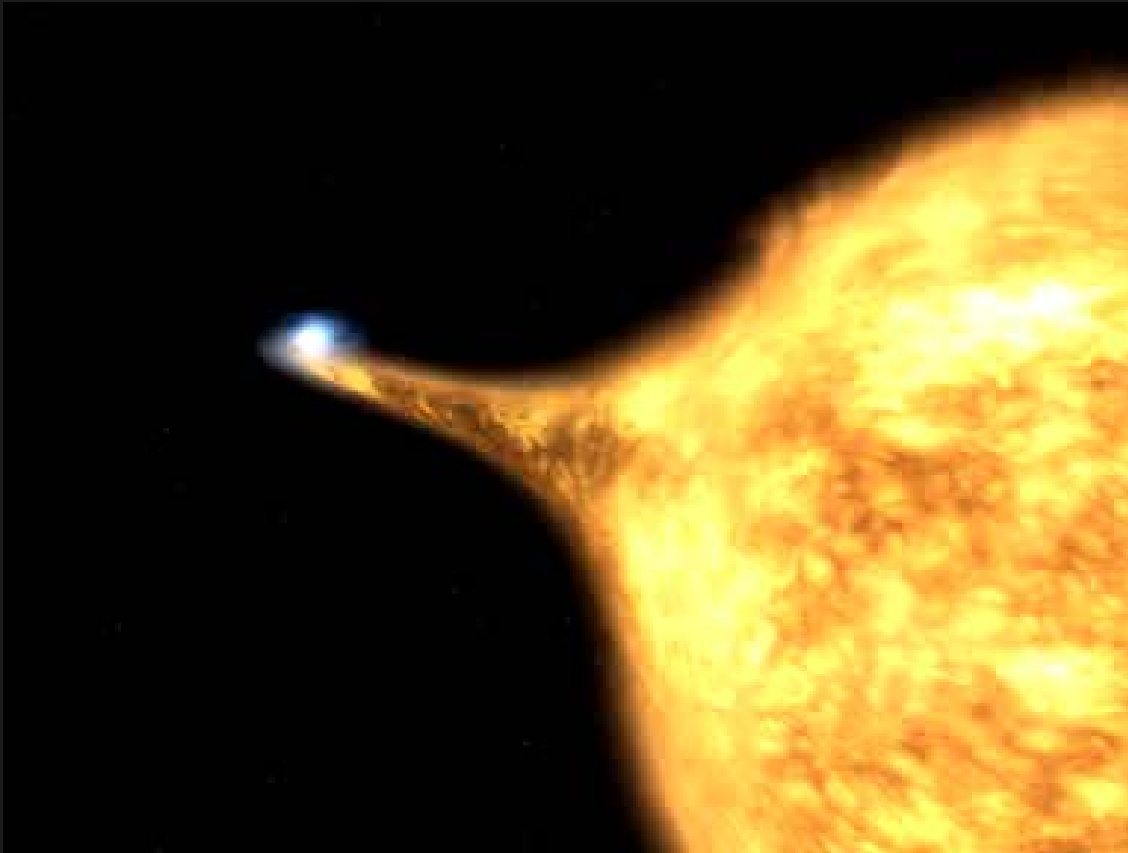
Suntzeff

Energie Quellen

- Gravitation → Typ II Supernovae
 - Kollaps einer Sonnenmasse der mehr in einen Neutronenstern
 - Freisetzung von 10^{46} Joule
 - vor allem Elektron Neutrinos ν_e
 - 10^{44} Joule in kinetischer Energy (Expansion der Ejecta)
 - 10^{42} Joule in Strahlung
- Nukleare (Bindungs-) Energy → Typ Ia
 - explosives Kohlenstoff- und Sauerstoff-Brennen von etwa einer Sonnemasse
 - Freisetzung von 10^{42} Joule

Thermonukleare Supernovae

Das “Standartmodell”

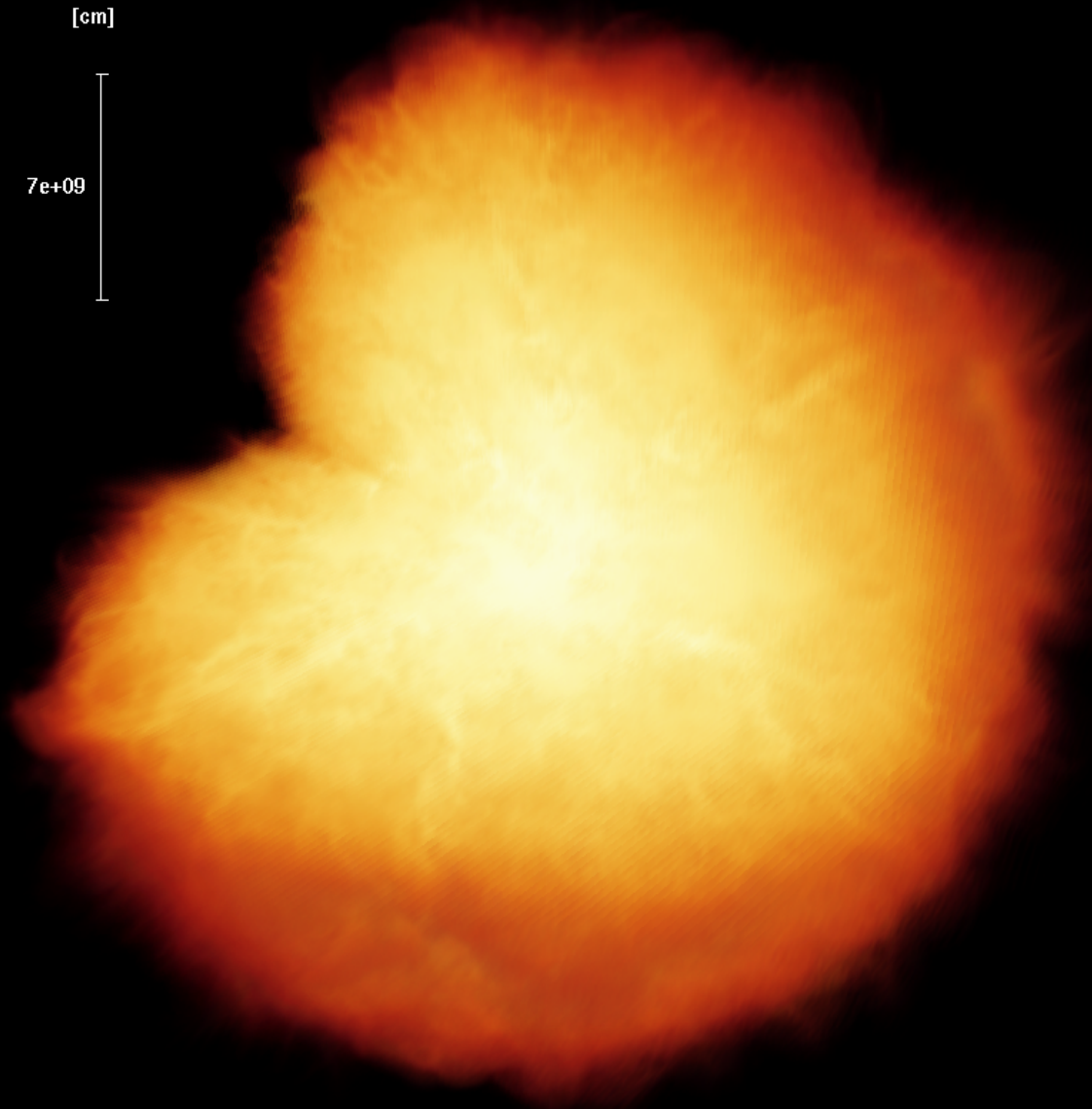


Weisser Zwerg in
einem
Doppelsternsystem

Durch den
Massentransfer wächst
der Weisse Zwerg zu
einer kritischen Masse
(Chandrasekhar Masse,
 $M_{\text{Chand}} = 1.4 M_{\odot}$)

Simulationen am Limit

Courtesy F. Röpke

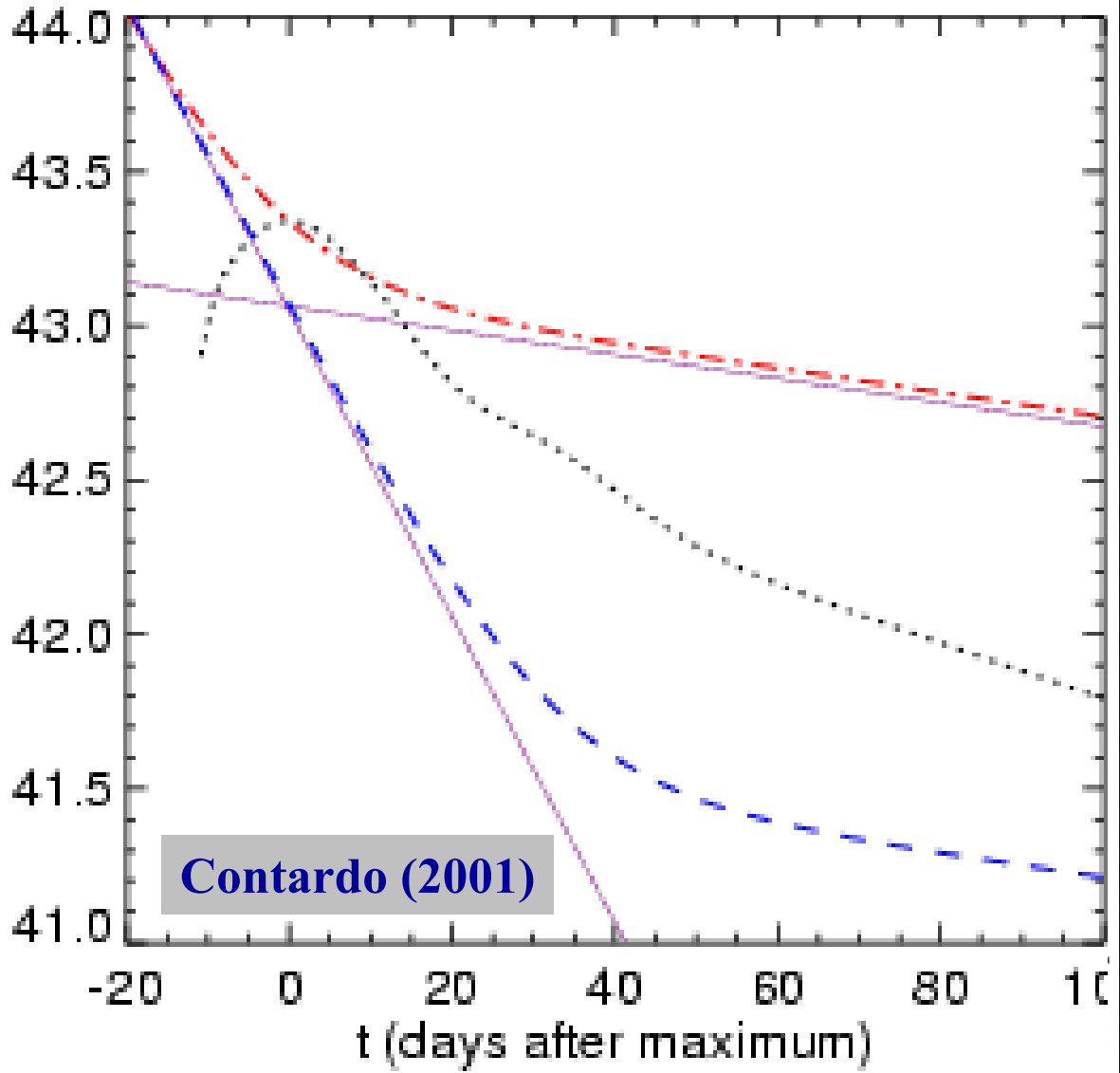
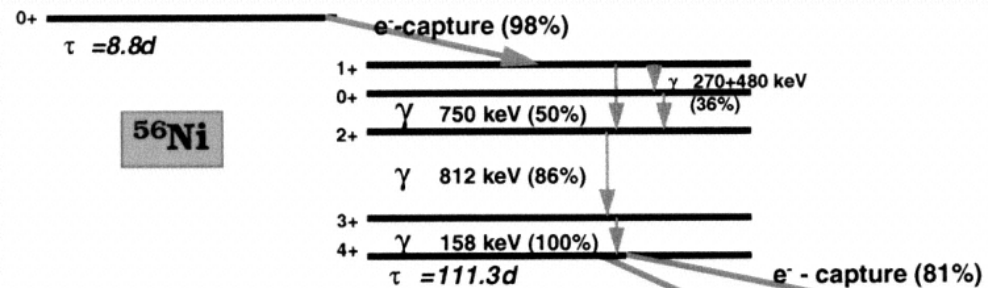


t=10.0s

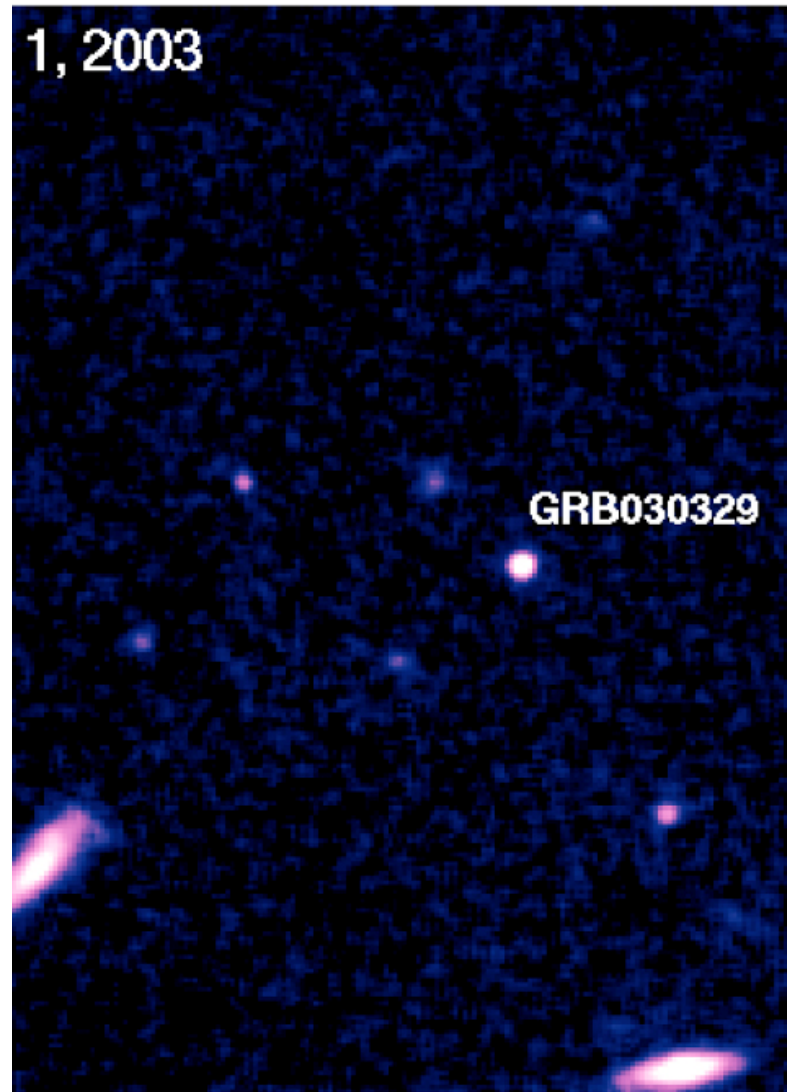
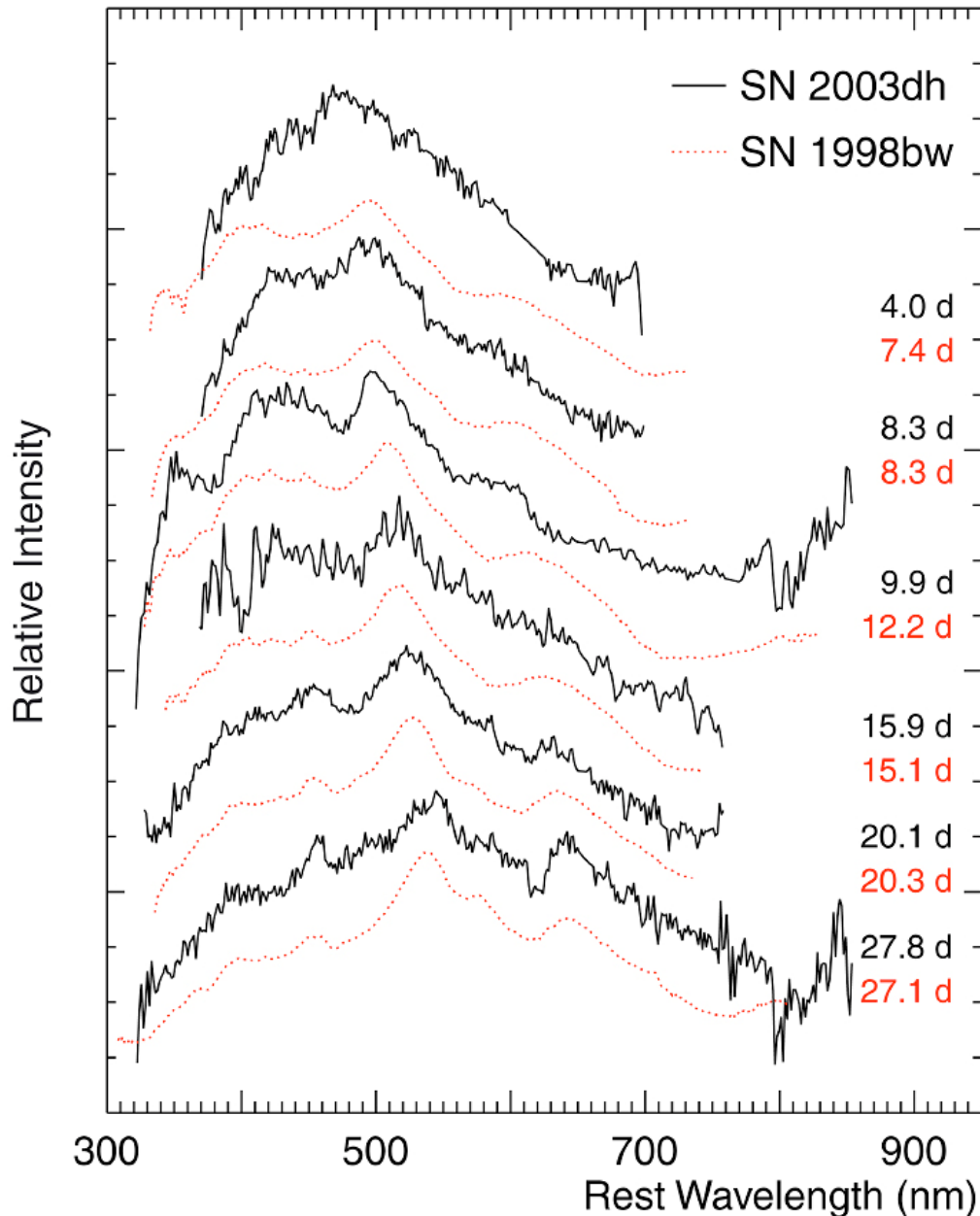
Radioaktivität

Ni Isotope und anderer Elemente

Umwandlung von γ -Strahlen und Positronen in Wärme und optische Photonen



Gamma-Strahlen Ausbrüche und Supernovae



Supernova Unbekannte

- Die Explosionen sind noch nicht vollständig verstanden
 - Umkehrung der Implosion bei den Kernkollaps Supernovae
 - Rolle der Neutrinos
 - genaue Verbrennung in den thermonuklearen Supernovae und der Strahlungstransport
- Vorgängersterne der thermonuklearen Supernovae sind nicht wirklich bekannt
 - Weiße Zwerge, aber ...
 - Doppel Weiße Zwerge oder ein Weißer Zwerg mit einem normalen Stern

Klassifizierung

Early Spectra:

no Hydrogen / Hydrogen

SN I

Si/ weak Si

SN II

Nebular spectra

He dominant/H dominant

SN Ia

1985A
1989B

He poor/He rich

GRBs!!

SN Ic

1983I
1983V

SN Ib

1983N
1984L

SN IIb

1993J
1987K

SN II

Light Curve decay
after maximum:
Linear / Plateau

Believed to originate
from *deflagration* or
detonation of an
accreting white dwarf.

Core collapse.

Most (NOT all)
H is removed during
the evolution

Core Collapse.

Outer Layers stripped
by winds (*Wolf-Rayet Stars*)
or binary interactions
Ib: H mantle removed!
Ic: H & He removed!

SN IIL

1980K
1979C

SN IIP

1987A
1988A

SN IIn(1995G) 1999em

Core Collapse of
a massive progenitor
with plenty of H .

Supernovae

Extrem helle Sternexplosionen

Wichtig für die Produktion von schweren chemischen Elementen

Endprodukt der Sternentwicklung

- für massive Sterne als Kernkollaps mit nachfolgendem Neutronenstern oder Schwarzem Loch**
- für kleine Sterne in engen Doppelsternsystemen
- (der Rest der Sterne erlischt langsam)

Supernovae

Extrem helle Sternexplosionen

**Wichtig für die Produktion von schweren
chemischen Elementen**

Beste Entfernungskennzeichen im Universum

**The only reliable way of determining
extragalactic distances is through supernova
investigations.**

F. Zwicky

Kosmologie mit Supernovae

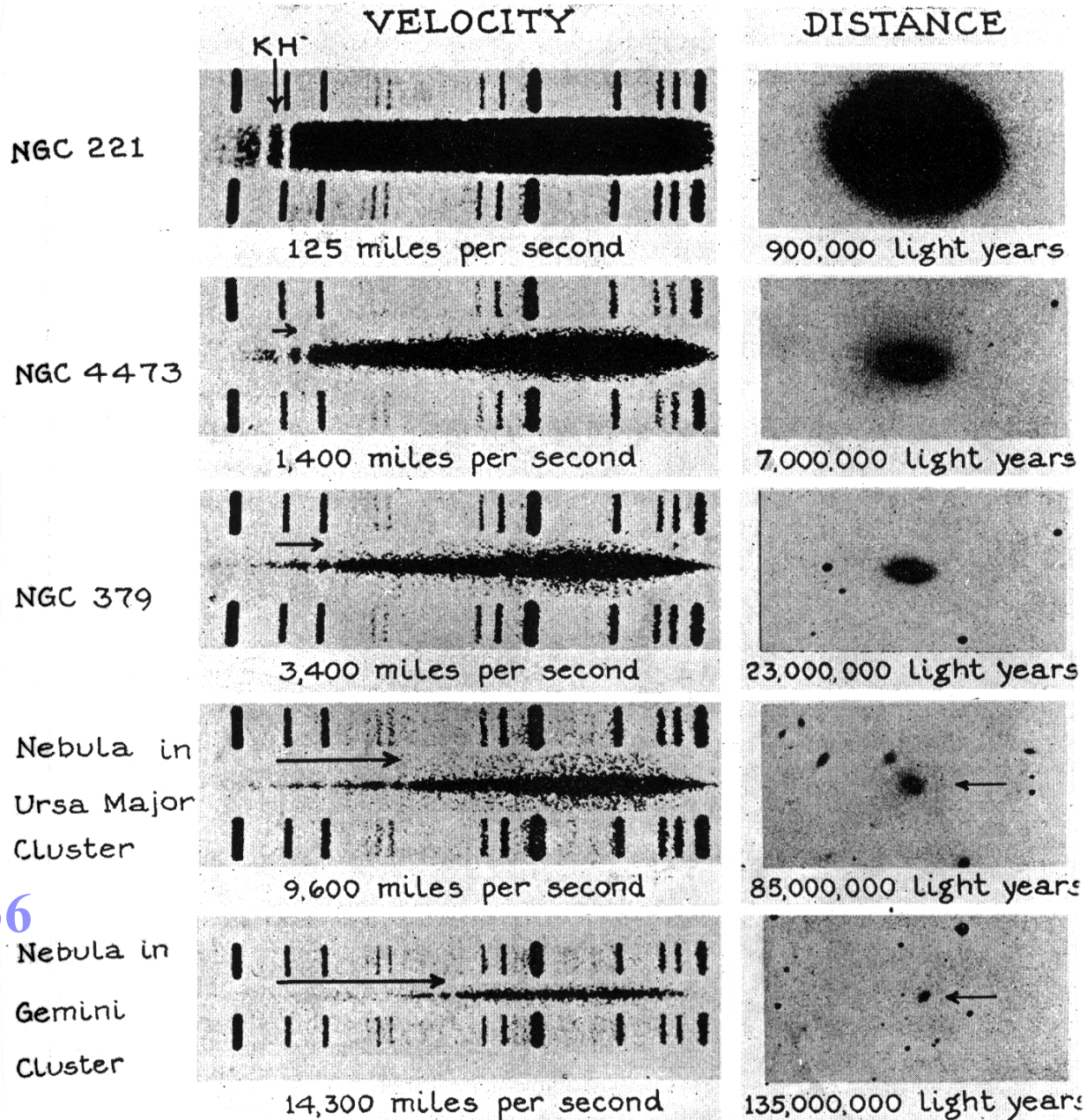
Entfernungen sind im Universum nur sehr schwer zu messen. Sie sind aber essentiell, um die Expansionsrate und deren Geschichte bestimmen zu können.

Typ Ia Supernovae sind ausgezeichnete Entfernungskennzeichner, die im nahen Universum geeicht werden.

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION FOR EXTRA-GALACTIC NEBULAE

Dis

ms



Hubble 1936

Das original Hubble Diagram

Geschwindigkeit

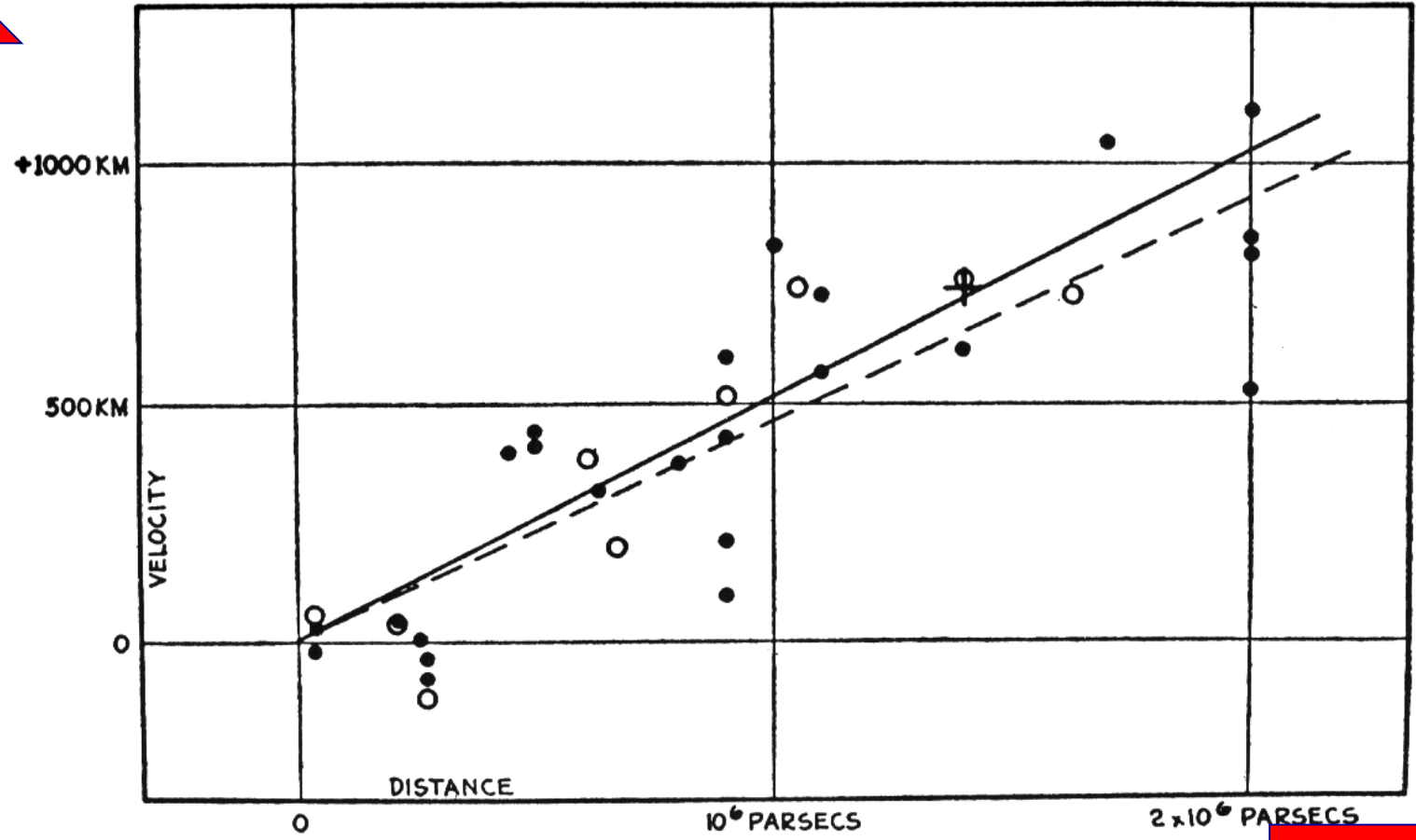
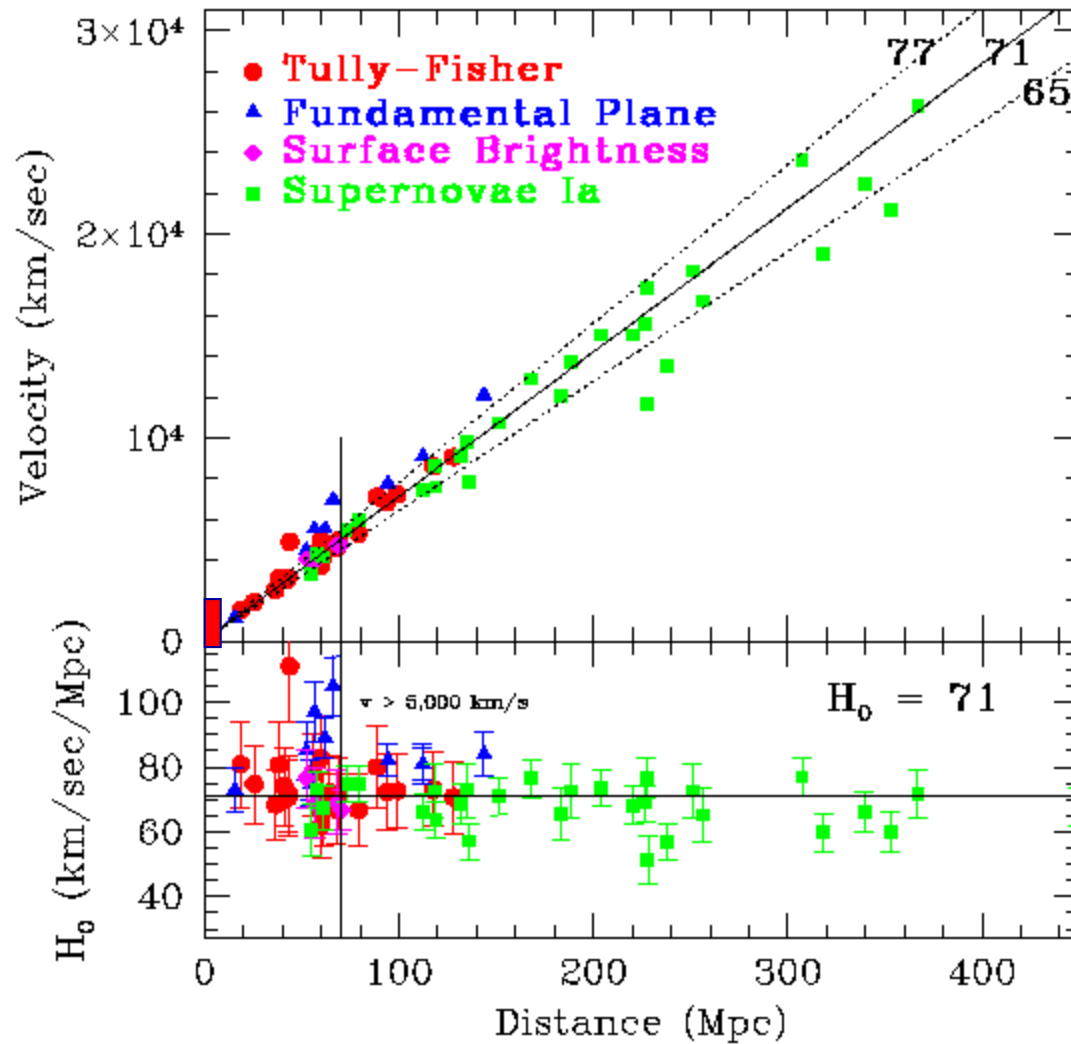


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

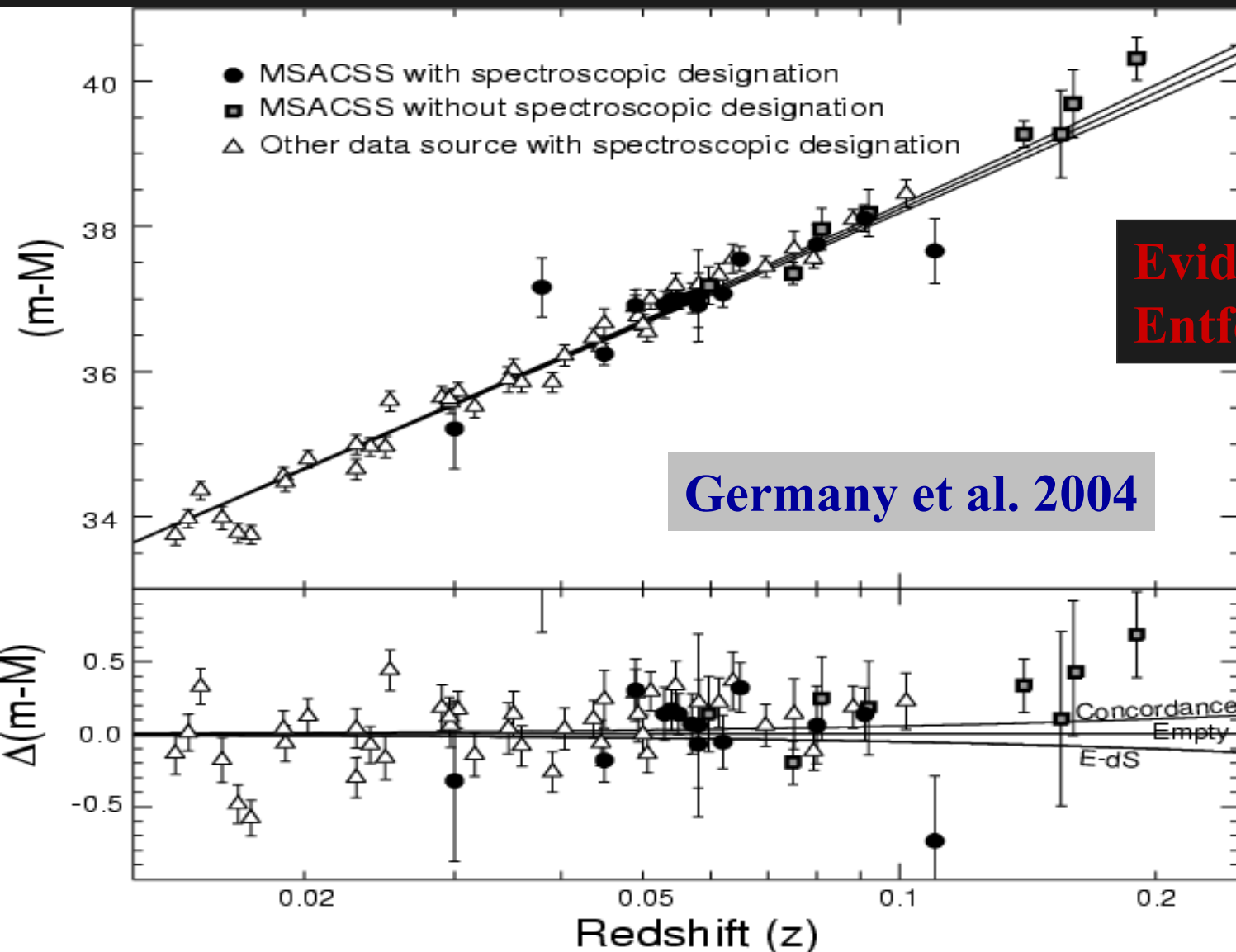
Entfernung



Ein modernes Hubble Diagram



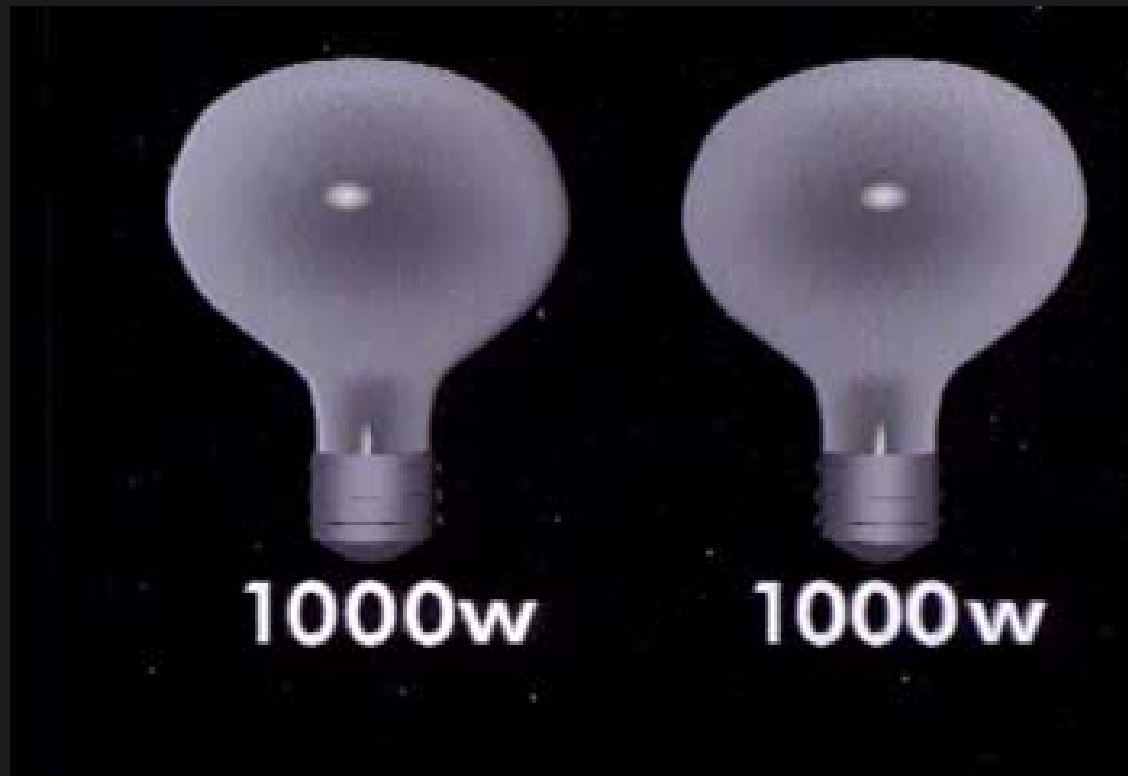
Die nahen SNe Ia

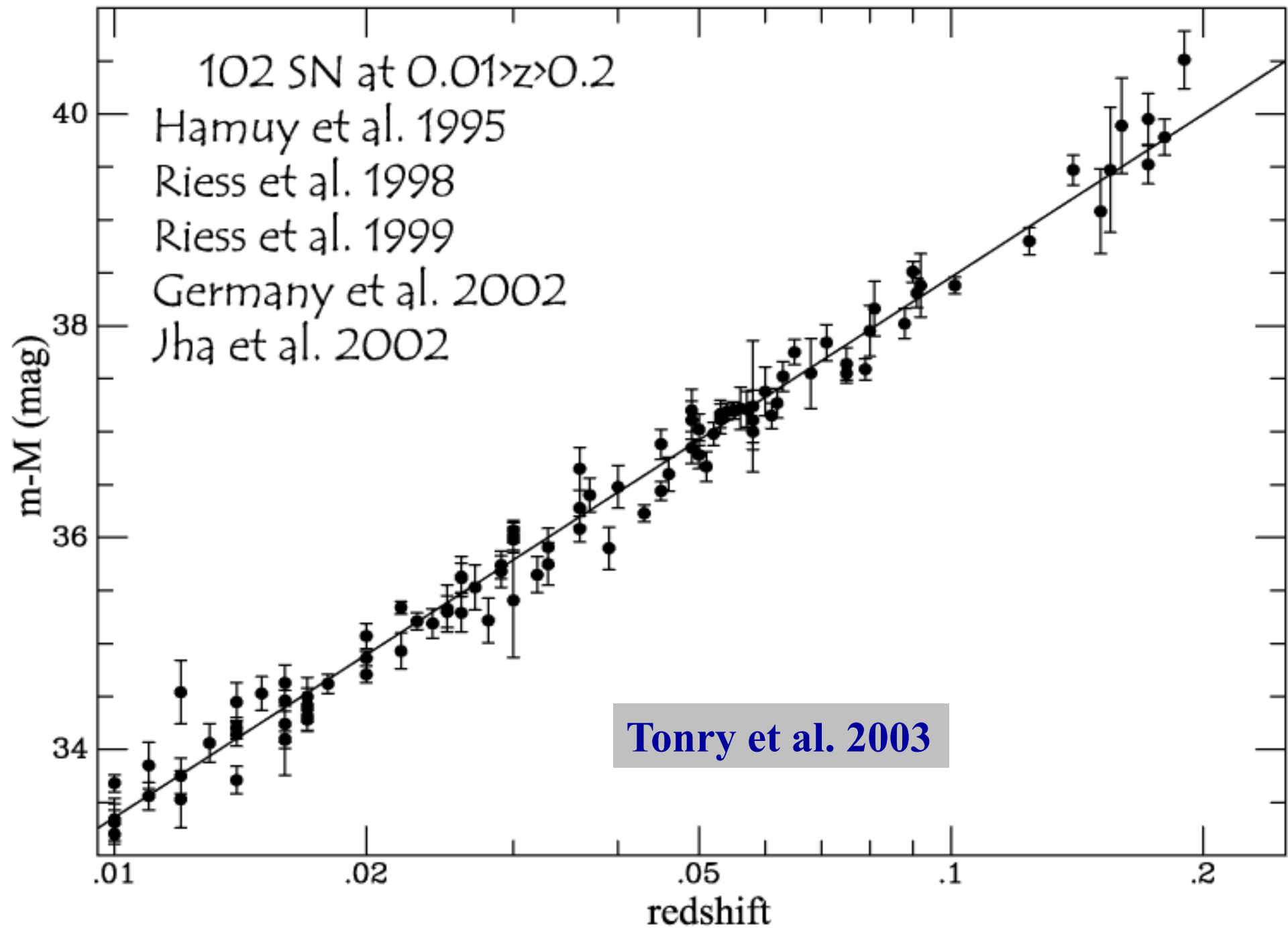


Evidenz für gute
Entfernungen

Germany et al. 2004

Entfernungsmessung mittels einer Lichtbirne





Der Energieinhalt dominiert das entfernte Universum

Die Expansionsgeschichte wird vom Energieinhalt des Universums bestimmt. Materie, wegen $E=mc^2$, ist auch Energie und aufgrund der anziehenden Gravitation müsste sich die Expansion mit der Zeit verlangsamen. Dies ist in den **Einsteinschen Feldgleichungen** kodiert.



WALL TO WALL
ALL BENEFIT
FOR WORLD
CUP
LHO, M... 2003

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

A. EINSTEIN

INDAM
VOLF

ERWIN S. ALBA

Fundamente der Kosmologie

Gravitationstheorie

Einsteinsche Relativitätstheorie

Isotropie

Es gibt keine bevorzugte Richtung im Universum

Homogenität

Es gibt keine bevorzugte Region

(e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)

Anthropisches Prinzip

Das Universum hat uns erzeugt

Friedmann-Lemaître Kosmologie

Annahme:

ein homogenes und isotropes Universum

Nullgeodesie in der Friedmann-Robertson-Walker Metrik:

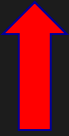
$$D_L = \frac{(1+z)c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} \mathcal{S} \left\{ \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \left[\Omega_k (1+z')^2 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} dz' \right\}$$

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M$$

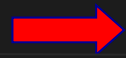
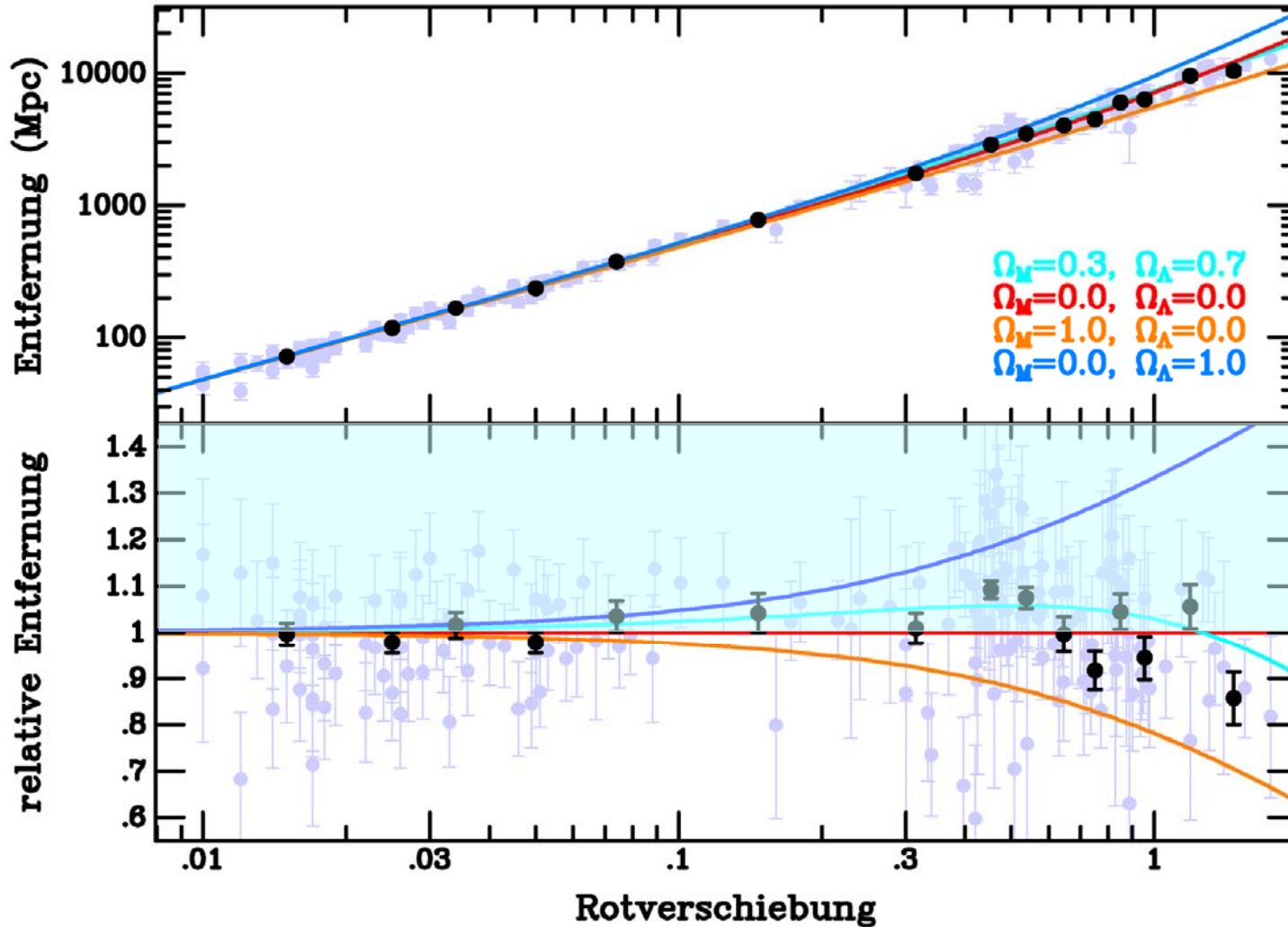
$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

Entfernung

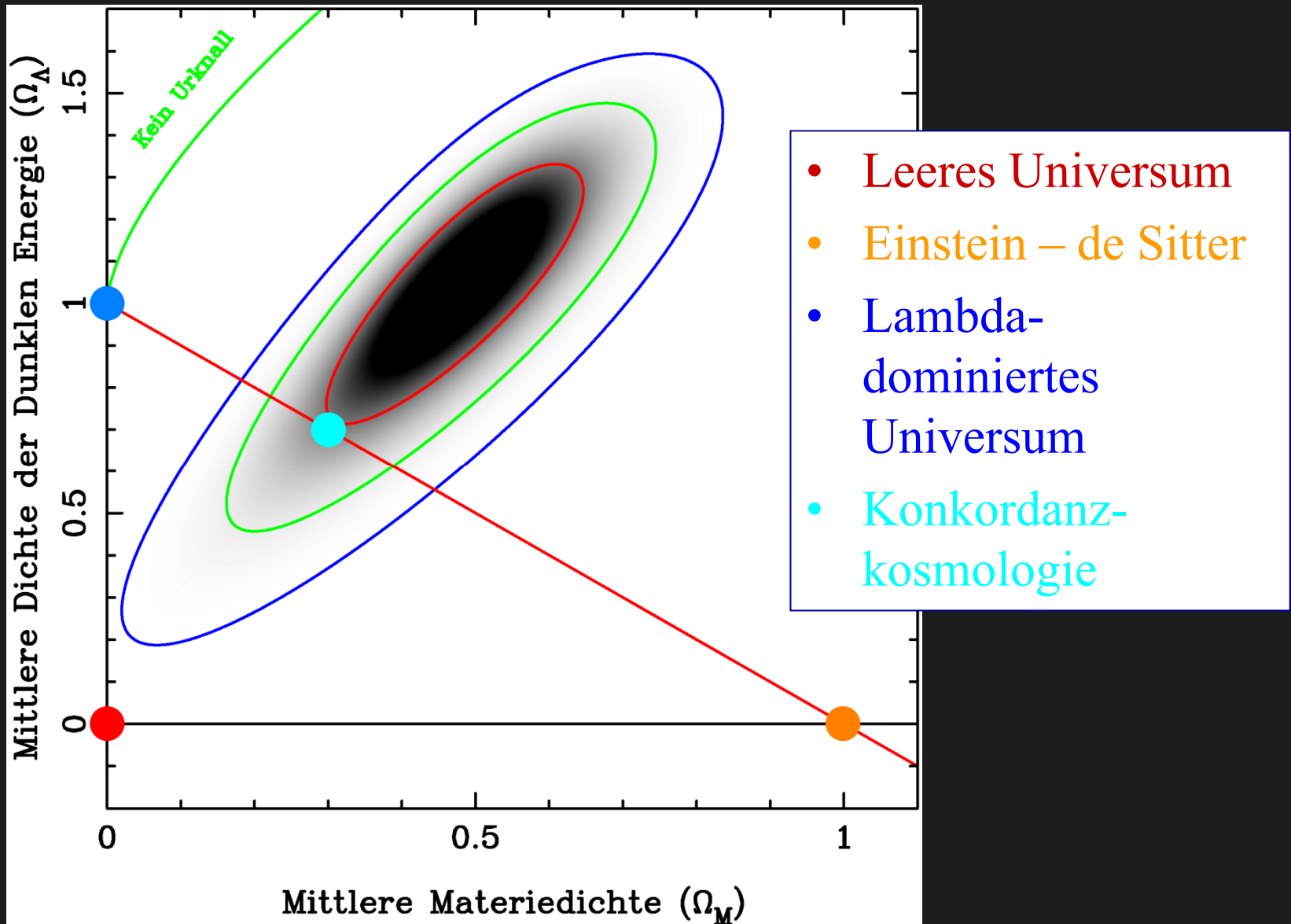


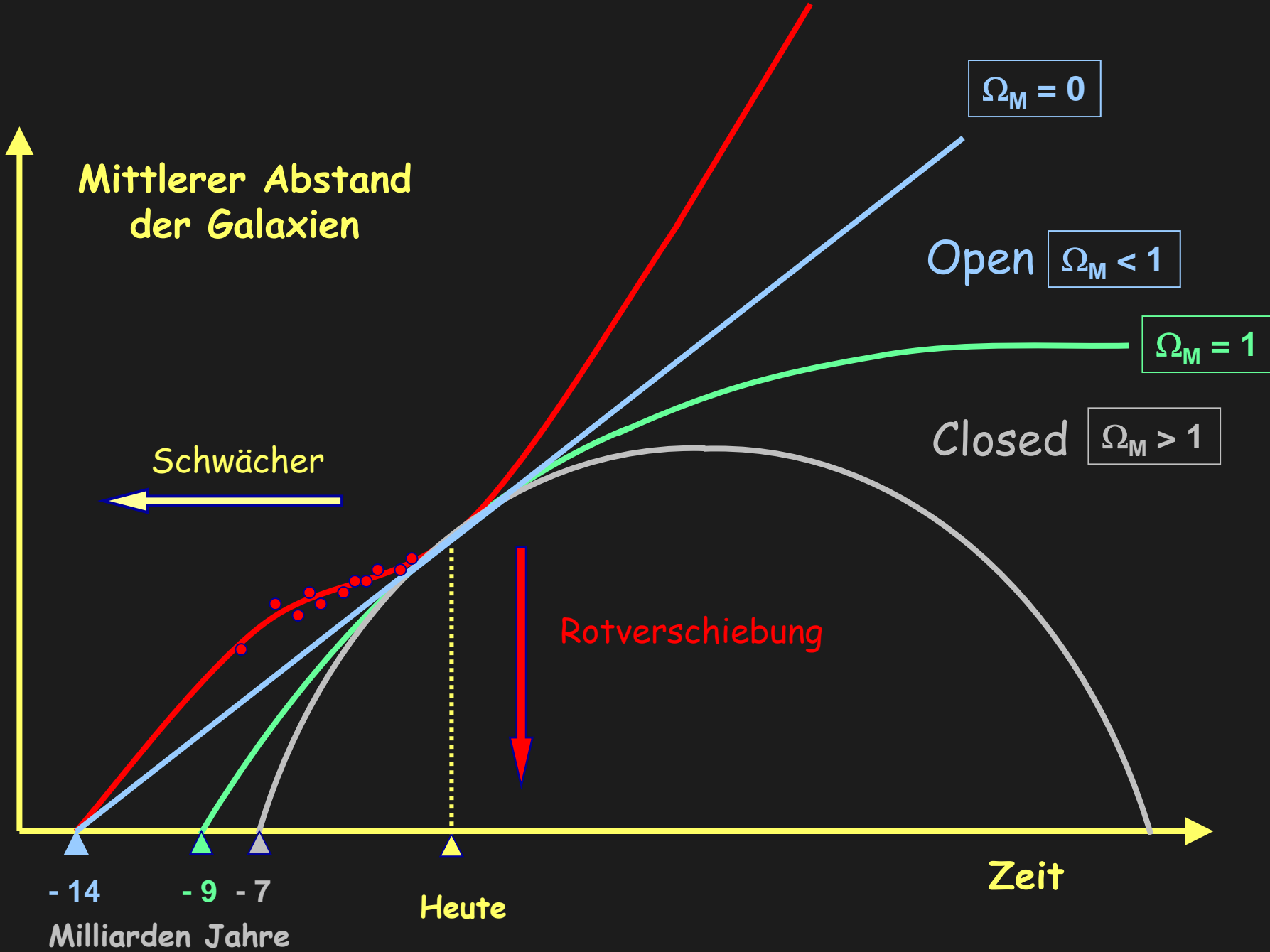
Das vollständige Hubble Diagramm



“Geschwindigkeit”

Kosmologische Implikation





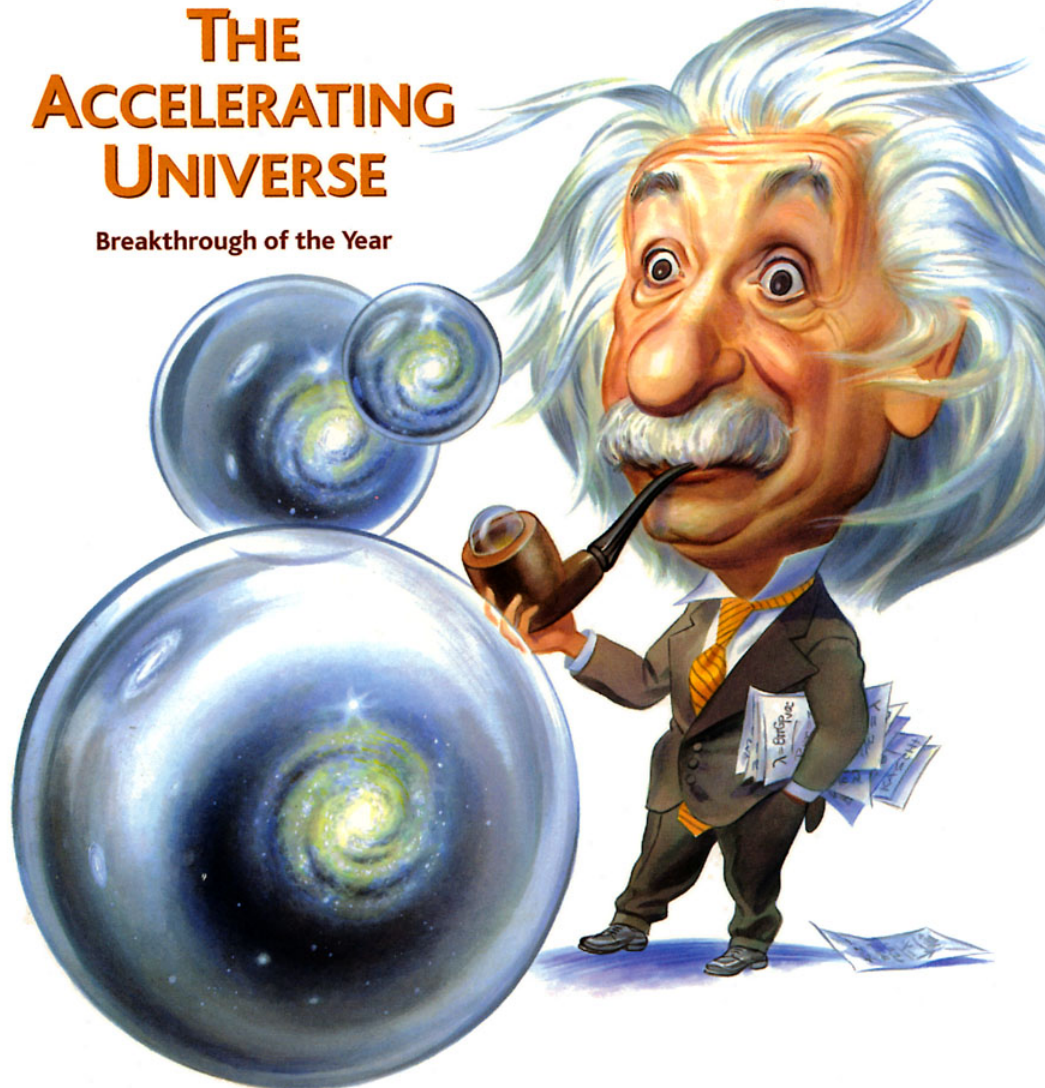
Science

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

Entfernt
als in ein
ungebre
durch e
werden.

fernt
nur
zeugt

Einstein zur Kosmologischen Konstante

Wir geben hierfür zunächst einen Weg an, der an sich nicht beansprucht, ernst genommen zu werden; er dient nur dazu, das Folgende besser hervortreten zu lassen.

Im folgenden führe ich den Leser auf dem von mir selbst zurückgelegten, etwas indirekten und holperigen Wege, weil ich nur so hoffen kann, daß er dem Endergebnis Interesse entgegenbringe. Ich komme nämlich zu der Meinung, daß die von mir bisher vertretenen

[Die Kosmologische Konstante] haben wir nur nötig, um eine quasi-statische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sterngeschwindigkeiten entspricht.

zeitlich und örtlich variabel, läßt sich aber im großen durch einen sphärischen Raum approximieren. Jedenfalls ist diese Auffassung logisch widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mußten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen.

Einstein (1917)

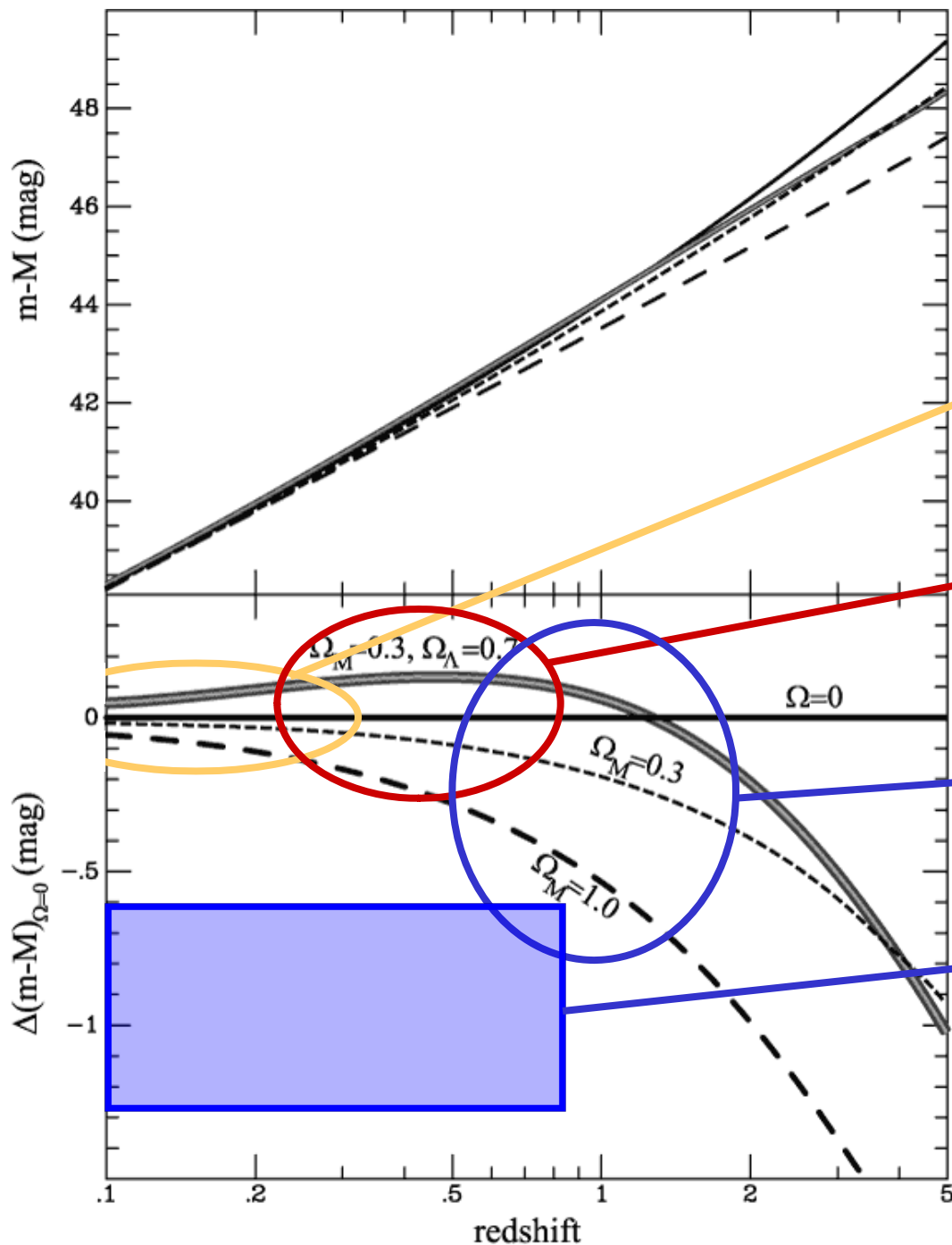
Vier wichtige Rotverschiebungsbereiche

- $z < 0.05$
 - Bestimmung der Characteristica der Type Ia Supernovae
 - Verständnis der Explosionen und des Strahlungstransportes
 - Messung der Hubble Konstante H_0
- $z < 0.3$
 - Untersuchung der Systematik der SNe Ia
 - Eichung als Entfernungsmessung

Vier wichtige Rotverschiebungsbereiche

- $0.2 < z < 0.8$
 - Messung der kosmischen Beschleunigung (Dunkle Energie)
- $z > 0.8$
 - Aufheben der Degeneration
 - Messung der Materiedichte (Dunkle Materie)
- Alle Rotverschiebungen
 - Messung der Details der Dunklen Energie

Supernova Projekte



SN Factory
Carnegie SN Project
SDSSII

ESSENCE
CFHT Legacy Survey

Higher-z SN Search
(GOODS)

Euclid/LSST

Plus lokale Projekte:
LOSS, CfA, ESC

Der Zustandsgleichungsparameter ω

- Leuchtkraftentfernung

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

$$\text{mit } \Omega_K = 1 - \sum_i \Omega_i \text{ und } \omega = \frac{p_i}{\rho_i c^2}$$

$$\omega_M = 0 \text{ (Materie)}$$

$$\omega_R = 1/3 \text{ (Strahlung)}$$

$$\omega_\Lambda = -1 \text{ (Kosmologische Konstante)}$$

ESSENCE

Weltweite Zusammenarbeit um
Typ Ia Supernovae im
Rotverschiebungsbereich
 $0.2 < z < 0.8$ zu finden und zu
charakterisieren

Suche mit dem CTIO 4m
Blanco Teleskop

Spektroskopie with VLT,
Gemini, Keck, Magellan

Ziel: Entfernungsmessung zu
200 SNe Ia mit einer

Unsicherheit von weniger
als 5%

→ Bestimmung von ω zu
besser als 10%



Das ESSENCE Team



SNLS – The SuperNova Legacy Survey

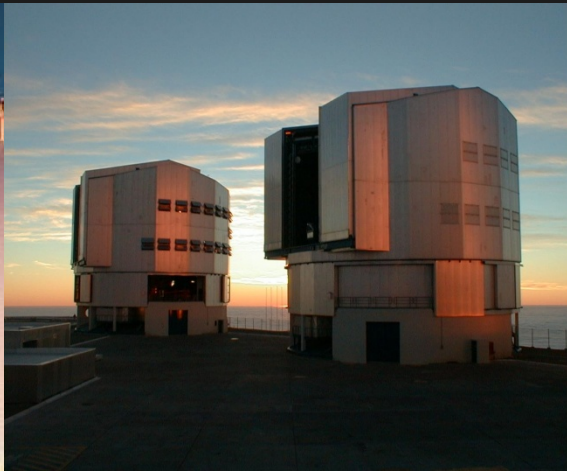
Weltweite Zusammenarbeit
um Typ Ia Supernovae im
Rotverschiebungsbereich
 $0.2 < z < 0.8$ zu finden und zu
charakterisieren

Suche mit dem CFHT 4m
Teleskop

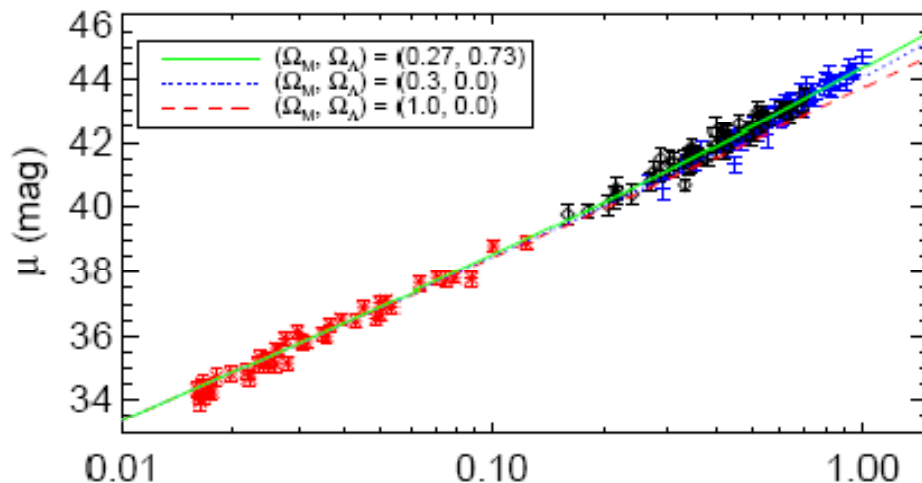
Spektroskopie mit VLT,
Gemini, Keck, Magellan

Ziel: Entfernungsmessung zu
500 SNe Ia mit einer
Unsicherheit von weniger
als 5%

→ Bestimmung von ω zu
besser als 7%

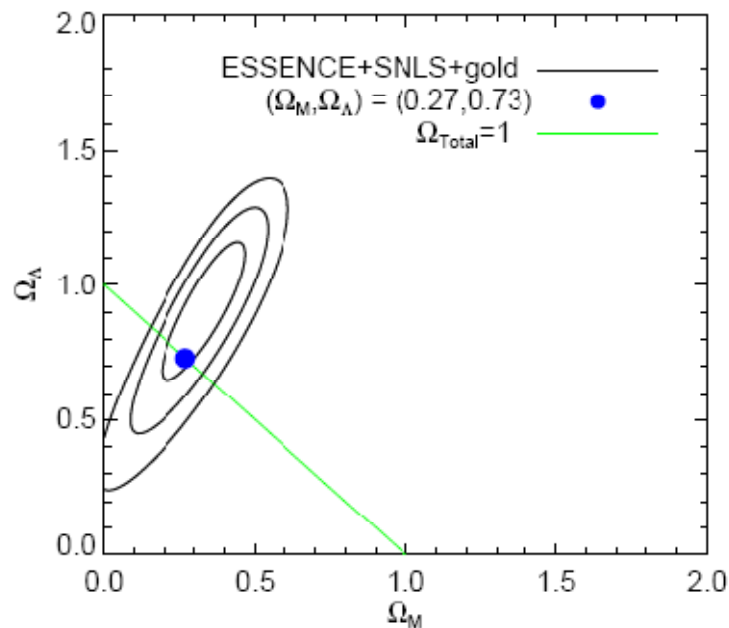
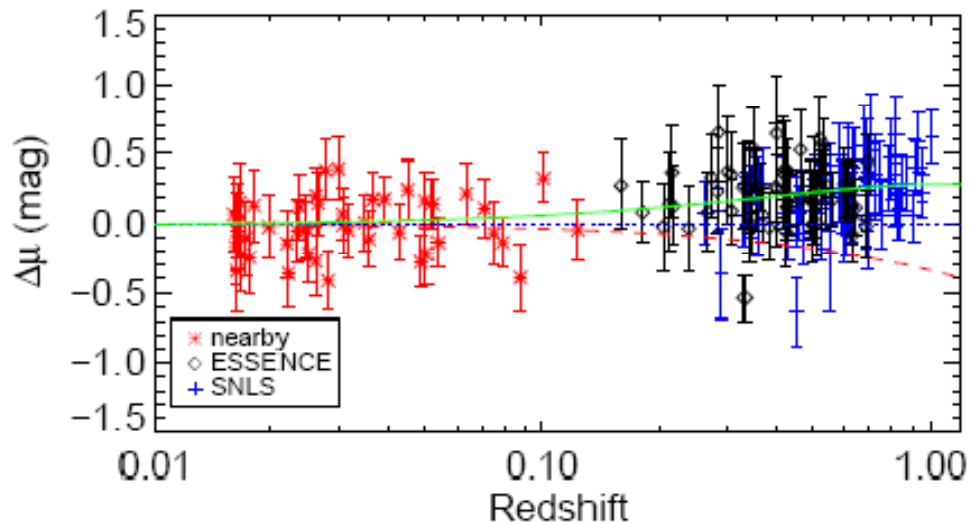


The SN Ia Hubble Diagram



Combination of
ESSENCE, SNLS
and nearby SNe Ia

Wood-Vasey et al. 2007



“Third year” SNLS Hubble Diagram (vorläufig)

~240 distant SNe Ia
rms ~ 0.17mag

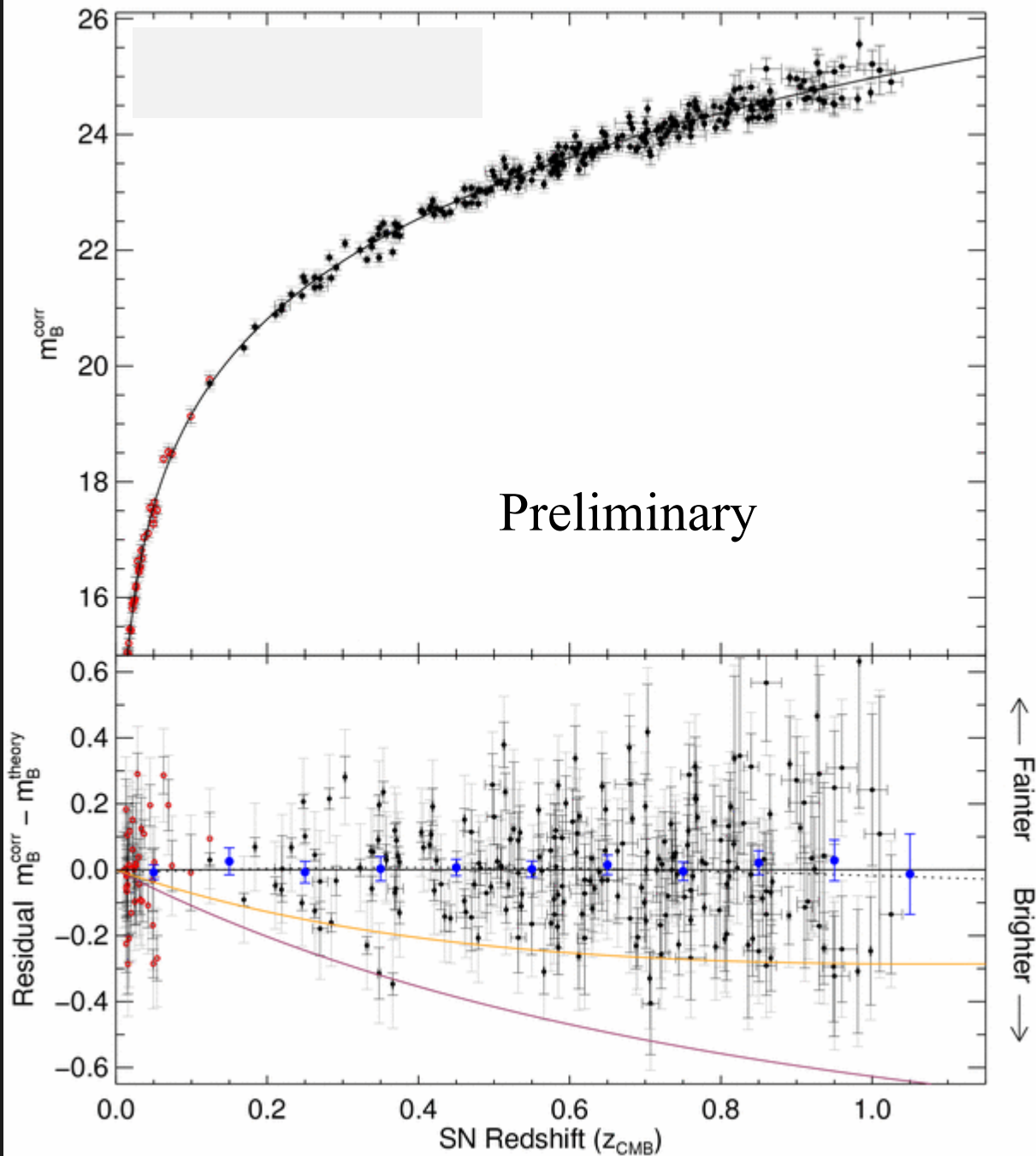


Fig.: M.Sullivan

Erste Kosmologieresultate sind veröffentlicht

- ESSENCE (3 Jahre)
 - Wood-Vasey et al. 2007 – 60 entfernte SNe Ia
 - Miknaitis et al. 2007 – Beschreibung des Experimentes
 - Davis et al. 2007 – Vergleich mit exotischen Modellen der Dunklen Energie
 - Spektroskopie (Matheson et al. 2005, Blondin et al. 2006)
- Resulte
 - 60 entfernte SNe Ia
 - plus 45 nahe SNe Ia, plus 57 SNe Ia von SNLS erstes Jahr
 - flache Geometrie und Kombination mit BAO

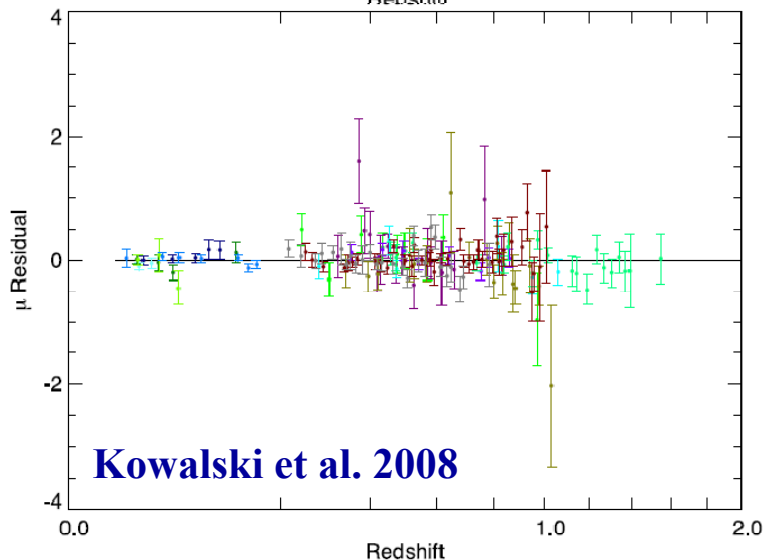
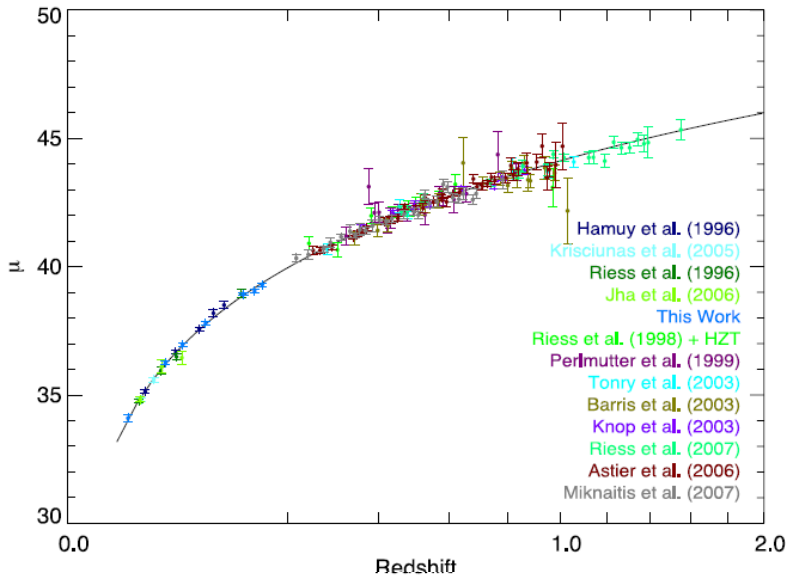
$$w = -1.07 \pm 0.09 \text{ (stat)} \pm 0.13 \text{ (sys)}$$

$$\Omega_M = 0.27 \pm 0.03$$

Die bis jetzt vollständigste Stichprobe (Riess et al. 2007)

- Zusammenfassung aller vorhandenen entfernten SNe Ia
 - Riess et al. (2004)
 - Astier et al. (2006)
 - Wood-Vasey et al. (2007)
- → 23 SNe Ia bei $z > 1$
- → insgesamt **182** SNe Ia mit $z > 0.0233$
($v = 7000$ km/s)
untere Entfernungslimite um lokale Effekte zu
minimisieren

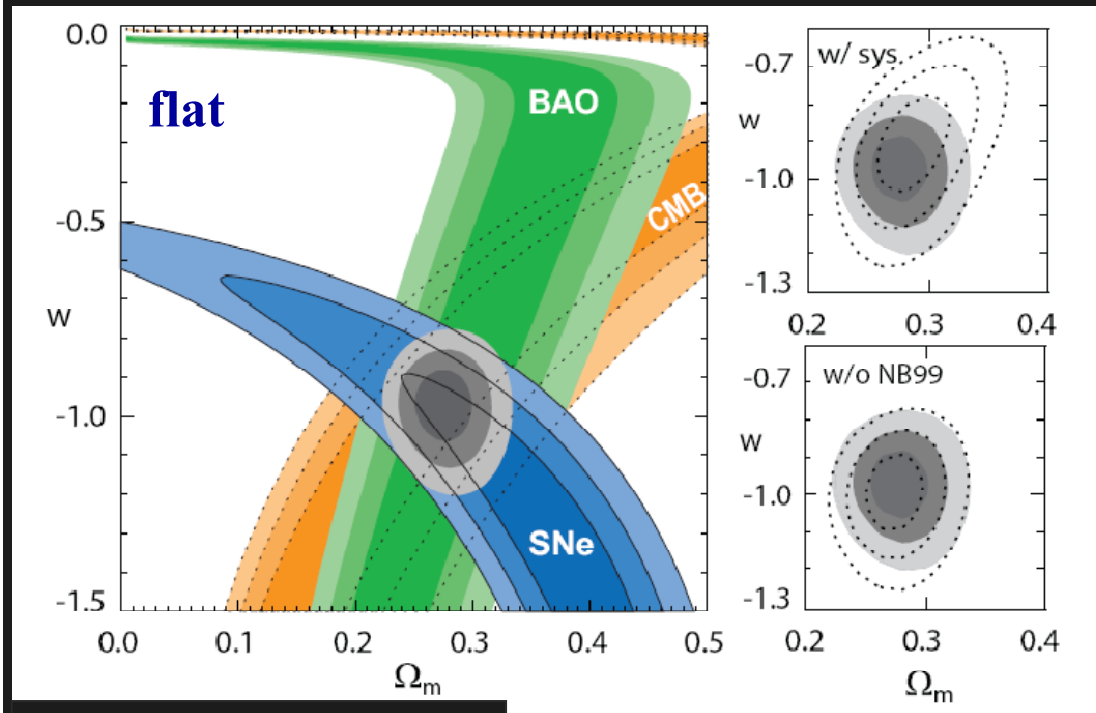
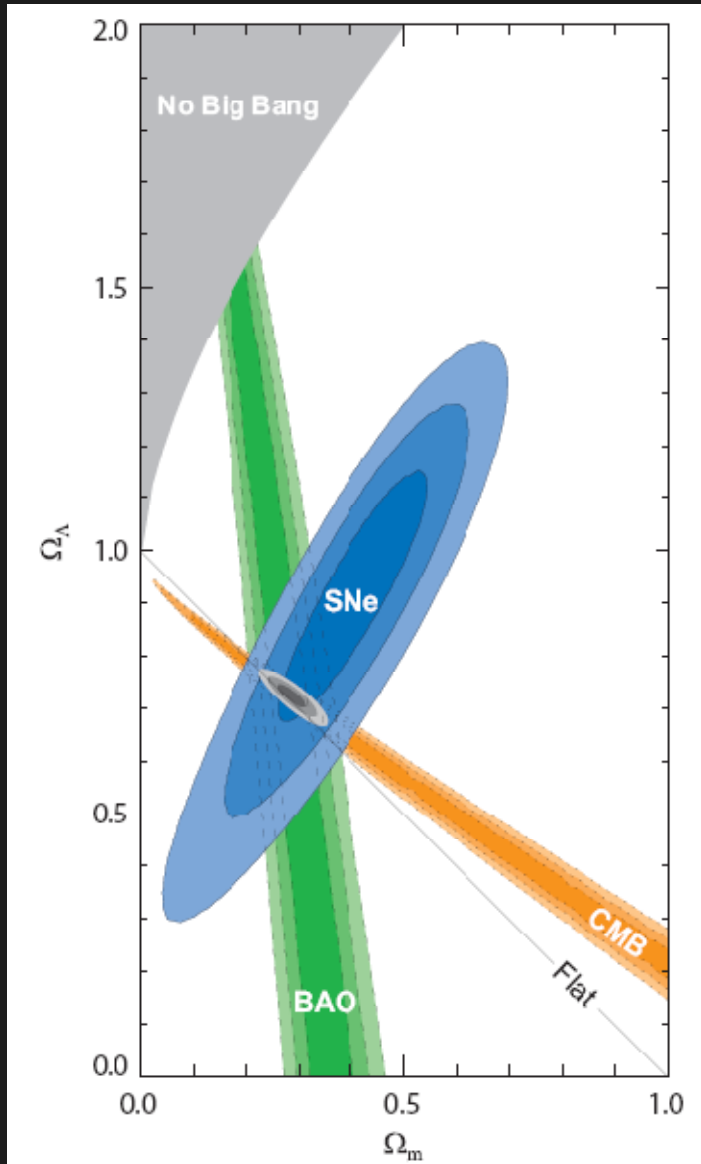
Das SN Hubble Diagram



- 13 verschiedene Datenquellen
 - gleichförmige Lichtkurven Abgleiche
 - einheitliche kosmologische Analyse

Kosmologie

- Keine Veränderungen im Vergleich zu früheren Daten und Analysen



Kowalski et al. 2008

Resultierende Kosmologie

- SNe Ia kombiniert mit BAO und CMB und mit der Annahme einer flachen Geometrie

$$\Omega_M = 0.274 \pm 0.016 \text{ (stat)} \pm 0.012 \text{ (sys)}$$

$$w = -0.969 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.07 \text{ (sys)}$$

- SNe Ia kombiniert mit BAO und CMB

$$\Omega_M = 0.285 \pm 0.020 \text{ (stat)} \pm 0.010 \text{ (sys)}$$

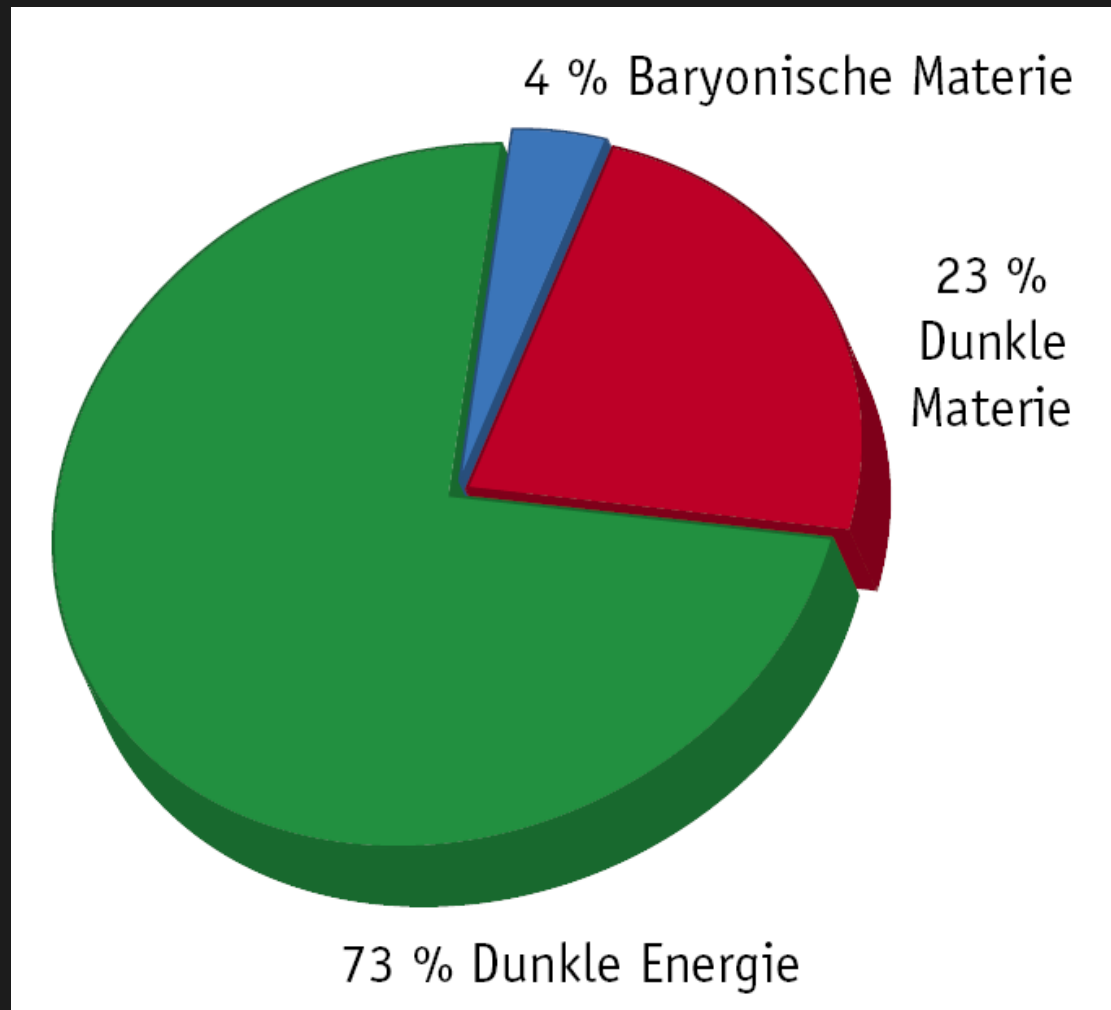
$$\Omega_K = -0.010 \pm 0.010 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (sys)}$$

$$w = -1.001 \pm 0.07 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (sys)}$$

Der Inhalt des Universums

Dunkle Materie und Dunkle Energie sind die bestimmenden Energiebeiträge des Universums.

Was sind sie?



Was bedeutet das? (3)

Das Universum besteht im wesentlichen aus
nichts.

Das Universum expandiert für immer.

Im Moment existiert keine überzeugende
physikalische Interpretation der
Vakuumsenergie (**Dunkle Energie**).

Das Alter des Universums ist jetzt grösser als
dasjenige der ältesten Sterne.

Interpretationen/Spekulationen

Einstein's Kosmologische Konstante

Bisher kein "Platz" im Standard Model der Teilchenphysik

Quintessence

Quantenmechanisches Teilchenfeld, das Energie in das Universum entlässt

Anzeichen einer höheren Dimension

Gravitation ist am besten beschrieben in einer Theorie mit mehr als vier Dimensionen

Phantom Energie

Die Dunkle Energie ist so stark, dass das Universum auseinander fällt (**Big Rip**)

Zusammenfassung

95% der Energie im Universum unverstanden

Materie wie wir sie kennen ist nur Verzierung

Vergangene Entwicklung des Universums
erklärbar

**Dynamisches Alter des Universums grösser als die
ältesten bekannten Objekte**

Neue Zweifel ...

Wie konstant sind die Naturkonstanten?

G , α , h , c