

Supernovae und Kosmologie

Bruno Leibundgut
European Southern Observatory

Übersicht

Supernovae

- Supernova Typen
 - Supernovae von Massiven Sternen
 - Thermonukleare Supernovae

Supernova Kosmologie

- Hubble Konstante
- Zeitdilatation
- Expansionsgeschichte

Historische Supernovae

SN 1006 (in Lupus)

SN 1054 (Krebs Nebel in Taurus)

SN 1181 (in Cassiopeia)

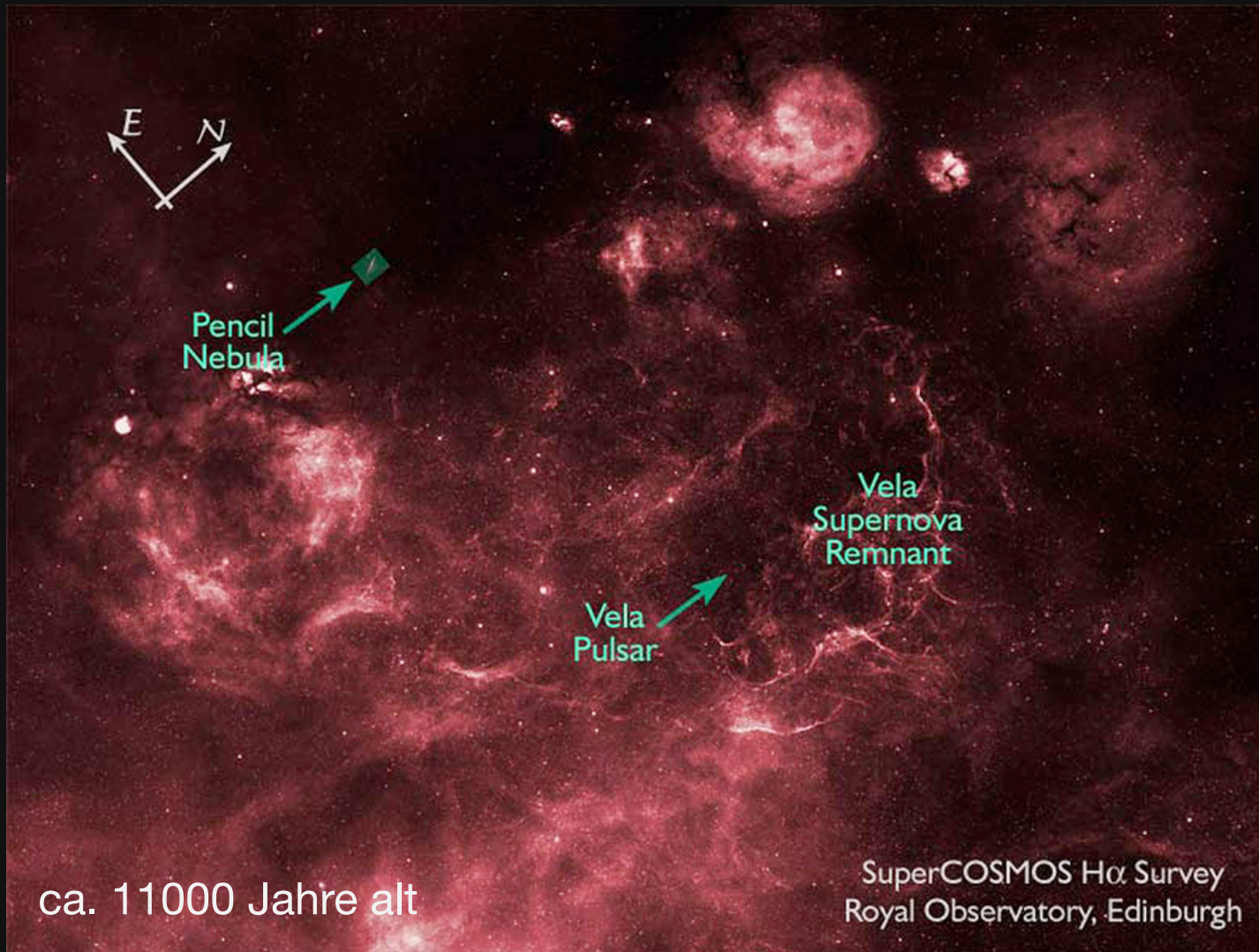
De stella nova (Tycho Brahe) 1572

Keplers Supernova 1604 (in Ophiuchus)

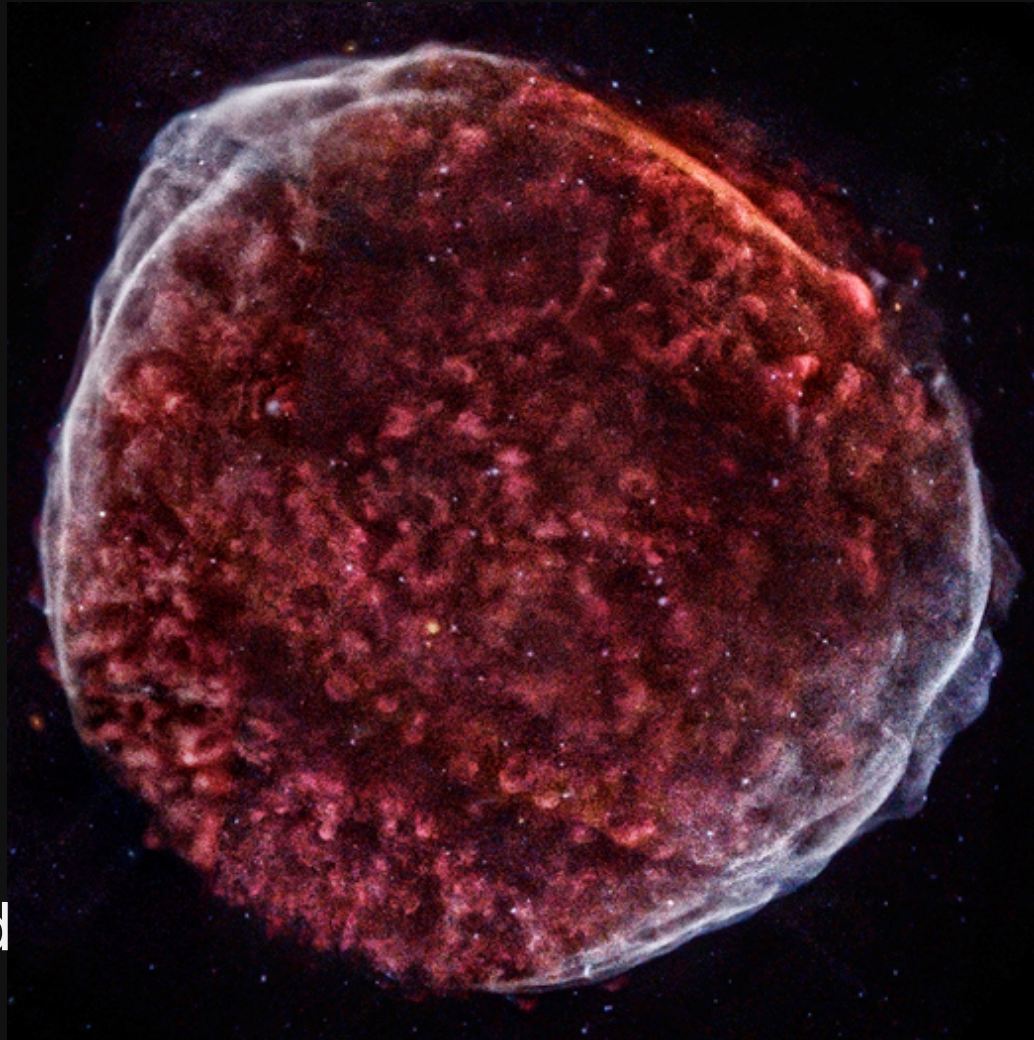
Cassiopeia A (ungefähr 1680)

S Andromeda (SN 1885B)

Vela Supernova Überrest



SN 1006

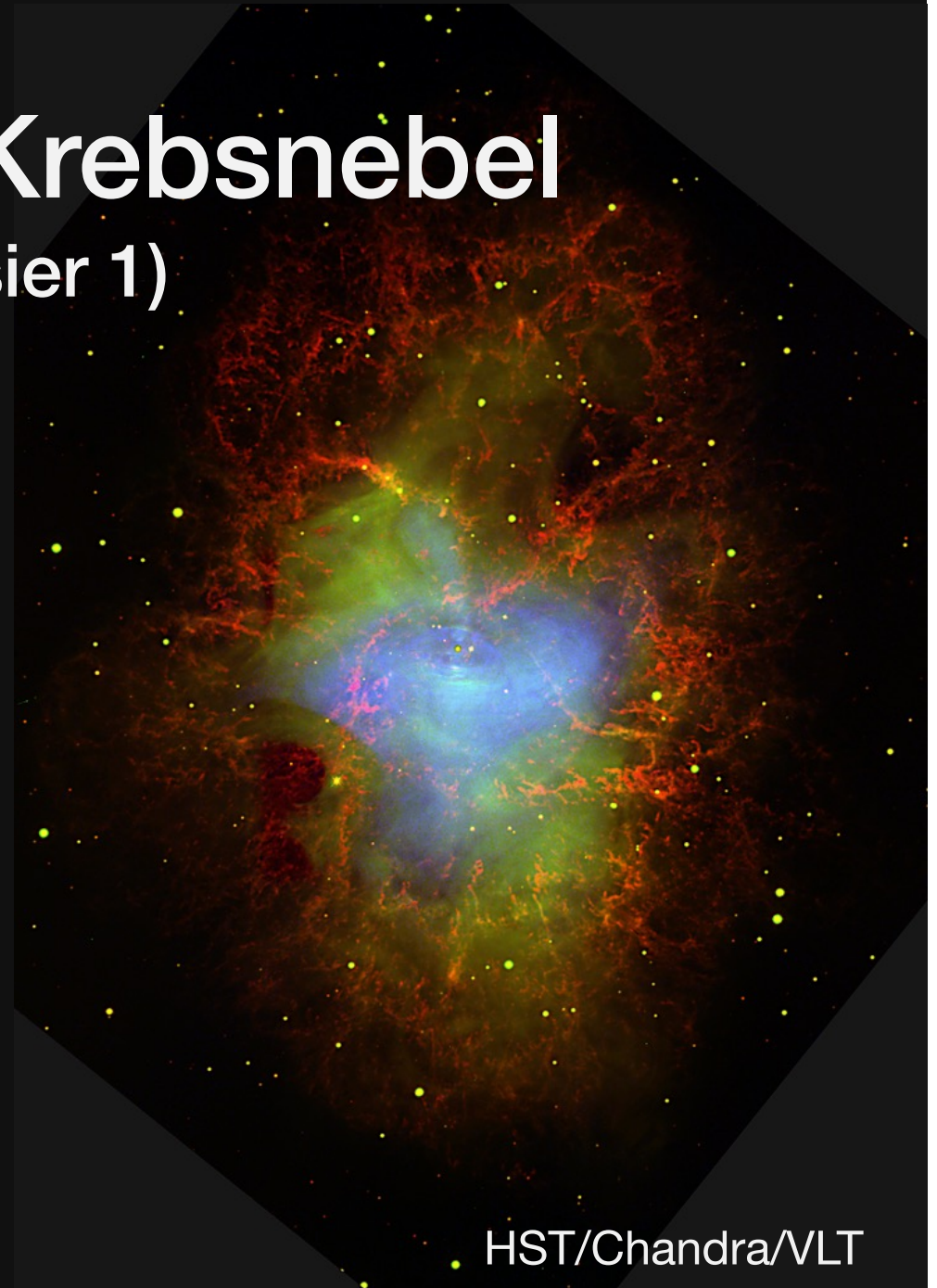


Röntgenbild
NASA/Chandra

SN 1054 - Krebsnebel

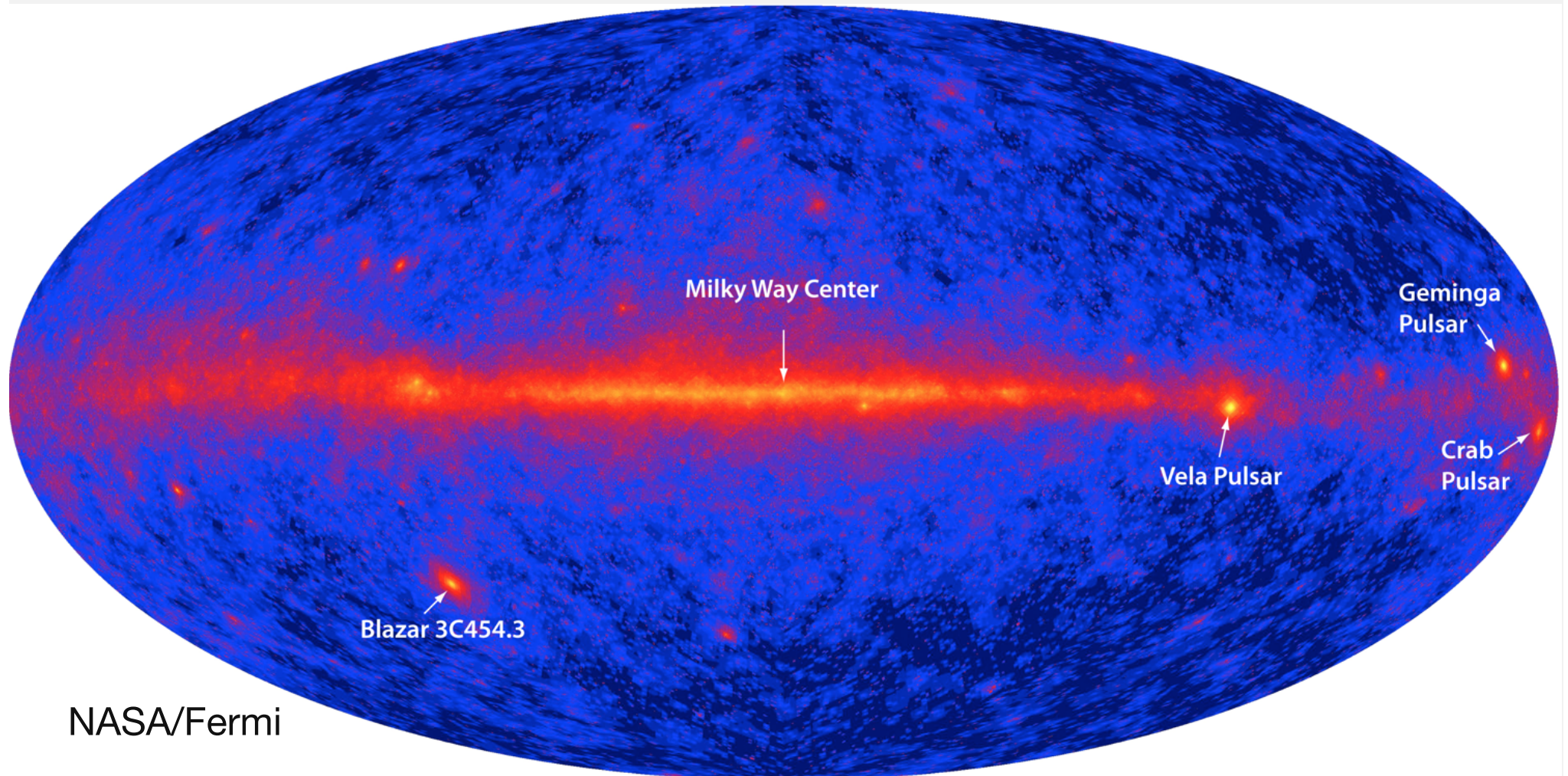
(Messier 1)

- Pulsar
 - Neutronenstern
 - Synchrotronstrahlung (blau)
- Sternüberreste
 - “Sterninneres”
 - Sauerstoff (grün)
 - Wasserstoff (rot)



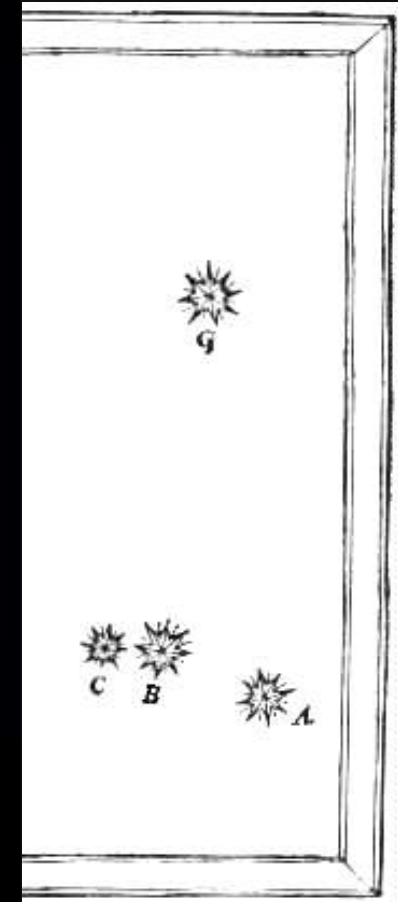
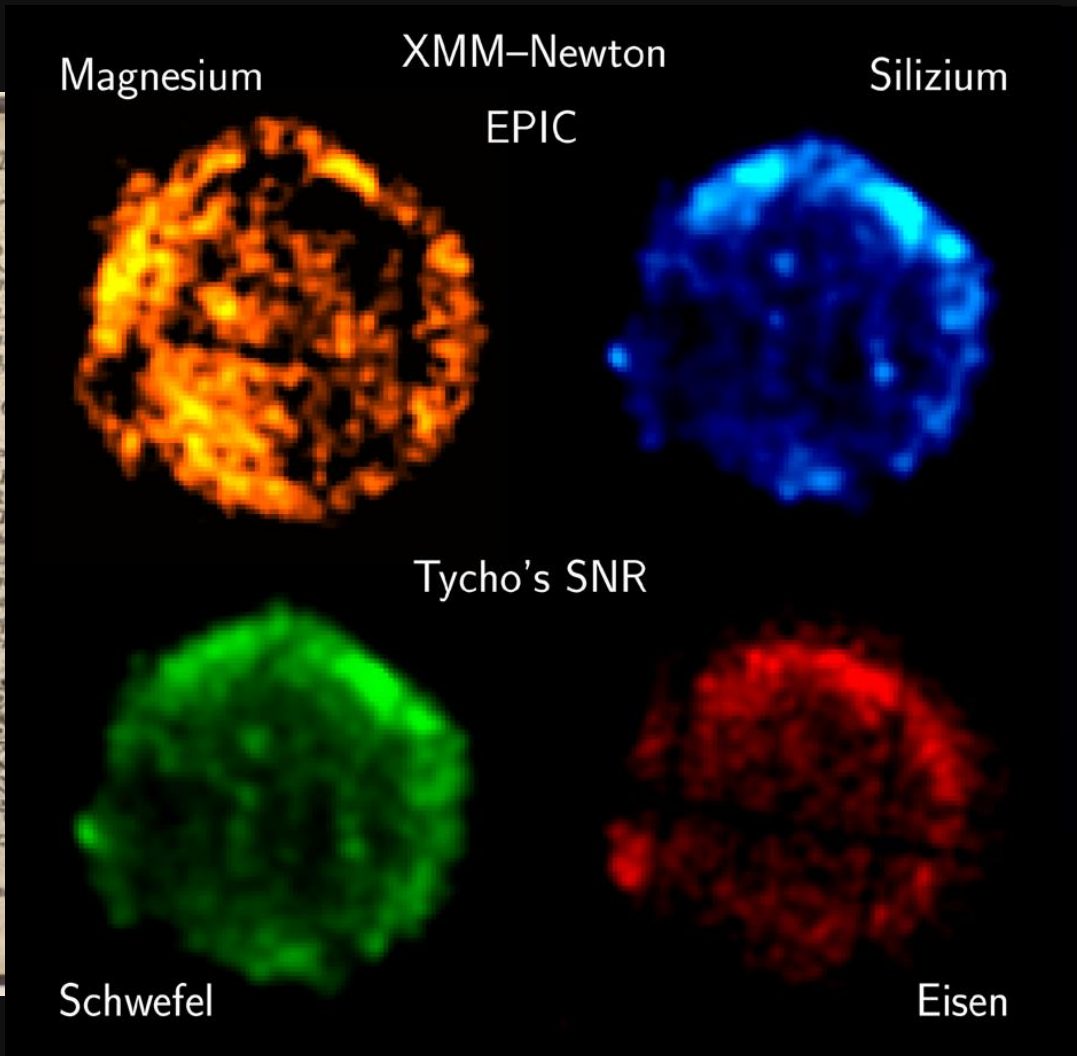
HST/Chandra/VLT

Der Röntgenhimmel

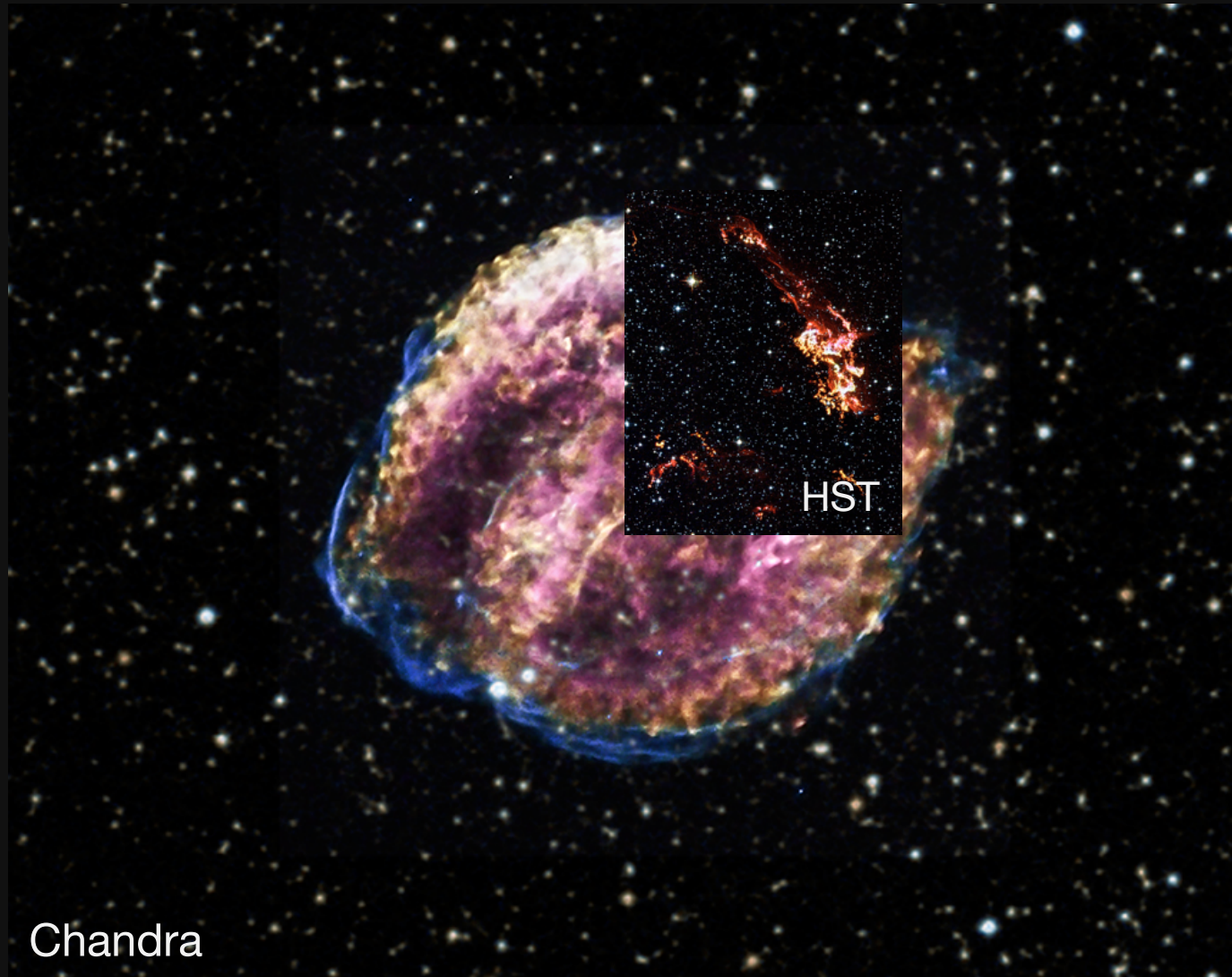


NASA/Fermi

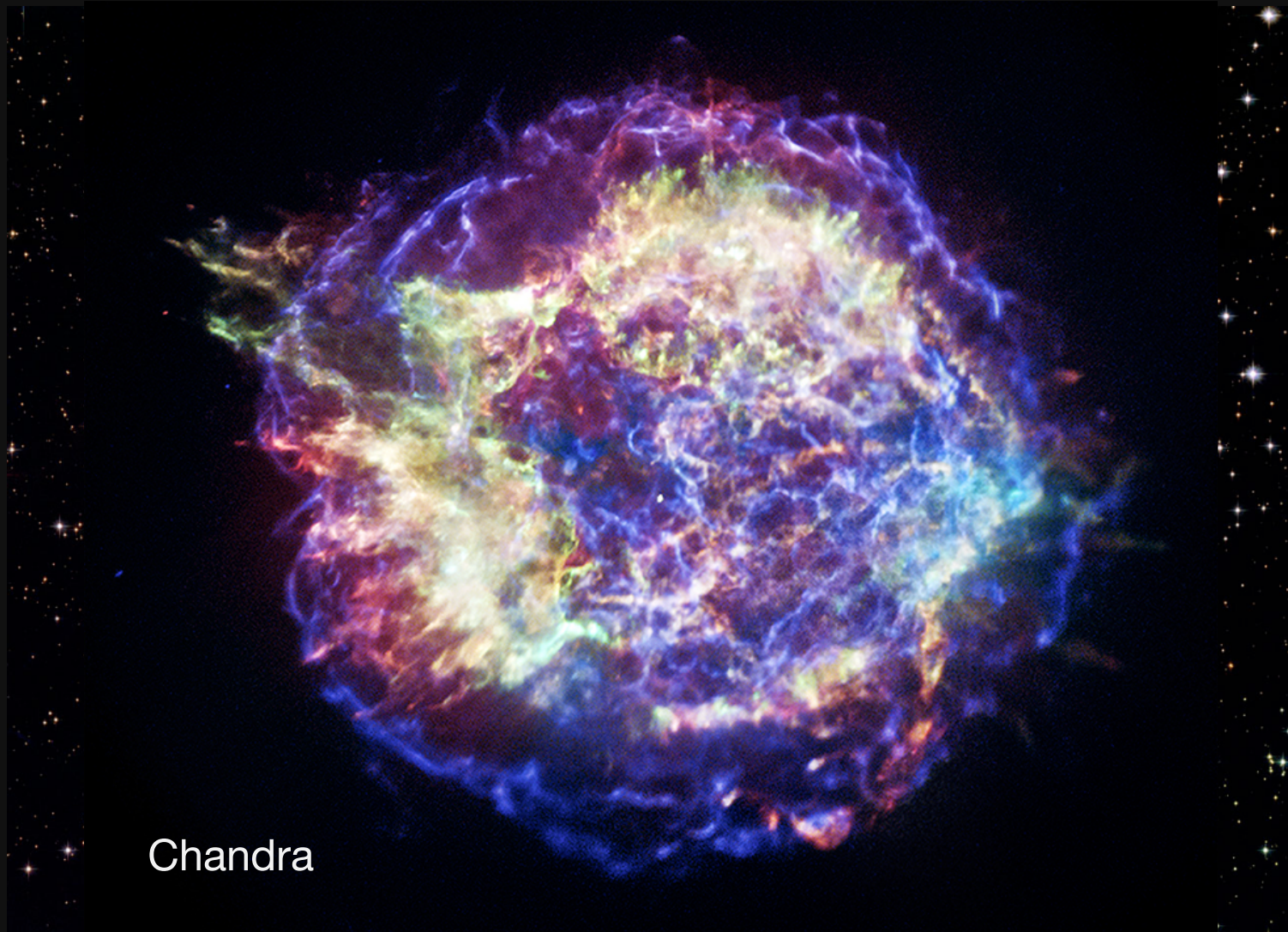
Tycho Brahes SN 1572



Keplers Supernova 1604



Cassiopeia A



30 April 2017

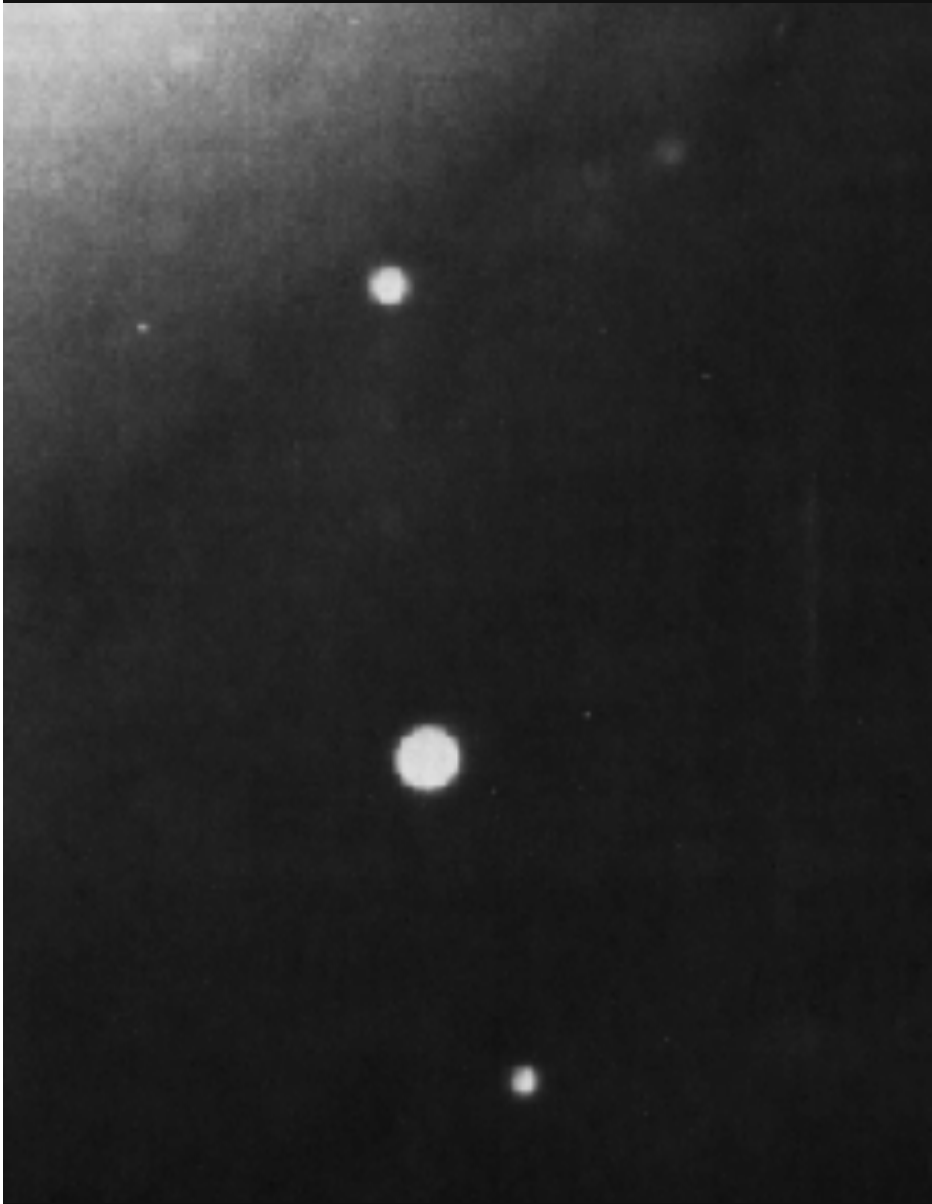
41. Edgar-Lüscher-Seminar



Supernovae

- Extrem helle Sternexplosionen
- Wichtig für die Produktion von schweren chemischen Elementen

SN 1993J



30 April 2017



41. Edgar-Lüscher-Seminar

SN 1994D



Pete Challis/HST

30 April 2017

41. Edgar-Lüscher-Seminar

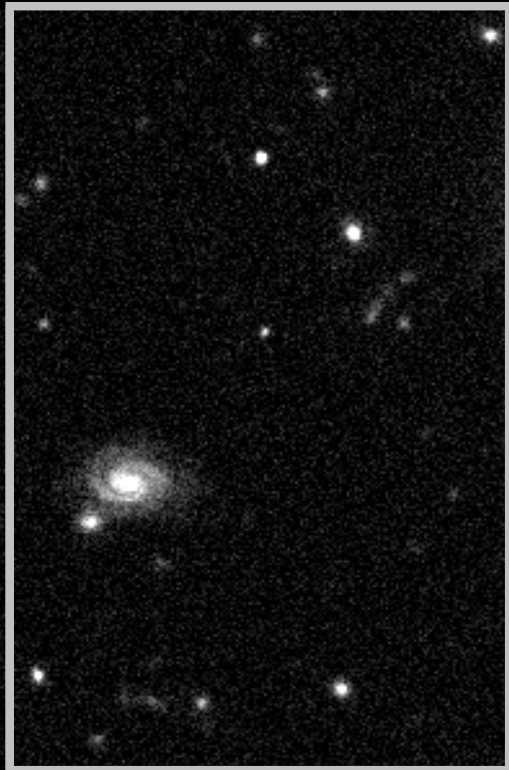
Supernova Search



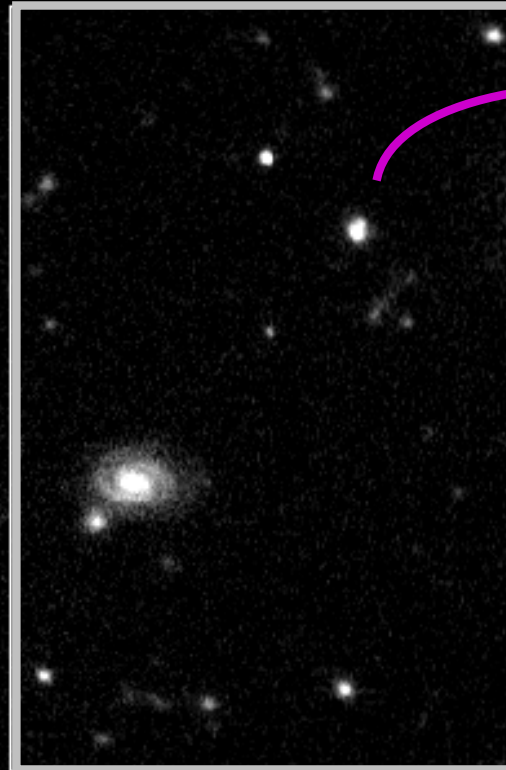
(High-z Supernova Team)

Supernova Suche

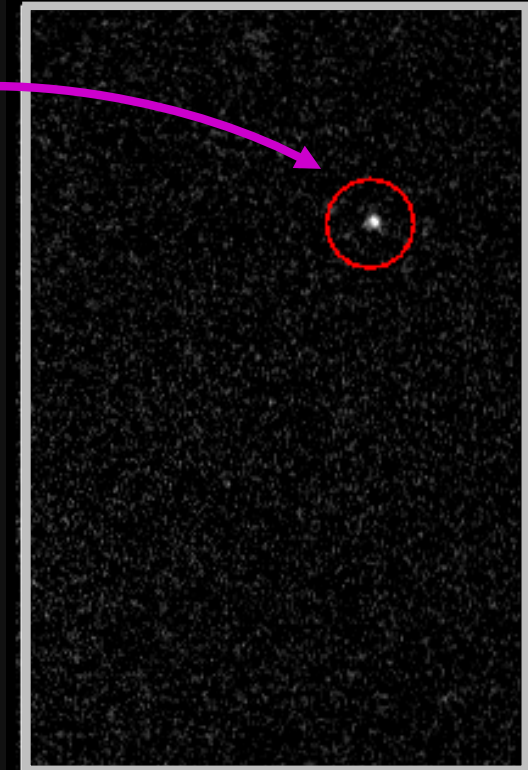
Epoch 1



Epoch 2 (3 weeks later)

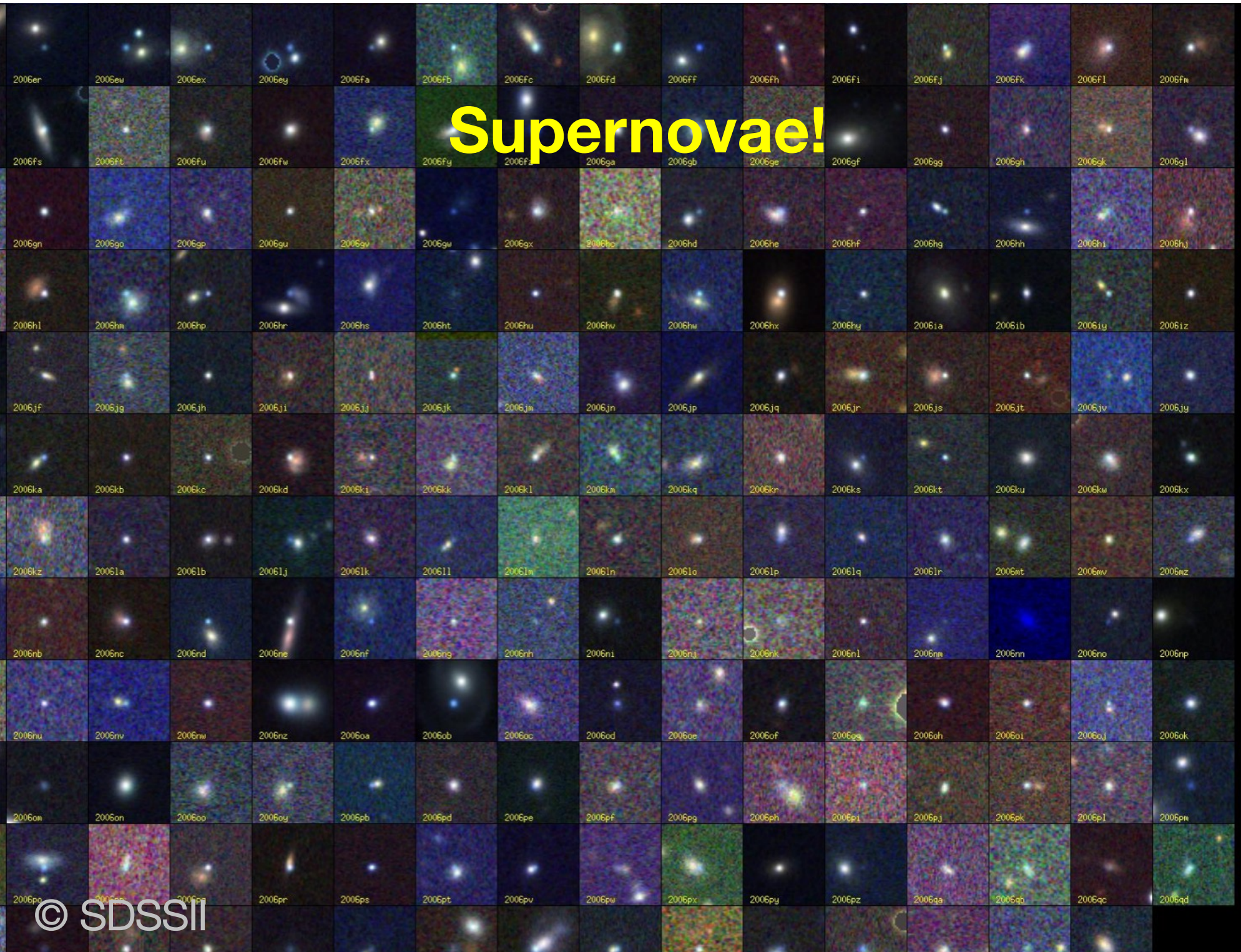


Epoch 2 - Epoch 1

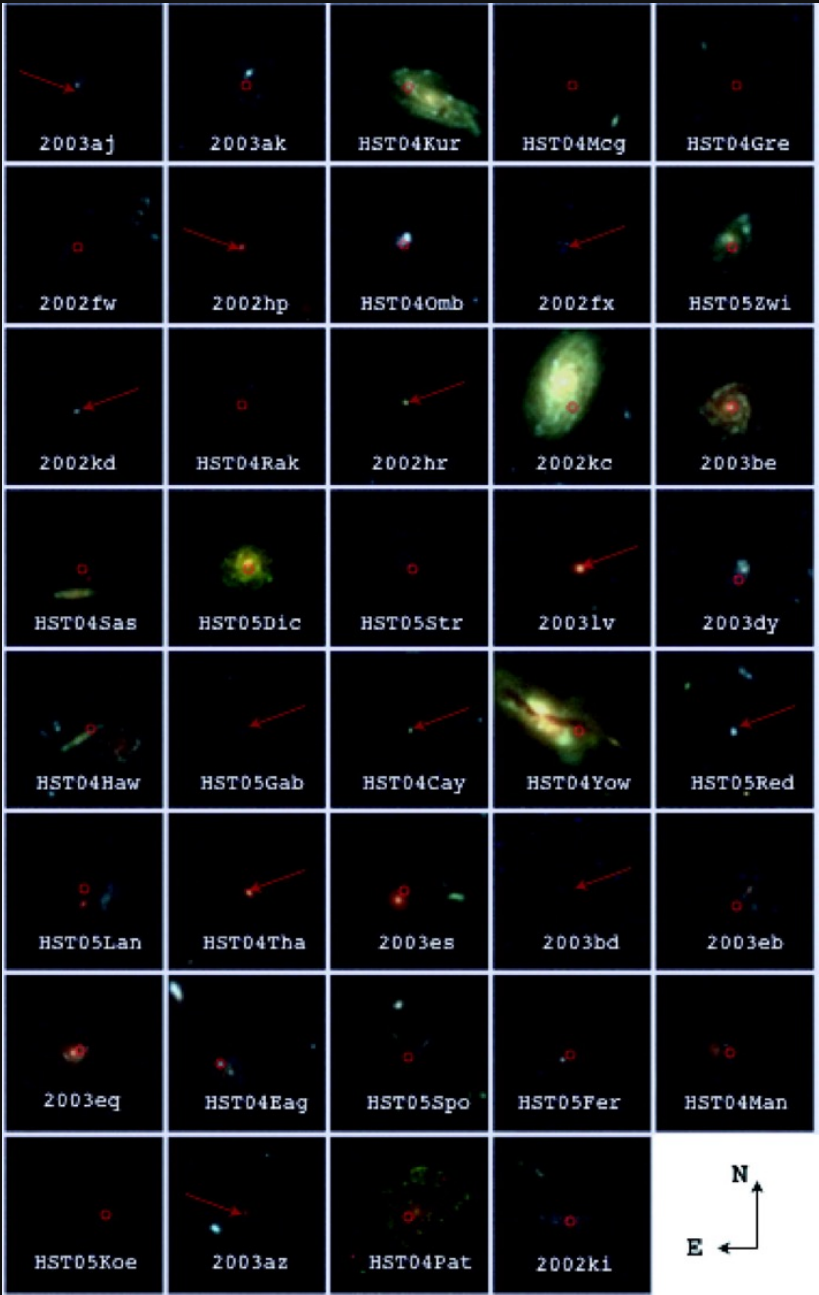


(High-z Supernova Team)

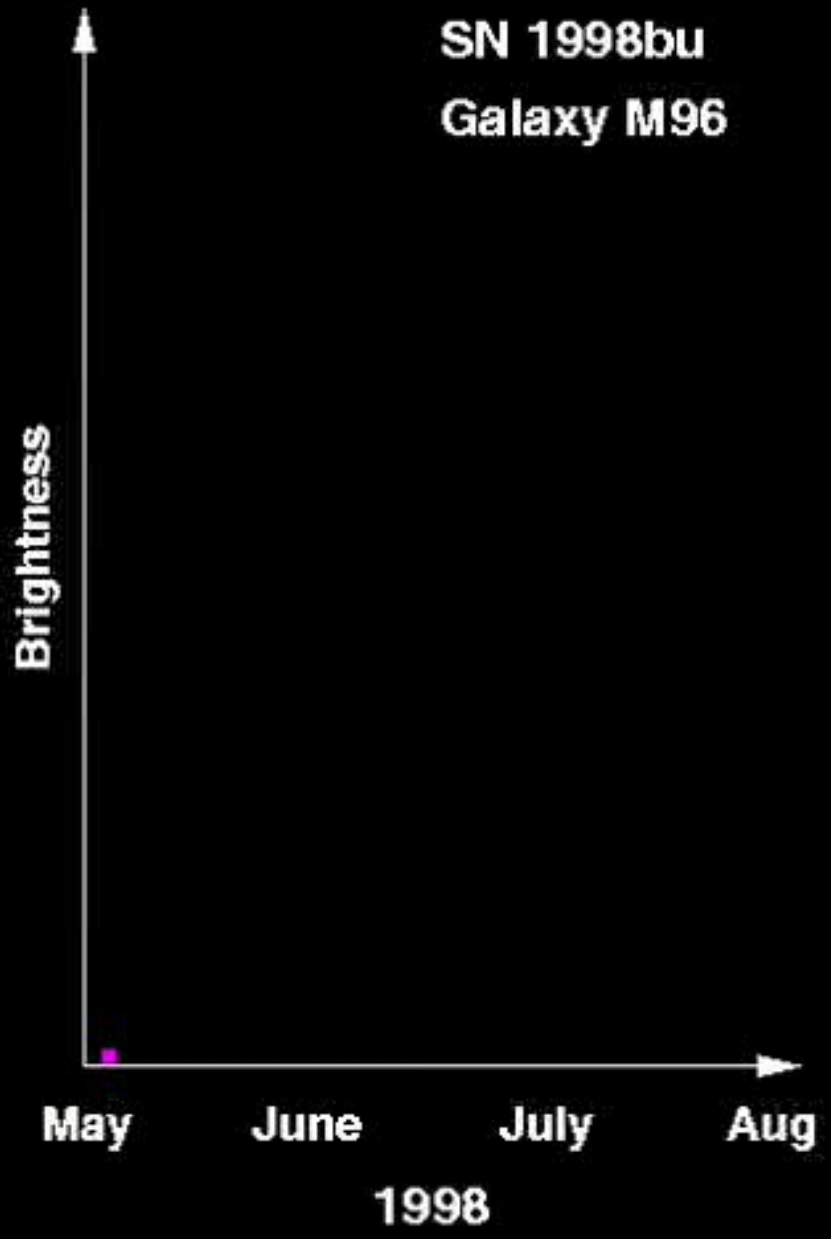
Supernovae!



Supernovae!



Riess et al. 2007



P. Challis/Harvard

Supernovae

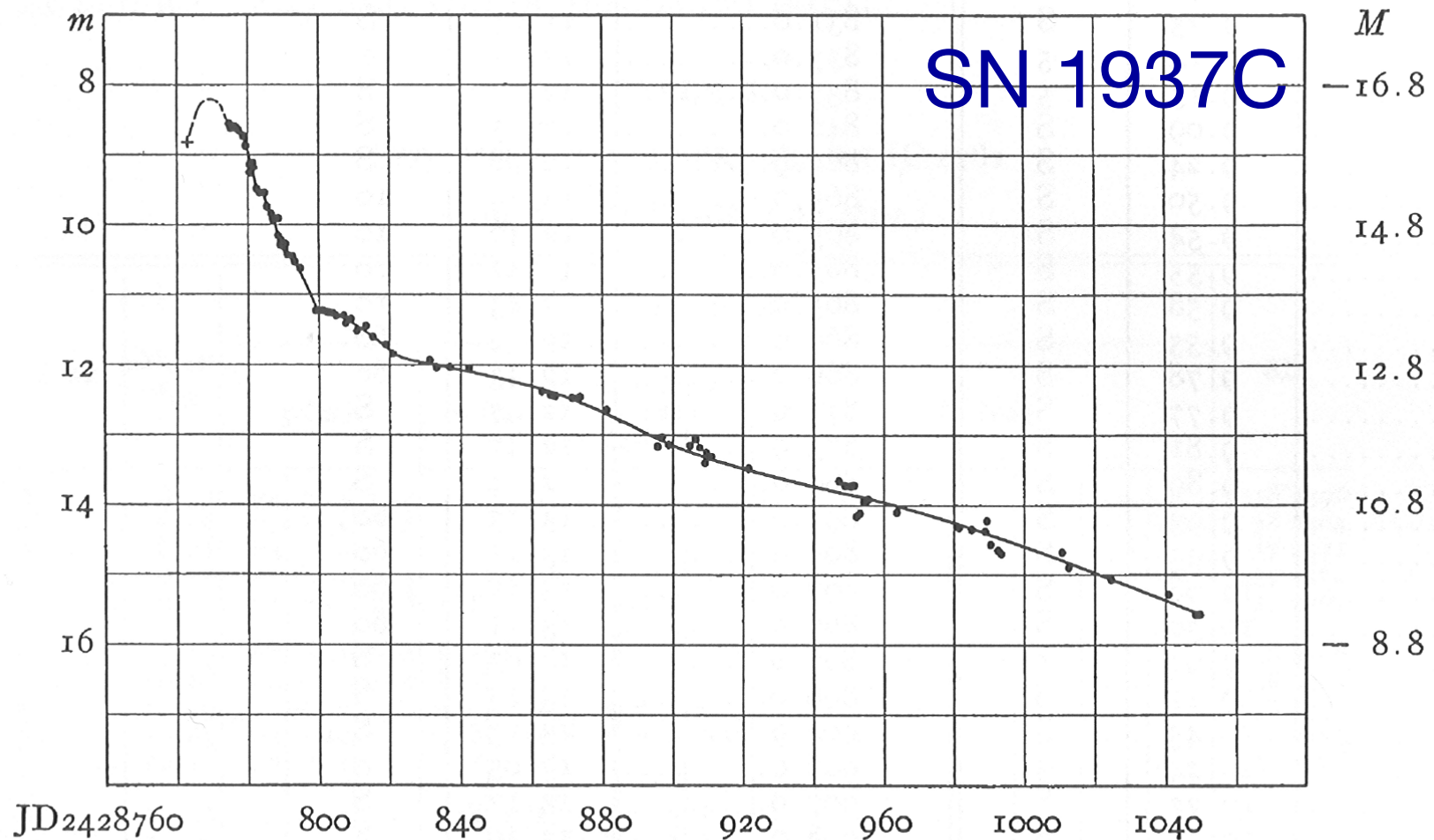


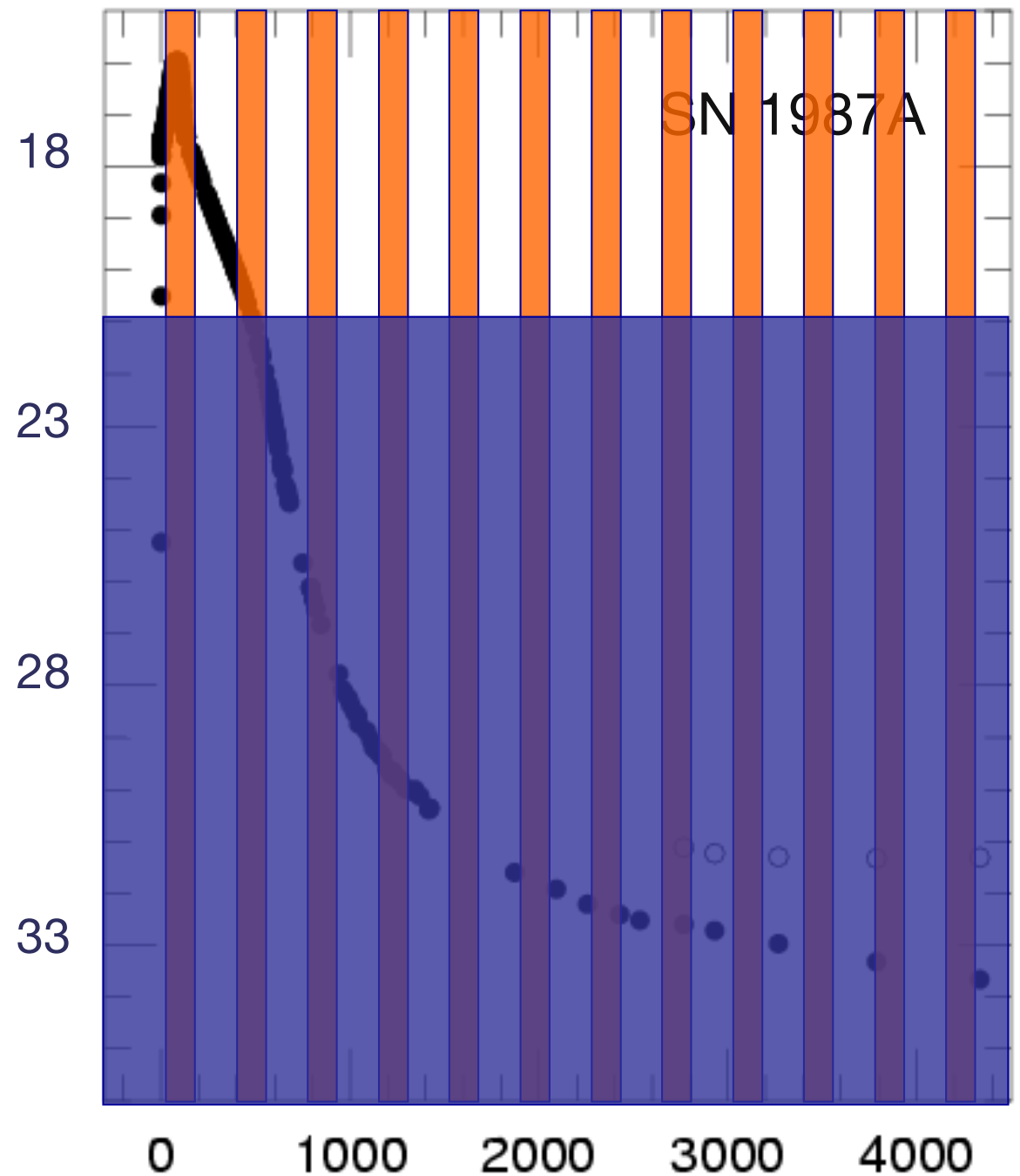
FIG. 1.—Photographic light-curve of supernova in IC 4182

Supernova Beobachtungen

Virgo
Entfernung

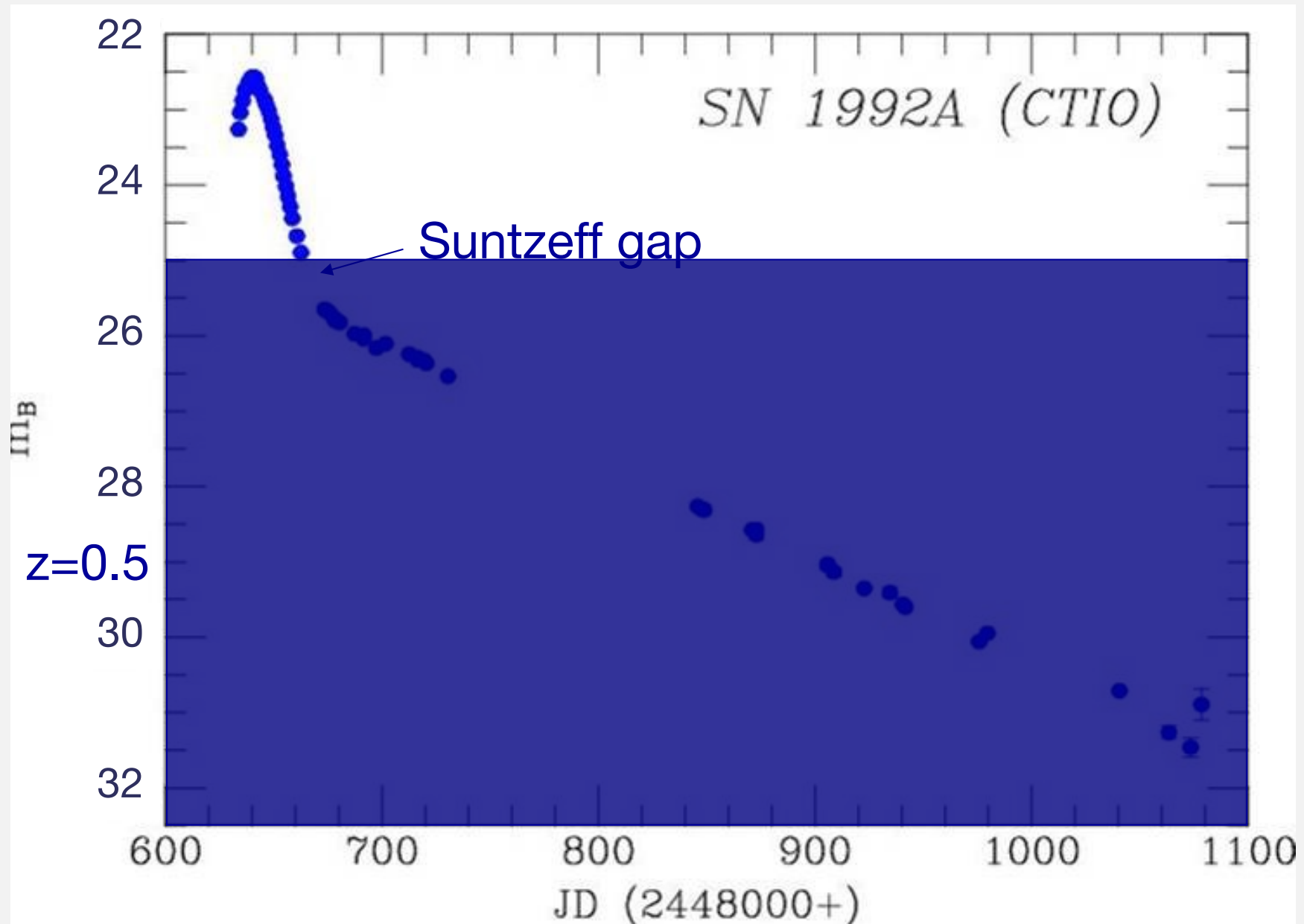
N. Suntzeff/CTIO/HST

30 April 2017



41. Edgar-Lüscher-Seminar

Supernova Beobachtungen



Supernova Klassifikation

Aufgrund der optischen
spektroskopischen Erscheinung

Kernkollaps
in massiven Sternen

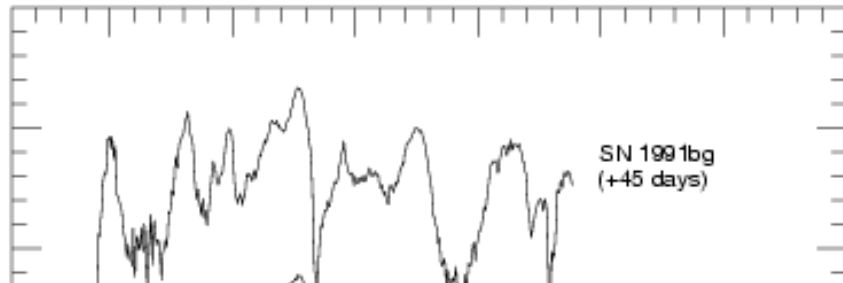
SN II (Wasserstoff H)
SN Ib/c (kein H/He)
Hypernovae/GRBs

SN Ia (kein H)

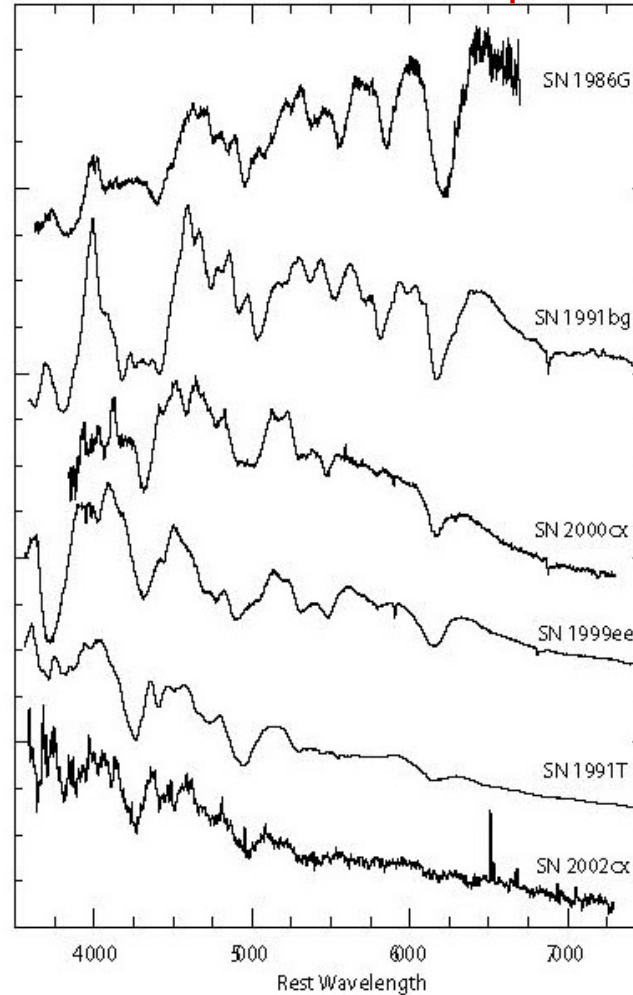
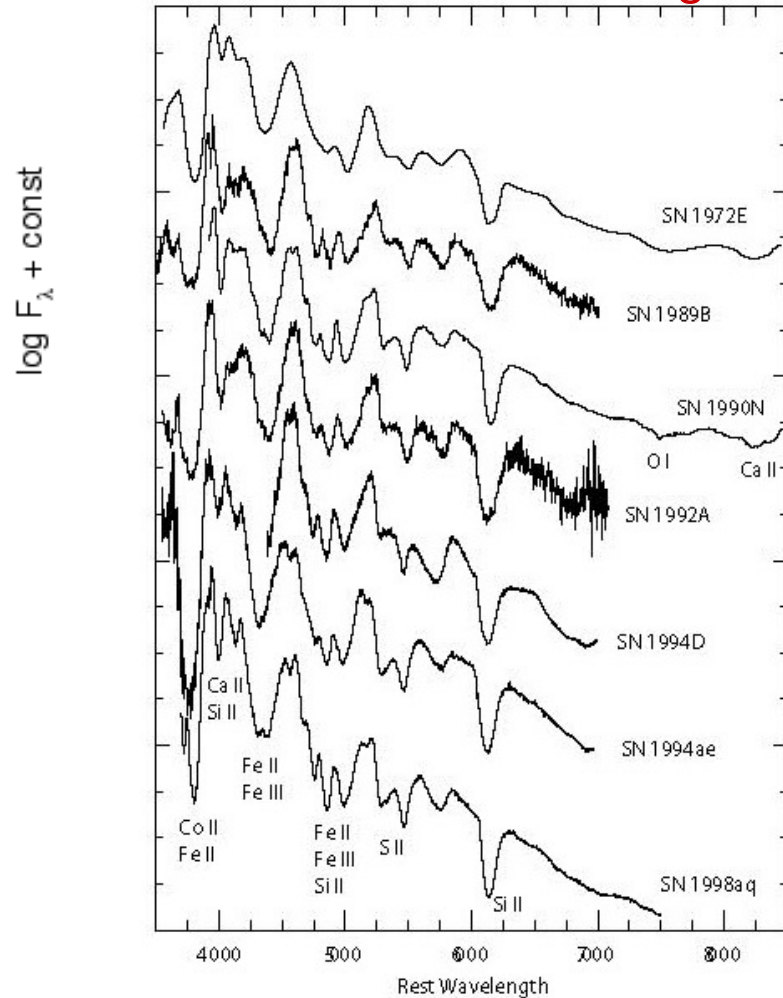
Thermonukleare
Explosionen

Supernova Spektroskopie

(Leibundgut et al. 1993)



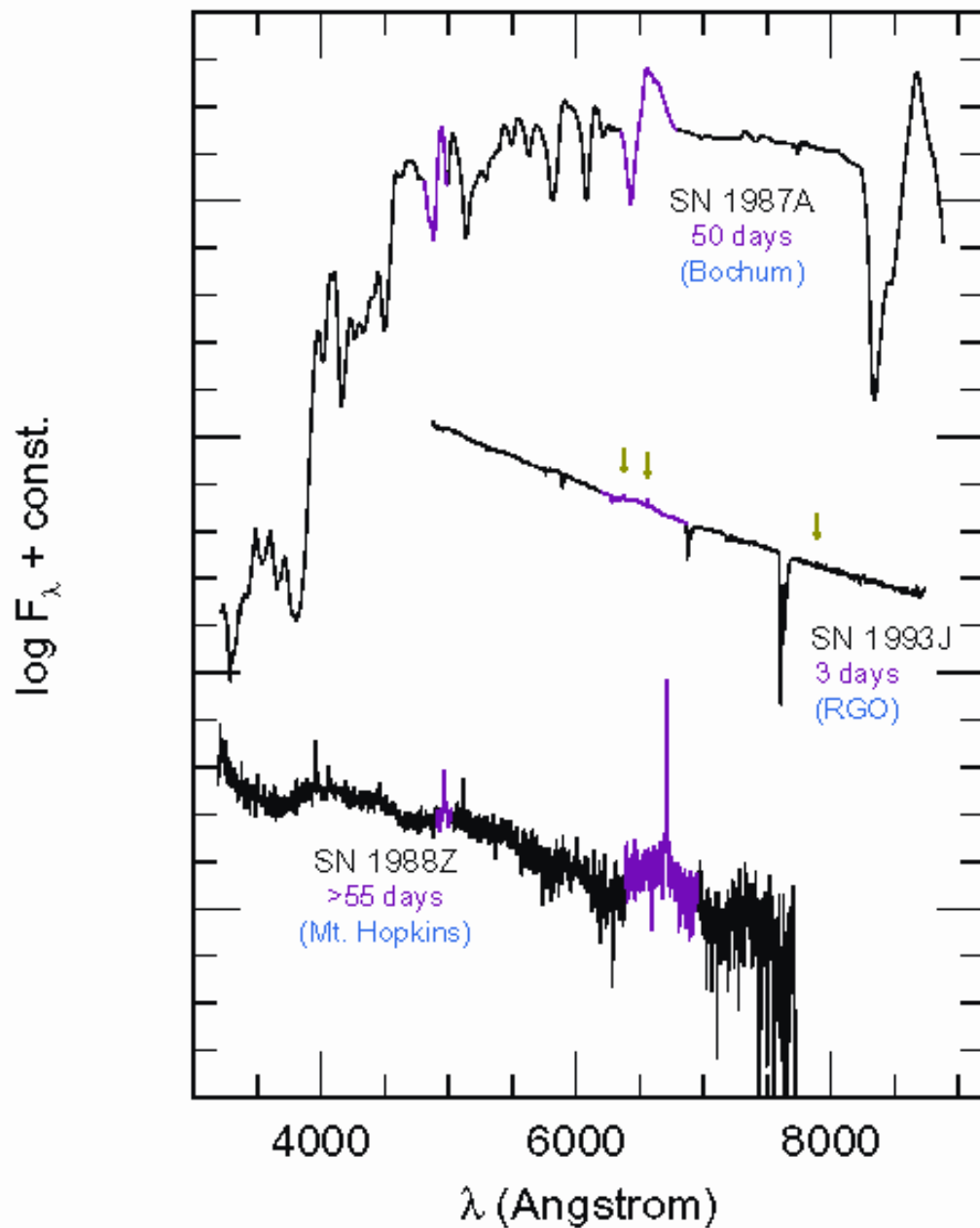
zwei Wochen später



Typ Ia

S. Blondin

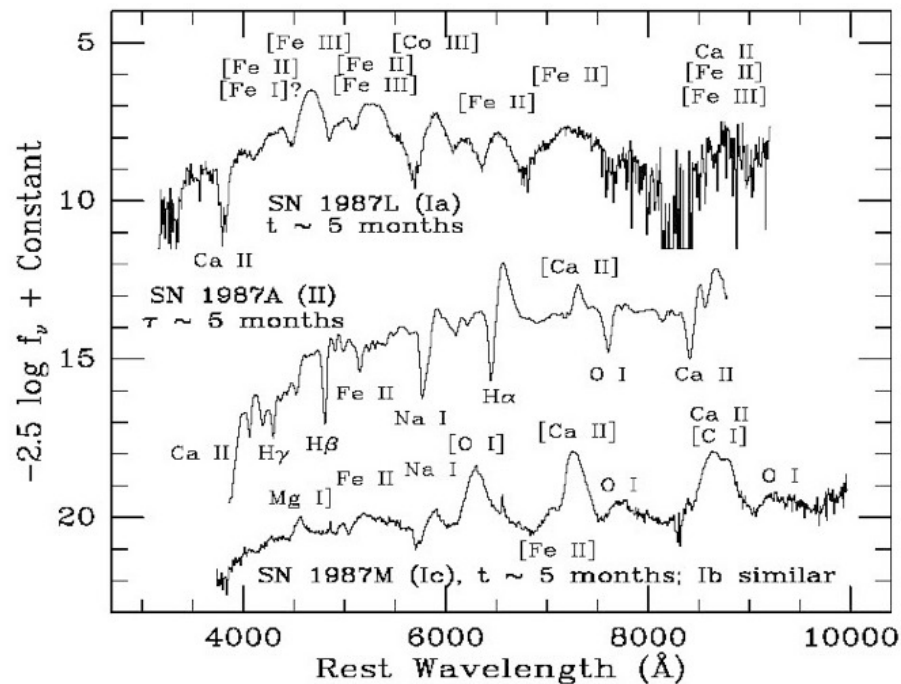
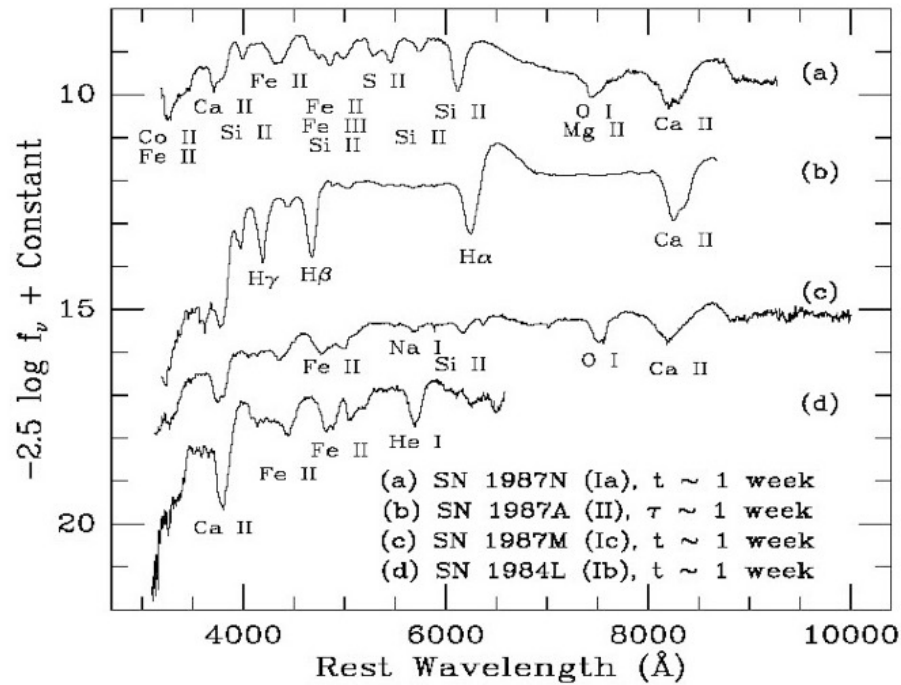
Type II Supernovae



Supernova Spektroskopie

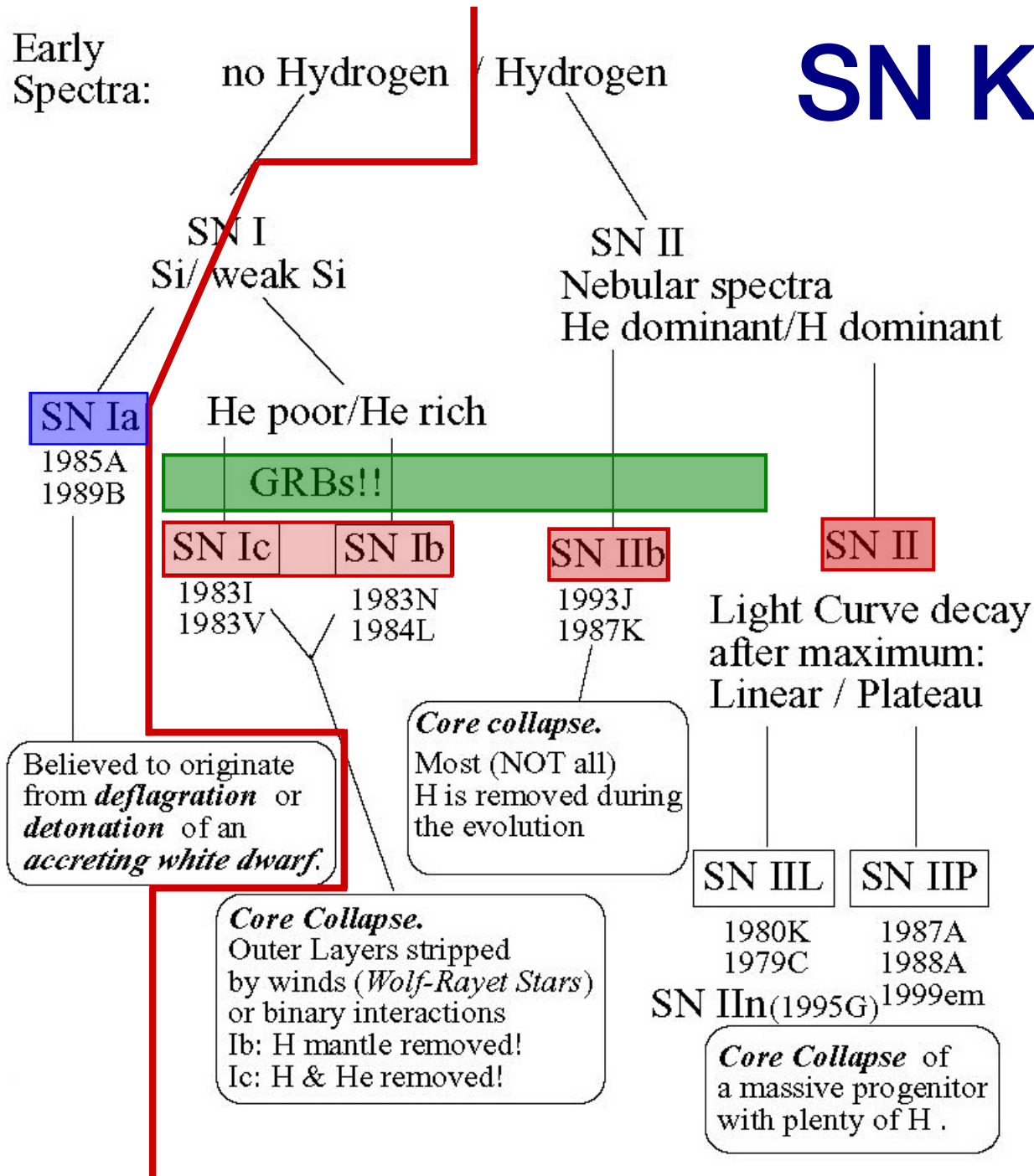
Typ II

Supernova Klassifikation



Filippenko 1997

SN Klassifikation (noch einmal)



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)

Supernova Klassen

Thermonukleare SNe

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

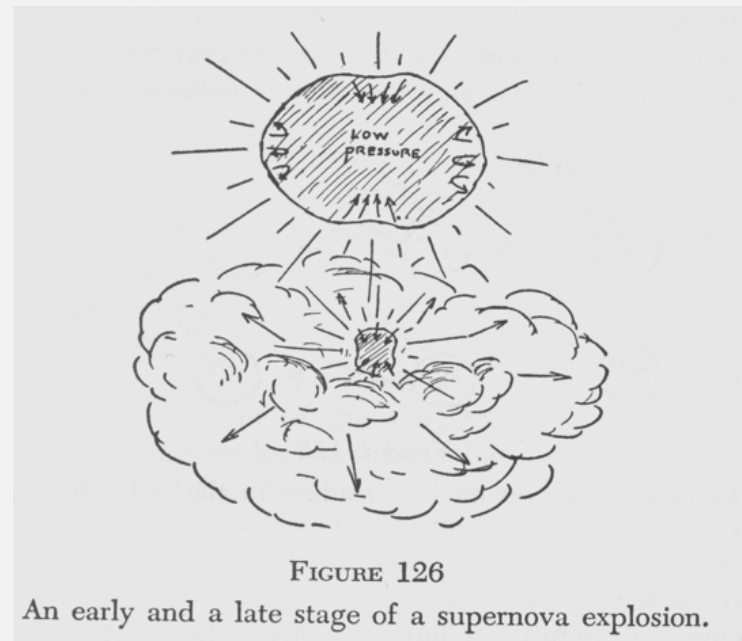
Kernkollaps SNe

- 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

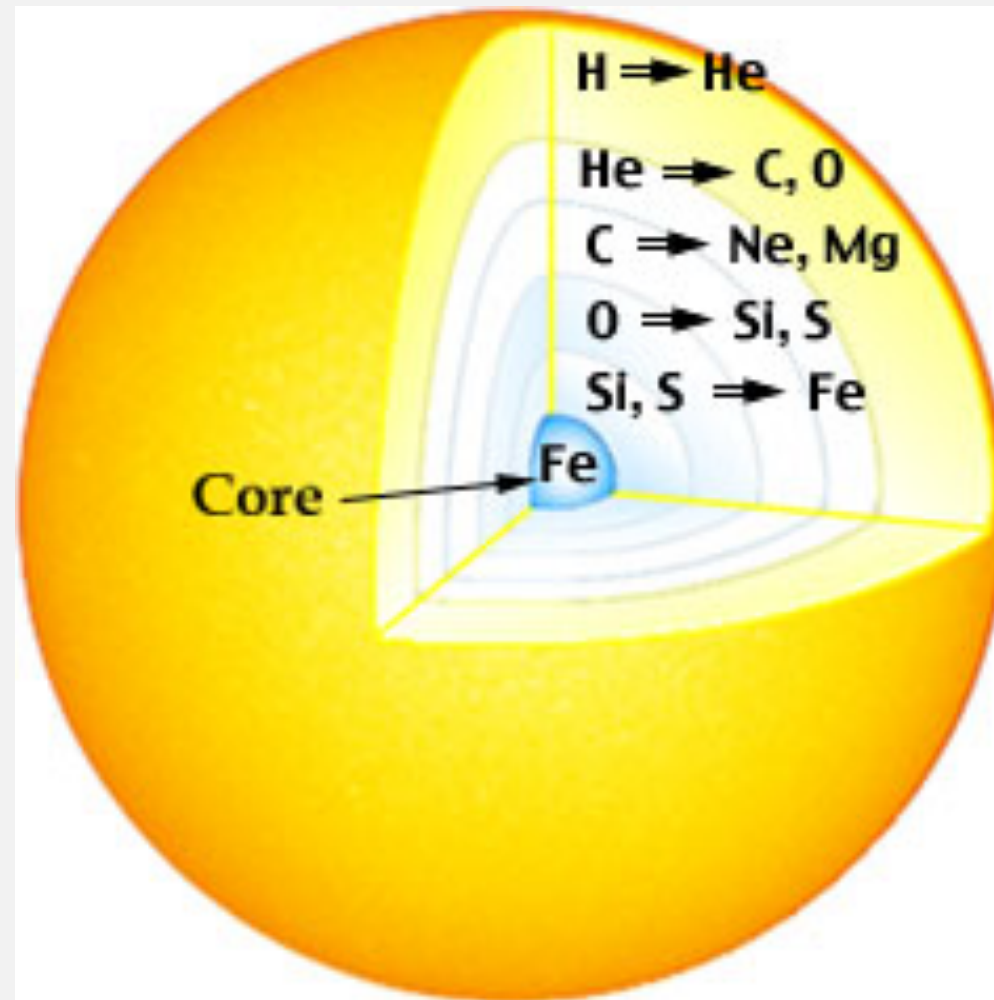
Energie Quellen

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

George Gamows Bild einer Kernkollaps Supernova



Struktur eines Vorgängersterne von Kernkollaps Supernovae



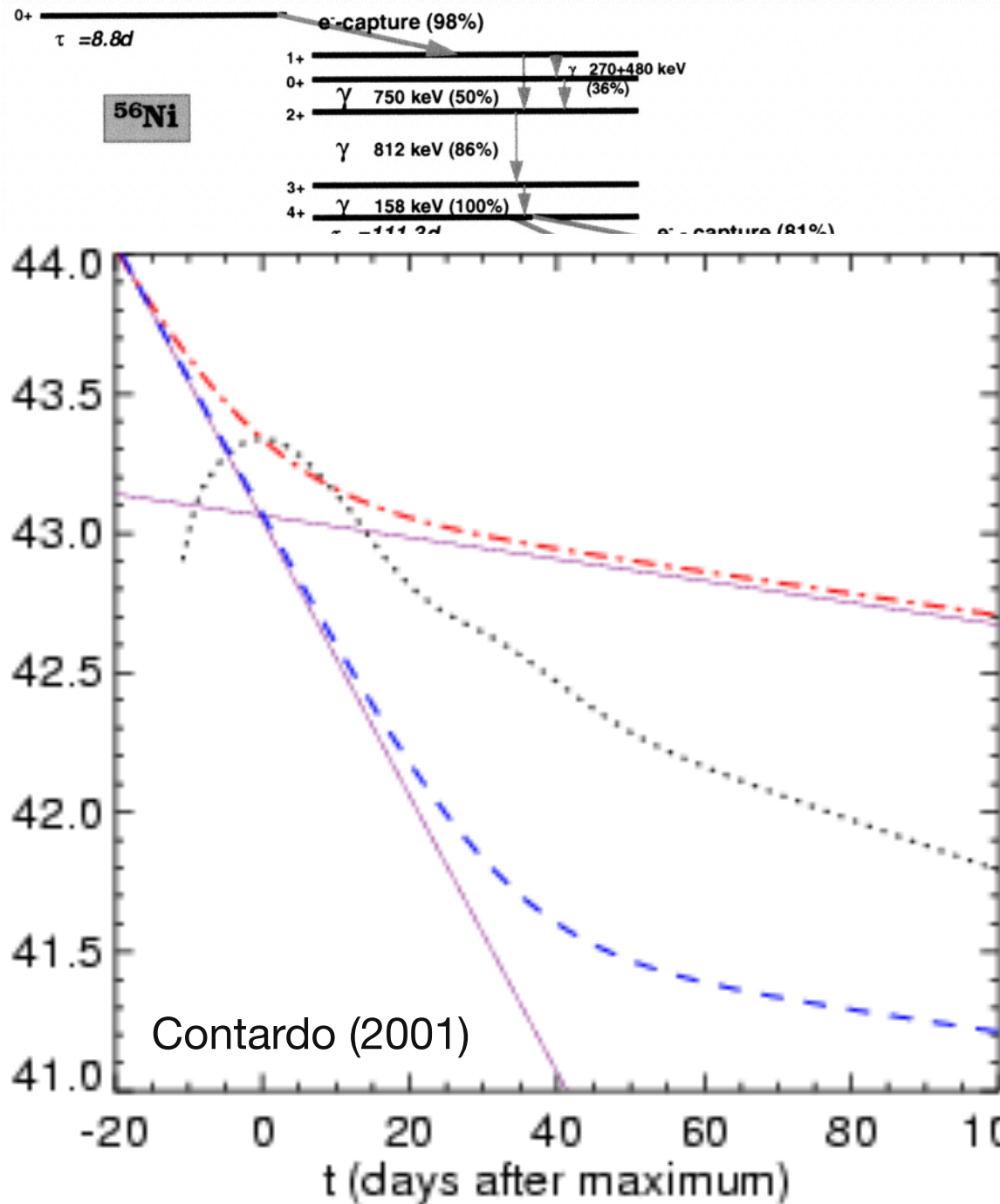
Energie Quellen

- 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-)Energie → Typ Ia
 - explosives C and O Brennen von etwa einer Sonnemasse
 - Freisetzung von 10^{42} Joule

Radioaktivität

Nickel Isotope und anderer Elemente

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



Supernova Unbekannte

Die Explosionen sind noch nicht vollständig verstanden

- Umkehrung der Implosion bei den Kernkollaps Supernovae
 - Rolle der Neutrinos
 - Magnetfelder
 - Hydrodynamische Instabilitäten
- genaue Verbrennung in den thermonuklearen Supernovae und der Strahlungstransport

Was wir über Typ Ia Supernovae gerne wissen würden?

Was explodiert?

Vorgängersterne,
Entwicklung zur
Explosion

Weißer Zwerge(?),
mehrere Möglichkeiten

Wie ist die Explosion?

Explosions-
mechanismus

mehrere Möglichkeiten
Deflagration,
Detonation,
verzögerte Detonation,
He Detonation,
Sternverschmelzung

Was wir über Typ Ia Supernovae gerne wissen würden?

Was bleibt übrig?

- Überreste
 - Tycho Brahes SN
 - Keplers
- Kompakter Überrest
 - keine, Begleitstern?
- Elementenanreicherung

Was wissen wir über Typ Ia Supernovae?

Wo explodieren sie?

- Umgebung
(lokal and global)
 - einige mit CSM(?)
 - alle Galaxientypen
 - Abhängig vom Galaxientyp?
- Feedback
 - wenig

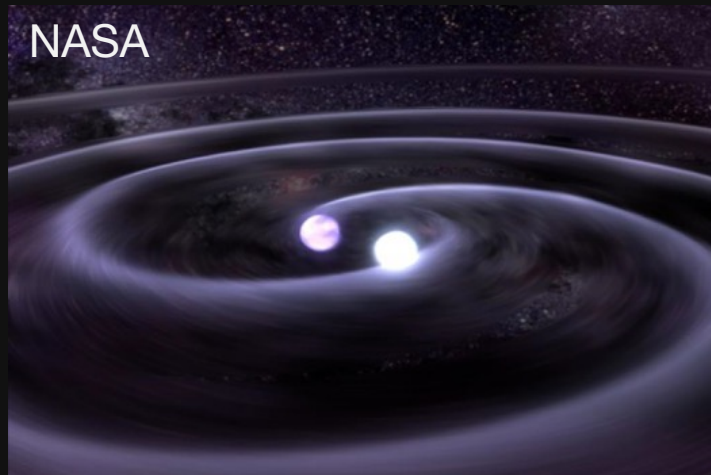
Andere Anwendungsmöglichkeiten

- “Leuchttürme”
- Entfernungsindikatoren
 - H_0 , kosmologische Parameter
- Chemische Fabriken
 - keine Stauberzeugung

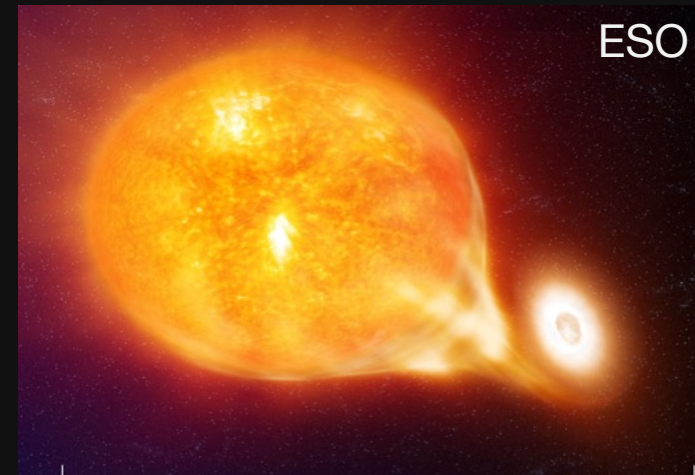
Vorgängersysteme der Typ Ia Supernovae unbekannt

Vorgängersterne der thermonuklearen
Supernovae sind nicht wirklich bekannt

- Weiße Zwerge, aber ...
 - Doppel Weiße Zwerge oder ein Weißer Zwerg mit einem normalen Stern



30 April 2017



41. Edgar-Lüscher-Seminar

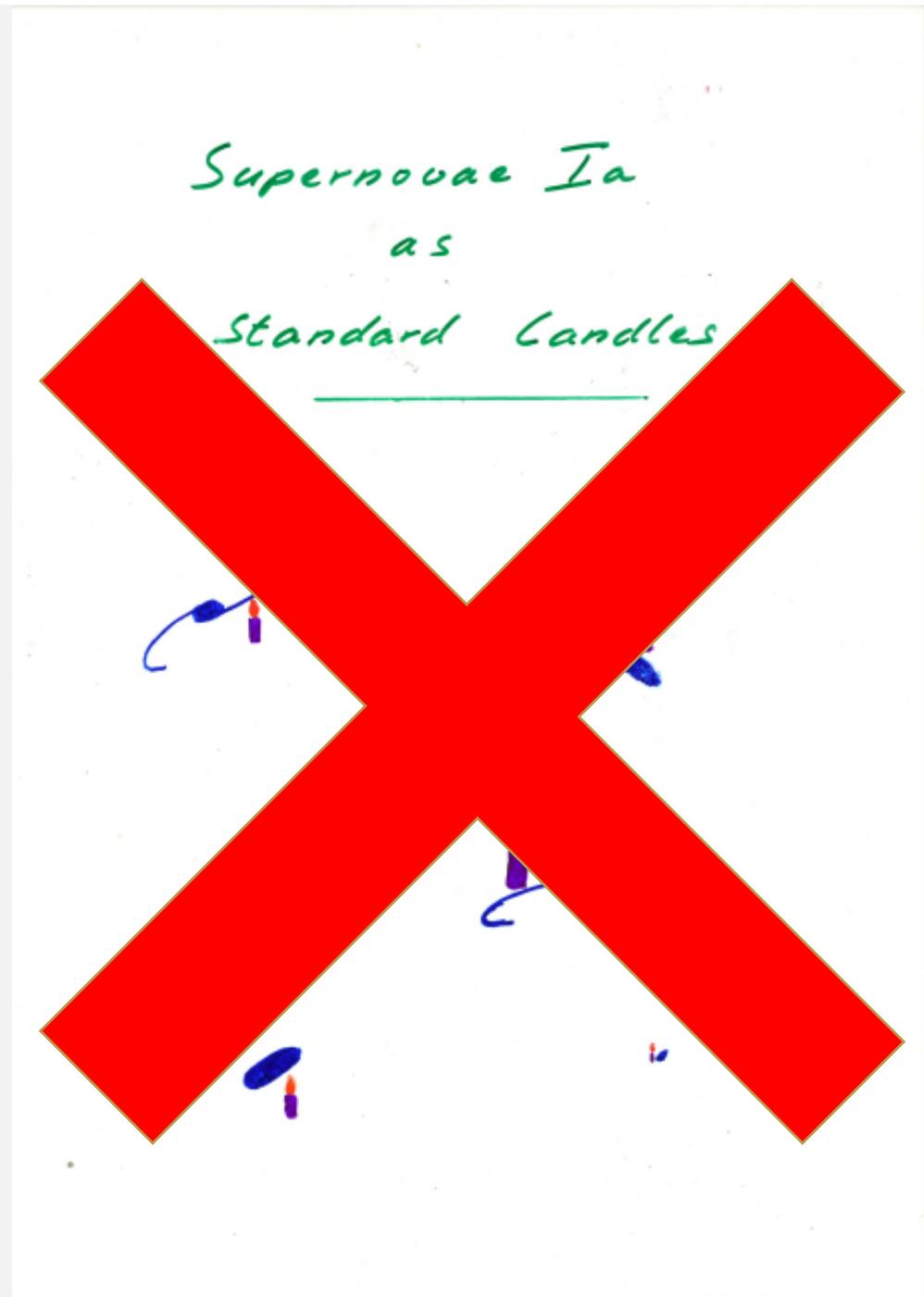
Kosmologie mit Supernovae

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

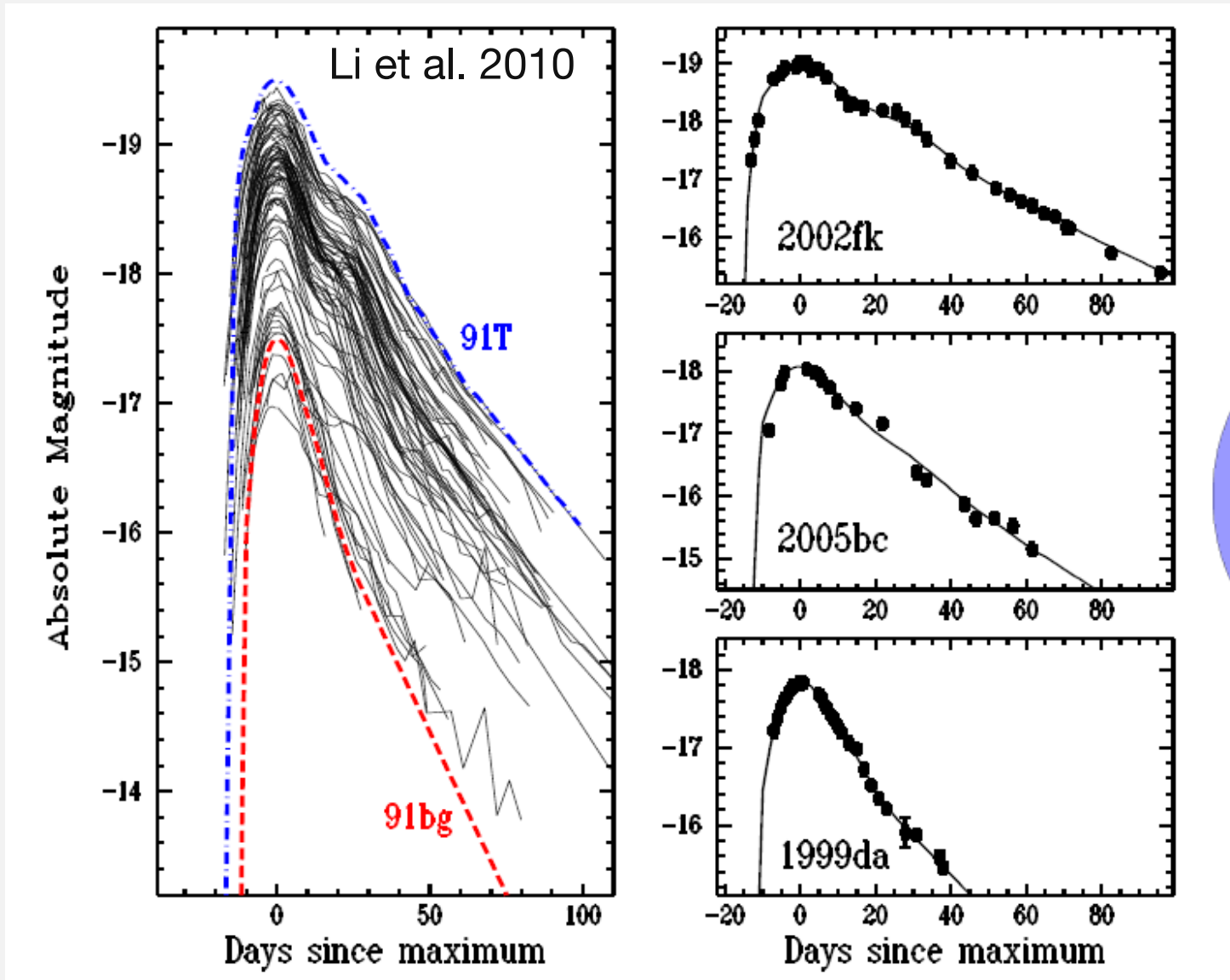
Typ Ia Supernovae sind ausgezeichnete Entfernungskennzeichen, die im nahen Universum geeicht werden.

Typ Ia SNe sind nicht Standard- kerzen

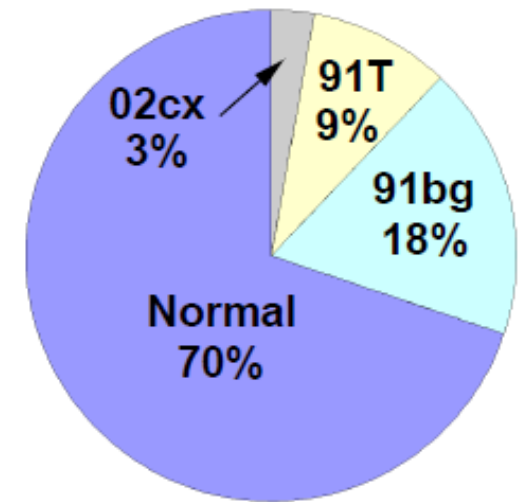
Normalisierung der
Leuchtkräfte durch
die Lichtkurvenform



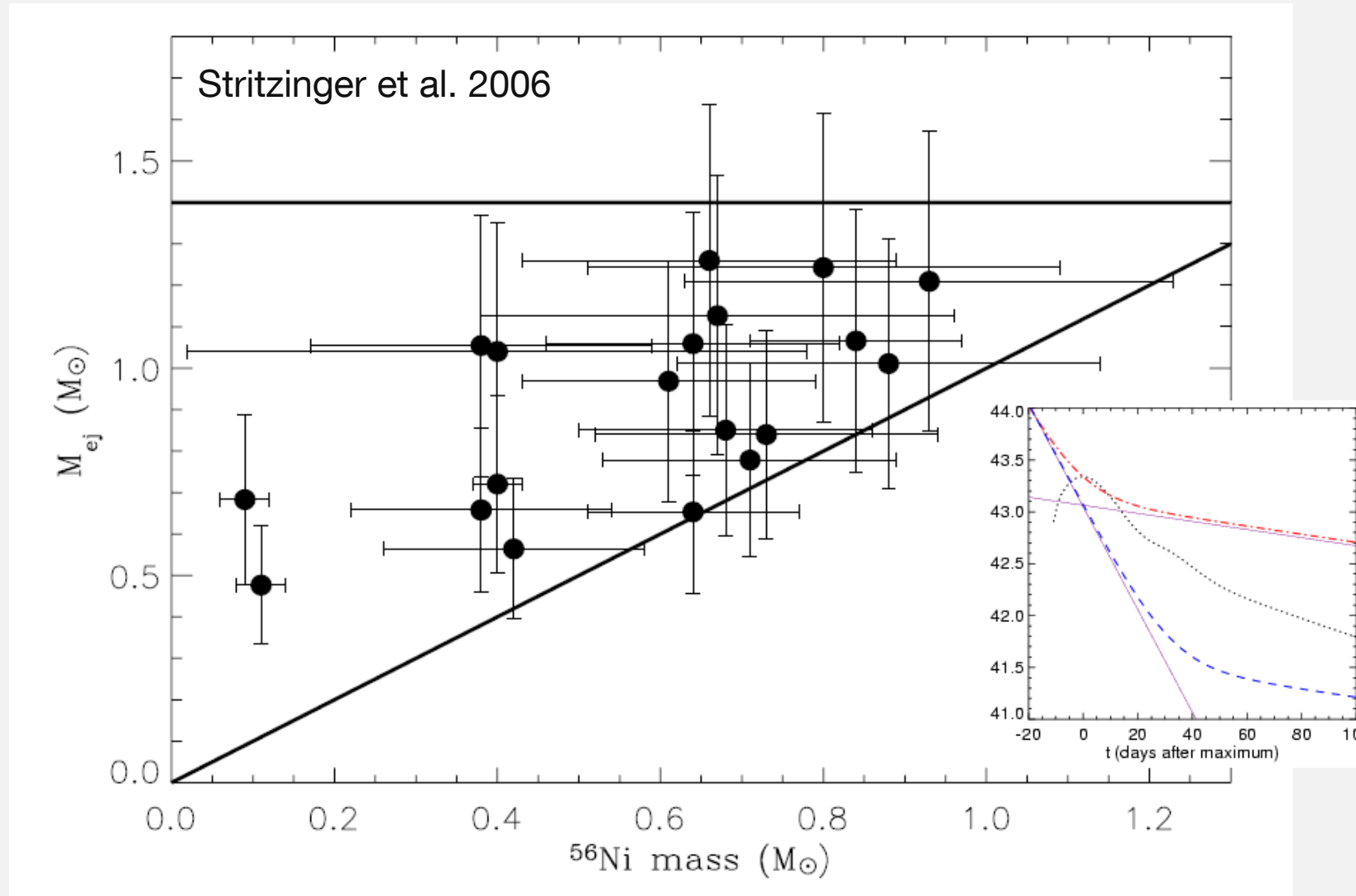
Leuchtkraft und Lichtkurvenform



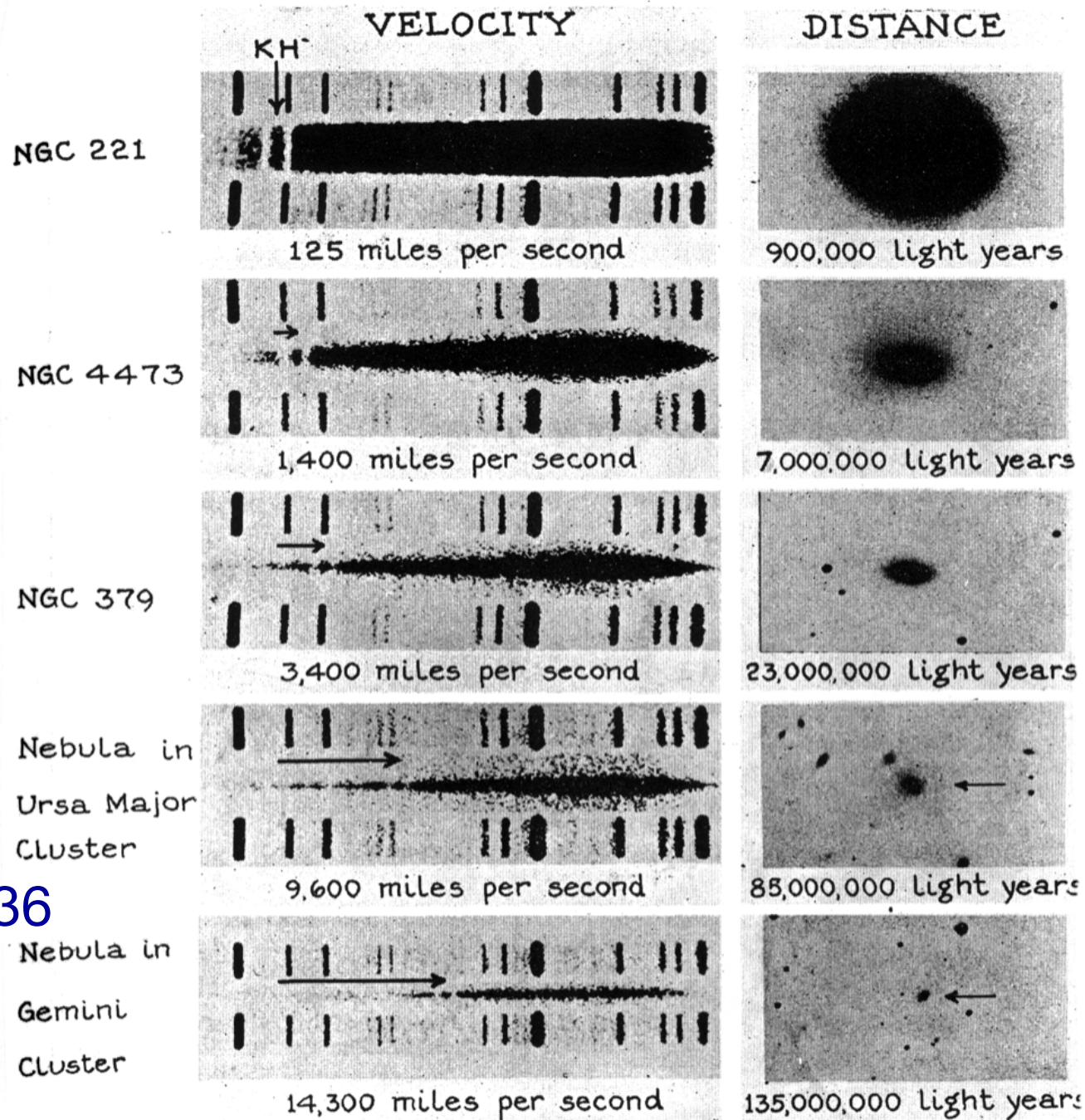
SNe Ia



Nickel- und Gesamtmassen



THE VELOCITY-DISTANCE RELATION FOR EXTRA-GALACTIC NEBULAE



Hubble 1936

30 April 2

r-Seminar

Das original Hubble Diagram

Geschwindigkeit

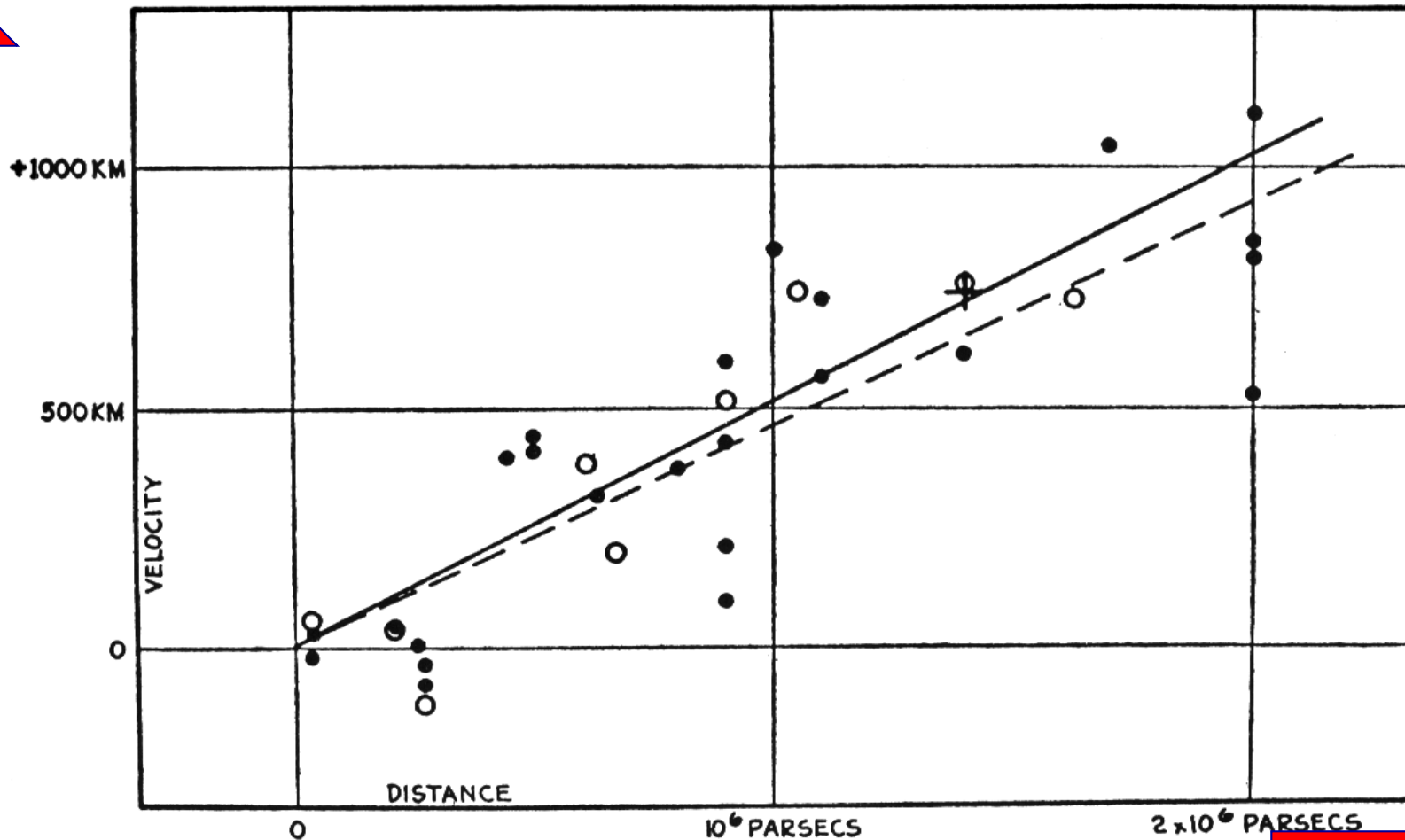
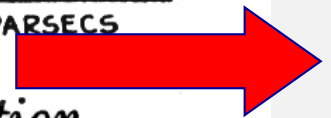
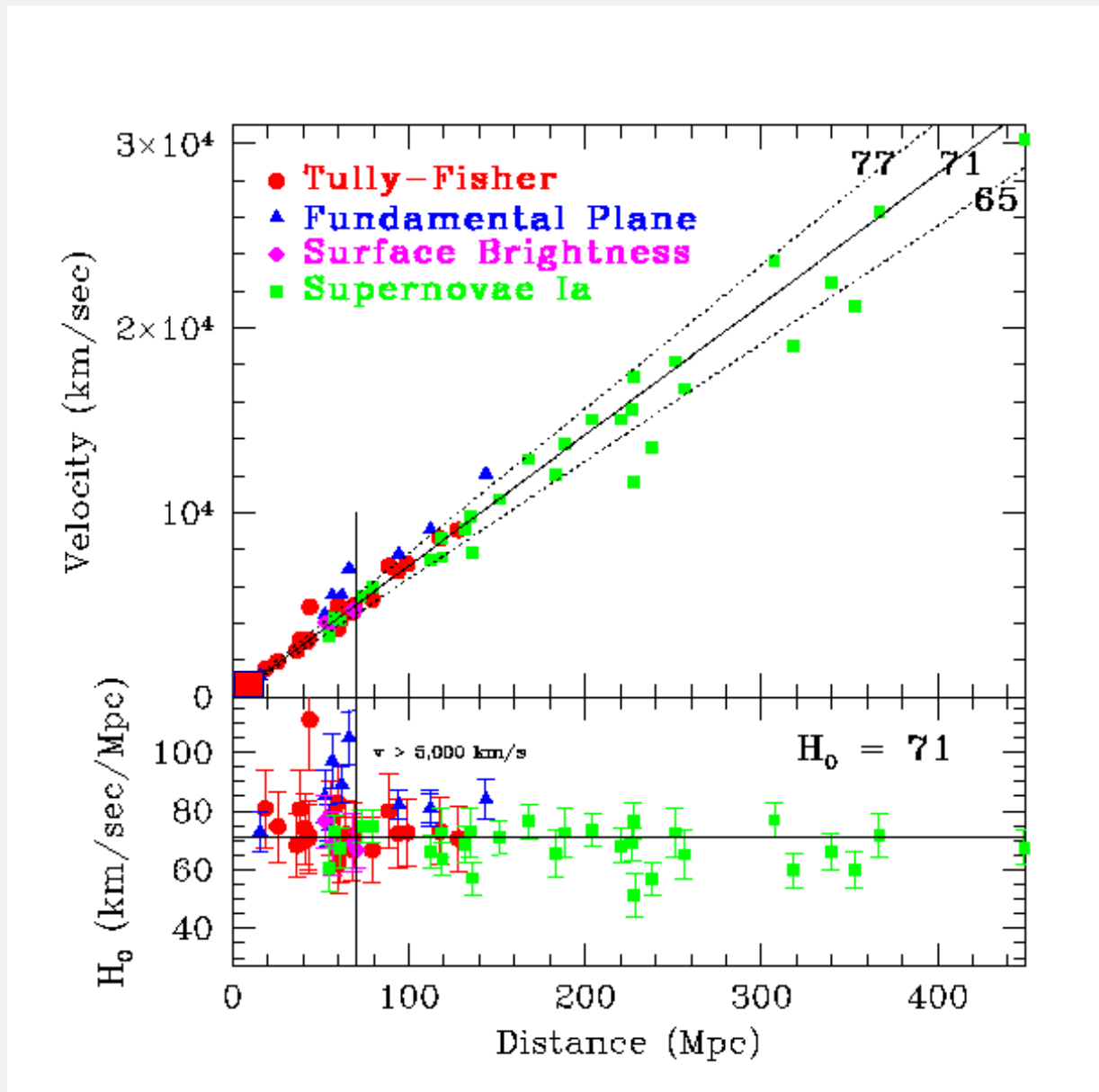


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

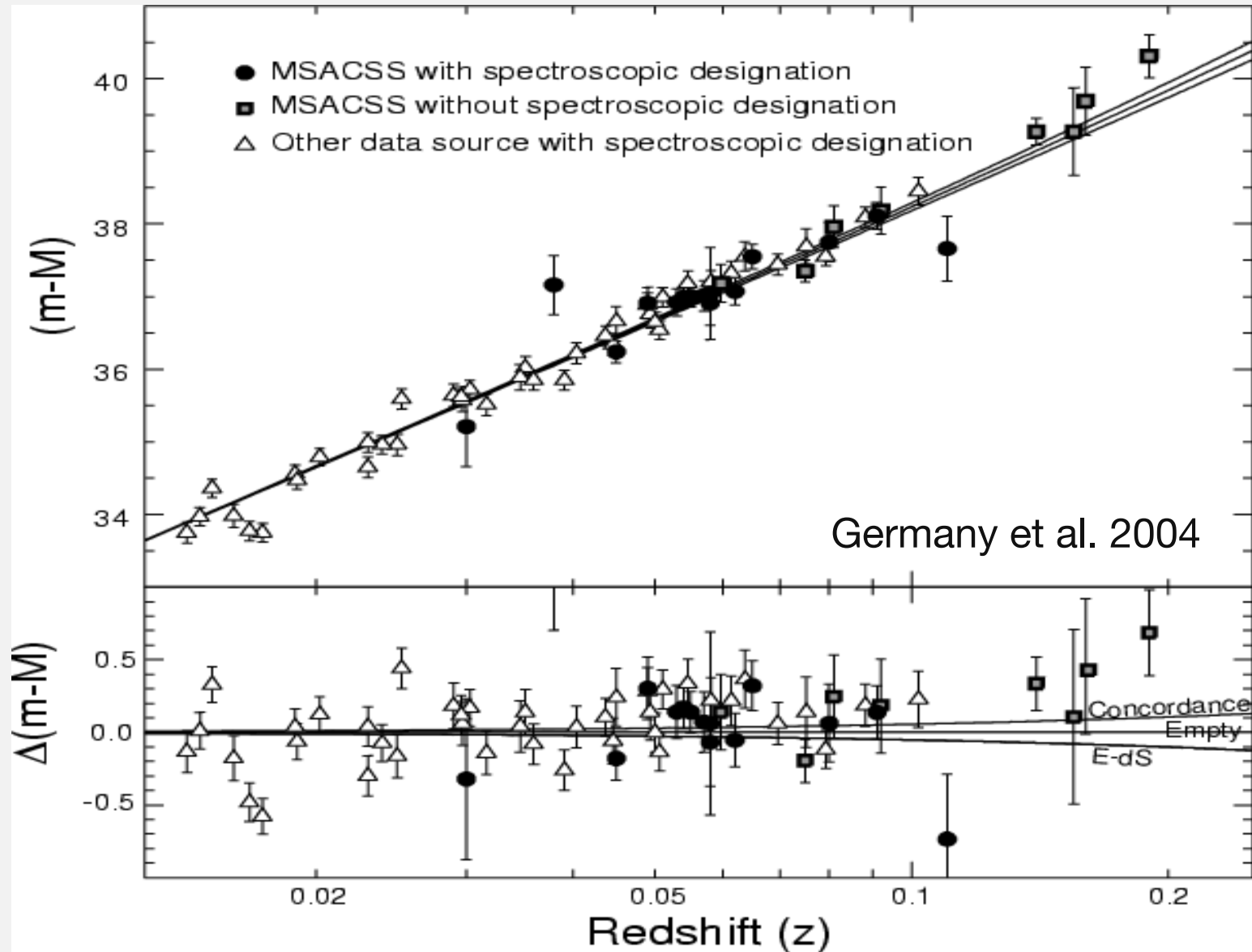
Entfernung

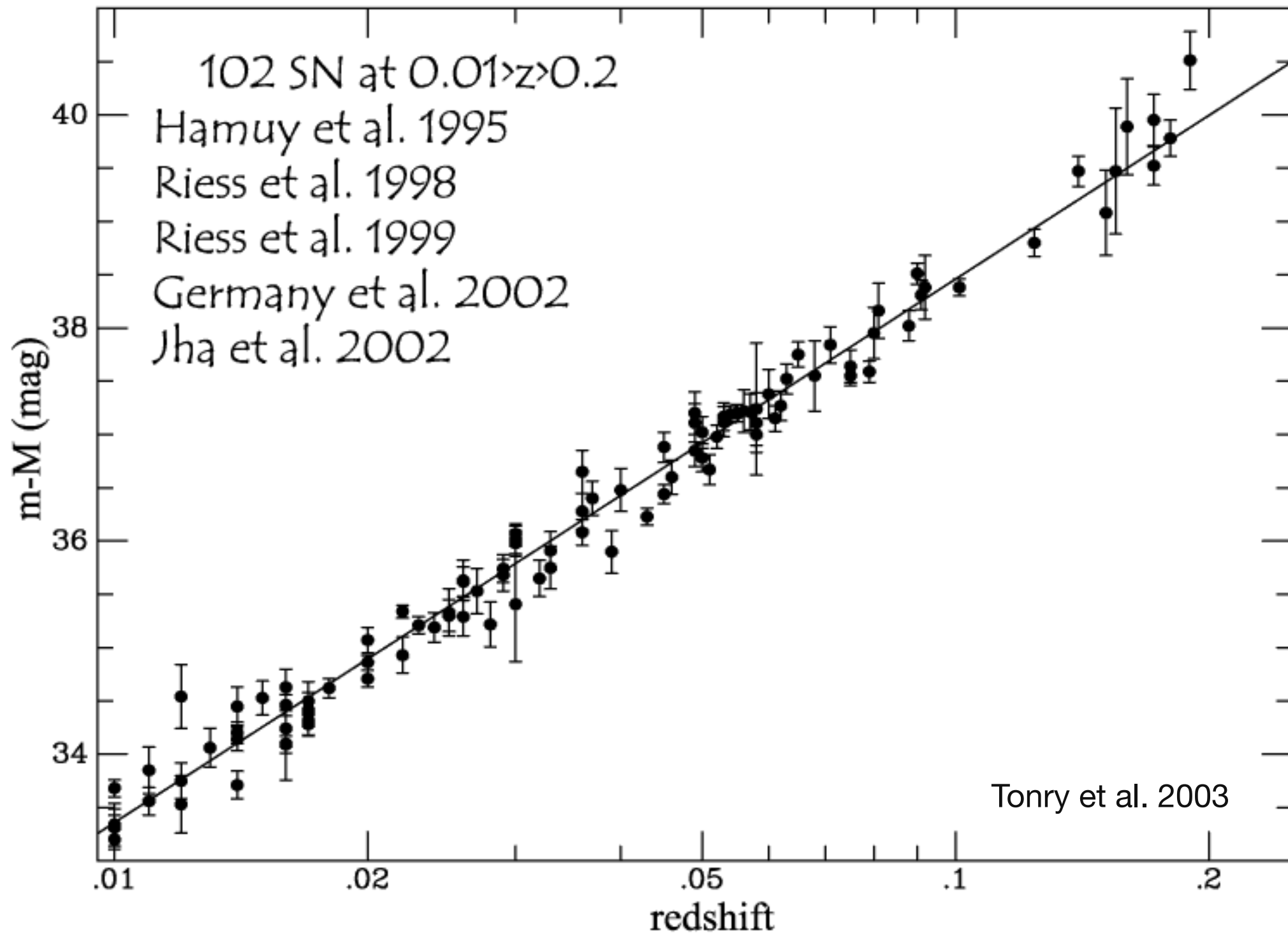


Ein modernes Hubble Diagramm



Die nahen SNe Ia





Hubble Konstante

Hubble Gesetz

$$D = \frac{v}{H_0} = \frac{cZ}{H_0}$$

Leuchtkraftentfernung

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

Entfernungsmodul

$$m - M = 5 \log(D_L) - 5$$

Entfernung in Einheiten von 10pc

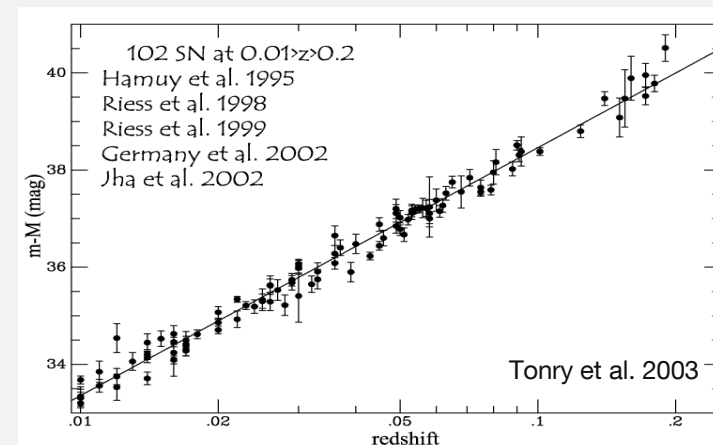
Hubble Diagram

Entfernungsmodul vs. Rotverschiebung

$$m - M = 5 \log \left(\frac{cz}{H_0} \right) + 25$$

$$m - M = 5 \log(z) + 5 \log(c) - 5 \log(H_0) + 25$$

$$H_0 = cz \cdot 10^{-0.2(m-M)+5}$$

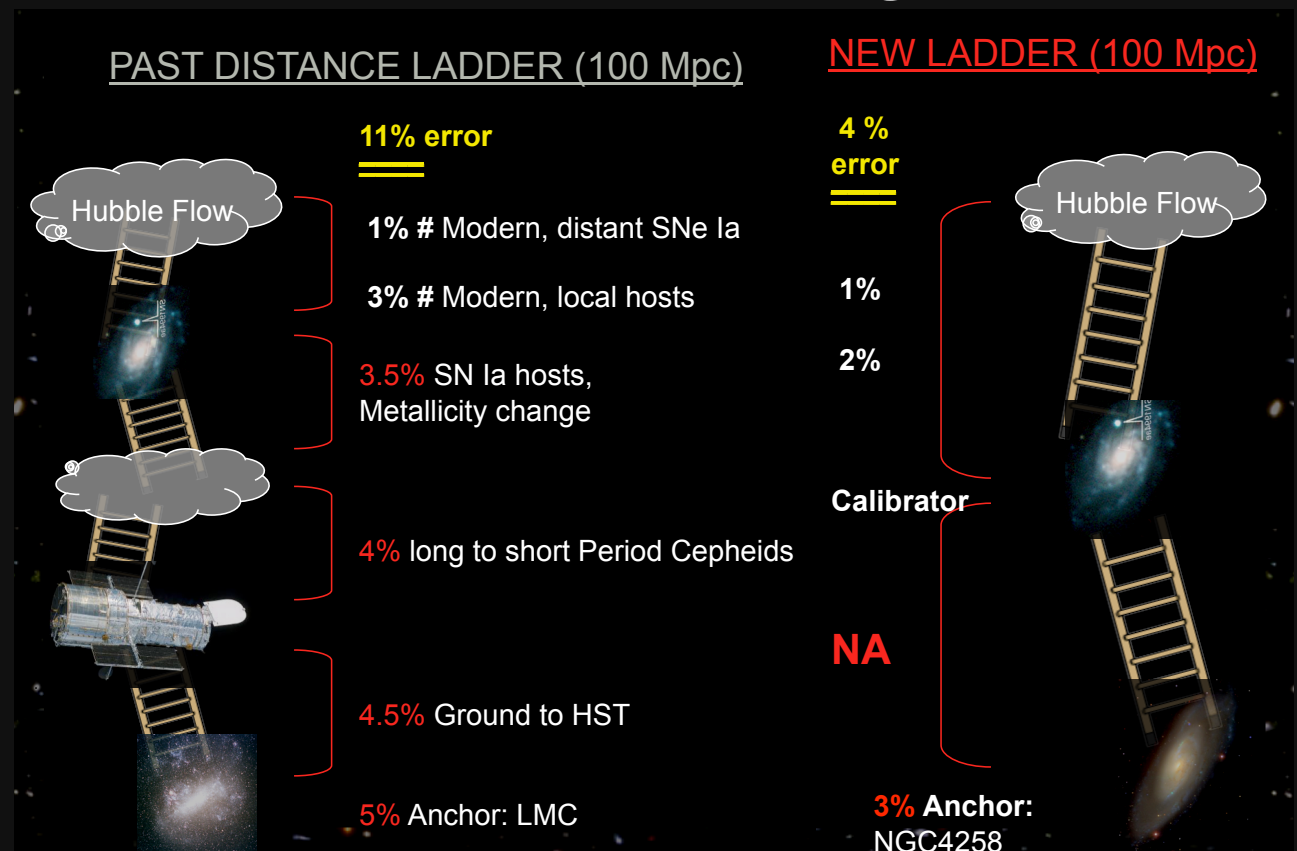


Eichung der SN Ia Leuchtkraft

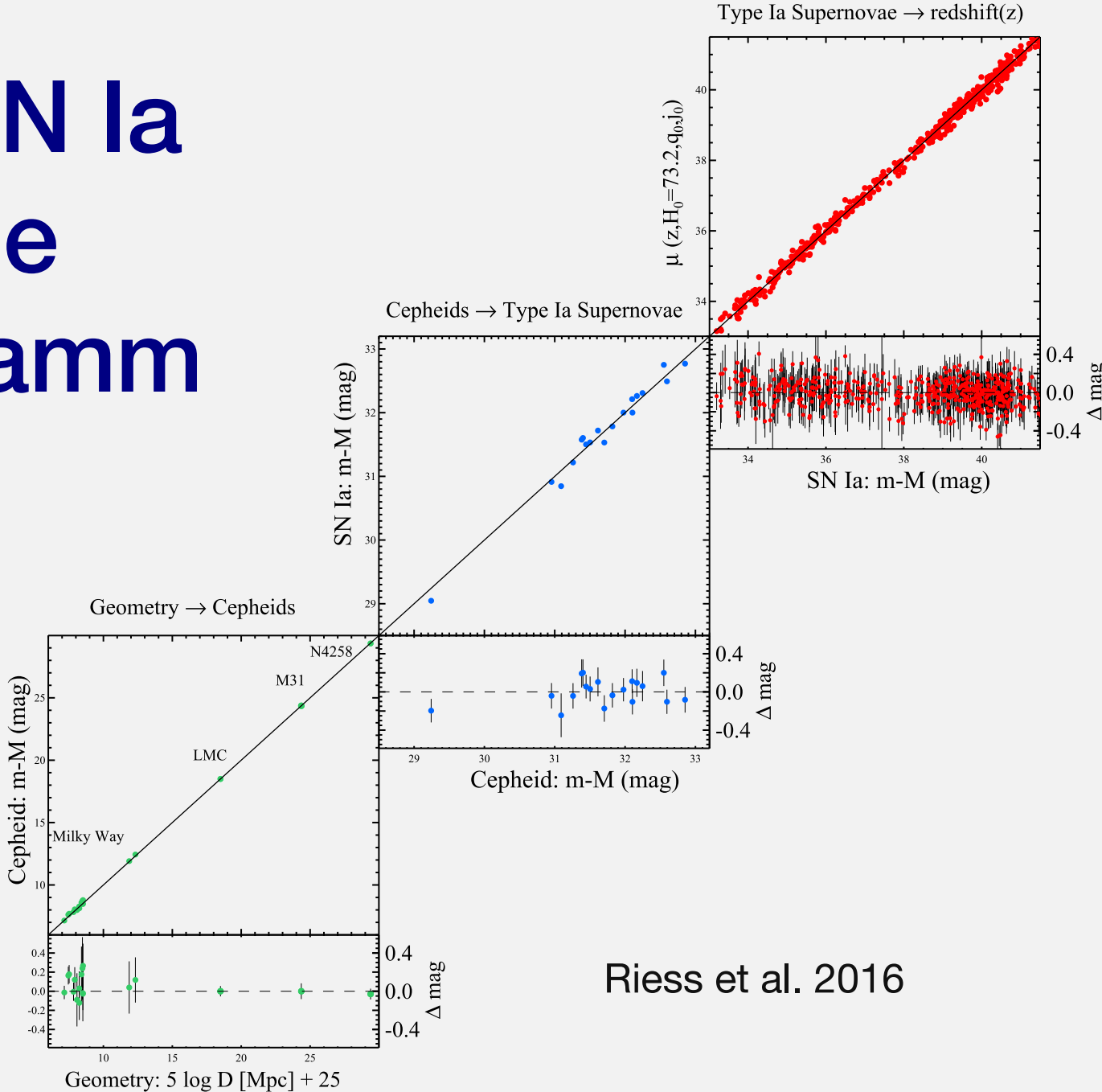
Kalibrierung der SN absoluten Helligkeit

Distanzleiter

Riess et al. 2016

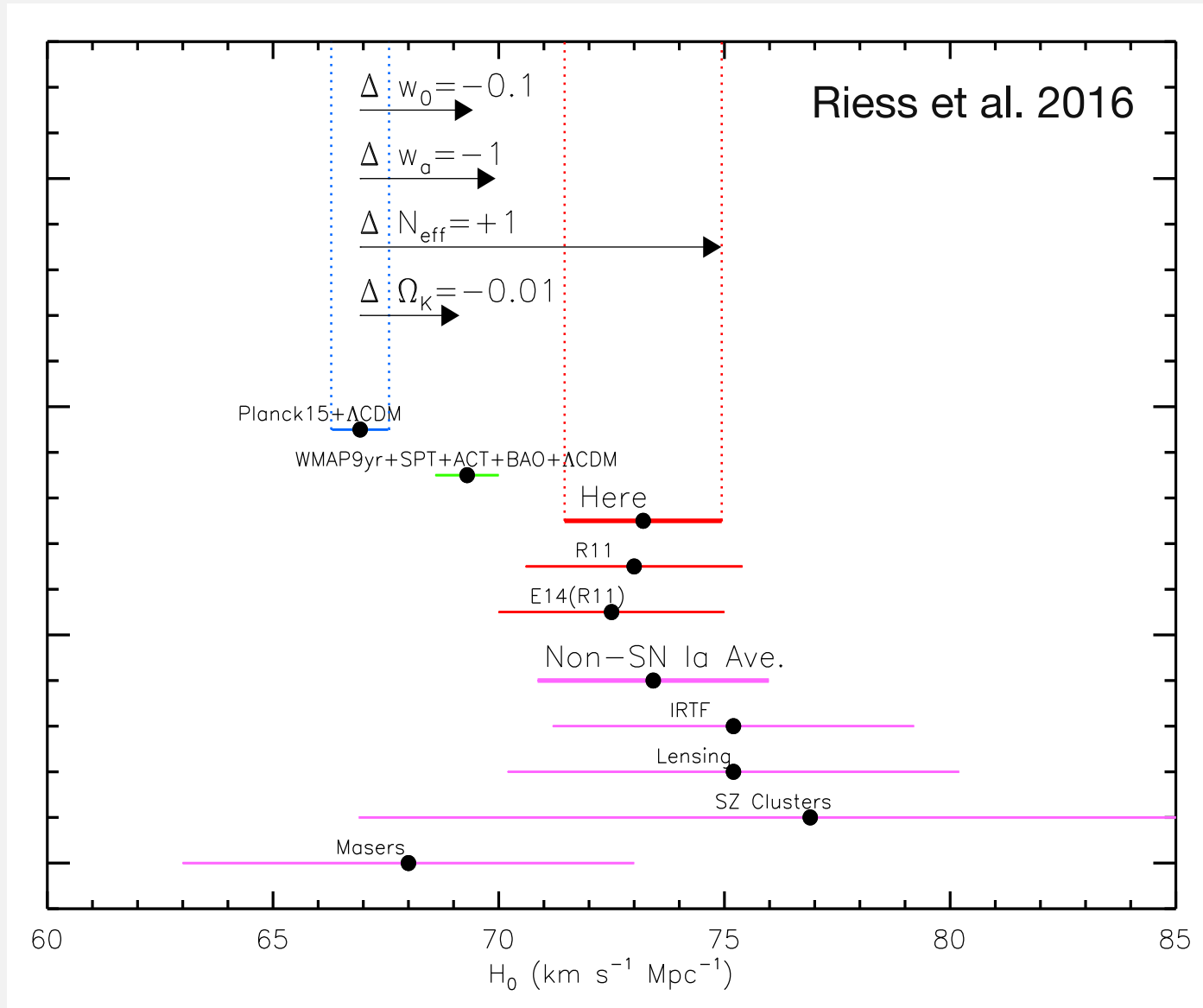


Das SN Ia Hubble Diagramm



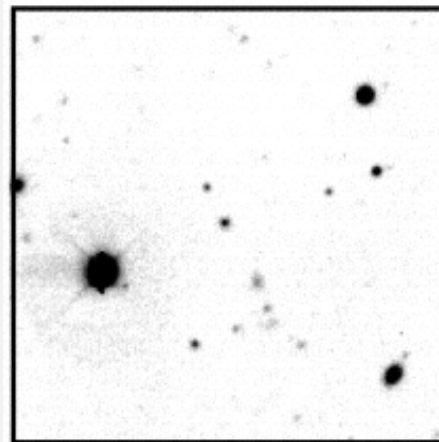
Riess et al. 2016

Hubble Konstante

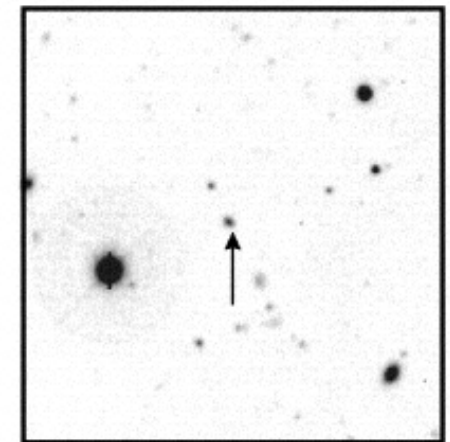


SN 1995K bei $z=0.479$

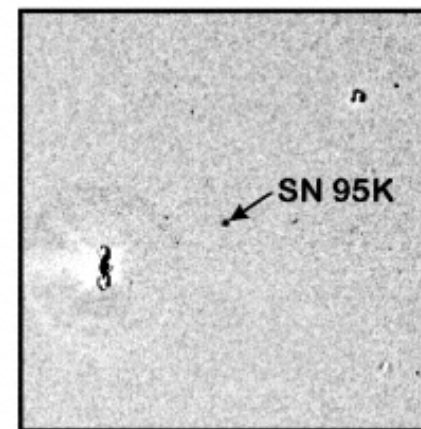
Erste SN des
High-z SN Search
Teams



7 Mar



30 Mar

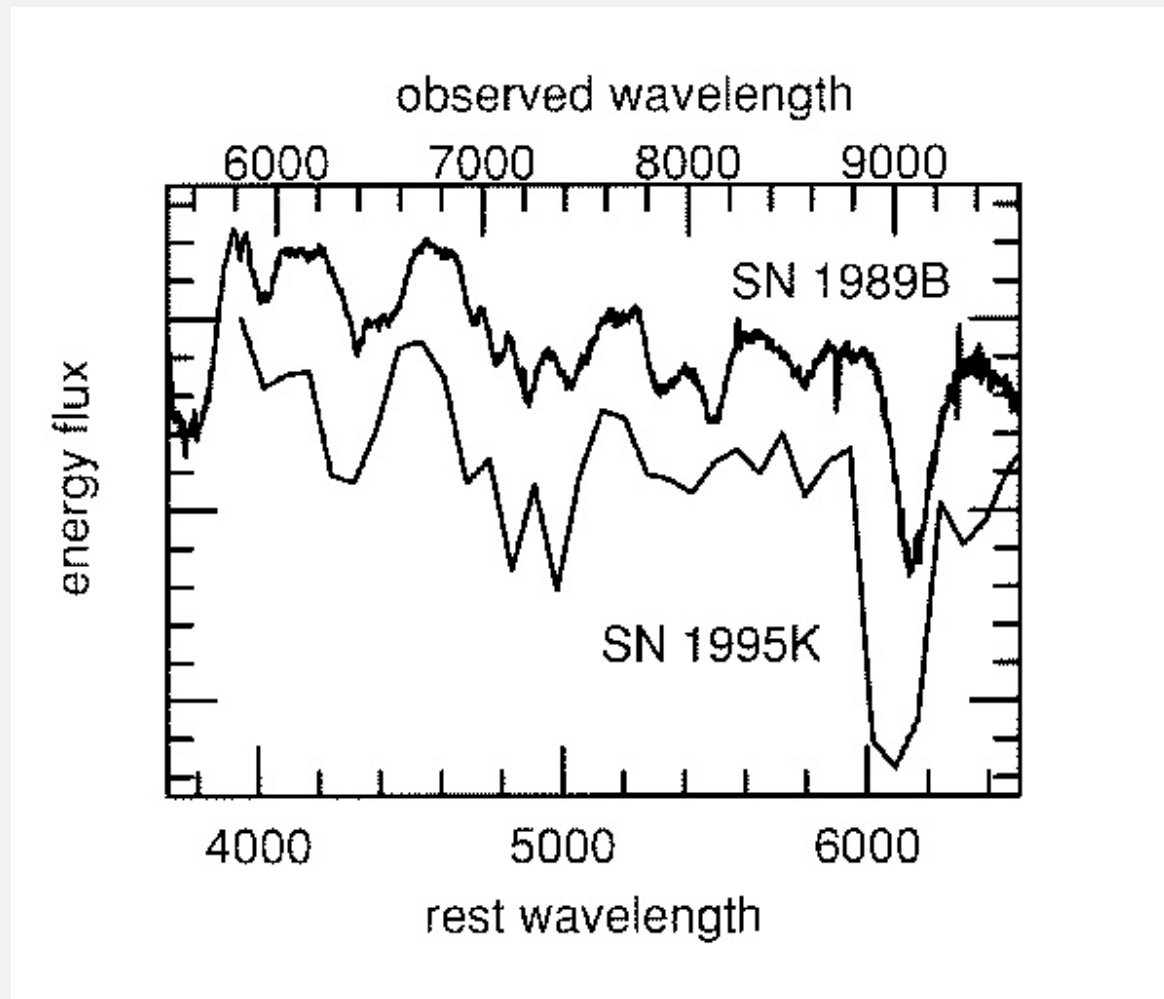
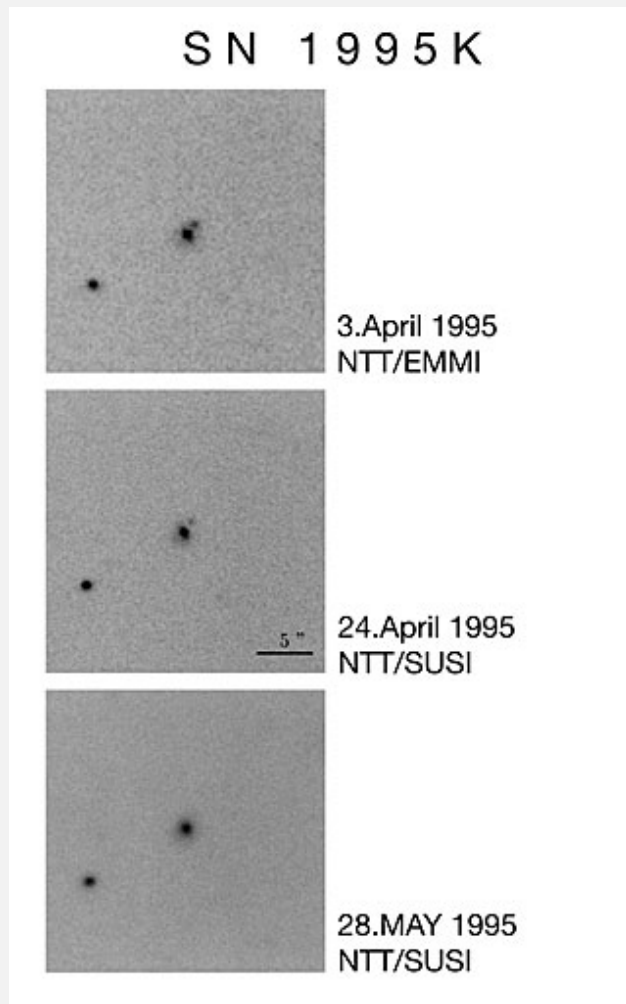


(30 Mar) - (7 Mar)

Schmidt et al. 1998

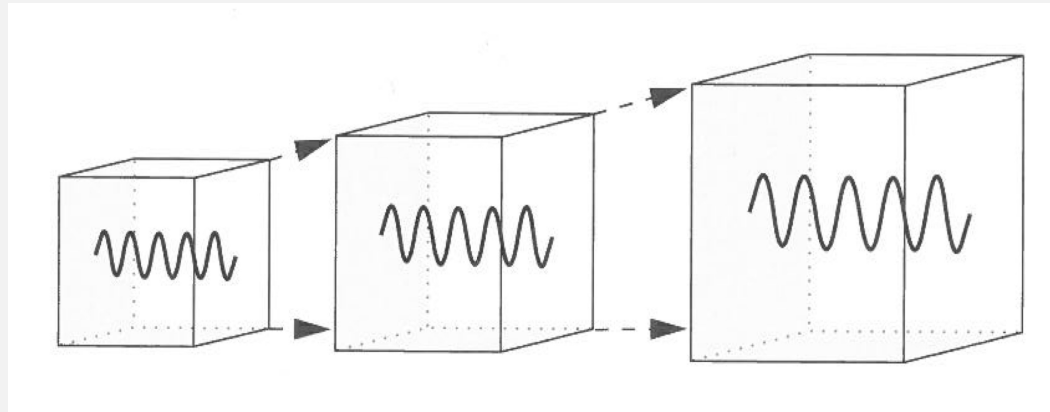
SN 1995K

“SN 1995K ist die am weiteste entfernte Supernova (ja, der am weitesten entfernte Stern!) der jemals beobachtet wurde.”



Einschub: Zeitdilatation

Vorhersage für ein expandierendes Universum



Uhren im entfernten Universum sollten langsamer laufen

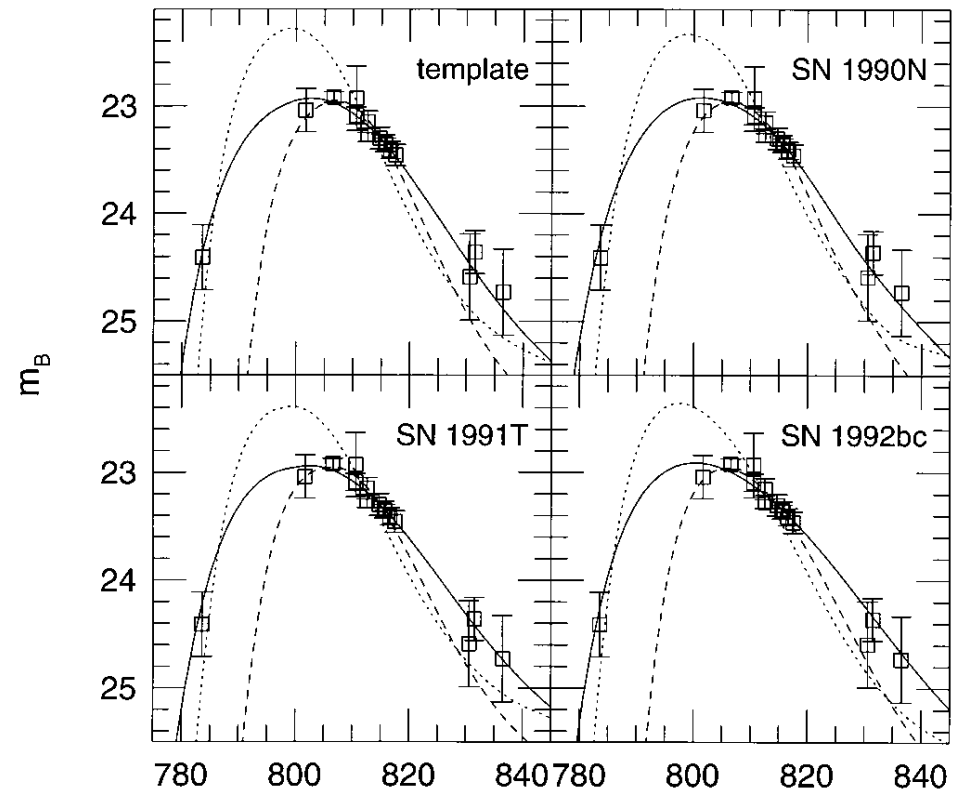
Problem: Geeignete 'Uhr' zu finden

Zeitdilatation

Lichtkurven von Typ Ia Supernovae sind homogen

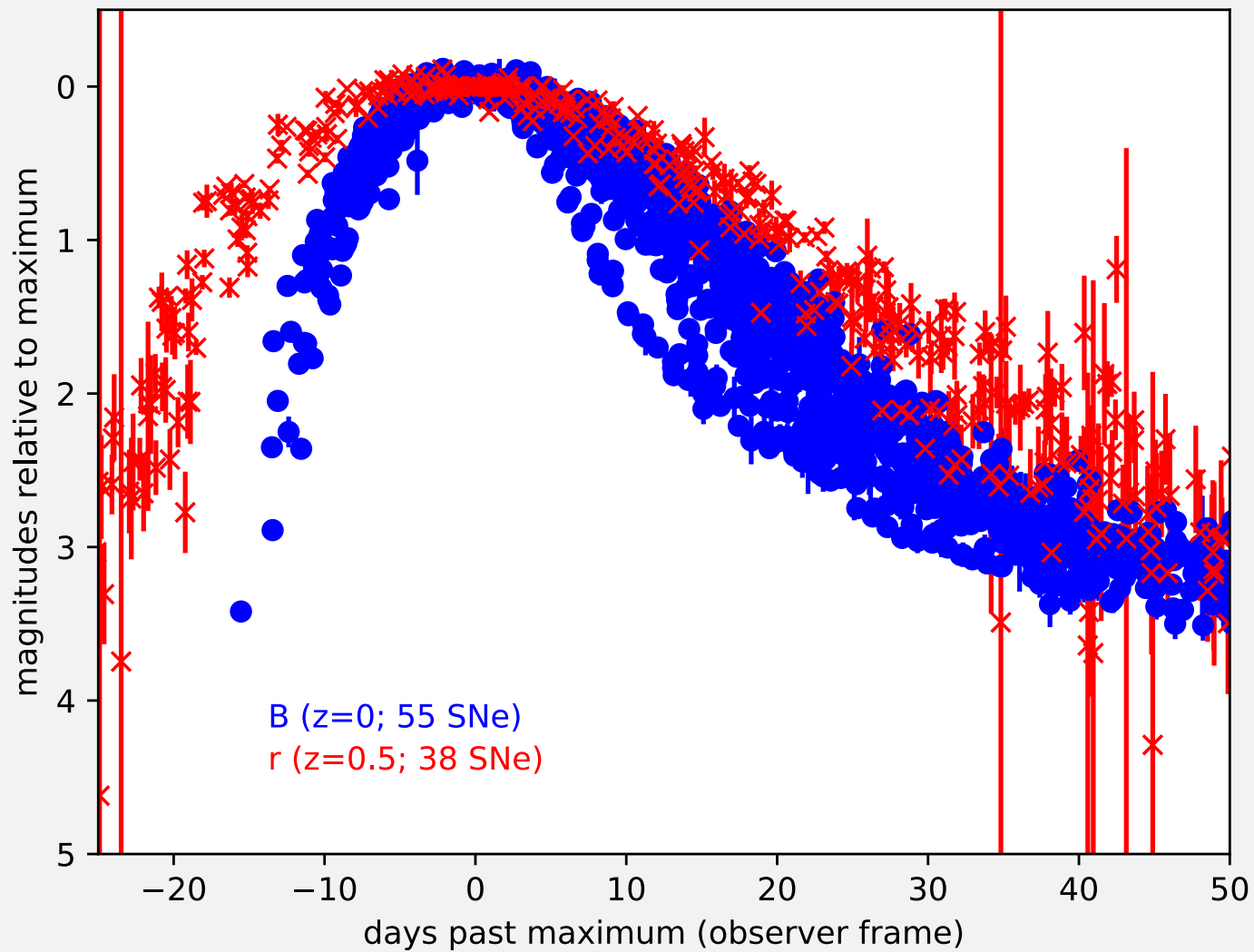
Vergleich einer entfernten (SN 1995K mit $z=0.479$) mit einer nahen SN Ia sollte den Effekt deutlich zeigen

$$t_{obs} = (1 + z)t_{rest}$$

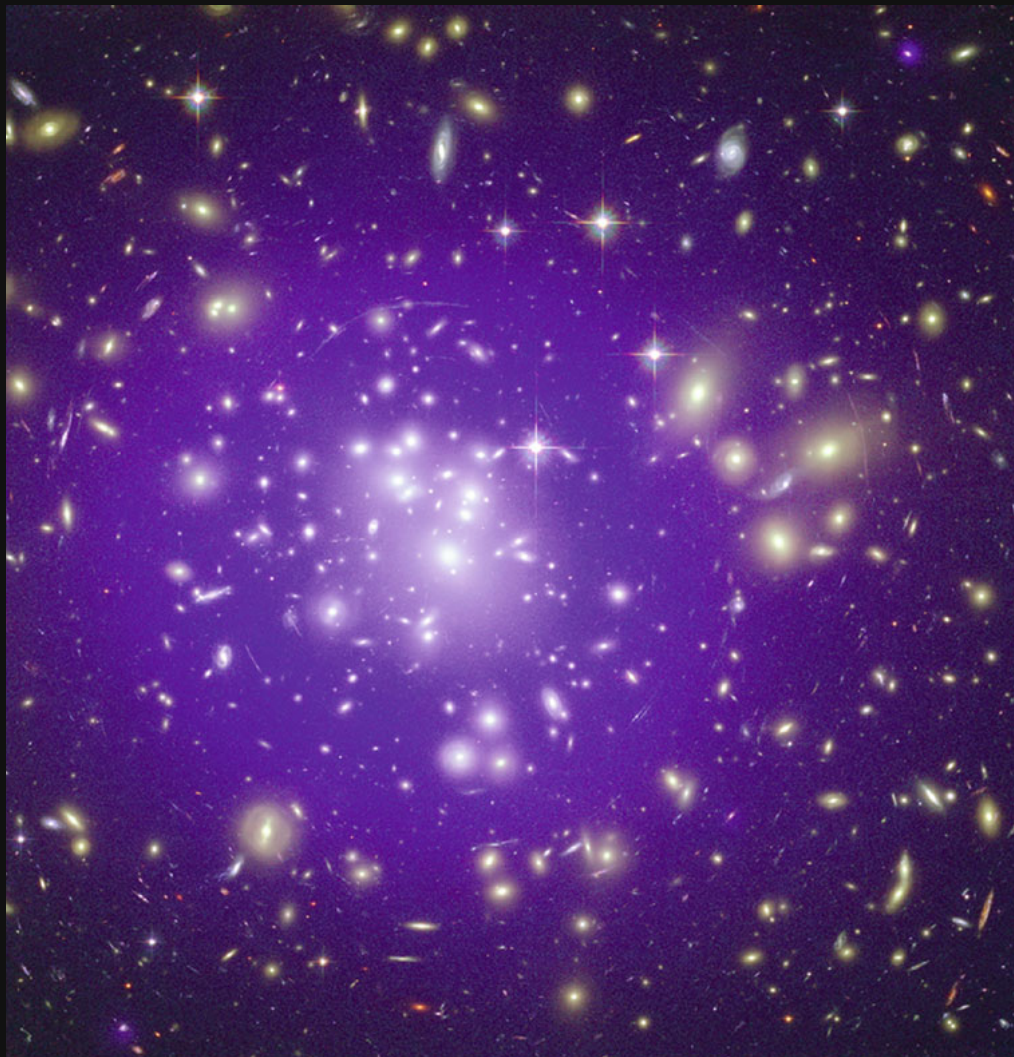


Leibundgut et al. 1996 JD (2449000+)

Zeitdilatation



Starke Gravitationslinsen



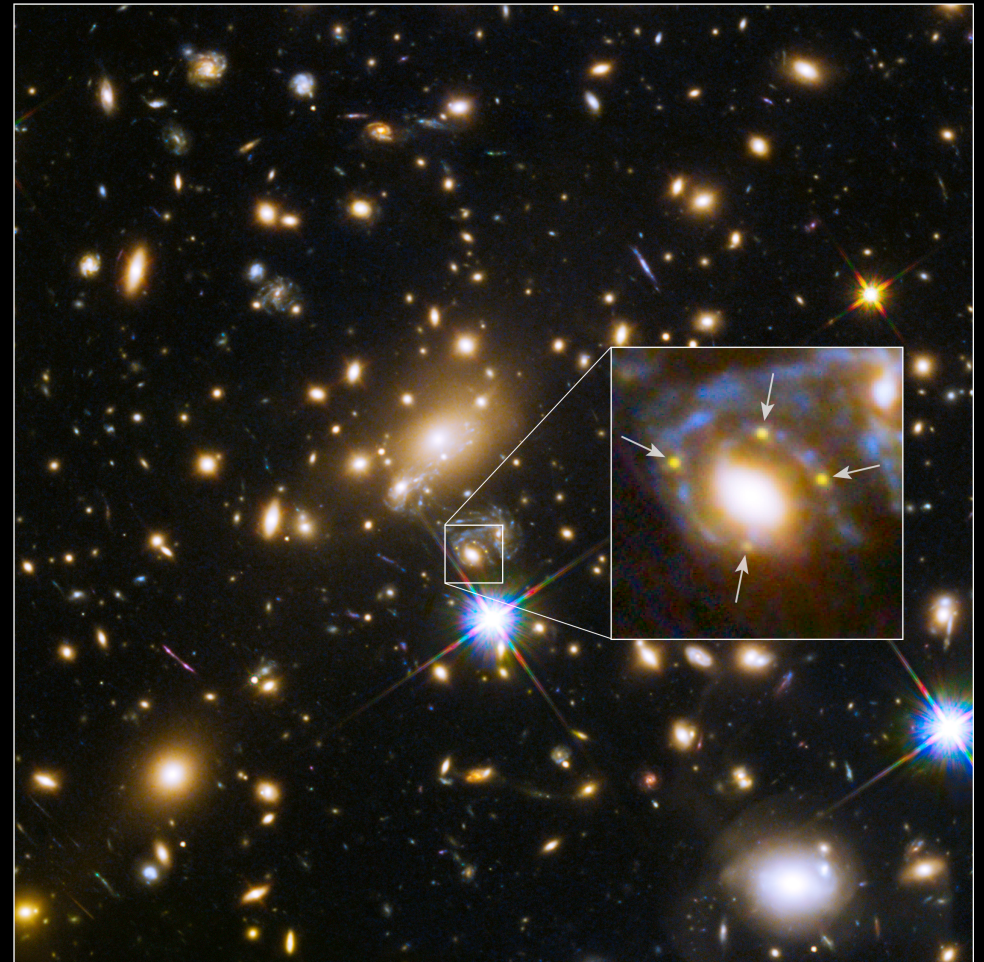
Abell 1689
ACS/HST



Ein extremes Beispiel

SN Refsdal

- mehrfach abgebildete Supernova
- unterschiedliche Weglängen der einzelnen Bilder
→ Bilder erscheinen zu unterschiedlichen Zeiten



Supernova Refsdal ■ Galaxy Cluster MACS J1149.6+2223
Hubble Space Telescope ■ ACS/WFC ■ WFC3/IR

NASA and ESA

STScI-PRC15-08a

SN Refsdal

Erschien im
November 2014

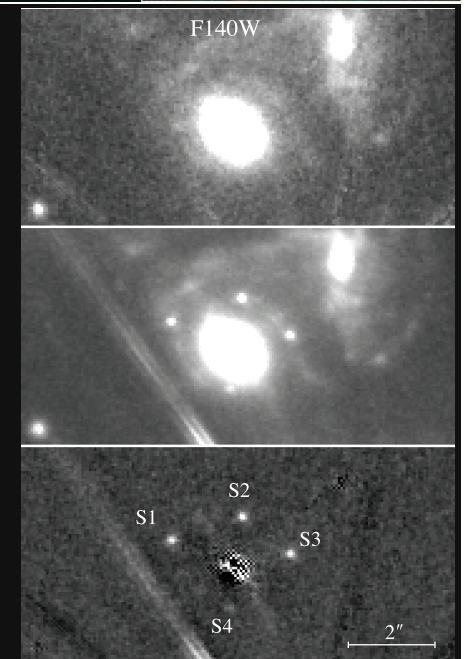
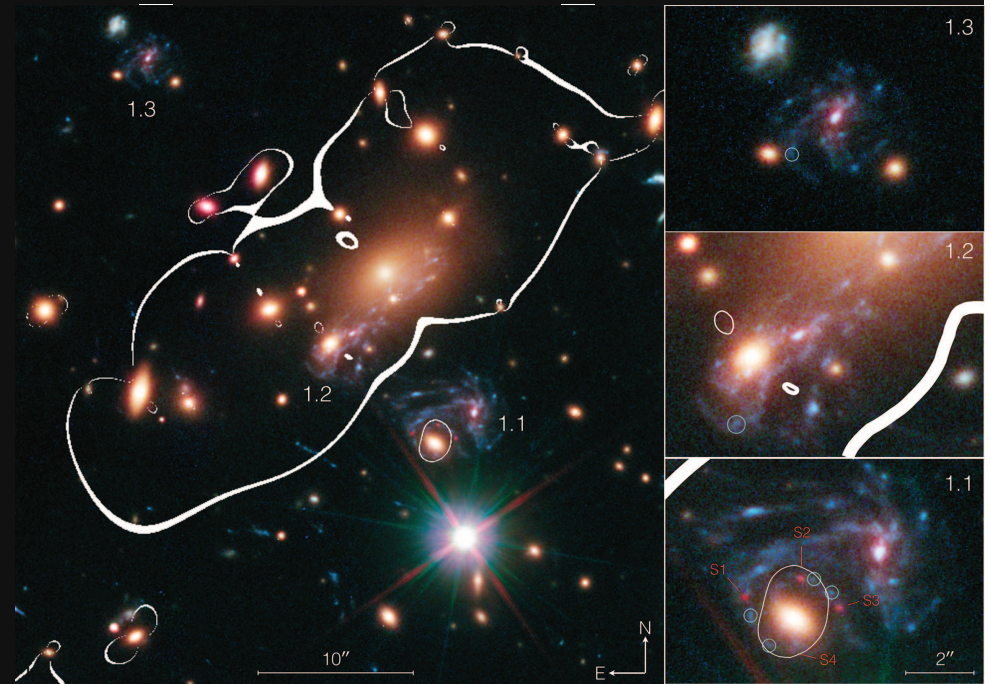
Galaxienhaufen

Rotverschiebung

$$z_{cluster} = 0.54$$

SN Rotverschiebung

$$z_{SN} = 1.49$$

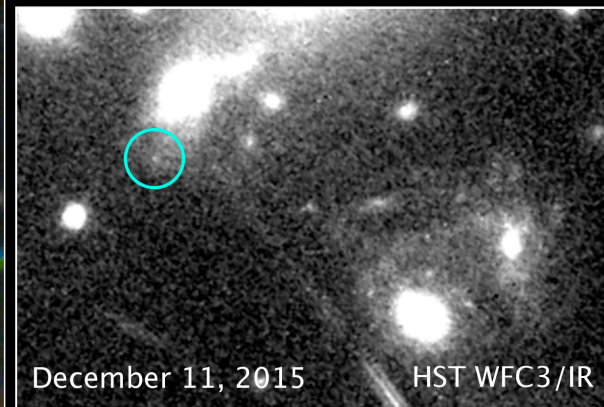
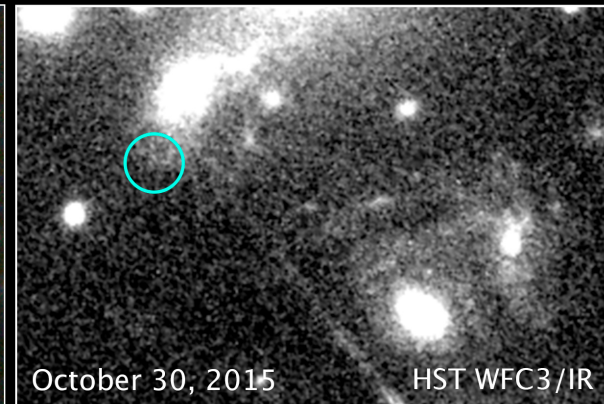
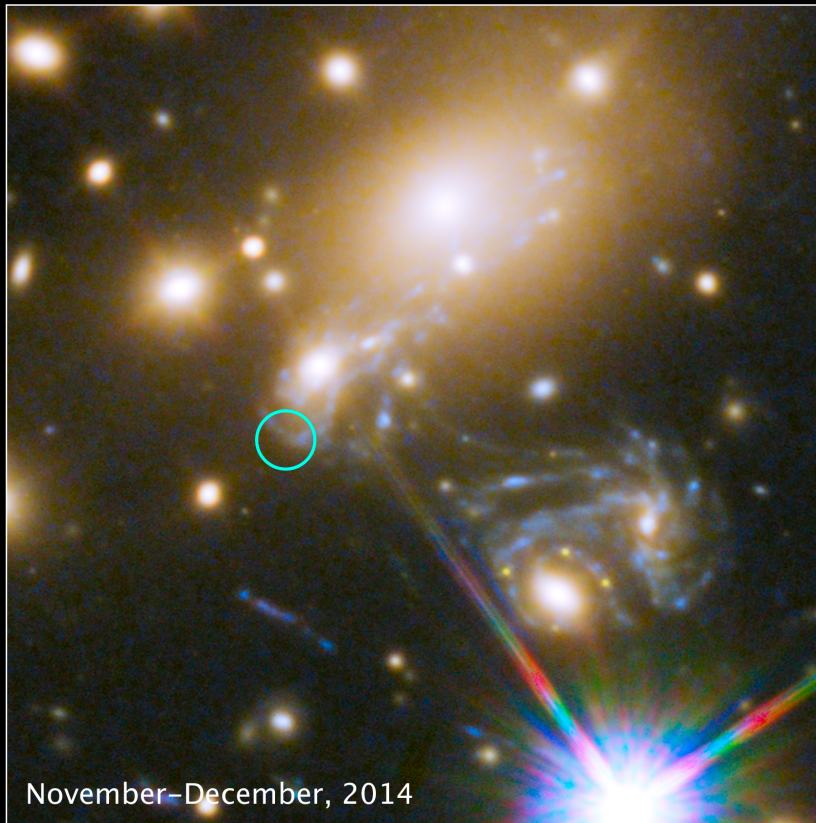


Kelly et al. 2015

SN Refsdal

Nächste "Erscheinung" wurde für
Dezember 2015 vorhergesagt

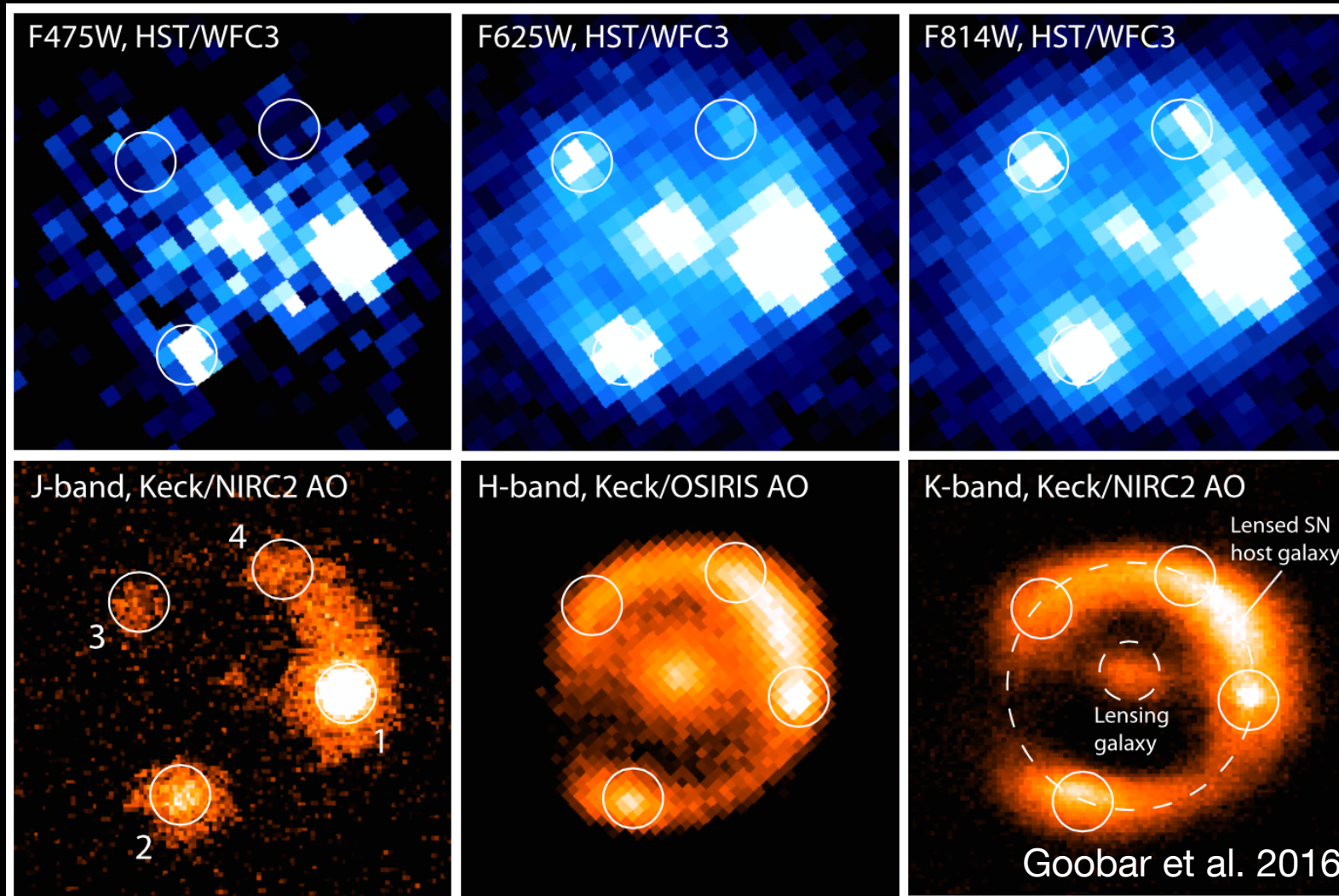
Supernova Refsdal • Galaxy Cluster MACS J1149.5+2223 • HST WFC3 ACS



NASA, ESA, and P. Kelly (University of California, Berkeley)

STScI-PRC15-46a

Erste Typ Ia SN hinter einer Linse (SN iPTF16geu)



Fundamente der Kosmologie

Gravitationstheorie

- Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

Isotropie

- Es gibt keine bevorzugte Richtung im Universum

Homogeneität

- Es gibt keine bevorzugte Region
- (e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)

Anthropisches Prinzip

- Das Universum hat uns erzeugt



WALL OF FAME
ALL BENCHES
FOR WORLD
CUP
L10, MAX 2003

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

A. EINSTEIN

E. RAN S. ALBA

INDAM
VOLK

Friedmann Kosmologie

Annahme

ein homogenes und isotropes Universum

Nullgeodesie in der Friedmann-Robertson-Walker Metrik:

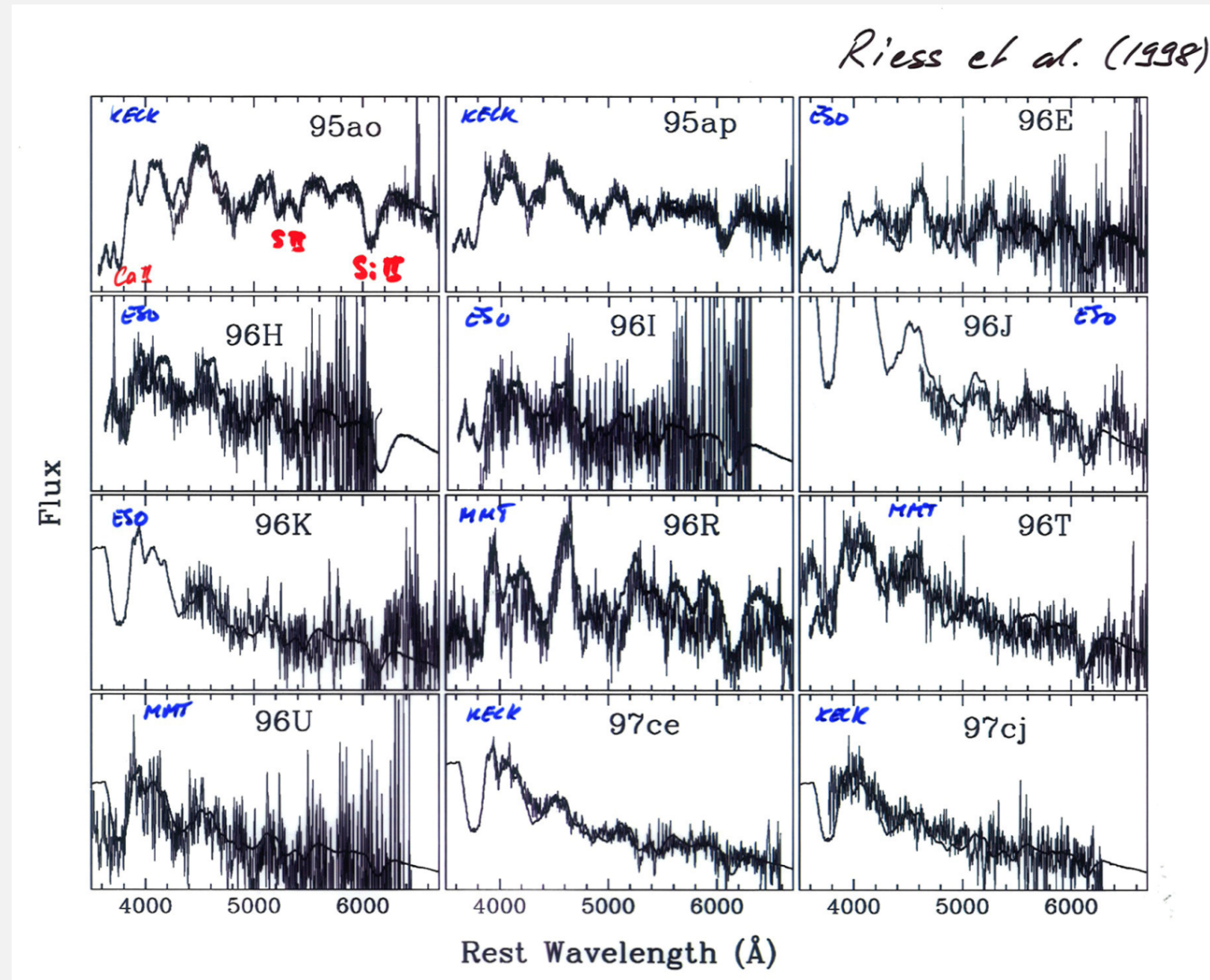
$$D_L = \frac{(1+z)c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} S \left\{ \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \left[\Omega_k (1+z')^2 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} dz' \right\}$$

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

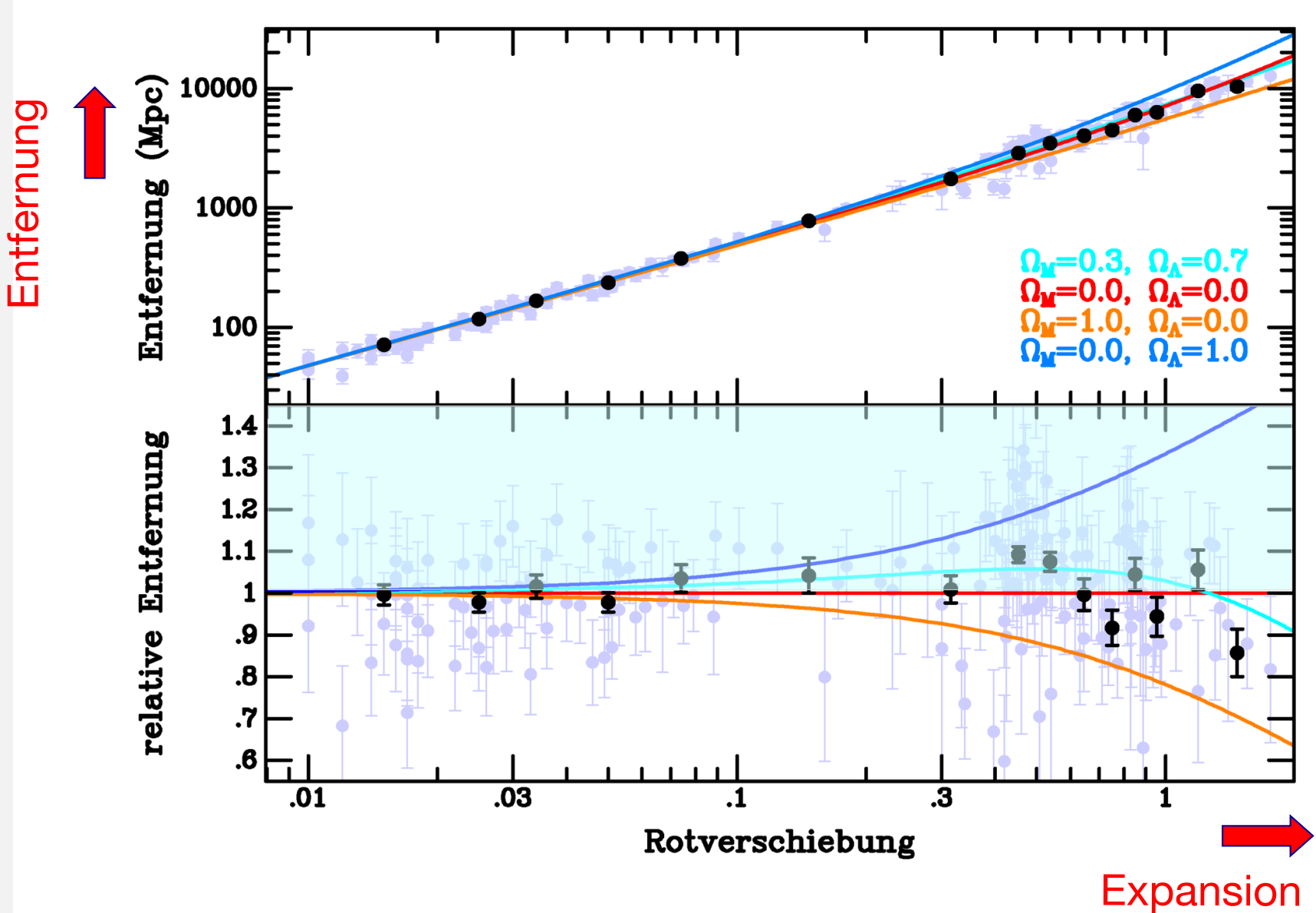
$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R^2 H_0^2}$$

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

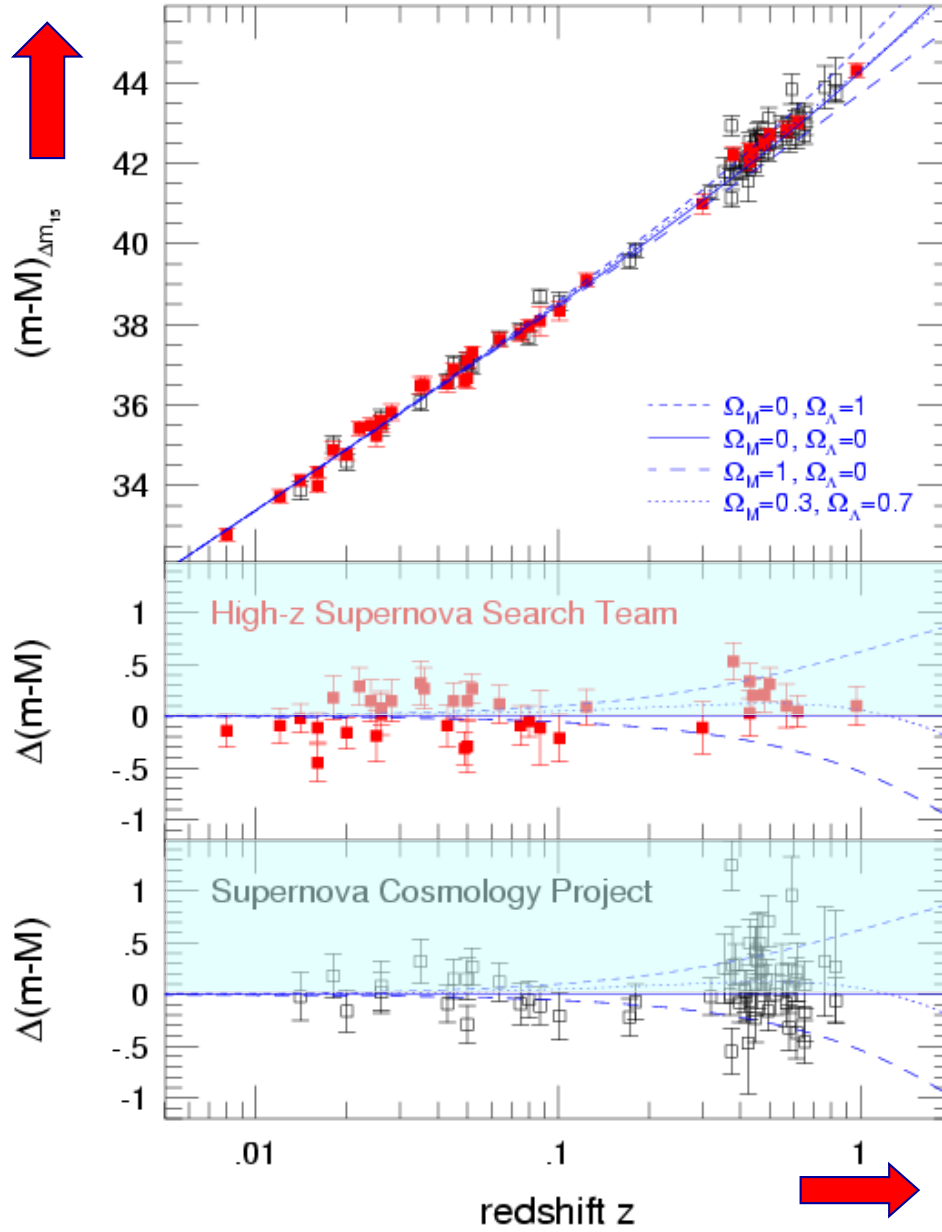
Spektroskopie der entfernten Typ Ia Supernovae



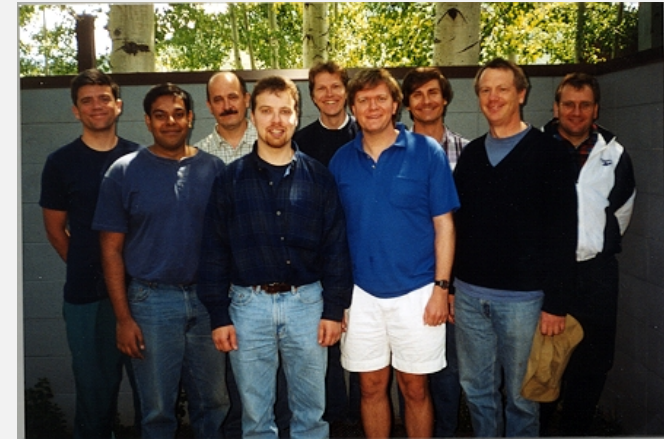
Das vollständige Hubble Diagramm



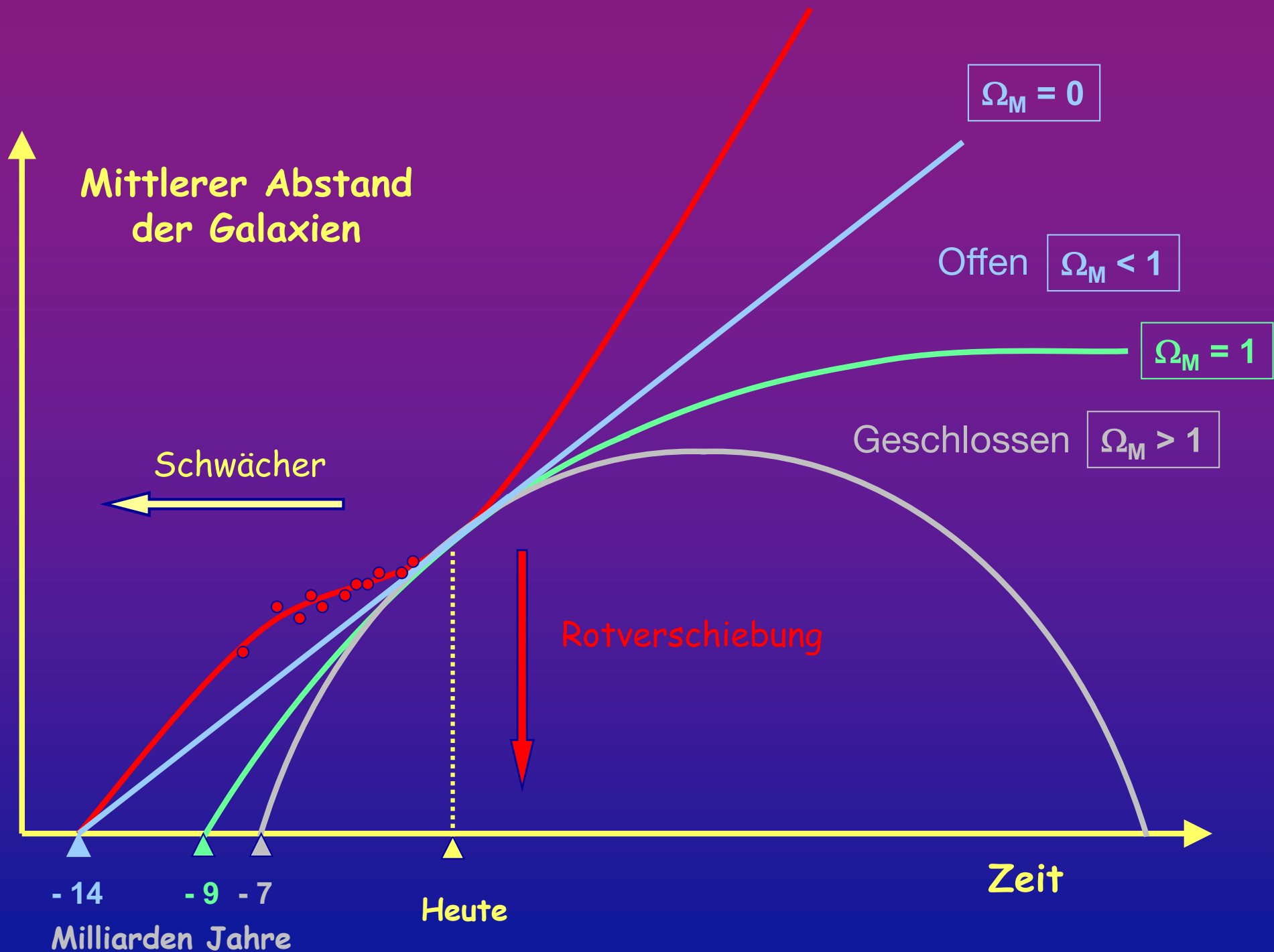
Entfernung



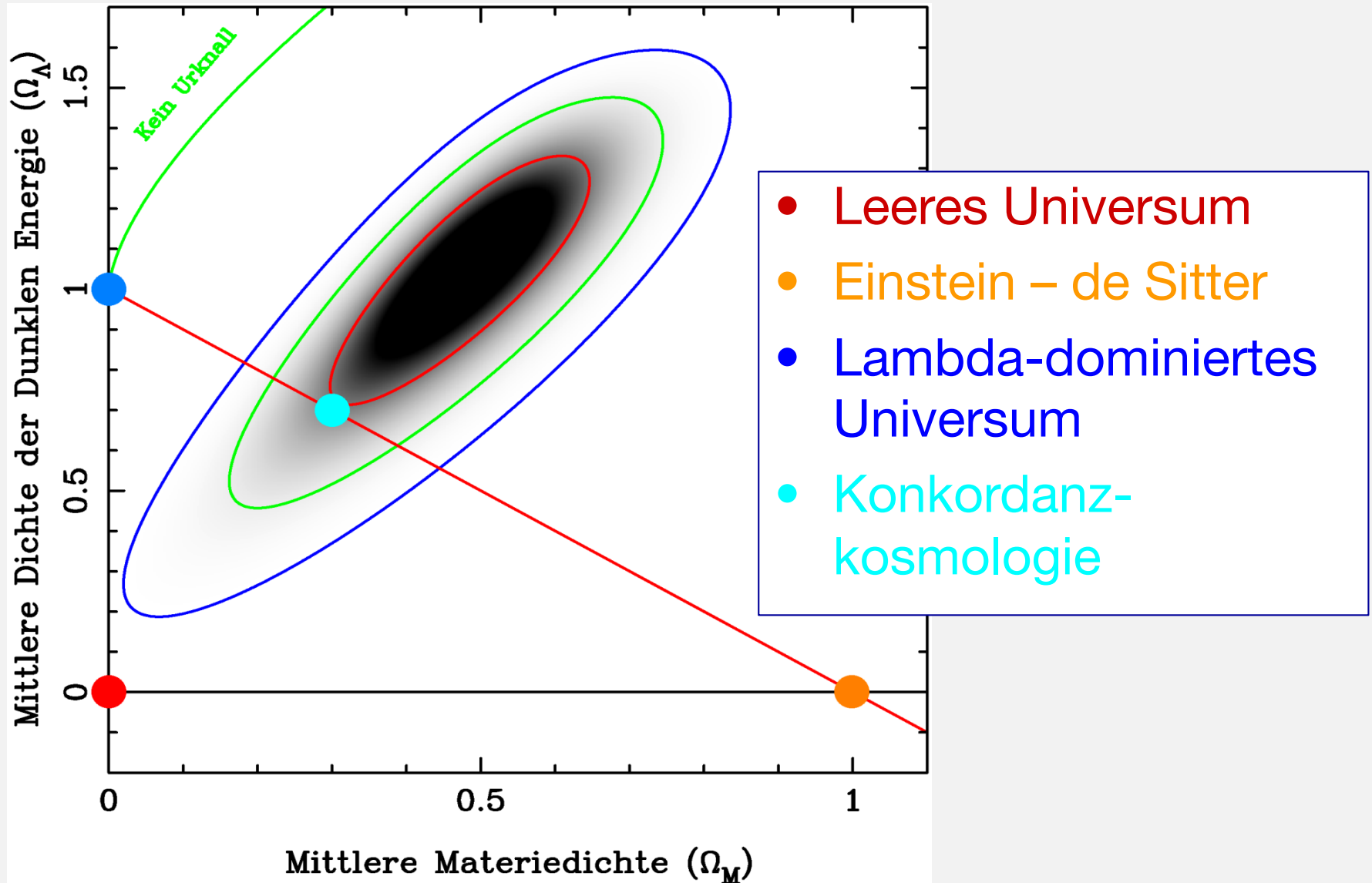
Das SN Hubble Diagramm



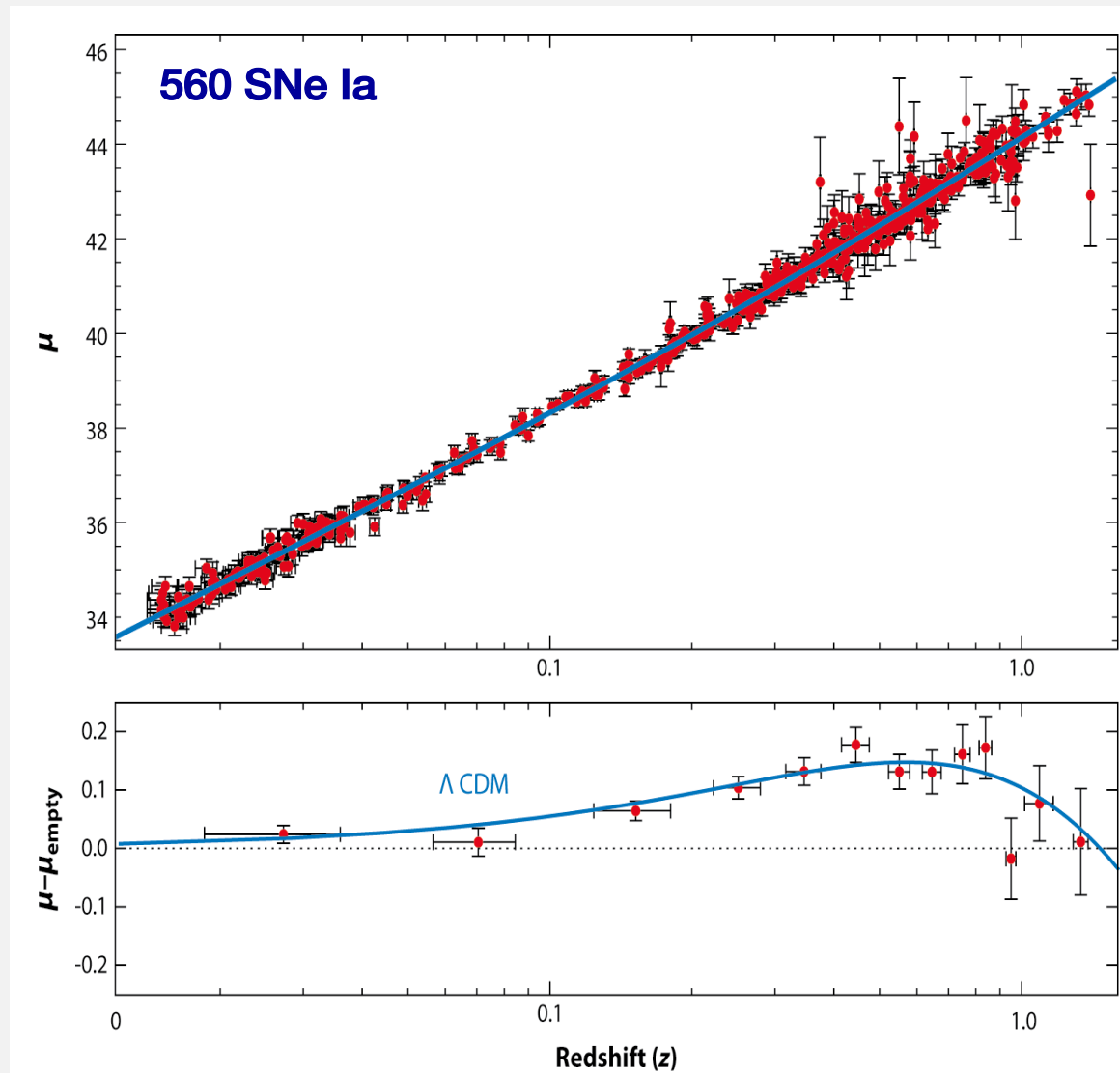
Expansion




Kosmologische Implikation



Supernova Kosmologie



 Goobar A, Leibundgut B. 2011.
Annu Rev. Nucl. Part. Sci. 61:251–79

Der Zustandsgleichungsparameter ω

Allgemeine Leuchtkraft Entfernung

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

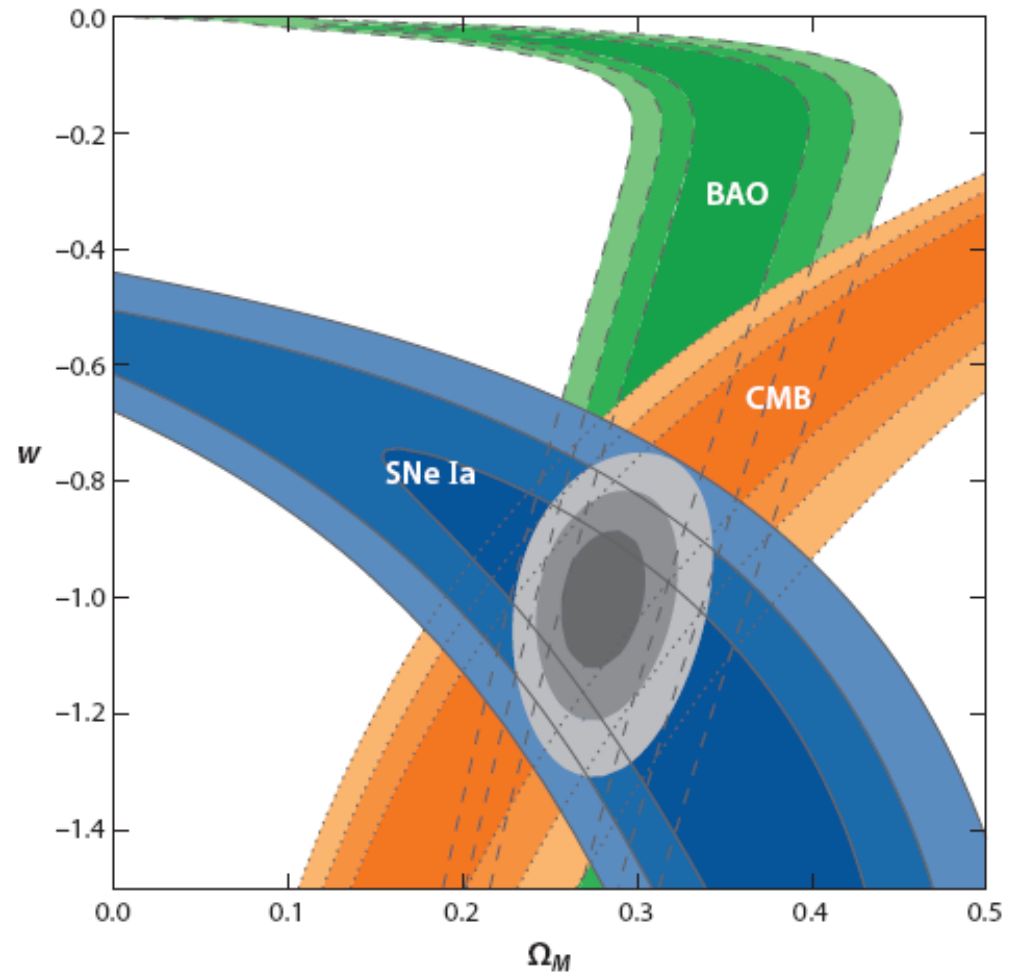
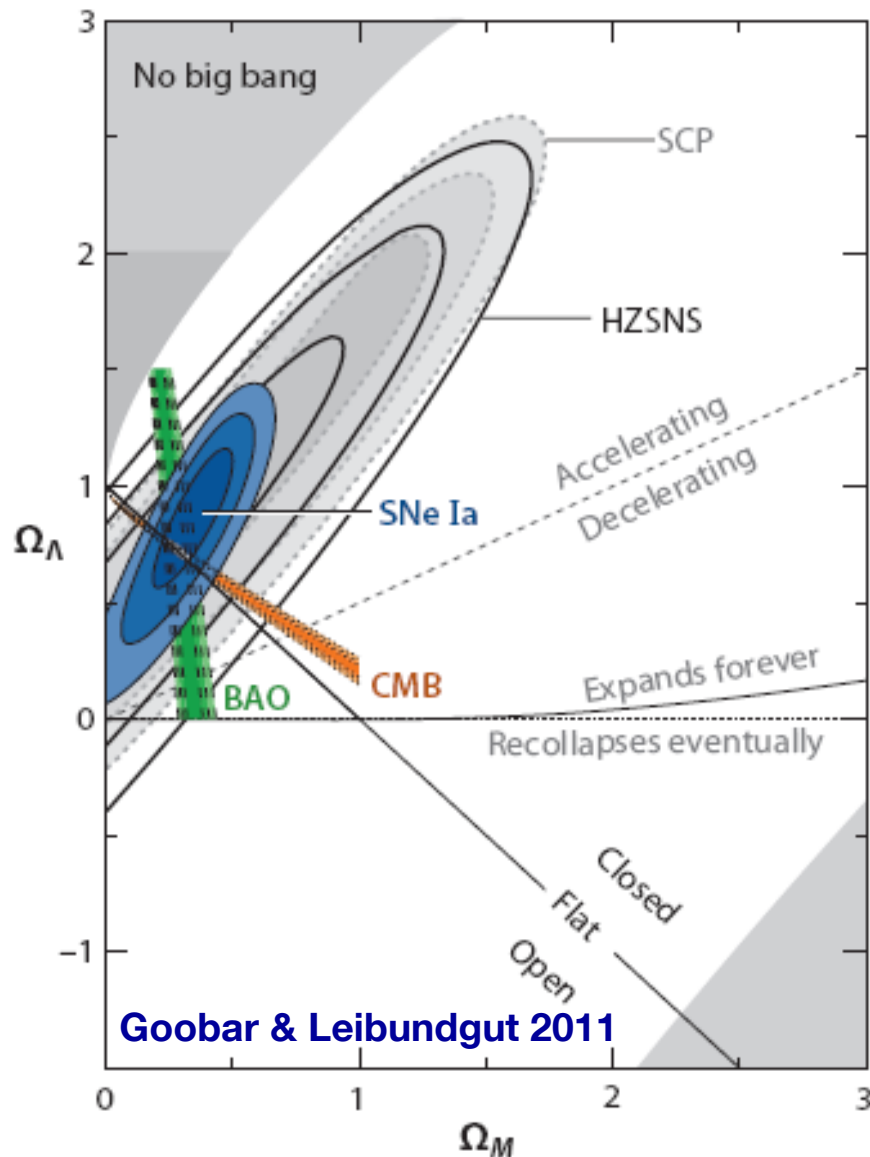
– mit $\Omega_K = 1 - \sum_i \Omega_i$ und $\omega_i = \frac{p_i}{\rho_i c^2}$

$\omega_M = 0$ (Materie)

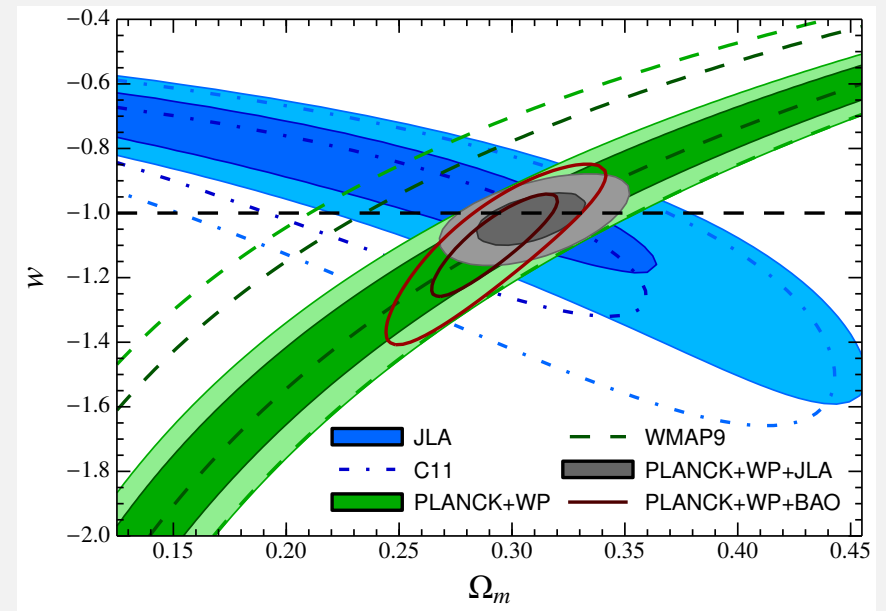
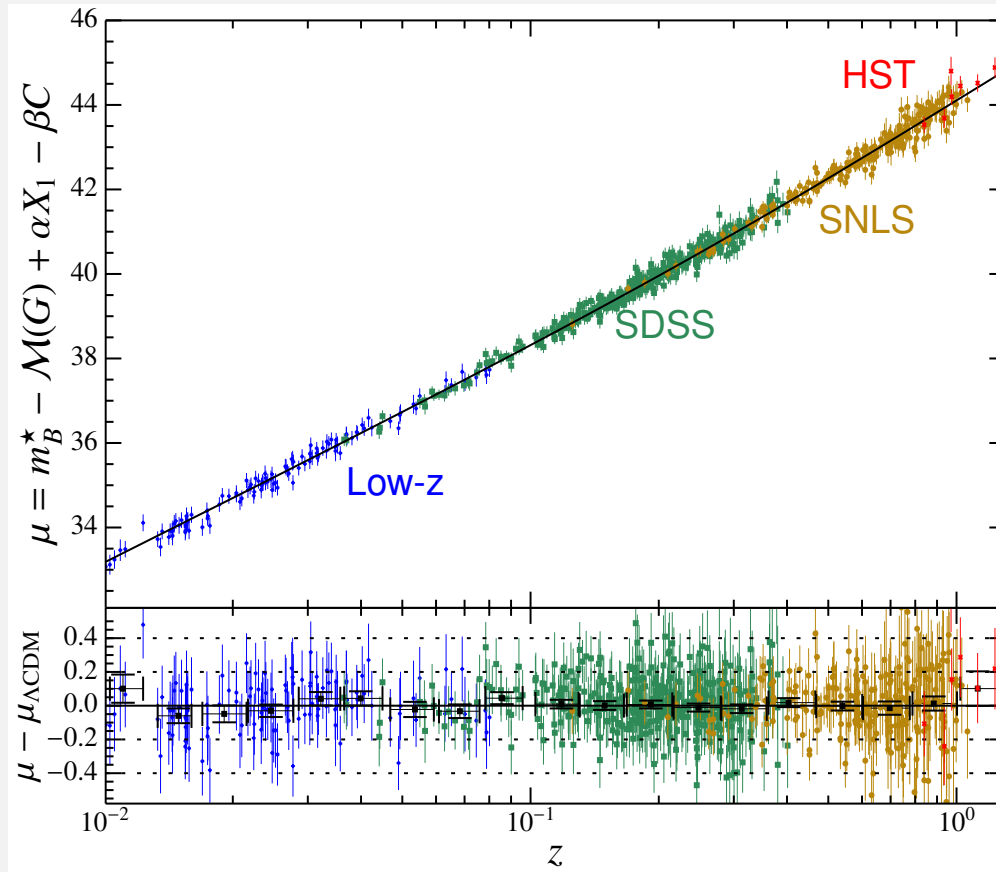
$\omega_R = \frac{1}{3}$ (Strahlung)

$\omega_\Lambda = -1$ (kosmologische Konstante)

15 Jahre Fortschritt



Neuste Messungen



Betoule et al. 2014

Entfernt
als in e
ungebr
Dies ka
Kompo

30 April 2017

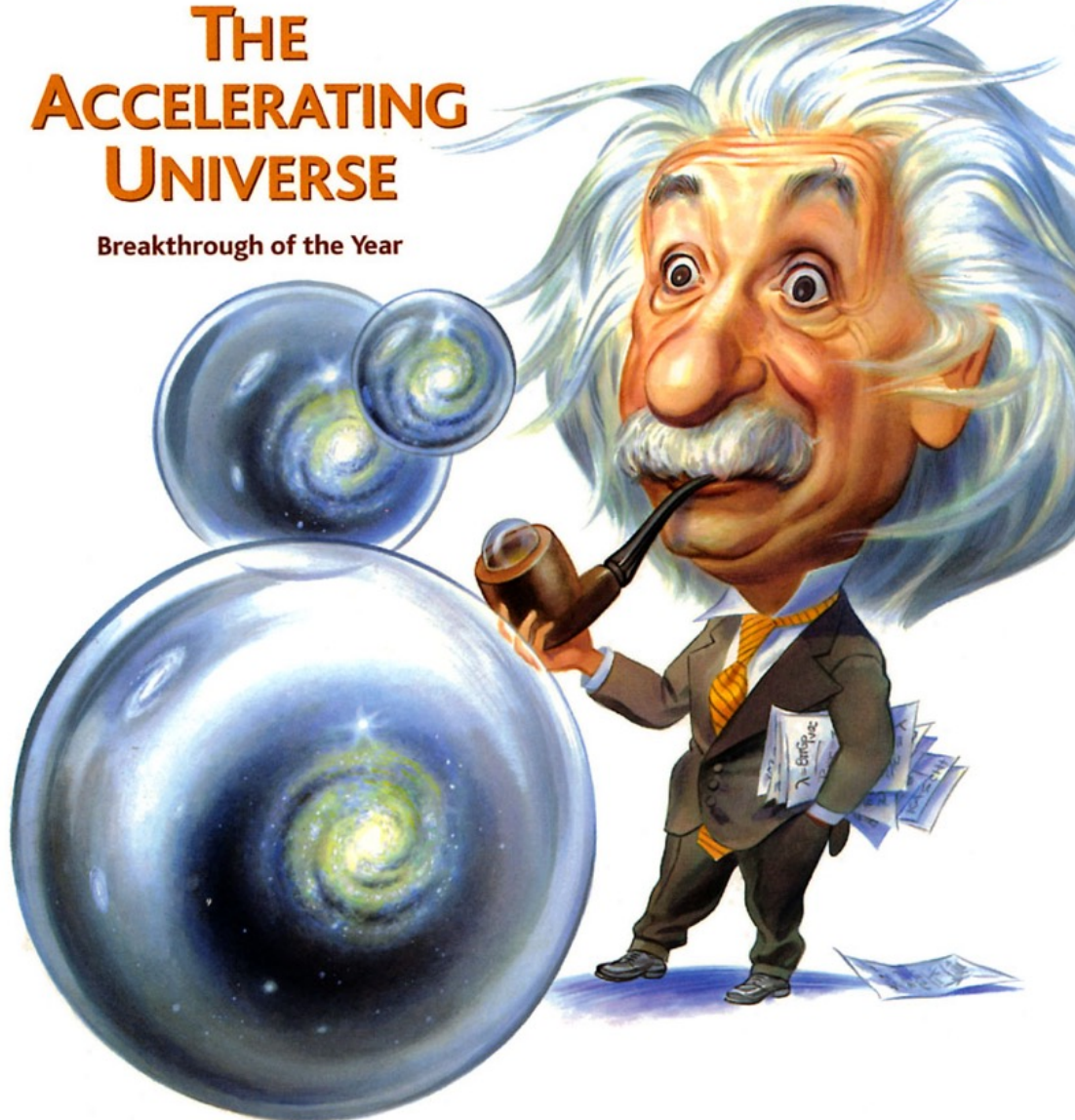
Science

18 December 1998

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

THE ACCELERATING UNIVERSE

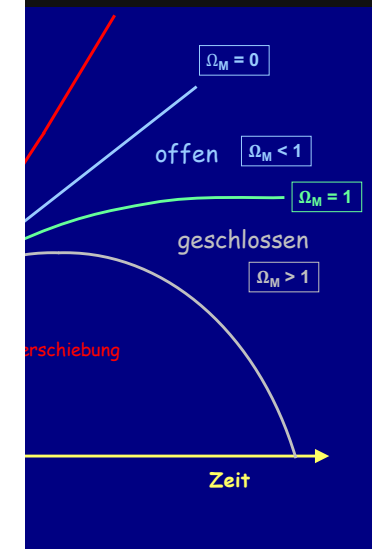
Breakthrough of the Year



AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

ntfernt

de



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 Feldgleichungen der Gravitation noch einer kleinen Modifikation be-

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

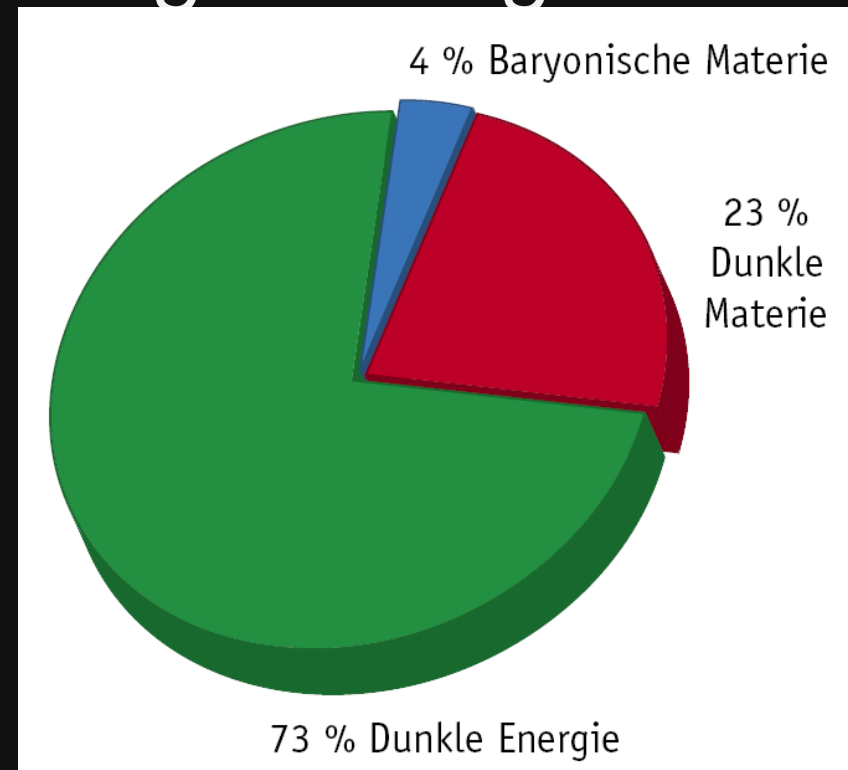
sphärischen Raum approximieren. Sicherlich ist diese Auffassung gegenwärtig widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser 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)

Der Inhalt des Universums

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

Was sind sie?



Was bedeutet das?

Das Universum besteht im wesentlichen aus
nichts.

Das Universum expandiert für immer.

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

Nur 4% des Universums sind aus
demselben „Stoff“ wie wir (und alles, das
wir kennen).

Interpretationen/Spekulationen

Einsteins Kosmologische Konstante

Bisher kein "Platz" im Standard Model der Teilchenphysik

Quintessence

Quantenmechanisches Teilchenfeld, dass 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

Baryonische Materie einzige die klumpt

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