

# Sterne, Galaxien und das Universum

## Teil 5: Das Ende der Sterne

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

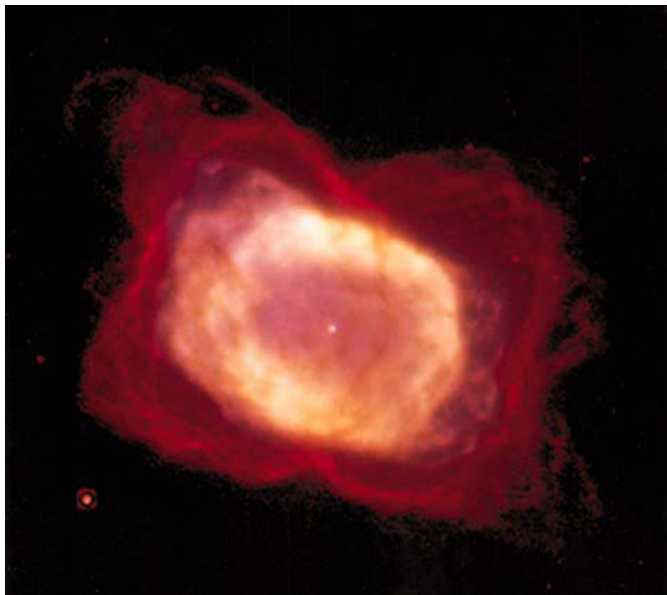
Hamburger Sternwarte  
Gojenbergsweg 112  
21029 Hamburg

5. Juli 2019

# Übersicht

- ▶ Sterne mit geringer Masse
- ▶ Sterne mit hoher Masse
- ▶ Supernovae

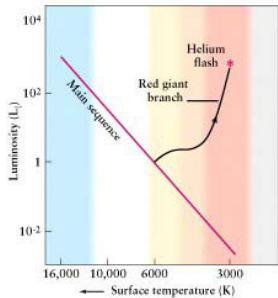
# Planetarischer Nebel



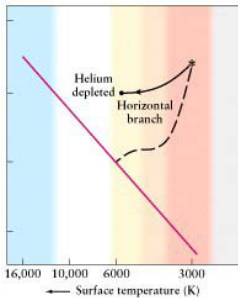
# Sterne mit geringer Masse

- ▶ weniger als  $4 M_{\odot}$
- ▶ gehen zunächst in die Rote Riesen Phase:

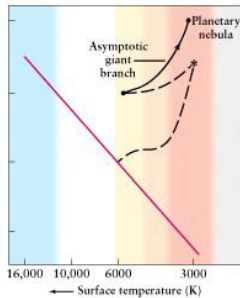
# Nach der HR



a



b

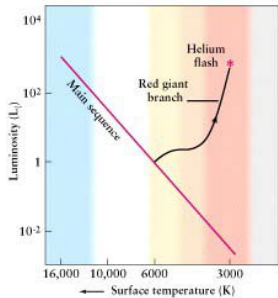


c

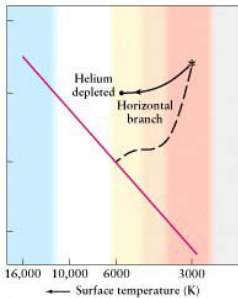
# Horizontalast

- ▶ nach dem He flash:
- ▶ Leuchtkraft sinkt etwas ab da Kern kühler wird
- ▶ → dadurch wird auch die Leistung des H-Schalenbrennens kleiner
- ▶ → Hülle kontrahiert
- ▶ → Effektivtemperatur steigt an
- ▶ der Stern bewegt sich auf den
- ▶ *Horizontalast*

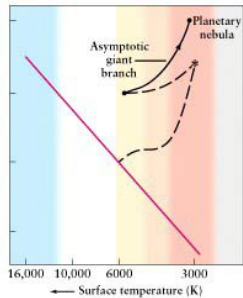
# Horizontalast



a



b



c

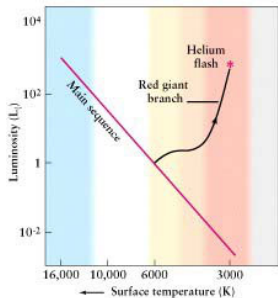
- ▶ dort haben Sterne He-Brennen im Kern und H-Brennen in einer Schale
- ▶ danach ist das He verbrannt
- ▶ der Kern besteht aus C und O
- ▶ Kern kontrahiert bis Elektronen entartet (siehe oben!)



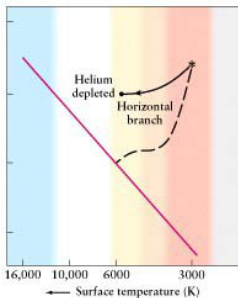
# AGB

- ▶ durch Kontraktion wird Energie frei
- ▶ → Kerntemperatur geht rauf
- ▶ → He-Brennen zündet in Schale um den Kern
- ▶ → dadurch wird eine 2. Rote Riesen Phase eingeleitet

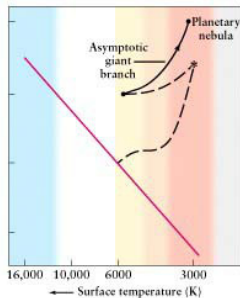
# AGB



a



b

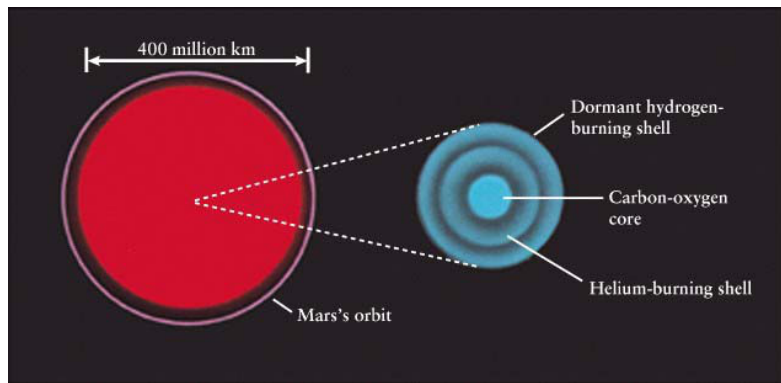


c

# AGB

- ▶ liegt aber nicht genau auf dem Riesenast
- ▶ *Asymptotischer Riesenast (AGB)*
- ▶ ein AGB Stern hat:
  - ▶ einen C-O Kern (entartet),
  - ▶ He-Schalenbrennen,
  - ▶ H-Schalenbrennen
- ▶ nach einer Weile dehnt sich der Stern weiter aus
- ▶ dadurch dehnt sich eventuell auch die H-Schalenquelle aus
- ▶ → sie kühlt ab und schaltet sich aus.
- ▶ ein AGB Stern ist groß:

# Sonne als AGB Stern



# Sonne auf dem AGB

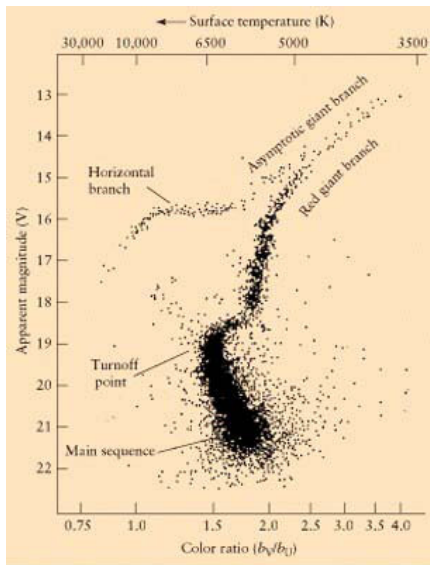
- ▶ erreicht bis zu  $10^4 L_{\odot}$
- ▶ auch Mars und die Gasriesen werden verdampft
- ▶ das dauert aber noch 8 Gyr ...

# Sternhaufen AGB



- ▶ AGB Sterne lassen sich gut in Kugelsternhaufen sehen
- ▶ Beispiel: M3
- ▶ ca. 10000 pc entfernt
- ▶ 50 pc Durchmesser
- ▶ HRD von 11000 Sternen des Haufens:

# M3



b

# Mischungsphasen

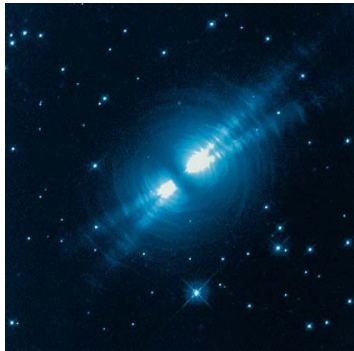
- ▶ Teile der Leuchtkraft werden durch Konvektion transportiert
- ▶ dadurch findet eine Vermischung des Materials statt
- ▶ wenn die Konvektion bis in der Kern reicht
- ▶ → Produkte des nuklearen Brennens können an die Oberfläche gemischt werden
- ▶ *dredge up* Phasen
- ▶ 1. dredge up Phase:
- ▶ nachdem H Brennen im Kern aufhört und der Stern ein Roter Riese wird



# Mischungsphasen

- ▶ 2. dredge up Phase: nach Ende des He Brennens im Kern
- ▶ 3. dredge up Phase: während der AGB Phase
- ▶ durch die Vermischungen werden hauptsächlich C, N, O in die Atmosphäre gemischt
- ▶ AGB Sterne können zu *carbon stars* mit hoher Kohlenstoffhäufigkeit werden

# Planetarische Nebel



- ▶ AGB Sterne verlieren sehr viel Masse
- ▶ Beispiel: Ei-Nebel (HST Bild)
- ▶ ca. 900 pc Entfernung
- ▶ Masse wird mit 20 km/s abgestoßen
- ▶ dazu zwei Jets mit 100 km/s
- ▶ ähnlich jungen Sternen?

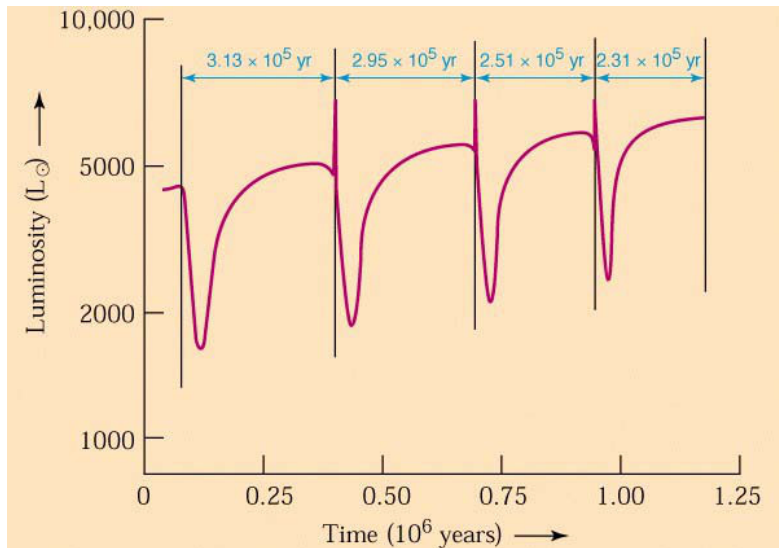
# Thermische Pulse

- ▶ AGB Sterne entwickeln Instabilität:
- ▶ H Schalenquelle schaltet sich ab
- ▶ → kontrahiert und wird heißer
- ▶ H-Schalenbrennen startet wieder
- ▶ neues He regnet auf die He-Schalenquelle
- ▶ die hat sich zuvor auch abgeschaltet
- ▶ → der Bereich kontrahiert und wird heißer
- ▶ bei Erreichen einer kritischen Temperatur findet ein

# Thermische Pulse

- ▶ *helium shell flash* statt
- ▶ dadurch wird die H-Schalenquelle nach außen gedrückt
- ▶ → sie wird kühler und schaltet ab
- ▶ → das Ganze geht von vorne los
- ▶ *thermische Pulse*
- ▶ ca. alle 300000 yr
- ▶ während eines Pulses kann die Hülle sich abkoppeln
- ▶ große Teile der Hülle werden so abgeworfen

# Thermische Pulse

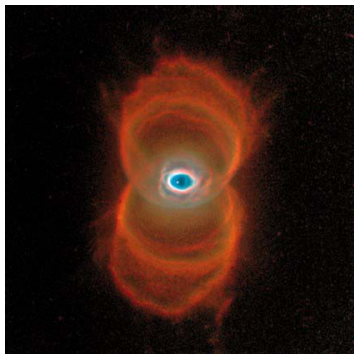


# Planetarische Nebel



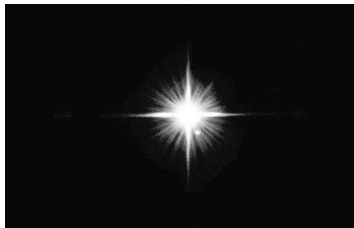
- ▶  $1 M_{\odot}$  Stern kann 50% verlieren
- ▶ ehemaliger Kern wird sichtbar
- ▶ regt Hülle zum Leuchten an →
- ▶ *Planetarischer Nebel*

# Planetarische Nebel



- ▶ recht häufig: bis zu 50000 in der Milchstraße
- ▶ Emissionen von H, O, N Ionen
- ▶ typische Größe ca. 1 ly
- ▶ im Mittel ca. 10000 yr alt
- ▶  $5 M_{\odot}/\text{yr}$  freigesetzt durch PNe in der Milchstraße

# Weißer Zwerge

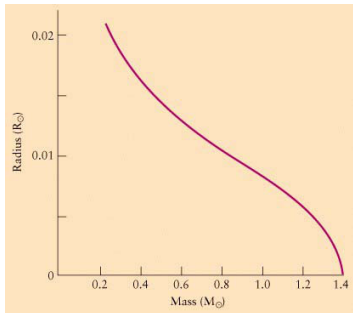


- ▶ Beispiel Sirius A+B

- ▶ ausgebrannter Kern →
- ▶ *Weißer Zwerg*
- ▶ kann keine weiteren Kernreaktionen starten
- ▶ kühlt langsam immer weiter ab
- ▶ ca.  $0.5 M_{\odot}$  bei Erd-Größe!

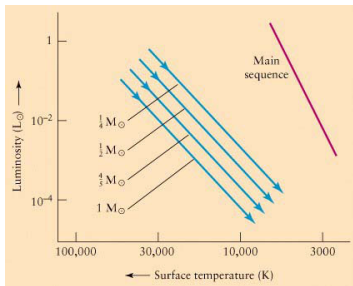


# Weißer Zwerge



- ▶ → extrem dichtes Material
- ▶ vom totalen Kollaps abgehalten durch Elektronenentartung (s.o.!)
- ▶ dadurch: werden *kleiner* mit größerer Masse
- ▶ → *Chandrasekhar Masse* bei ca.  $1.4 M_{\odot}$
- ▶ darüber → kein WD mehr möglich

# Weißer Zwerge



- ▶ WD besteht aus C und O
- ▶ nach genügend Kühlung
- ▶ → Material wird kristallisieren!
- ▶ betrifft nur die Atomkerne!
- ▶ kühler C-O WD ist im Prinzip ein riesiger Diamant!

# Massereiche Sterne

- ▶ Sterne mit  $> 4 M_{\odot}$
- ▶ starten weitergehende Reaktionen nach dem He-Brennen
- ▶ Grund: höhere Drücke und Temperaturen
- ▶ daher total andere Entwicklung nach dem He-Brennen als masse-arme Sterne

# Massereiche Sterne

- ▶ nach He-Brennen:
- ▶ Kernmasse ist größer als Chandrasekhar-Limit
- ▶ → Kern kontrahiert weiter
- ▶ Sobald die Temperaturen 600 MK erreichen
- ▶ → Kohlenstoff Brennen zündet
- ▶ produziert O, Ne, Na, Mg

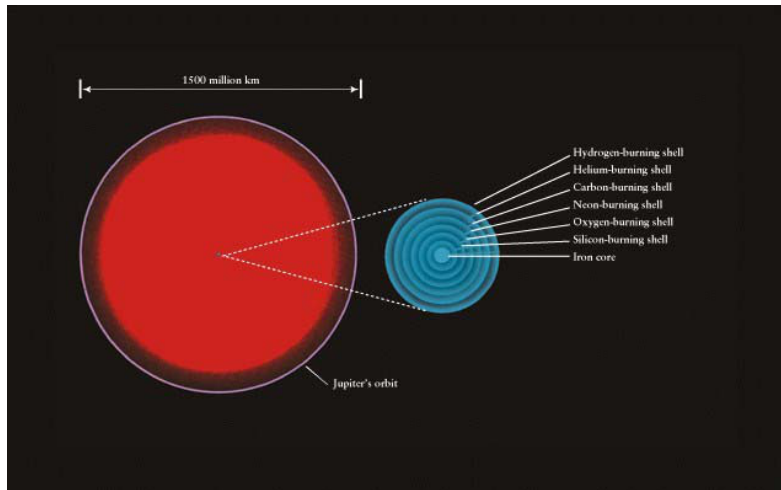
# Massereiche Sterne

- ▶ nach Kohlenstoff Brennen:
- ▶ → Neon Brennen startet bei ca. 1 GK
- ▶ produziert mehr O und Mg
- ▶ nach Neon Brennen:
- ▶ → Sauerstoff Brennen startet bei ca. 1.5 GK
- ▶ produziert hauptsächlich S und Si

# Massereiche Sterne

- ▶ letzte Phase:
- ▶ → Silizium Brennen startet bei ca. 2.7 GK
- ▶ produziert alles bis rauf zu Fe
- ▶ jede dieser Phasen produziert eine neue Rote Riesen Phase
- ▶ und hinterlässt Schalenquellen

# Struktur



# Massereiche Sterne



- ▶ Dabei verliert der Stern große Mengen Material
- ▶ Beispiel: Enten Nebel
- ▶ ca.  $40 M_{\odot}$  Stern
- ▶ starker Massenverlust
- ▶ Gas kollidiert mit ISM



# Massereiche Sterne

- Die Brennphasen laufen immer schneller ab:

Table 22-2 Evolutionary Stages of a  $25\text{-}M_{\odot}$  Star

Stage	Core temperature (K)	Core density ( $\text{kg/m}^3$ )	Duration of stage
Hydrogen burning	$4 \times 10^7$	$5 \times 10^3$	$7 \times 10^6$ years
Helium burning	$2 \times 10^8$	$7 \times 10^5$	$7 \times 10^5$ years
Carbon burning	$6 \times 10^8$	$2 \times 10^8$	600 years
Neon burning	$1.2 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	1 year
Oxygen burning	$1.5 \times 10^9$	$10^{10}$	6 months
Silicon burning	$2.7 \times 10^9$	$3 \times 10^{10}$	1 day
Core collapse	$5.4 \times 10^9$	$3 \times 10^{12}$	$\frac{1}{4}$ second
Core bounce milliseconds	$2.3 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{15}$	
Explosive	about $10^9$	varies	10 seconds

# SN Ausbruch

- ▶ Eisenkern von außen stark geheizt
- ▶ → extrem energiereiche Strahlung im Kern
- ▶ → nukleare Reaktionen starten
- ▶ setzen *Neutrinos* frei
- ▶ diese verlassen den Stern
- ▶ → Kern fängt an zusammen zu fallen

# SN Ausbruch

- ▶ → Temperaturen steigen auf  $5 \times 10^9$  K
- ▶ → *Photosdisintegration* beginnt
- ▶ → Eisen Atomkerne brechen auseinander
- ▶ das kostet enorme Mengen Energie
- ▶ → Kern fällt noch schneller zusammen

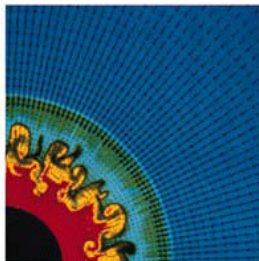
# SN Ausbruch

- ▶ Rest des Sterns merkt das der Kern plötzlich weg ist!
- ▶ → fällt Richtung Zentrum mit 15% der Lichtgeschwindigkeit
- ▶ nach 1/4 Sekunde hat Kern 20 km Durchmesser erreicht
- ▶ Dichte jetzt vergleichbar mit der eines Atomkernes
- ▶ → Material wird extrem 'hart'
- ▶ → Kollaps stoppt und Kern expandiert ein wenig

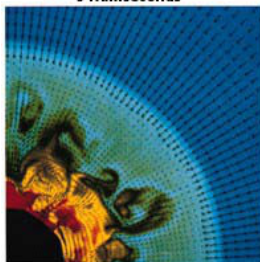
# SN Simulation



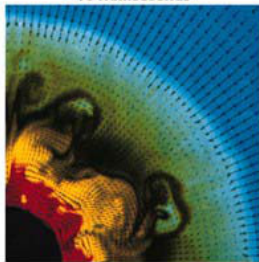
5 milliseconds



10 milliseconds



15 milliseconds



20 milliseconds

# SN Ausbruch

- ▶ das erzeugt starke Schockwelle
- ▶ die stößt mit einfallender Hülle zusammen
- ▶ Schockwelle stark genug um die Implosion in Explosion zu verwandeln
- ▶ nach wenigen Stunden erreicht die Explosion den Rand des Sternes
- ▶ → Supernova (Typ II) Ausbruch

# SN Ausbruch

- ▶ dabei wird 100 mal so viel Energie frei wie die Sonne in ihrem gesamten Leben erzeugt hat!
- ▶ Leuchtkraft der SN erreicht  $10^9$  Sonnenleuchtkräfte
- ▶ Material wird mit mehr als  $10^4 \text{ km s}^{-1}$  abgestoßen
- ▶ spektakuläres Feuerwerk . . .

# SN 1987A

- ▶ hellste und naheste SN seit Kepler
  - ▶ hell genug für das bloße Auge (Südhimmel)
  - ▶ hat 'nur'  $10^8 L_{\odot}$  erreicht (zu früh explodiert!)
  - ▶ Neutrino Emission beobachtet . . .
  - ▶ 3h vor der Entdeckung im sichtbaren Licht!



# SN 1987A

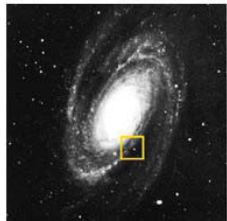


a

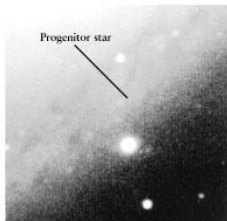
# Extragalaktische SNe

- ▶ Typ II Supernovae sind auch in anderen Galaxien sichtbar
- ▶ Beispiel: SN 1993J
- ▶ auch Elternstern kann u.U. beobachtet worden sein!

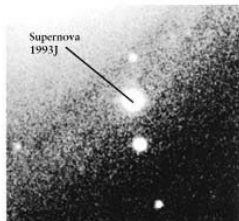
# SN 1993J



a



b

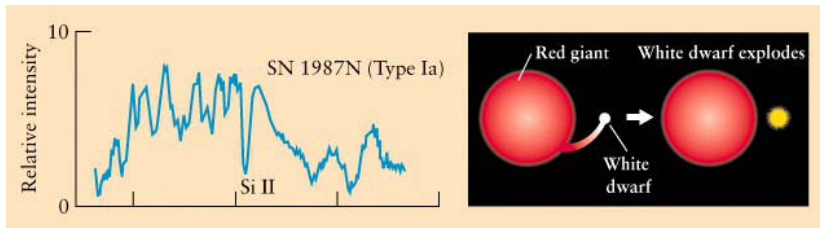


c

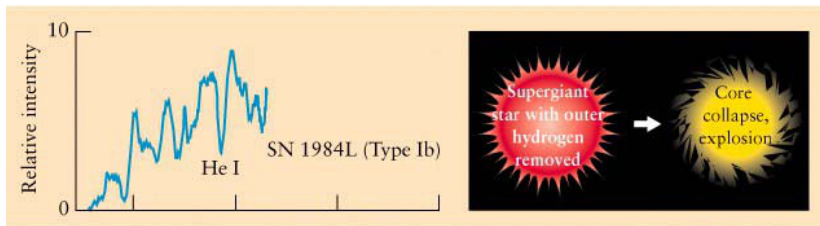
# Typ I SNe

- ▶ Weiße Zwerge in engen Doppelsternen können auch Supernovae produzieren
- ▶ Begleiter entwickelt sich
- ▶ und dehnt sich dabei aus
- ▶ → Material strömt auf den WD
- ▶ Masse des WD  $>$  Chandrasekhar Limit
- ▶ → Kollaps setzt ein
- ▶ dabei zündet C und O Brennen explosiv
- ▶ → der ganze WD wird zerrissen
- ▶ → *Typ Ia Supernova*

# Supernova Typen

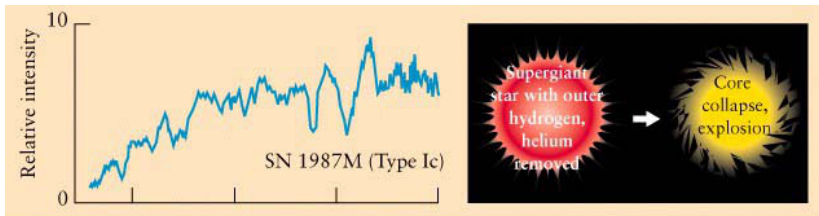


a

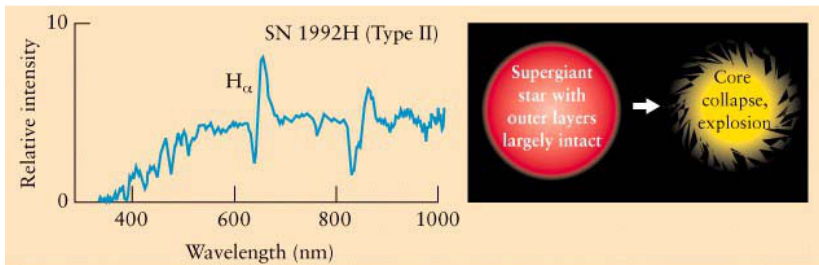


b

# Supernova Typen

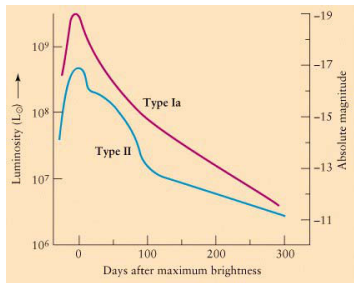


c



d

# Lichtkurven



- ▶ SN Typen können z.B. über Lichtkurven unterschieden werden
- ▶ späte LC durch radioaktiven Zerfall bestimmt!

# Supernova Überreste

- ▶ bei der Explosion abgestoßenes Material
- ▶ produziert leuchtenden Nebel
- ▶ viele solcher Nebel sind bekannt
- ▶ Beispiel Gum Nebel:
  - ▶ 60° Durchmesser im Himmel
  - ▶ ca. 400 Lichtjahre entfernt
  - ▶ Zentrum ca. 1500 Lichtjahre entfernt
  - ▶ SN vor ca. 11000 Jahren explodiert
  - ▶ vermutlich so hell wie der Halbmond!



# Gum nebula



# Was bleibt übrig?

- ▶ “Cygnus loop”
- ▶ ca. 15000 Jahre alt
- ▶ ca. 120 Lichtjahre groß
- ▶ ca. 2600 Lichtjahre entfernt

# Cygnus Loop



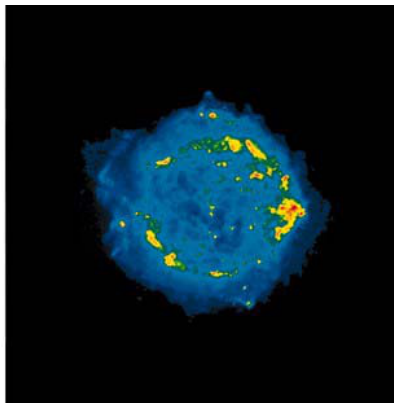
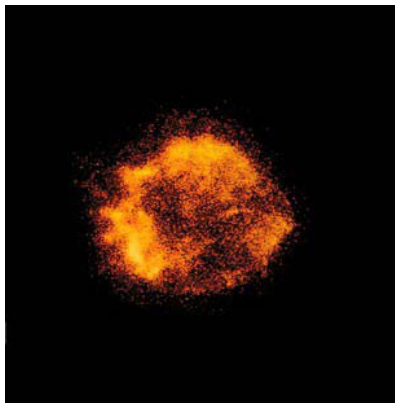
# Cygnus Loop HST



# Supernova Überreste

- ▶ SN Überreste werden am besten mit Radioteleskopen gejagt
- ▶ Cas A: vor ca. 300 Jahren explodiert (nicht gesehen!)
- ▶ Milchstraße sollte ca. 1–5 SNe pro Jahrhundert zeigen
- ▶ die Meisten davon sind durch Staub verdeckt

# Cas A: Röntgen & Radio



# Was bleibt sonst noch?

- ▶ Neutronenstern (s.u.!)
- ▶ Schwarzes Loch (s.u.!)

# Zusammenfassung

