

Supernovae

Felicia Krauß

20. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

- 1 Historisch
- 2 Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
- 3 Physikalische Mechanismen
- 4 Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
- 5 Supernova 1987 A
- 6 Supernova Überreste
- 7 Supernovae als Standardkerzen
- 8 Anwendung in der Kosmologie

Historisch

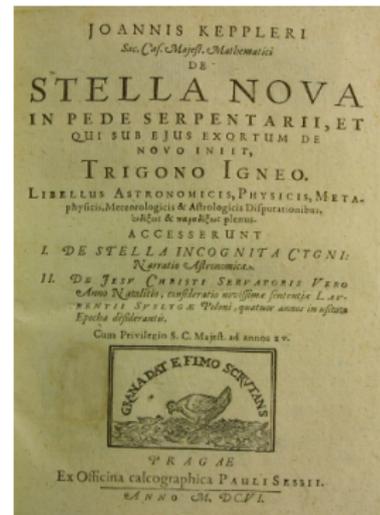
Tycho Brahe: SN 1572

Nova (lateinisch): neu

Brahe: „*De nova et nullius ævi memoria prius visa Stella*“

Johannes Kepler: SN 1604

Kepler: „*De Stella Nova*“





<http://fuse.pha.jhu.edu/~wpb/Kepler/book.html>

Historisch

Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

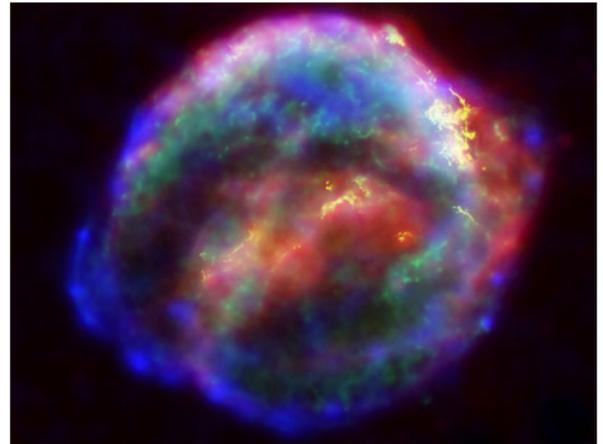
Wortherkunft
Übersicht
SN 1054

SN 1604

heute: Supernova Überrest



<http://fuse.pha.jhu.edu/~wpb/Kepler/book.html>



Quelle: NASA;
<http://chandra.harvard.edu/photo/printgallery/2004/>

Jahr	Position	Überrest	m_v [mag]
185	Zentaur	RCW 86	-6
386	Schütze	G11.2-03	?
393	Skorpion	?	- 3
1006	Wolf	PKS 1459 - 41	-7.5 ± 0.4
1054	Stier	Krebsnebel	-6
1181	Kassiopeia	3C 58	-2
1572	Kassiopeia	3C 10	-4
1604	Schlangenträger	Keplers SN	-2
1680	Kassiopeia	Cassiopeia A	+6
1885	Andromedanebel	S Andromedae	+6
1979	M 100	-	11.6
1987	LMC	SN1987A	+3

Supernova 1054

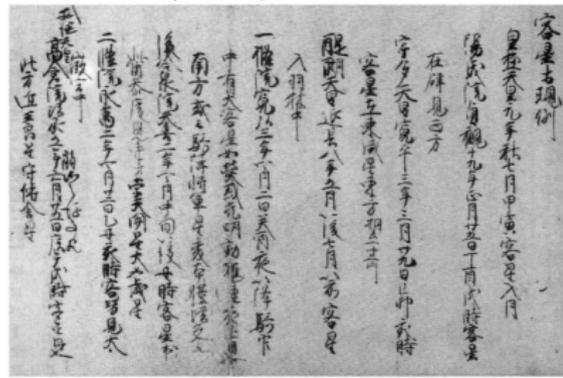
„On the 1st year of the Chi-ho reign period, 5th month, chi-chou [July 4, 1054], a **guest star** appeared approximately several inches to the southeast of Tian-kuan [Aldebaran]. After a year and more it gradually vanished.“

Sung-shih, Kapitel 9



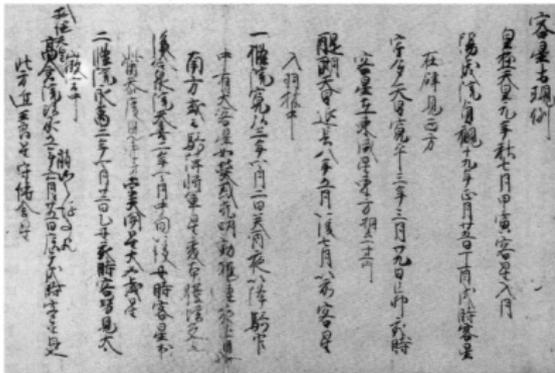
<http://hera.ph1.uni-koeln.de/~heintzma/NS1/>

3C58 Crab SN1006 超新星残骸
 1181年 1054年 1006年 西曆



Fujiwara no Teika

3C58 1181年 Crab 1054年 SN1006 1006年 超新星残骸 西曆



Fujiwara no Teika

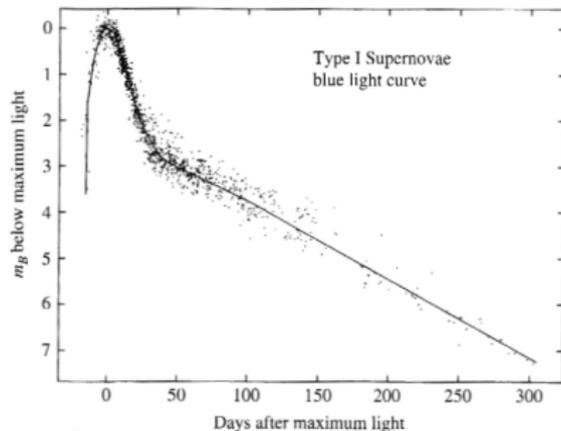
SN 1054

„In the fifth month, day 20 to 29 (19 June to 28), the second year in the Ten Ki Period (1054), at midnight, a guest star could be seen at Shi Shin (east of Orion). It was close to Taurus and as big as Jupiter.“

Übersetzung: Hiroyuki Takahata

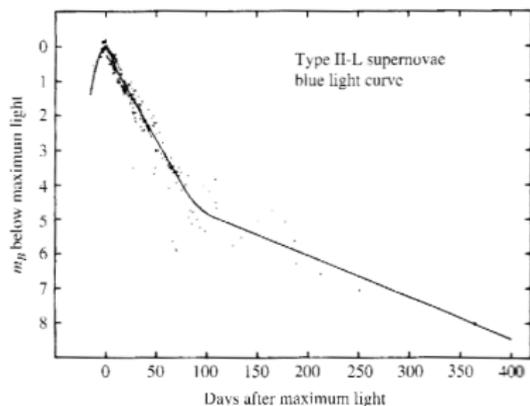
Supernova Typ I

Ia: $M_B = -19.5 \text{ mag}$
Ib, Ic: $M_B \approx -16 \text{ mag}$



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.9)

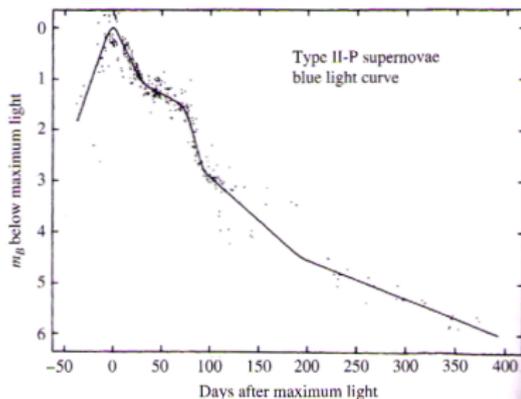
Supernova Typ II-L



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.9)

- $M = -17.6 \pm 0.4 \text{ mag}$
- linearer Abfall der Lichtkurve

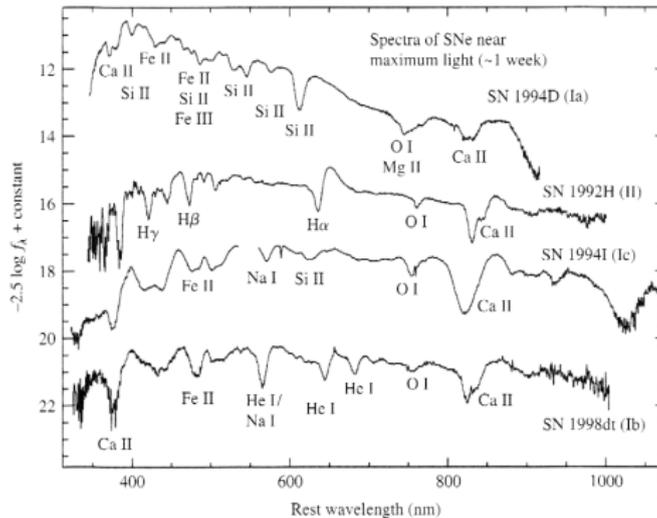
Supernova Typ II-P



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.9)

- Plateau: konstante Helligkeit über mehrere Wochen
- $M \sim -17.0 \text{ mag}$

Spektrum

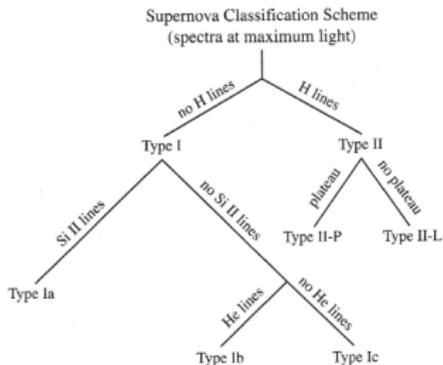


Typ I: Kein H
Ia: Si bei 615 nm
Ib: He
Ic: kein He

Typ II: H

(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.6)

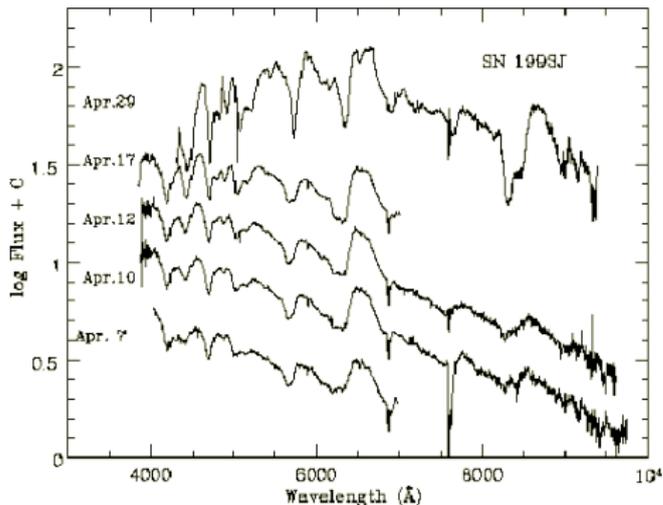
Spektrum



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.9)

- Ia: tritt in allen Galaxien auf
- Ib, Ic, II: nur in Spiralgalaxien, H II-Regionen

SN 1993 J



nur 1987 K ähnliche Verhaltensweise:

- starke H_{α} Linie, Typ II
- Veränderung zur He I - Linie, Typ Ib
- Lichtkurve ähnlich wie Ib
- Klassifizierung als „Iib“

(<http://www.pha.jhu.edu/~qzhang/seminar1bfigs/node9.html>)

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Thermonukleare Explosion, Doppelsternsysteme
Kernkollaps, Neutronensterne, Pulsar

Supernovae Ia - Übersicht

Weißer Zwerg

Doppelsternsystem

Gravitationsdruck \leftrightarrow Entartungsdruck

Weißer Zwerg akkretiert Masse
 \rightarrow Gravitationsdruck größer als Entartungsdruck
 \Rightarrow Supernova

Modelle

- 1 „single - degenerate“
Weißer Zwerg und Hauptreihenstern
- 2 „double - degenerate“
zwei weiße Zwerge

single - degenerate

Bedingungen

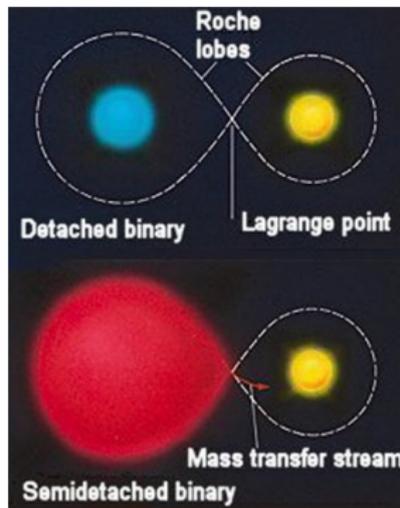
- Begleiter wird zum Roten Riesen
- enges Doppelsternsystem
- Akkretion: $10^{-7} \frac{M_{\odot}}{y}$
- Zeit zur Freisetzung der Energie: wenige Sekunden
- verliert während Sternentwicklung äußere Schichten

→ benötigt Fusion von C,O zu schweren Elementen

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Thermonukleare Explosion, Doppelsternsysteme
Kernkollaps, Neutronensterne, Pulsar

Akkretion



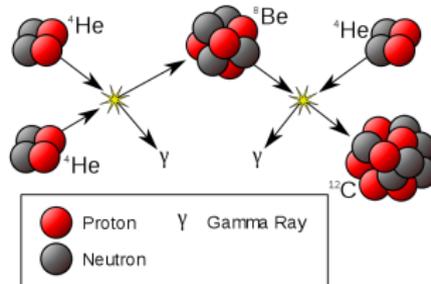
http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/images/close_binary.jpg

Video! <http://www.eso.org/public/videos/eso0943b/>

3 α - Prozess

Akkretion

- Weißer Zwerg akkretiert Masse
- Fusionsprozesse an Oberfläche



<http://en.wikipedia.org/wiki/User:Bob>

Thermonukleare Explosion

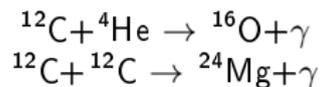
Thermonukleare Explosion

Gravitation > Entartungsdruck
→ Kontraktion, Temperatur steigt

$v \propto T^{27} \rightarrow \textit{Thermal Runaway}$

Kohlenstoffbrennen in wenigen Sekunden

Kohlenstoff-Brennen:



Deflagration und Detonation

Deflagration Stoßwelle des C-Brennen langsamer als lokale Schallgeschwindigkeit

Detonation Stoßwelle schneller als lokale Schallgeschwindigkeit

bestes Modell: erst Deflagration, dann Detonation

Produkte: ^{56}Ni ; S, Si, Mg; Ca, Ar, S

Thermonukleare Explosion

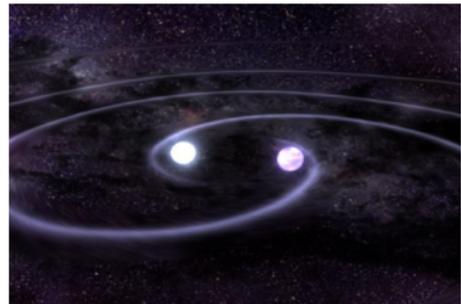
- freigesetzte Energie: $\sim 10^{51} \text{ erg}$
- Stern explodiert, mit Geschwindigkeiten $\sim 0.05c$
- Überrest: expandierende Gaswolke
- Begleiter: Runaway-Stern

Supernova nur beobachtbar wegen Zerfälle, Comptoneffekt, Absorption

double - degenerate

Vereinigung weißer Zwerge

- Gravitationswellenabstrahlung: Verlust an Energie, Drehimpuls
- masseärmerer Stern: Überschreiten des Roche-Limits
- Akkretion durch massereichen Stern



http://chandra.harvard.edu/photo/2005/j0806/wd_00.jpg

double-degenerate

- hohe Gezeitenkräfte

→ in wenigen Umläufen Zerstörung des masseärmeren Zwerges

- massereicher Stern nimmt Überreste über Akkretionsscheibe auf
- $M > 1.44 M_{\odot}$: zünden des C-Brennens

→ Supernova Explosion

Kernkollaps - Übersicht

Entdeckung 1982: Jim Wilson

Masse

Kernkollaps: bei massereichen Sternen mit $M > 8 M_{\odot}$

Überriesen: Typ II, mit $M \approx 8 - 30 M_{\odot}$

Sterne mit $M > 30 M_{\odot}$: Typ Ib, Ic

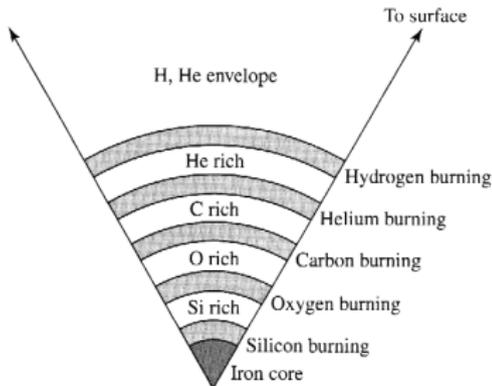
Typ Ib,Ic: instabil verlieren Wasserstoffhülle (Wolf-Rayet - Phase)

Ic verliert Heliumhülle

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Thermonukleare Explosion, Doppelsternsysteme
Kernkollaps, Neutronensterne, Pulsar

Entwicklung



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.10)

Wasserstoff größtenteils verbraucht,
Temperatur hoch genug: weitere
Fusionsprozesse

→ Bildung einer
Zwiebelschalenstruktur

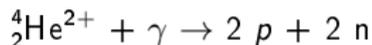
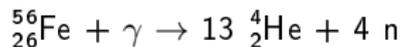
Wiederholung: Kernfusion

Element	Prozess	Temperaturschwelle [K]	Produkte	Energie [MeV]	Dauer
H	p-p	$4 \cdot 10^6$	He	6.55	$10^7 y$
H	CNO	$15 \cdot 10^6$	He	6.25	-
He	3α	$100 \cdot 10^6$	C, O	0.61	$10^6 y$
C	C+C	$600 \cdot 10^6$	O, Ne, Na, Mg	0.54	$10^3 y$
O	O+O	$1000 \cdot 10^6$	Mg, S, P, Si	0.3	100d
Si	Si	$3000 \cdot 10^6$	Co, Fe, Ni	< 0.18	5d

Photodesintegration

Kernmasse: $1.3 M_{\odot} < M < 2.5 M_{\odot}$

Atomkerne werden gespalten:



- in kurzer Zeit: schwere Elemente werden gespalten
- endothermer Prozess

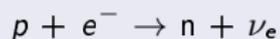
→ Gravitation > Strahlungsdruck
Kern kontrahiert

Neutronisation

extreme Bedingungen:

$$T_c \sim 8 \cdot 10^9 \text{ K}, \rho_c \sim 10^{13} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Neutronisation/ ϵ -Zerfall

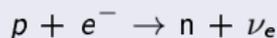


Neutronisation

extreme Bedingungen:

$$T_c \sim 8 \cdot 10^9 \text{ K}, \rho_c \sim 10^{13} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Neutronisation/ ϵ -Zerfall



- Einfang freier Elektronen
- Kraft durch Entartungsdruck der Elektronen sinkt

⇒ Kernkollaps

Kernkollaps

- Kern kollabiert, $v \sim r$
 - bei $r \sim 30\text{km}$ Geschwindigkeiten $>$ lokale Schallgeschwindigkeit
 - äußere Schicht löst sich von innerer Schicht
 - Kern kontrahiert bis $\rho_C \sim 8 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 - Entartungsdruck der Neutronen
- Bildung eines Neutronensterns
- Dichte hoch → Rückstoß nach außen
- Explosion

Kernkollaps II

- Schockwelle gebremst durch einfallendes Material
- optisch dicht, Neutrinos können nicht entweichen
- heizen die Schockfront auf (5% Neutrinoenergie)
- $\rightarrow T = 500,000 \text{ K}, v = 30,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
- Photonen entweichen
- Energieverlust durch Neutrinos $3.1 \cdot 10^{45} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$
- Energieverlust durch Photonen: $4.4 \cdot 10^{38} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$

→ „verzögerte Explosion“

Nukleosynthese

r- Prozess: Anlagerung von Neutronen
Bildung schwerer Elemente Schockfront reißt neutronenhaltiges Material
hinaus

β^- - Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Thermonukleare Explosion, Doppelsternsysteme
Kernkollaps, Neutronensterne, Pulsar

Neutronensterne

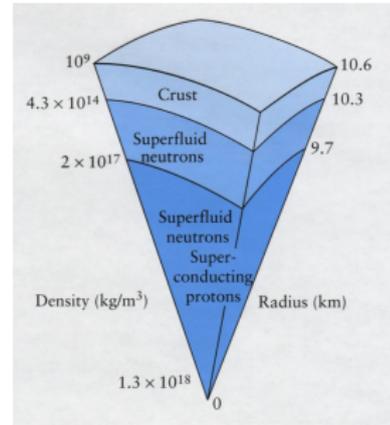
Bildung eines Neutronensterns

Bedingungen

$1.44 M_{\odot} < M_{Core} < \sim 3 M_{\odot}$: Stabilisierung des Kerns zu Neutronenstern

$M_C > \sim 3 M_{\odot}$: Kollaps kann nicht aufgehoben werden: Schwarzes Loch

→ Oppenheimer - Volkoff - Grenze



<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/fnsstrct.JPG>

Eigenschaften

Eigenschaften eines Neutronensterns

- $R_{NS} \sim 10 - 15 \text{ km}$
- Magnetfeld: $\sim 10^8 \text{ T}$

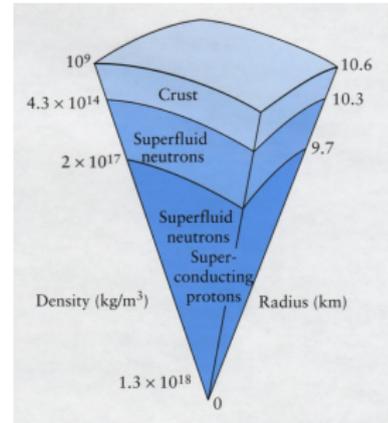
Rotation - Drehimpulserhaltung

$$L = I\omega, \text{ mit } I = \frac{2}{5} M \cdot r^2$$

$$P_{NS} \sim \left(\frac{R_{NS}}{R_S} \right)^2 P_S$$

P : Rotationsperiode; mit $R_{NS} = 15 \text{ km}$,
 $R_S = R_{\odot}$, $M_S = 1M_{\odot}$, $P_S = 27 \text{ d}$

$$\rightarrow P = 0.001 \text{ s}$$



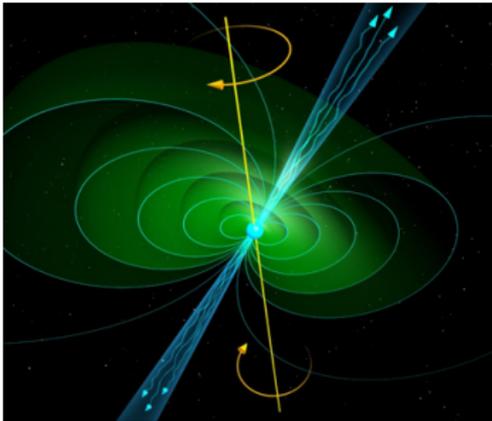
<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/f230nsstrct.JPG>

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Thermonukleare Explosion, Doppelsternsysteme
Kernkollaps, Neutronensterne, Pulsar

Pulsar

Leuchtturmeffekt

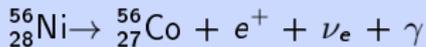


<http://www.atomicart.com/>

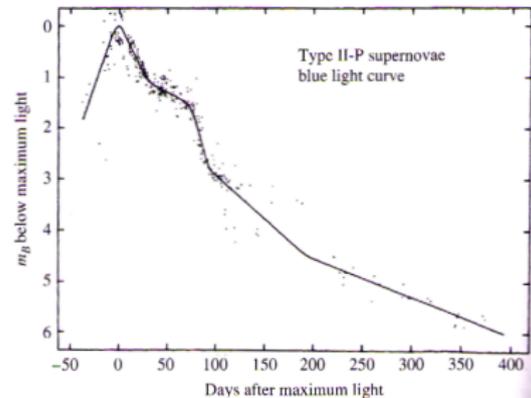
- Rotationsachse gegenüber magnetischer Achse geneigt
- Abstrahlung im Radiobereich
- Plasma: Abstrahlung im Röntgenbereich

Plateau

- Wasserstoff-Hülle ionisiert durch Schock
- Rekombination, Freisetzung von Energie
- außerdem: radioaktiver Zerfall von ^{56}Ni
- $\tau_{1/2}(^{56}\text{Ni}) = 6.1d$



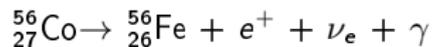
→ Plateau in Lichtkurve



(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.9)

weiterer Zerfall

- weiterer Zerfall von ${}^{56}_{27}\text{Co}$



Beitrag von Co in Lichtkurvenabfall

$$\tau_{1/2}({}^{56}\text{Co}) = 77 d$$

Historisch
Klassifizierung nach Lichtkurve und Spektrum
Physikalische Mechanismen
Lichtkurve und radioaktiver Zerfall
Supernova 1987 A
Supernova Überreste
Supernovae als Standardkerzen
Anwendung in der Kosmologie

Übersicht
Neutrinos
Lichtkurve & Zerfall
Überrest

Übersicht



<http://www.aao.gov.au/images/captions/aat050.html>

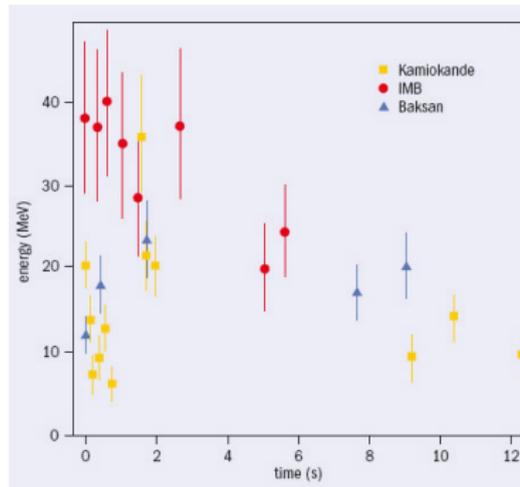
23. Februar: Supernova 1987A in LMC



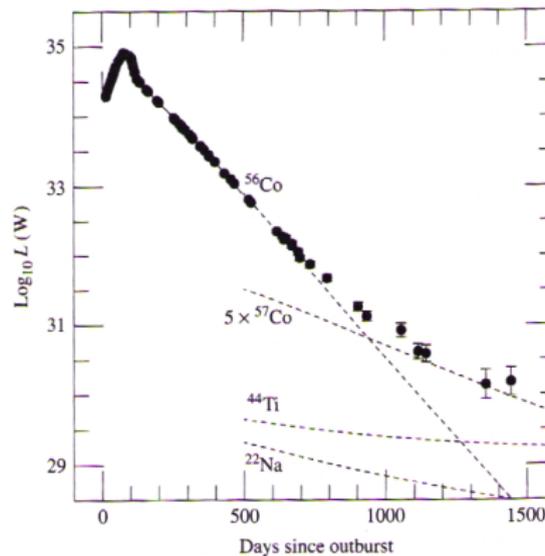
Bedeutung

- erdnächste Supernova seit 1604
- Vorgängerstern identifiziert: Sanduleak -69 202 (blauer Überriese)
- erstmaliges Detektieren von nicht solaren Neutrinos
- ohne Hilfsmittel sichtbar ($m=4.5$ mag)

Detektierte Neutrinos



CERN

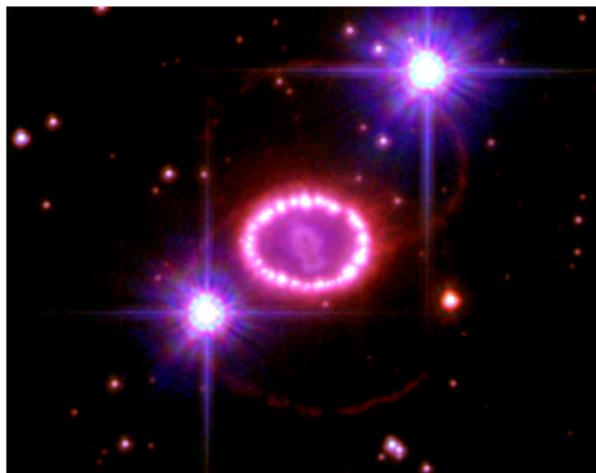


(Carroll, Ostlie; 2007, Fig. 15.12)

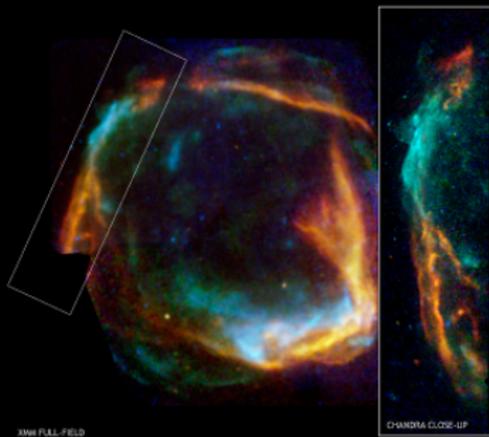
Radioaktivität

- Röntgen und Gammastrahlung nach Monaten, nicht Jahren
- normalerweise: erst sichtbar wenn Überrest sichtbar
- radioaktives Nickel nicht nur im Inneren des Kerns
- Auflösung der Zwiebelschalenstruktur

Überrest

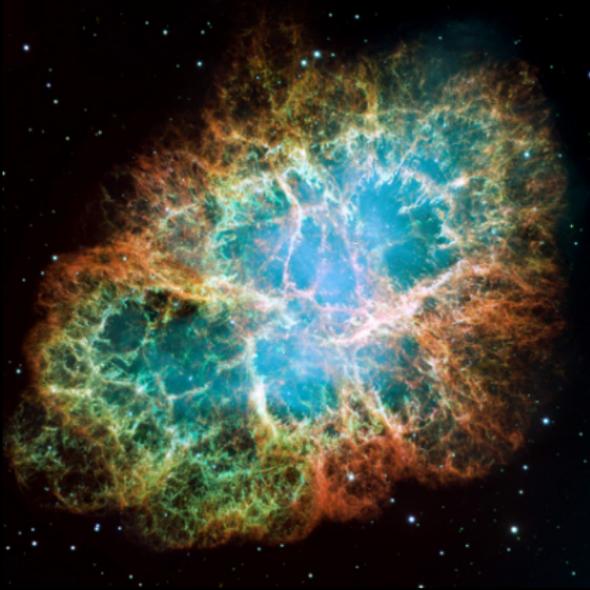


HST, 2007



Überrest von Supernova 185:
RCW 86

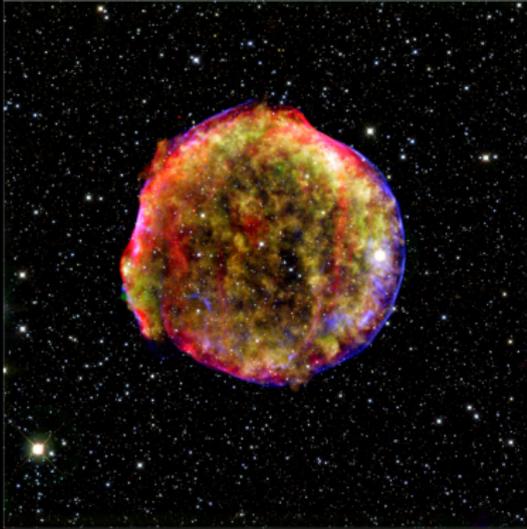
Quelle: <http://chandra.harvard.edu/edu/formal/snr/images/rcw86.jpg>



Überrest von Supernova
1054 (SN II): Krebsnebel

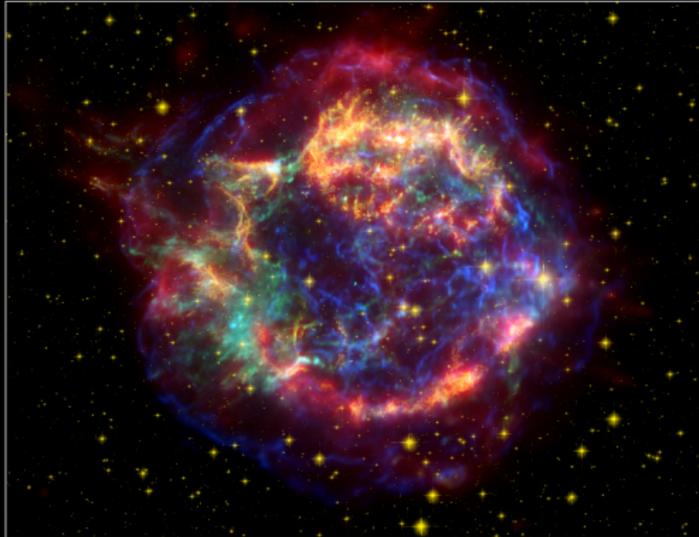
Quelle: HST;

http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/Mod/PIA03606_modest.jpg



Überrest von Supernova 1572
(SN I): Tycho's Supernova

Quelle: http://spitzer.caltech.edu/uploaded_files/graphics/high_definition_graphics/0003/3518/sig08-016_Ti.jpg



Überrest von Supernova
1680: Cassiopeia A

Quelle: http://ipac.jpl.nasa.gov/media_images/ssc2005-14c_small.jpg

Typ Ia als Standardkerze

Helligkeit von Supernova Ia:

$$M = -19.5 \text{ mag} \pm 0.03$$

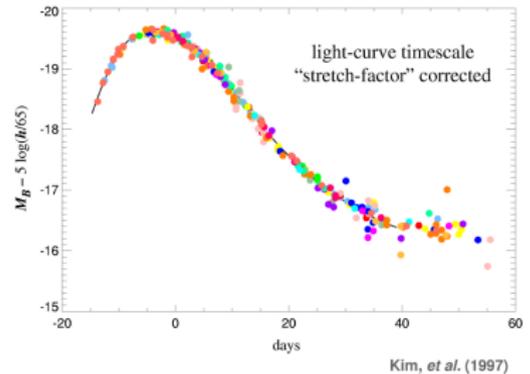
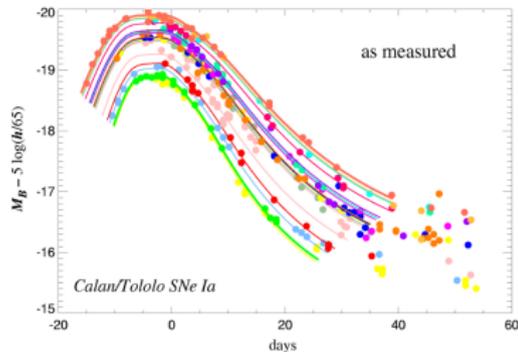
Entfernungsmodul:

$$m - M = -5 + \log_{10} \left(\frac{d}{pc} \right)$$

Kalibrierung durch Cepheiden: Bestimmung der absoluten Helligkeit

Korrekturmethoden

stretch-Methode: Phillips-Relation



Quelle: http://www-supernova.lbl.gov/public/figures/stretch_hamuy.gif

Kosmologie

weit entfernte Supernova leuchten schwächer als erwartet:
Beschleunigung des Universums

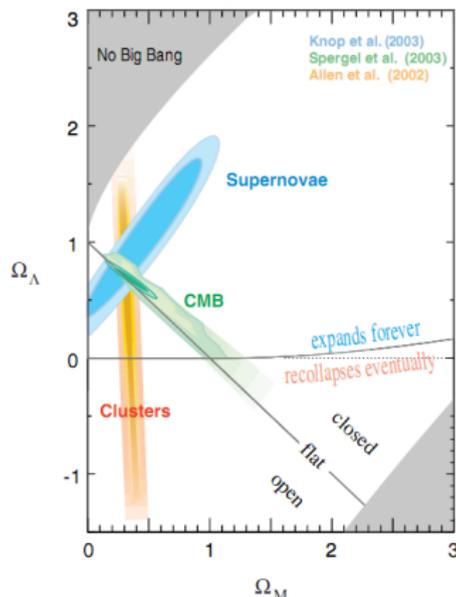
Kosmologische Konstanten

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

Ω_m : Massendichte

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Abweichung von erwarteter Entfernung $d \propto z$
(High- Z -Supernova Team, Supernova Cosmology Project)



$$\Omega_m = 0.25, \Omega_\Lambda = 0.75$$

Analyse: Ausschließung von
Extinktionseffekten, „grauer Staub“





Carroll, W. Bradley; Ostlie, Dale A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2. Auflage, Addison-Weseley, 2007



Petschek, Albert G.: *Supernovae*, Springer, 1990



Tayler, R. J.: *Stellar Astrophysics*, 1992



<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/RecentSupernovae.html>



Vorlesung einführung in die Astronomie II



http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/pub_resources/pop_science/suw/suw.html



http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/pub_resources/pop_science/phiuz_www.pdf



<http://www.cvconseils.com/etoiles.html>



<http://www.pha.jhu.edu/~qzhang/seminar1bfigs/seminar1bfigs.html>



Wheeler, Swartz: *The Evolution of massive stars to explosion*



HST