

# Supernovae – Explosionsmechanismen

Victoria Grinberg

La Villa - 31.08.2006

# Inhaltsüberblick

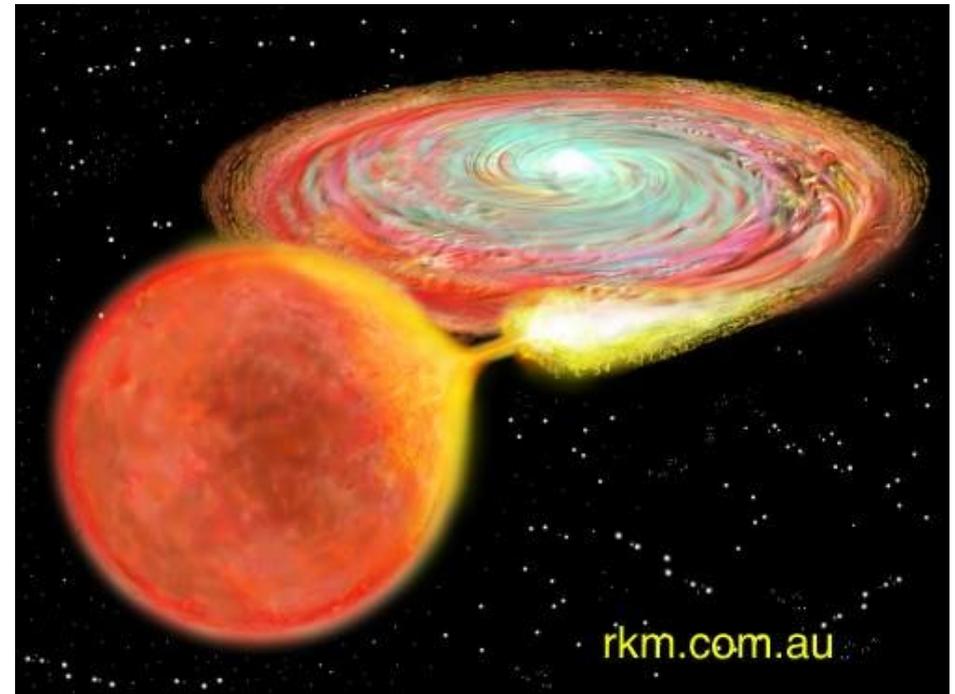
- **Klassifizierung und Explosionsmechanismen**
- **Supernovae vom Typ Ia**
  - **Vorläuferstern**
  - **Explosion**
  - **zusätzliche Betrachtungen**
- **Supernovae vom Typ II**
  - **Vorläuferstern**
  - **Kernkollaps**
  - **die sichtbare Supernova**
  - **Untertypen**
  - **Die Remnants**
  - **Supernovae vom Typ Ib und Ic**

# Klassifizierung und der Explosionsmechanismus

- keine Übereinstimmung
- Vorhandensein von Elementen bzw. ihren Emissions- und Absorptionenlinien, hängt von der Art des Vorläufersterns ab
- Typ Ia □ „**thermonukleare**“ Supernovae
- Typ II, Typ Ib und Ic □ „**hydrodynamische**“ Supernovae

# Supernovae vom Typ Ia (SN Ia)

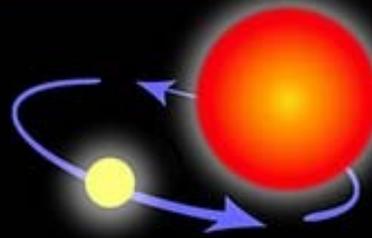
- weder Wasserstoff-, noch Heliumlinien im Spektrum, d.h. alles H und He muss entweder verbraucht oder anderweitig verschwunden worden sein
- Vorkommen in elliptischen Galaxien (geringe Sternentstehungsrate!)
  - **weißer Zwerg in engem Doppelsternsystem!**



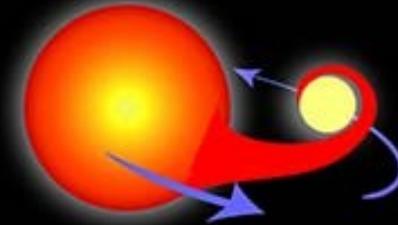
# The progenitor of a Type Ia supernova



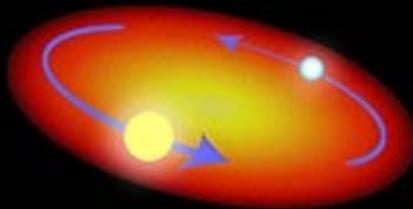
Two normal stars are in a binary pair.



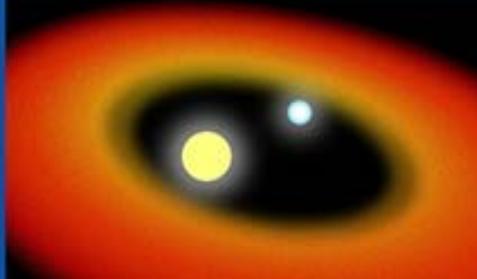
The more massive star becomes a giant...



...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



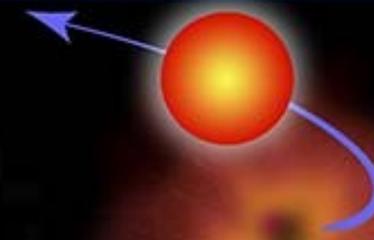
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...

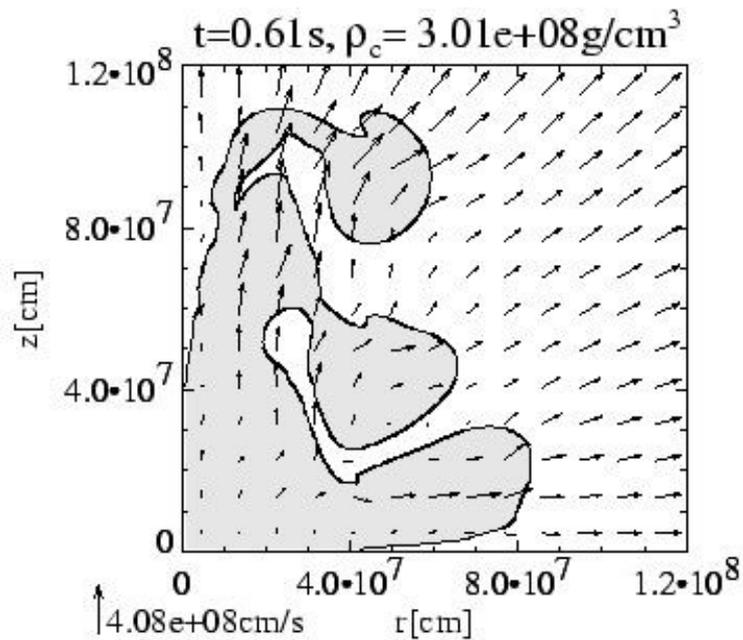


...causing the companion star to be ejected away.

- Akkretion von Gas aus der Hülle des Partnersterns
- **ohne** fusionsfähiges Material: Annähern an, Erreichen und Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze von ca. 1.4 Sonnenmassen  Stern beginnt zu kollabieren
  - Entstehung eines Neutronensterns
- **mit** fusionsfähigem Material (Sauerstoff, Kohlenstoff, C+O Zwerg):

# Die Explosion

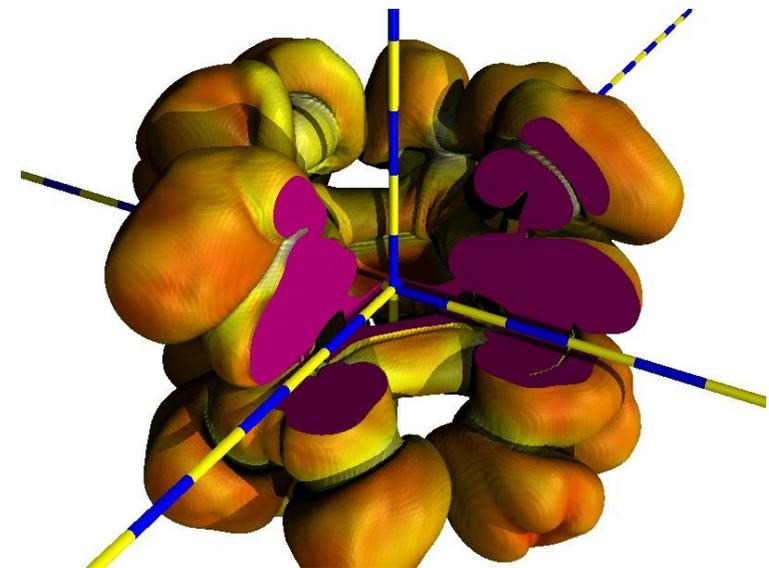
- Beim Erreichen einer Masse von ca. 1.4 Sonnenmassen (aber noch vor Erreichen der Chandrasekhar-Grenze!) setzt die Kernfusion mit Kohlenstoff ein
- Elektronendruck allerdings unabhängig von der Temperatur, d.h. es findet keine Expansion statt, die die Reaktionsrate verlangsamen würde
- Eine Stoßwelle (der Kernfusion) bewegt sich von innen her auf die Oberfläche zu, wobei hier zwei verschiedene Modelle denkbar sind:



2D Simulation

- **Detonation:** Stoßwelle **schneller** als materialspezifische Schallgeschwindigkeit
- **Deflagration:** Stoßwelle **langsamer** als materialspezifische Schallgeschwindigkeit

Stoßwelle in 3D-Simulation nach 0,4 s



- Deflagration mit nachfolgender Detonation bietet die beste Übereinstimmung mit Beobachtungsdaten

- Bildung von  $^{56}\text{Ni}$  im innersten Bereich
- Die Stoßwelle braucht ca. eine Sekunde, um die Oberfläche zu erreichen – hierbei hat der weiße Zwerg genügend Zeit, sich auszudehnen, daher entstehen in den äußeren Schichten „nur“ Ca, Ar, S und Si, im mittleren Bereich v.a. S, Si, Mg; der alleräußerste Rand bleibt von der Kernfusion unberührt
- Im Standardmodell für Kohlenstoffdeflagration entstehen insgesamt ca. 0,6 Sonnenmassen  $^{56}\text{Ni}$  unter Freierwerdung von

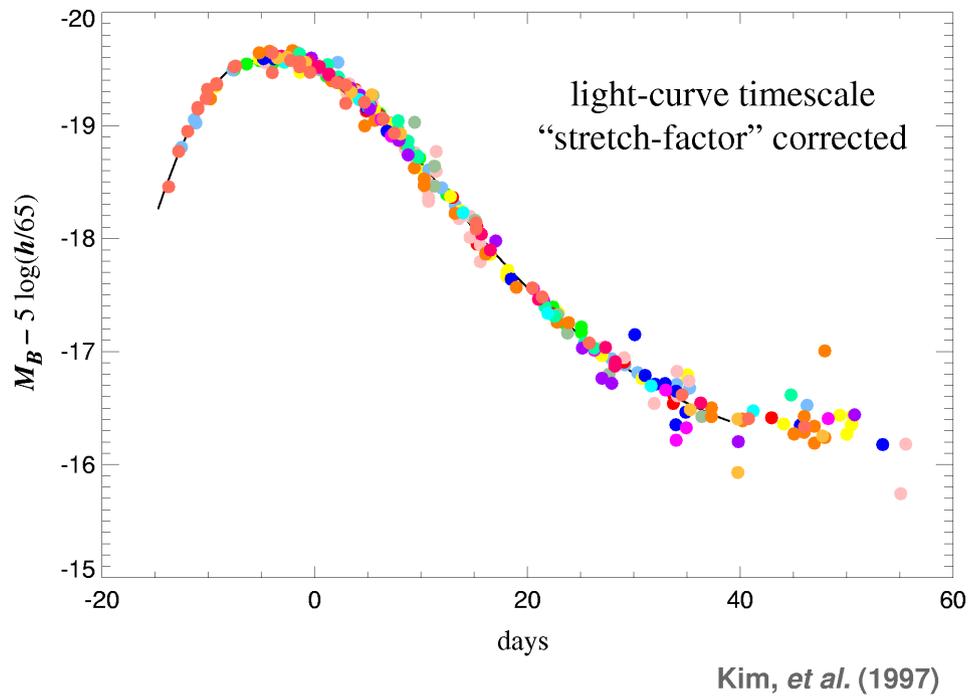
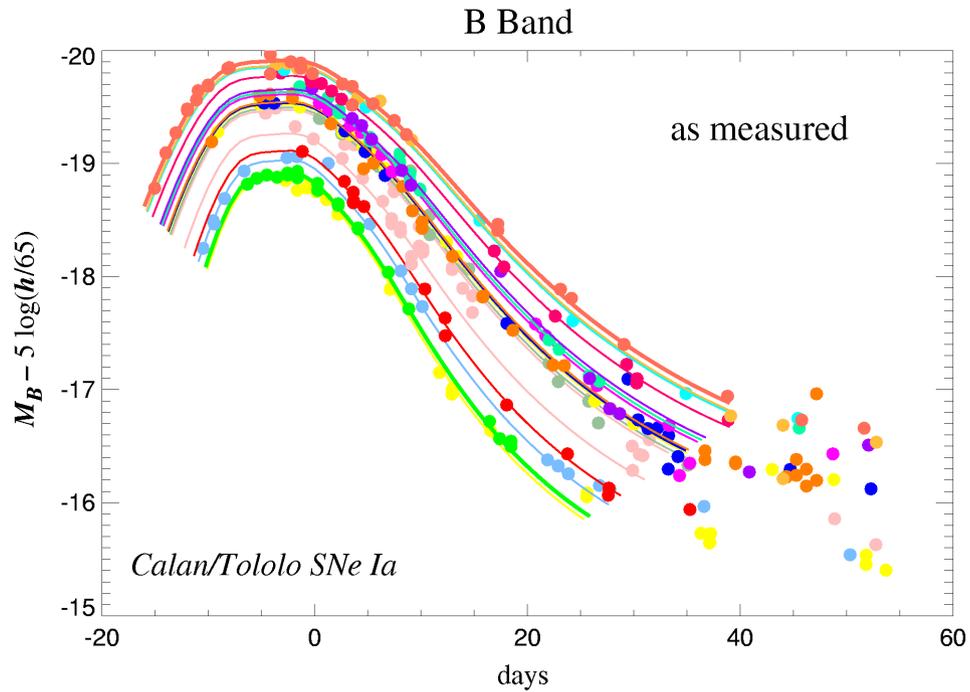
$$E = E_{\text{nukl}} - E_{\text{bind}} = 1,3 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$

$$(1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J})$$

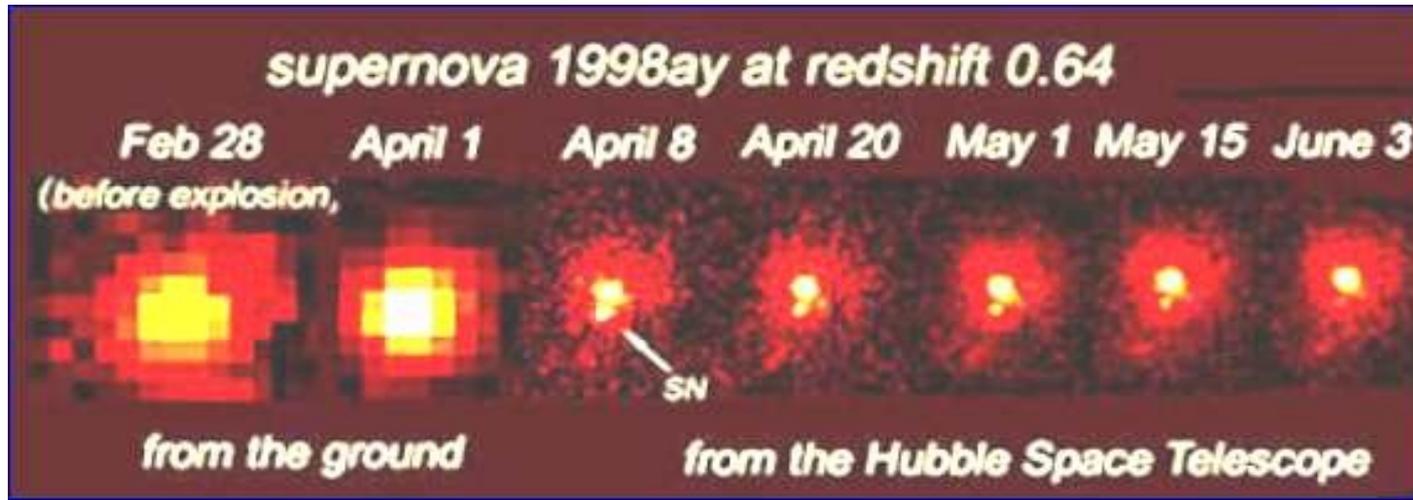
- **vollständige Zerstörung des Zwergs**, kein kompakter Remnant

# Warum ist eine SN Ia sichtbar?

- Die Explosionsenergie geht in **kinetische Energie der Expansion** über  $\square$  d.h. damit der explodierende weiße Zwerg wäre alleine so nicht sichtbar, andere Erklärung nötig!
- Bildung von Positronen und Gammastrahlung durch den **Zerfall von  $^{56}\text{Ni}$**  (Halbwertszeit 6,6d) zu  $^{56}\text{Co}$  (Halbwertszeit 77 Tage) und schließlich zu  $^{56}\text{Fe}$  (stabil)
- Entstehung beobachteter Strahlung durch **Comptoneffekt, Absorption und Ionisation**



# SN Ia als Standardkerzen



- Die absolute Helligkeit  $M$  einer SN Ia streut nur wenig um den Wert von  $-19,5$ 
  - aus sichtbarer Helligkeit  $m$  kann die Entfernung berechnet werden

# Werden alle Zwerge mit Partnern zu SN Ia?

- **Nein!**
- Schicksal des Sterns hängt von der Akkretionsrate ab:
  - **geringe Akkretionsrate** ( $\Delta M/\text{Jahr} < 1 \cdot 10^{-8} M_{\text{sonne}}$ ):  
pykonuklerare Reaktionen des extrem dichten akkretierten Materials auf der Oberfläche des Sterns; äußere Sternschicht wird abgesprengt, allerdings ohne den Stern zu zerstören; stärkste Ausbrüche als **Novae** sichtbar
  - **mittlere Akkretionsrate** ( $3 \cdot 10^{-6} M_{\text{sonne}} > \Delta M/\text{Jahr} > 1 \cdot 10^{-8} M_{\text{sonne}}$ ):  
Masse des weißen Zwerge wächst, Entstehung einer **Supernova**

– **hohe Akkretionsrate** ( $\Delta M/\text{Jahr} > 3 \cdot 10^{-6} M_{\text{sonne}}$ ): akkretiertes Material zu „heiß“ um von dem weißen Zwerg geschluckt zu werden

- letztendlich geht das Material aus dem System verloren
- Durch den Massen- und Drehmomentverlust werden aus manchen Systemen **Doppelsternsysteme zwei C+O Zwergen**

Das Schicksal dieser Doppelsternsysteme noch unklar; wahrscheinlich sind Verschmelzen und nachfolgend je nach Masse entweder eine Supernova vom Typ Ib/c oder ein Neutronenstern

# Supernovae vom Typ II (SN II)

## Vorläuferstern:

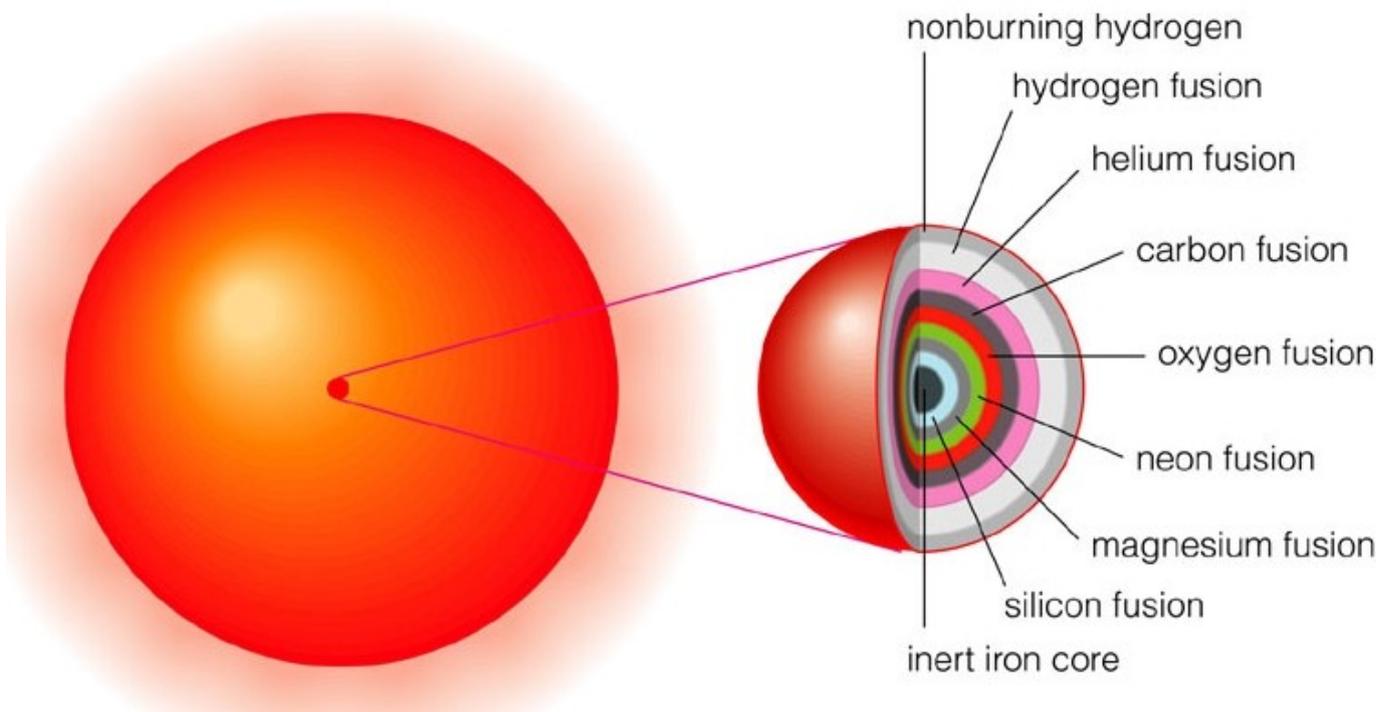
- blauer Riese mit einer Masse zwischen 8 und 40 Sonnenmaßen □ **Typ II Supernovae**
- Schwerere Sterne werden als instabil angenommen, so dass sie ihre Wasserstoffhülle wahrscheinlich verlieren und zu **Supernovae vom Typ Ib/c** werden



SN 1987A  
rechts: vor der Explosion  
links: nach der Explosion

# Die Entwicklung des Vorläufersterns

- Ist im innersten Bereich der Wasserstoff verbraucht, fällt dieser in sich zusammen, die Temperatur steigt und es setzen weitere Fusionsreaktionen ein □ Bildung einer „Zwiebelstruktur“



# Stufen der Kernfusion

<i>Ausgangselement</i>	<i>Produkt(e)</i>	<i>Schwellentemperatur [<math>10^6</math> K]</i>	<i>Energieausbeute pro Ereignis [MeV]</i>
Wasserstoff	Helium	4	6.55
Wasserstoff	Helium	15	6.25
Helium	Kohlenstoff, Sauerstoff	100	<0,61
Kohlenstoff	Sauerstoff, Neon, Magnesium	600	<0,54
Sauerstoff	Magnesium, Silikon, Schwefel, Phosphor	1000	<0,30
Silikon	Eisen, Nickel Kobalt	3000	<0,18

# Das Ende der Kernfusion

- Ein immer **geringerer Energiegewinn** bei steigender Temperatur
- Die einzelnen Fusionsphasen werden immer kürzer
- Bei den im Kern vorherrschenden Temperaturen entweicht die Energie nicht mehr in Form von Konvektion oder elektromagnetischer Strahlung, sondern **Neutrinos**
- Es bildet sich ein „Eisenkern“, da die Fusion von  $^{56}\text{Ni}$  und  $^{56}\text{Fe}$  zu schwereren Elementen **nicht mehr exo- sondern endotherm** ist

# Photodesintegration

- Bei den nun vorliegenden hohen Temperaturen können Photonen schwere Kerne durch die (endothermische) **Photodesintegration** zerstören. Besonders wichtig ist dabei die Photodesintegration von Eisen:



- In extrem kurzer Zeit wird dem Kern so die thermische Energie entzogen, die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts beitrug

# *inverser $\beta$ -Zerfall*

- Außerdem werden die freien Elektronen in die schweren Kerne gedrückt und von freien, durch Photodesintegration gebildeten Protonen eingefangen, z.B.



- **Der Elektronendruck sinkt**
- Enormer Energieverlust durch Neutrinos: Der Energieverlust eines Sterns der 20-fachen Sonnenmaße durch Photonen beträgt  $4.4 \cdot 10^{38}$  ergs/s, durch Neutronos  $3.1 \cdot 10^{45}$  ergs/s
- Rapider Kollaps des Eisenkerns durch Abnahme des Elektronendrucks

# Der Kernkollaps

- Die Geschwindigkeit des Kollaps proportional zum Abstand zum Zentrum
  - bereits in 20-50km vom Zentrum entfernt übersteigt die Einfallgeschwindigkeit die lokale Schallgeschwindigkeit
  - der innere Teil des Kerns wird vom äußeren, das als Stoßwelle ins Zentrum fällt, entkoppelt
  - im äußeren Teil des Kerns werden Geschwindigkeiten bis 70.000 km/s erreicht
- Da mechanische Information sich höchstens mit der Schallgeschwindigkeit ausbreitet, „wissen“ die äußeren Schichten nichts von den Vorgängen im Kern

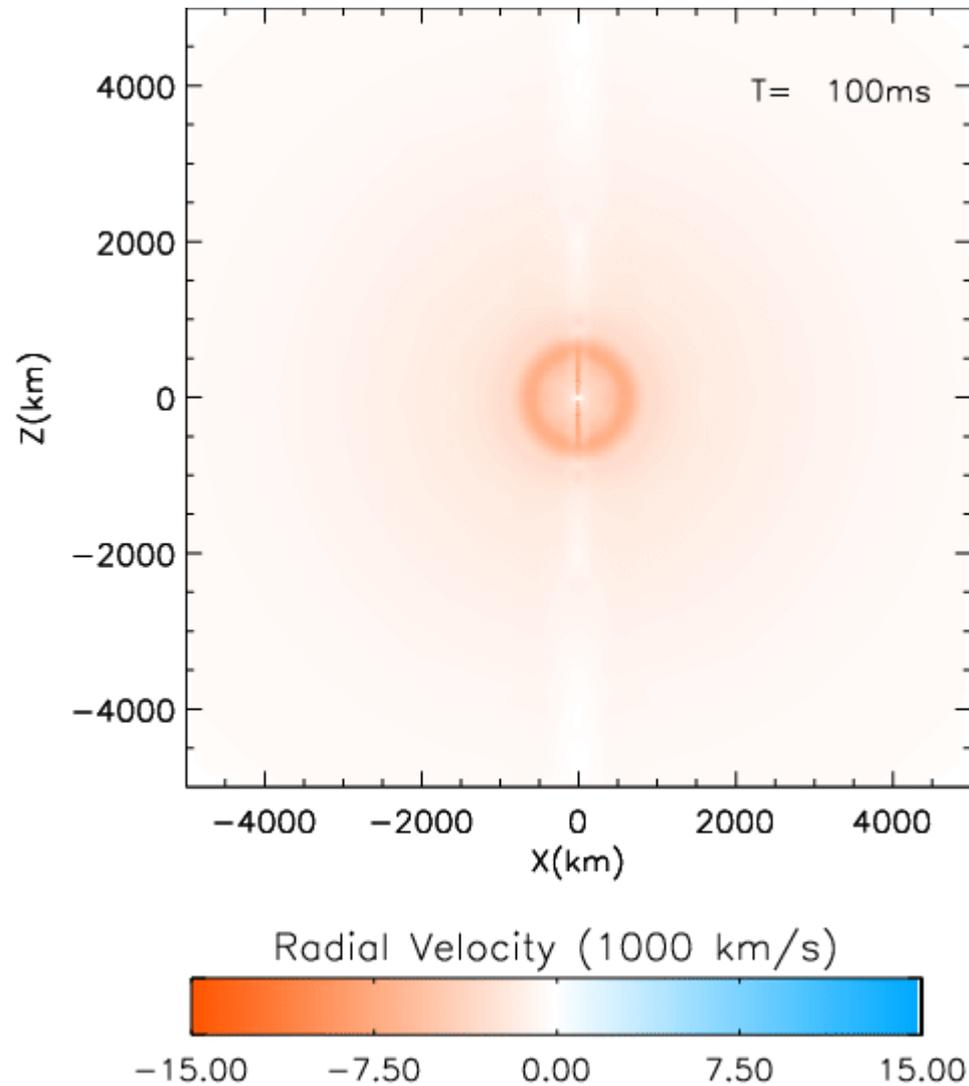
# Der Kernkollaps

- Erreicht das Innere des Kerns eine Dichte von  $8 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ , so besteht es fast vollständig aus Neutronen und kann aufgrund des **Pauli-Prinzips** nicht weiter komprimiert (Entartungsdruck der Neutronen) werden □ plötzlicher Halt □ **Rückstoß**
- Der Rückstoß schickt dem einfallenden Material des äußeren Kerns entgegengerichtete Wellen, die nach Erreichen der Schallgeschwindigkeit eine Stoßwelle bilden
- Die Materie im Kern kann erst dann den Neutronenstern bilden, wenn seine Bindungsenergie abgestrahlt ist

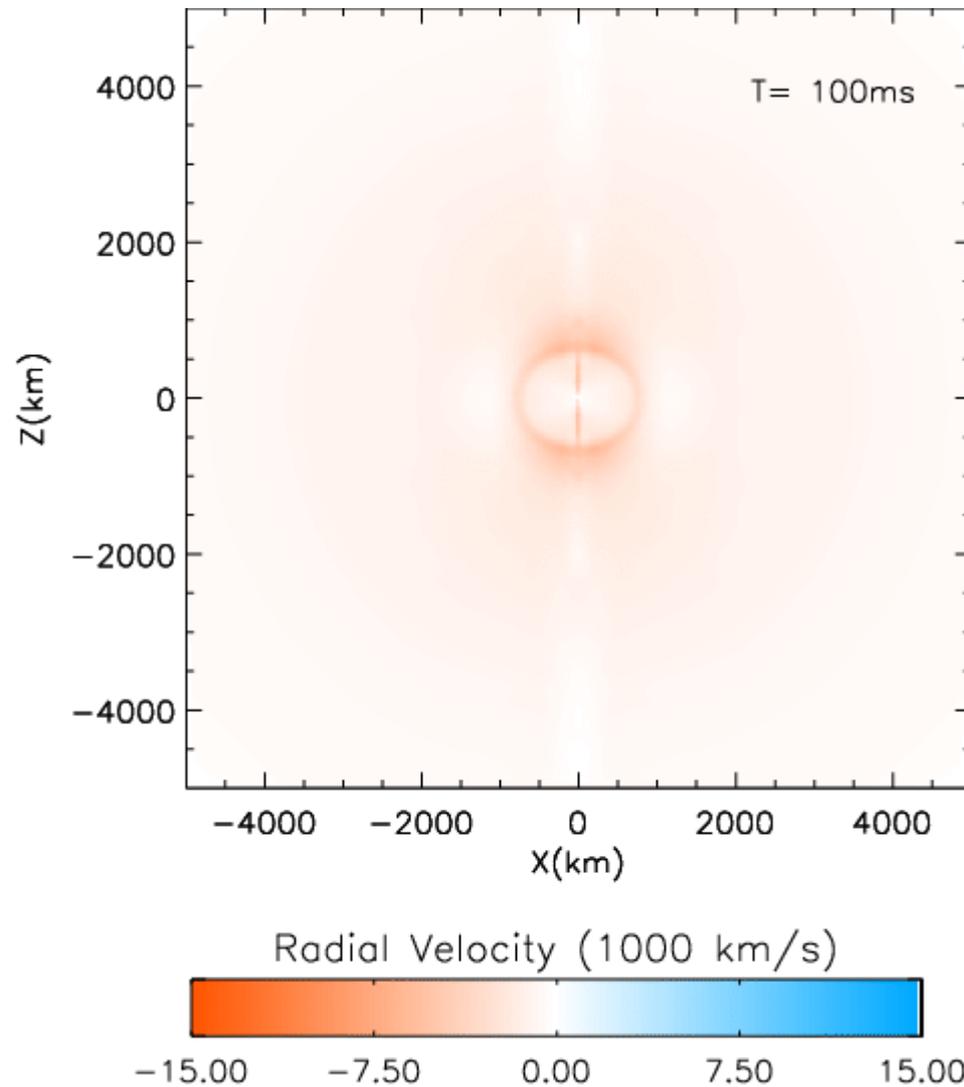
# Prompt Hydrodynamic Explosion

- Das Zusammentreffen von Stoßwelle und Eisen des äußeren Kerns führt zu weiterer **Photodesintegration**: pro 0,1 Sonnenmassen photodesintegrierten Materials Energieverlust von  $1,7 \cdot 10^{51}$  erg
- **20 ms** erforderlich, damit die Schockwelle den inneren Kern vollständig durchdringt

# Simulationen



nichtrotierender  
Vorläuferstern  
mit 15 Sonnenmassen



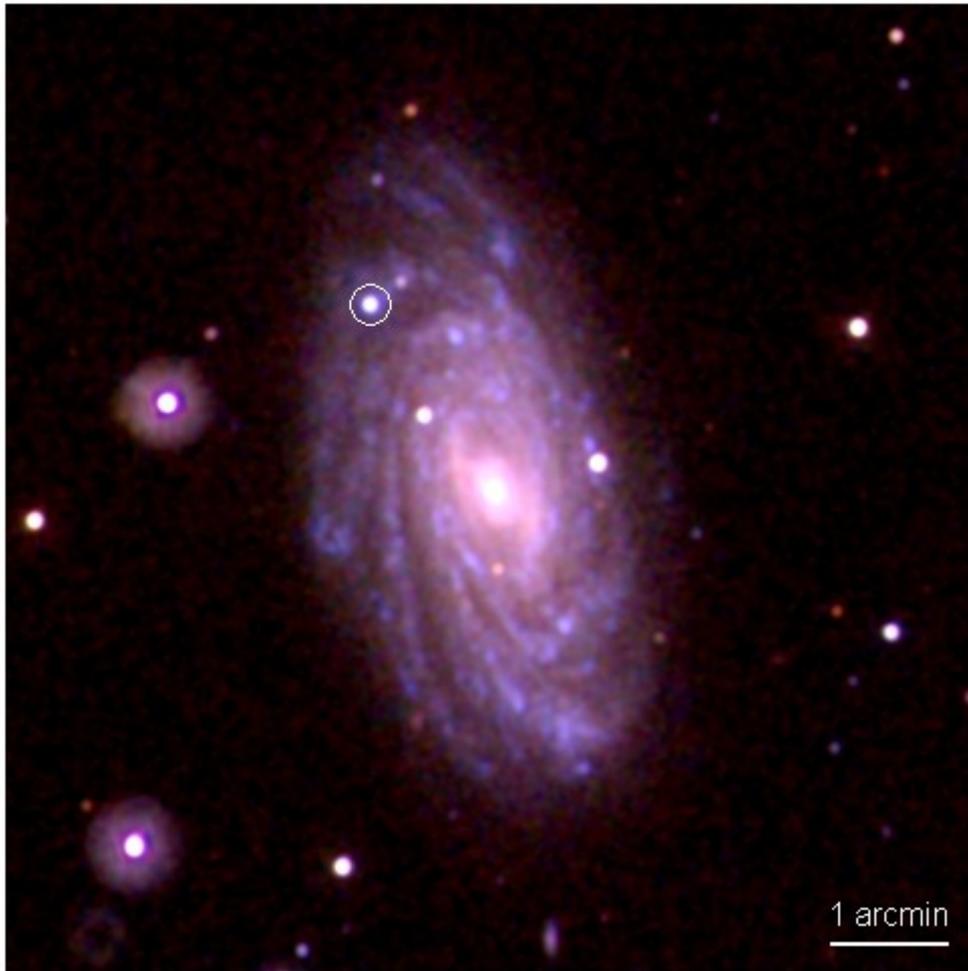
rotierender Vorläuferstern  
mit 15 Sonnenmassen

# Delayed Explosion Mechanism

- Computersimulationen zeigen, dass bei einem Eisenkern von mehr als 1,2 Sonnenmassen die Stoßwelle abstirbt  anderer Explosionsmechanismus unter Berücksichtigung der Neutrinos entscheidend!
- Durch seine enorme Dichte ist das Material für Neutrinos optisch dicht
  - Teil der Neutrinoenergie ( $\sim 5\%$ ) wird in der Materie hinter der Stoßfront gespeichert und „heizt“ die abschwächende Stoßwelle wieder an
- Gesamtdauer des Prozesses nun ca. 1s

# Die Supernova erscheint

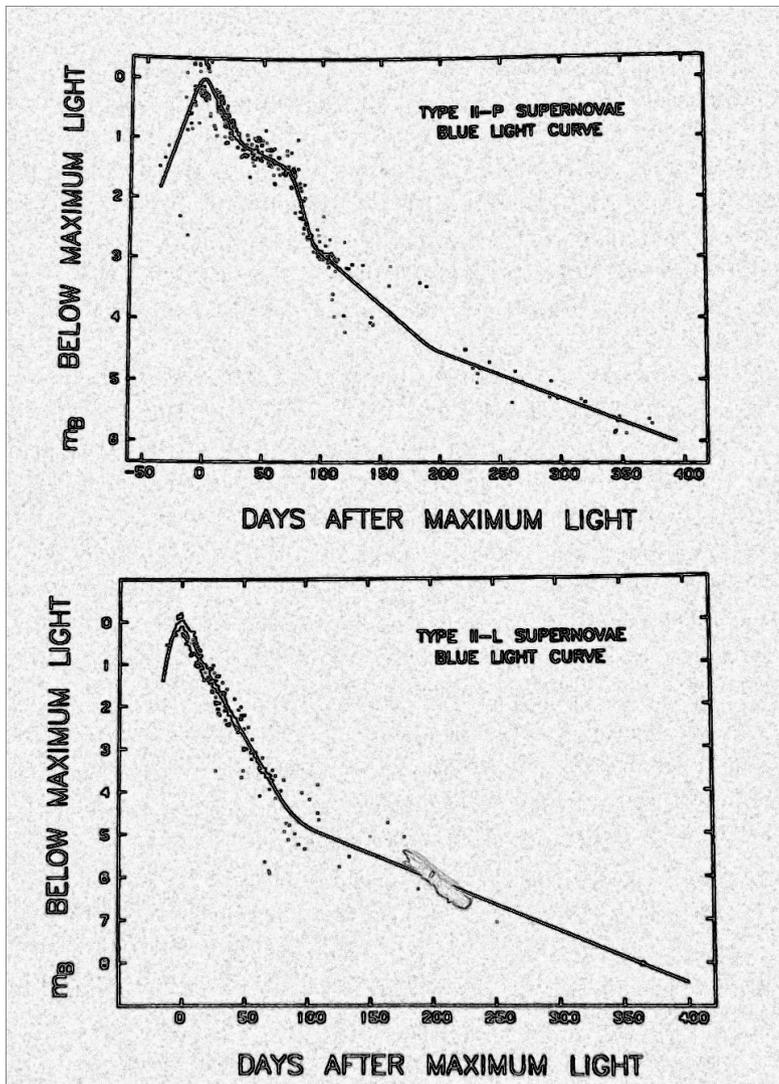
- Die Stoßwelle breitet sich weiter im Stern aus: die Heliumschicht wird in einer Minute, die Wasserstoffschicht in zwei Stunden bis einem Tag durchstoßen
- Beim Heraustreten der Stoßwelle werden die äußeren Schichten auf bis zu 500.000 K erhitzt auf bis 30.000 km/s beschleunigt  
Supernova für den (Nichtneutrino-) Erdbeobachter sichtbar, zuerst v.a. im ultravioletten Bereich
- Nach bis zu einer Woche gehen die Temperaturen bis auf 6000K zurück und es setzt die Rekombination ein □  
**Schwarzkörperstrahlung** mit insgesamt  $10^{49}$  erg ( $\sim 1\%$  der kinetischen Energie, 0,01% der gesamten Neutrinoenergie)



SN 2006bp vom 10. April 2006 (in der Galaxie NGC 3953)

- Nach der Rekombination ist eine neue Energiequelle erforderlich □ **radioaktiver Zerfall**, vgl. SN Ia
- Anfang wird die Gammastrahlung des Zerfalls durch Streuung an Elektronen innerhalb der SN ihre Energie verlieren und als optische Strahlung die SN verlassen; später dringt sie z.T. ungehindert hervor
- Der genaue Verlauf der Lichtkurve hängt allerdings von vielen Faktoren (ursprüngliche Masse, Vorhandensein eines Remnants, Menge an erzeugten  $^{56}\text{Ni}$  und anderen radioaktiven Elementen) ab

# SN II-P und SN II-L



- Unterschied in der **Form der Lichtkurven**
- Ist die ausgestoßene Masse und dadurch ihre Geschwindigkeit sehr groß, wird die Abkühlung der Hülle durch ihre rasche Ausdehnung kompensiert  **Plateauphase, Typ II-P**
- Bei geringerer Expansionsgeschwindigkeit von Anfang an die radioaktive Zerfallstrahlung dominant  **Typ II-L**

# Supernovaremnants

- War die Masse des Vorläufersterns **unter ca. 25 Sonnenmassen**, wird sich der Kern zu einem **Neutronenstern** stabilisieren
- Darüber kann der Gravitation nichts widerstehen und es bildet sich ein **schwarzes Loch**
- In beiden Fällen geht mit der Bildung des jeweiligen Objekts die Produktion von Neutrinos einher, die fast die gesamte **Bindungsenergie des Neutronensterns** besitzen:  $3 \cdot 10^{53}$  erg ( ~ 100 mal mehr als die Sonne während ihrer gesamten Lebensspanne produziert!)

# Supernovae von Typ Ib und Ic

- Bei zu hoher Masse sind die Sterne instabil und die äußere Hülle geht entweder durch Massentransport in einem Doppelsternsystem oder durch stellare Winde verloren
  - Ergebnis ist ein „nackter“ Kern, mit einer äußeren Heliumschicht von ca. 4-6 Sonnenmassen und Elemente höherer Ordnungszahl (bis Eisen) weiter im Kern □  
**„Heliumstern“**
- Ablauf wie bei einer Supernova des Typs II, wobei weniger  $^{56}\text{Ni}$  erzeugt wird und die Lichtkurve entsprechend schwächer ausfällt
- Typ Ic ist heliumarm □ hat auch die Heliumhülle abgestoßen

# Nachtrag: Neutrinos

- Warum wechselwirken Neutrinos im inneren einer Supernova aber nicht z.B. auf der Erde mit der Materie?
- $\tau = n * \sigma * l$  mit  $\tau$  = optische Tiefe;  $n$  = Anzahldichte der Teilchen, mit welchen die Neutrinos wechselwirken können;  $\sigma$  = Wirkungsquerschnitt;  $l$  = Strecke bis zum betrachteten Medium
- Definition:

**Mittlere freie Weglänge  $\lambda$ : Strecke, bei der  $\tau = 1$  ist**

- Also:

$$\lambda = \frac{1}{n * \sigma} = \frac{u}{\rho * \sigma}$$

u = atomare Masse  
 $\rho$  = Dichte

- im inneren der Supernova:

für Protonen und Neutronen  $u = 1,6 * 10^{-24} \text{ g}$

für Kernmaterie  $\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^2$

- $\lambda = 1,6 \text{ km}$ , d.h. klein im Vergleich zum Sternradius □  
Wechselwirkung mit Materie!

- für Wasser:

$\rho = 1 \text{ g/cm}^2$

- $\lambda \approx 20 \text{ Lichtjahre!}$

**Danke für eure Aufmerksamkeit!**