

# Spätstadien der Sternentwicklung

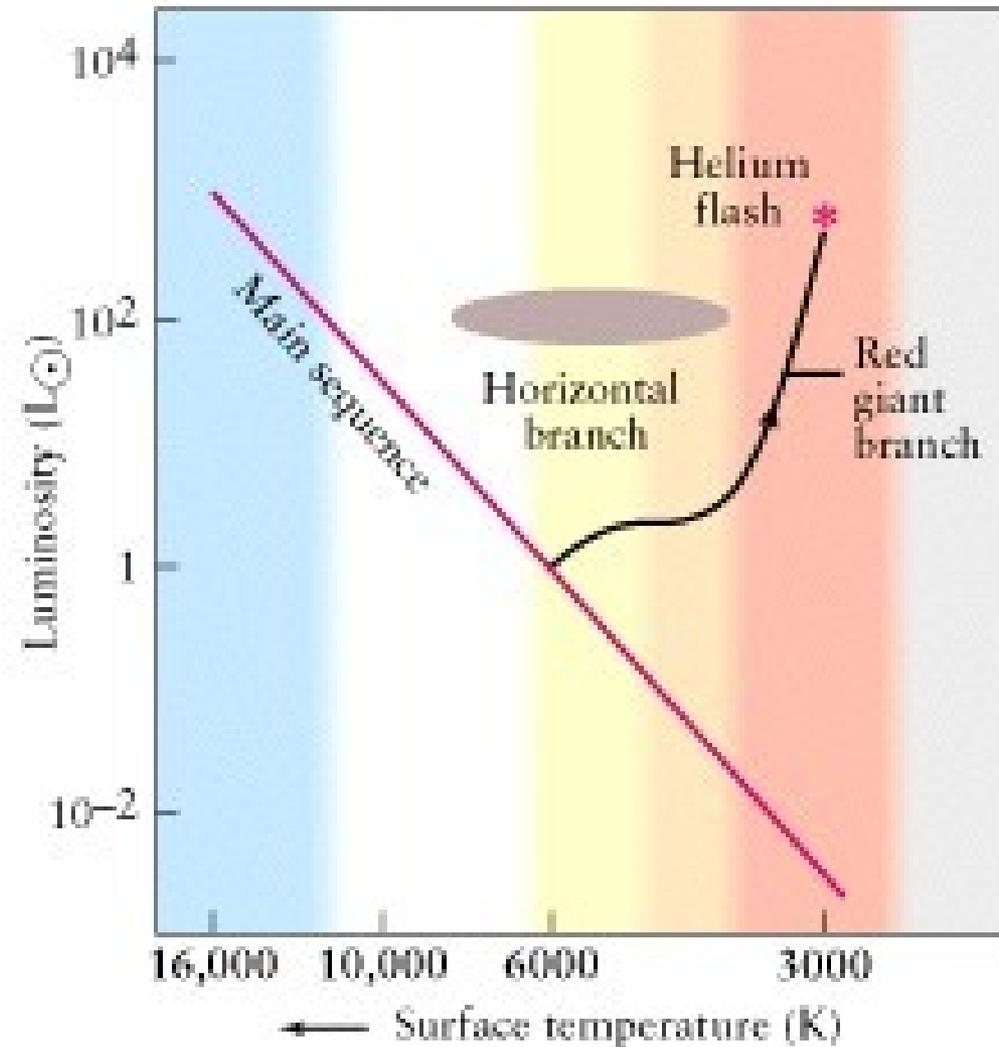
- Wiederholung: Entwicklung nach dem H-Brennen
- Altersbestimmung
- Supernovae
- Neutronensterne
- Pulsare
- Schwarze Löcher



# Wiederholung: Das Brennen nach der Hauptreihe

## Roter Riese:

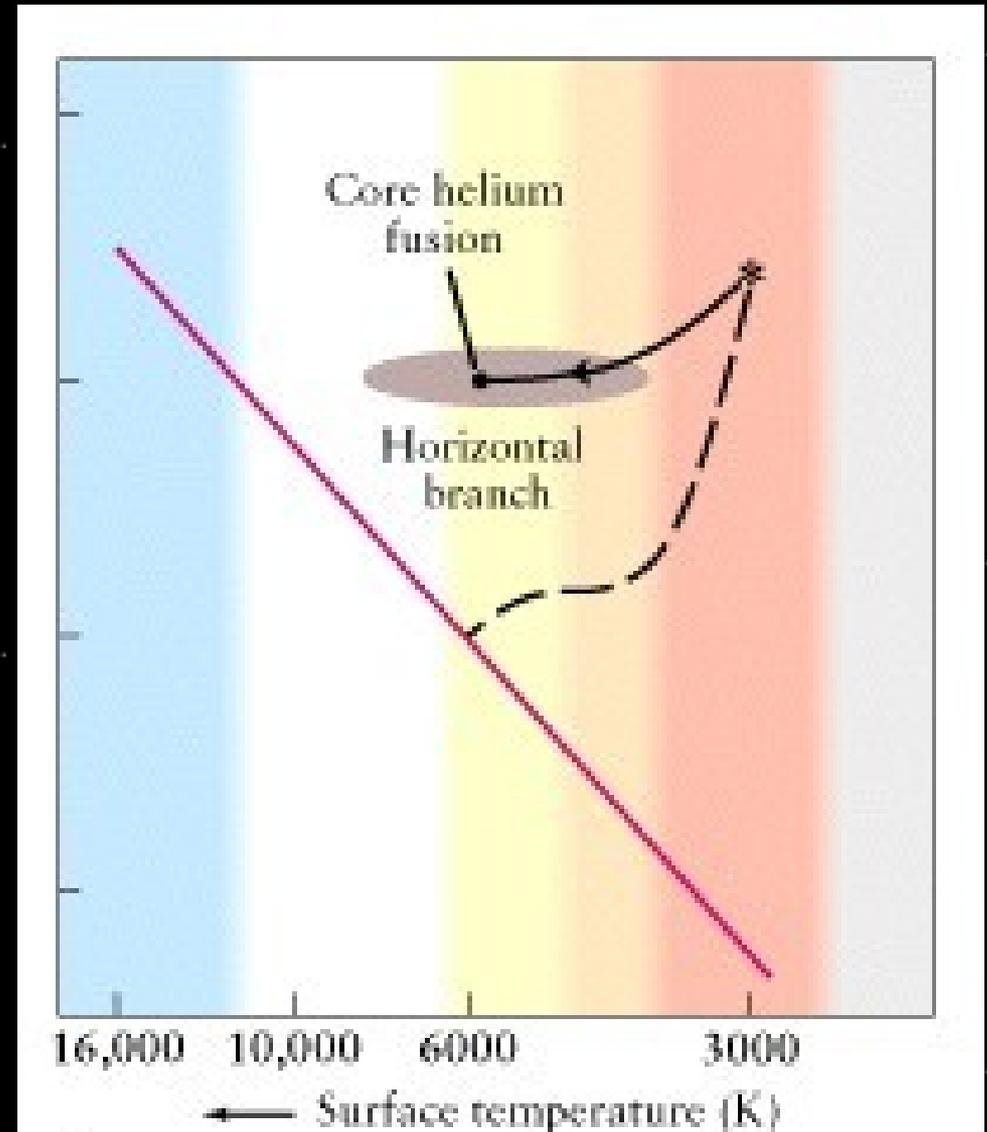
- Kontraktion des Kerns nachdem H im Kern verbrannt ist
- Helium-Blitz bei Zündung des He im Kern



# Wiederholung: Das Brennen nach der Hauptreihe

## Horizontal-Zweig:

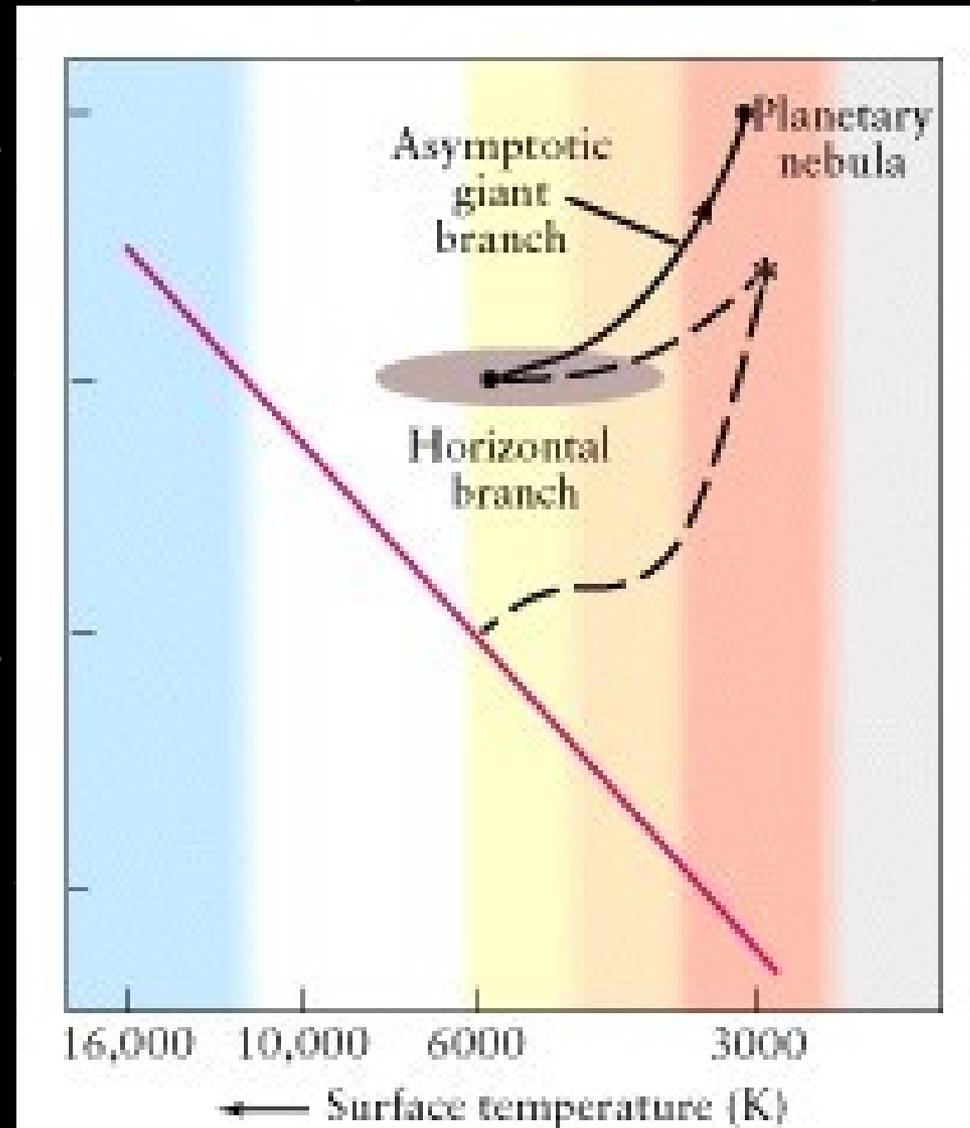
- Stabile He-Fusion im Kern
- Kurze Phase



# Wiederholung: Das Brennen nach der Hauptreihe

## AGB (Asymptotic Giant Branch):

- Nachdem He in Kern verbrannt, fällt Kern in sich zusammen,
- He-Fusion in Schale
- Schale dehnt sich aus wegen
- C-Blitz bei ausreichender Masse
- Produktion von planetaren Nebeln



# Nebenprodukt: Der planetare Nebel

Die äußersten Schalen können nicht mehr gehalten werden.

Sie gehen verloren und bilden einen **planetaren Nebel**

- ~ 10,000 PNs in der Milchstraße
- Lebensdauer: einige 10,000 Jahre
- Größe: 1000 AU - 1pc
- Temperatur 25000 - 100000K
- Zentralstern: AGB  
bis weißer Zwerg

Masseverlust:

- 10-40%
- ändert Masse des Sterns und damit weitere Entwicklung



**Helix Nebel**

Planetary Nebula NGC 6751

**NGC6751**



Hubble  
Heritage

# Der Eskimonebel



**NGC 2392 • “Eskimo” Nebula**

**HST • WFPC2**

NASA, ESA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-07

# Das Katzenauge



**NGC 6543**

PR95-01a · ST ScI OPO · January 1995 · P. Harrington (U.MD), NASA

**HST · WFPC2**

12/13/94 zgl

# Stundenglas-Nebel



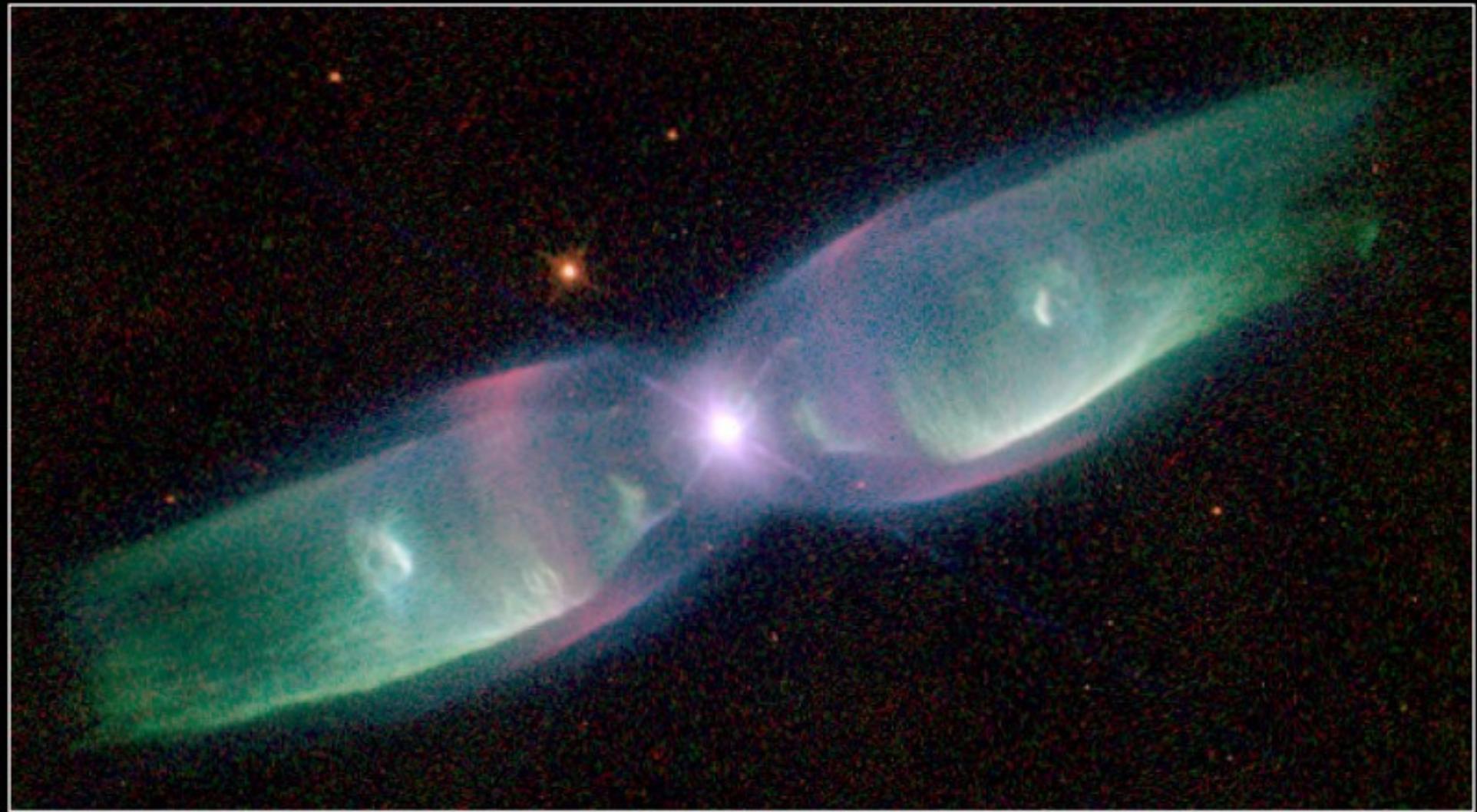
**Hourglass Nebula · MyCn18**

**HST · WFPC2**

PRC96-07 · ST ScI OPO · January 16, 1996

R. Sahai and J. Trauger (JPL), the WFPC2 Science Team and NASA

M2-9



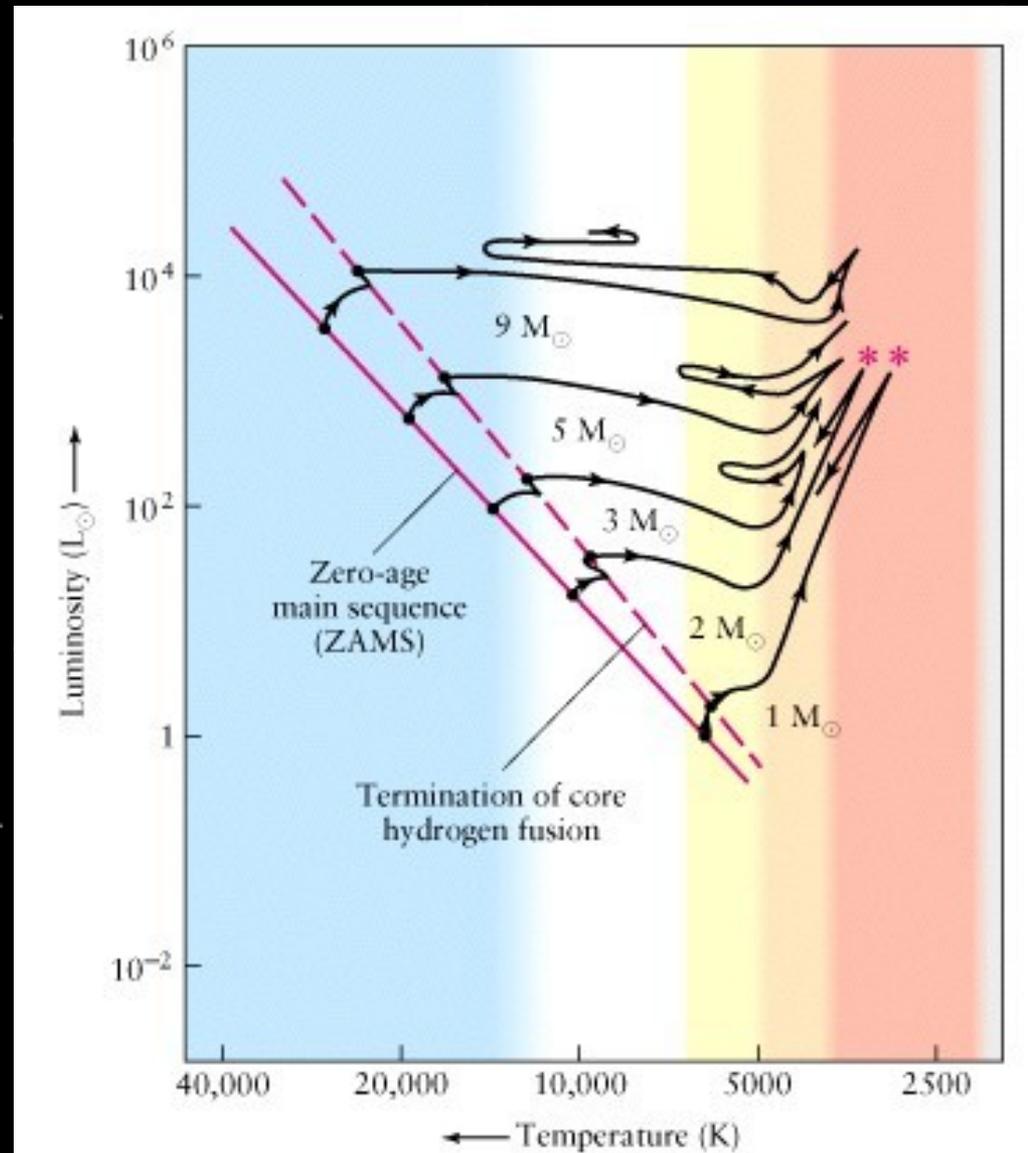
Planetary Nebula M2-9

HST • WFPC2

PRC97-38a • ST ScI OPO • December 17, 1997

B. Balick (University of Washington) and NASA

# Wiederholung: Das Brennen nach der Hauptreihe



# Das Russell-Vogt Theorem

- $M_* < 0.02 M_\odot$ : leichte Erwärmung durch Gravitationsdruck und Konvektion im Kern
- $0.02 < M_* < 0.085 M_\odot$ : *Brauner Zwerg*  $\sim 3,000,000\text{K}$  im Kern  
H-Brennen wird nie erreicht
- $0.085 < M_* < 0.4 M_\odot$ : masseärmste Sterne,  
He-Brennen wird nie erreicht
- $0.4 < M_* < 3 M_\odot$ : massearme Sterne:  $H \rightarrow He$  (*p-p Kette*)  
 $He \rightarrow C$  (*Triple- $\alpha$* )
- $M_* > 3 M_\odot$ : massereiche Sterne:  $H \rightarrow He$  (*CNO Kette*)  
 $He \rightarrow C$  (*Triple- $\alpha$* ),  $^{12}\text{C} \rightarrow \text{Ne, Na, Mg, O}$

# Altersbestimmung durch Sternhaufen

- Alle Sterne eines Haufens sind etwa gleichzeitig entstanden
  - Entsprechend ihrer Masse entwickeln sie sich unterschiedlich schnell

Masse [ $M_{\odot}$ ]	Spektral- typ	Kontraktion z. HR	Haupt- reihe	Riese	Roter Riese
30	O5	0,02	4,9	0,55	0,3
15	B0	0,06	10	1,7	2
9	B2	0,2	22	0,2	5
5	B5	0,6	68	2	20
3	A0	3	240	9	80
1,5	F2	20	2000	280	
1,0	G2	50	10000	680	
0,5	M0	200	30000		
0,1	M7	500	$10^7$		

# Altersbestimmung durch Sternhaufen

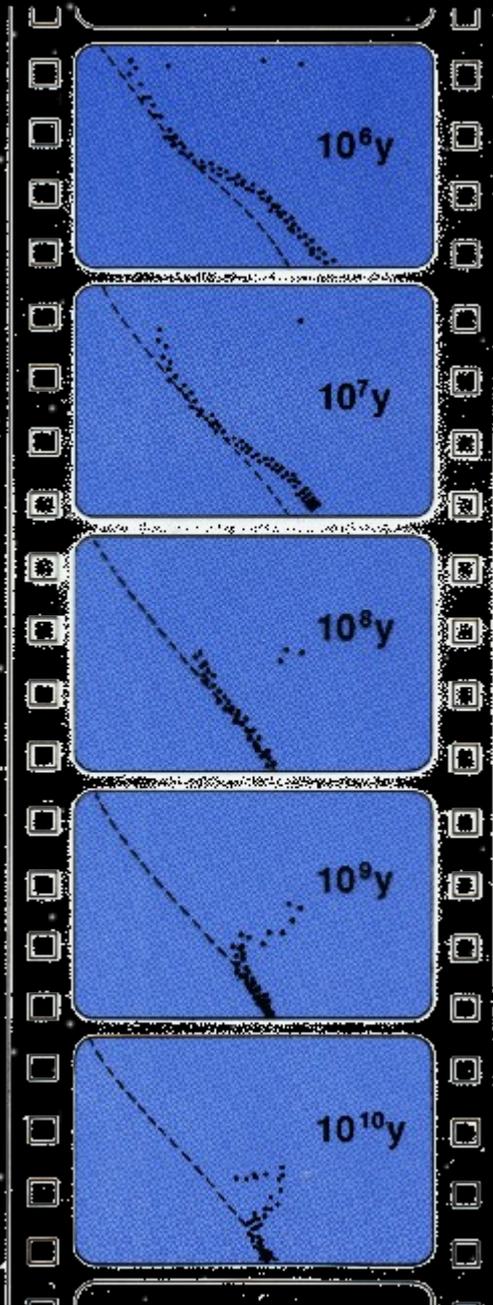
- Alle Sterne eines Haufens sind etwa gleichzeitig entstanden
  - Entsprechend ihrer Masse entwickeln sie sich unterschiedlich schnell
  - Wenn alle Massen vertreten sind, ist das Alter gegeben durch die Sterne, die auf der Hauptreihe schon fehlen.



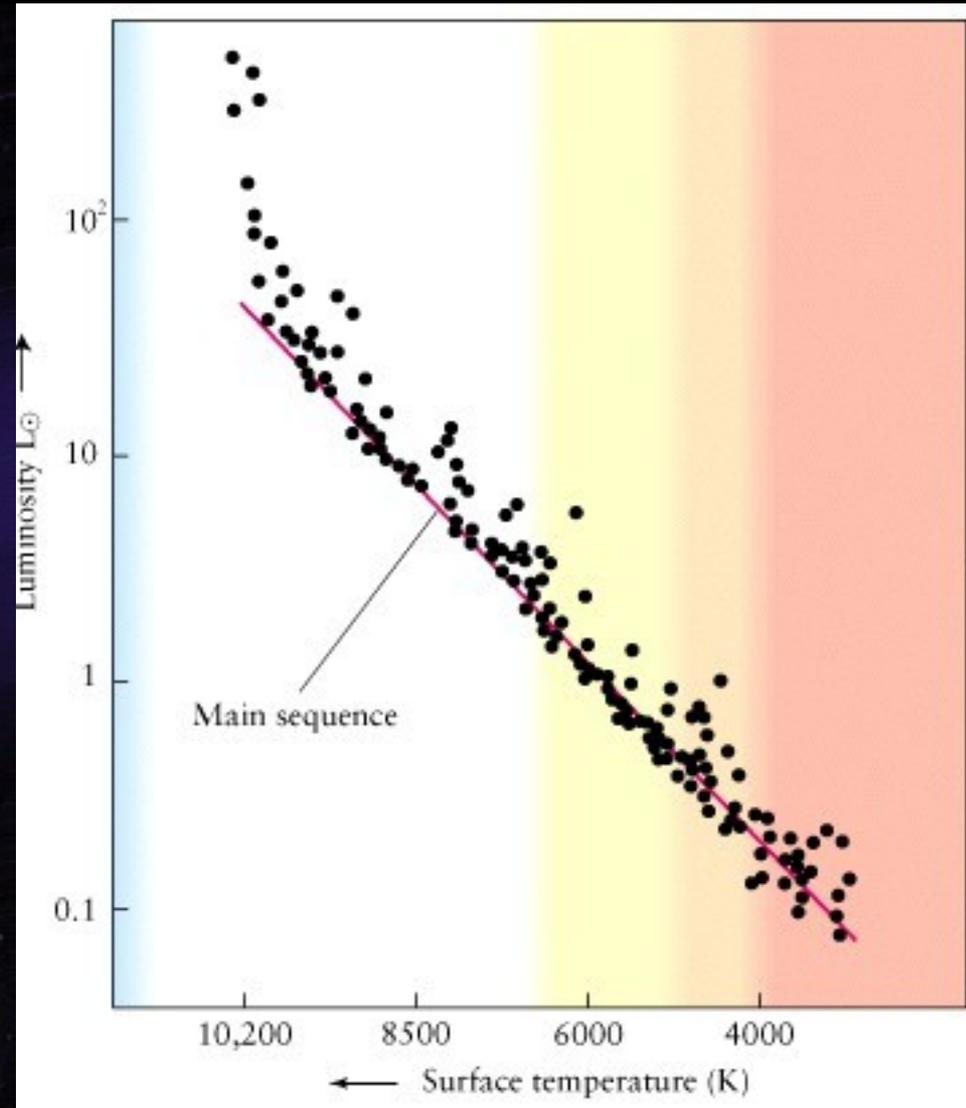
# Der "Knick" in der Sternhaufen-Entwicklung

Der Knick in der HR markiert den Zeitpunkt, zu dem die Sterne ihren Wasserstoff aufgebraucht haben und sich in Richtung der roten Riesen bewegen.

Aus der Knickstelle kann somit das Alter des Sternhaufens abgelesen werden.

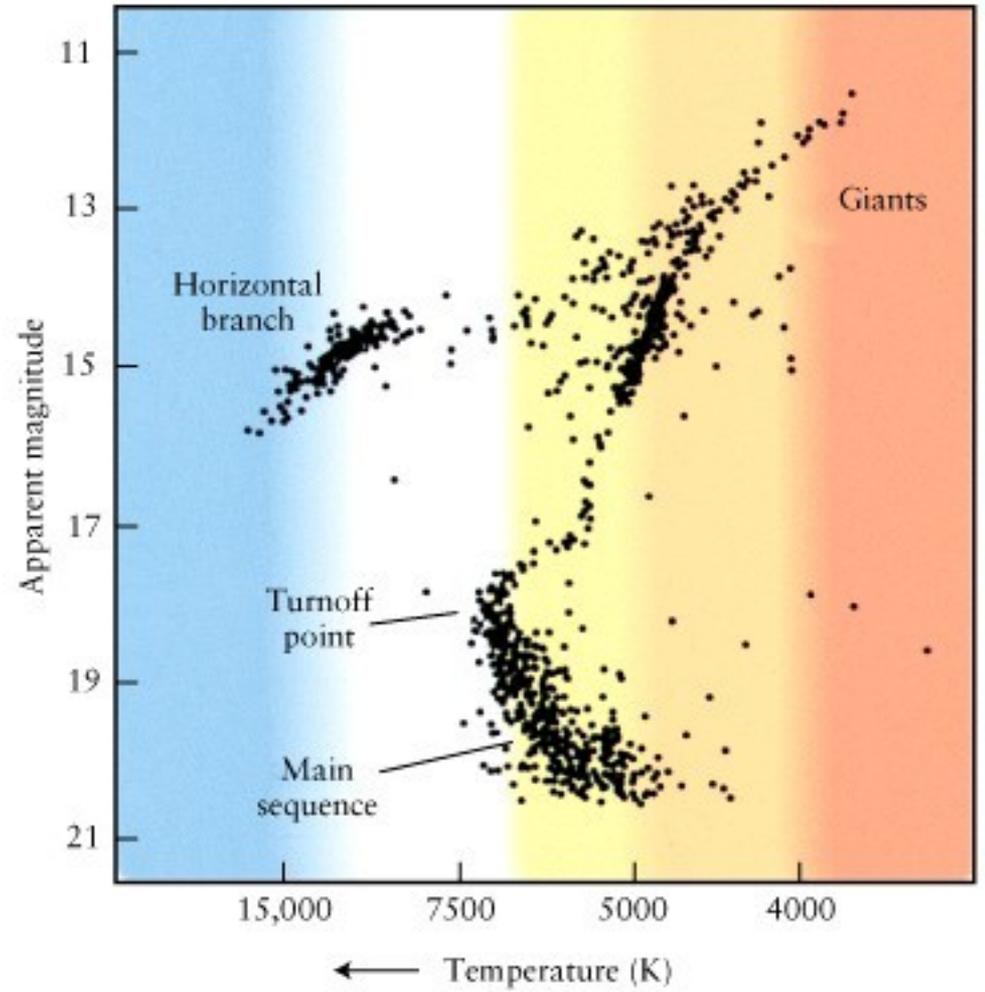


# Die Pleiaden



< 100 Mill. Jahre, Reststaub der Mutterwolke sichtbar

# M55

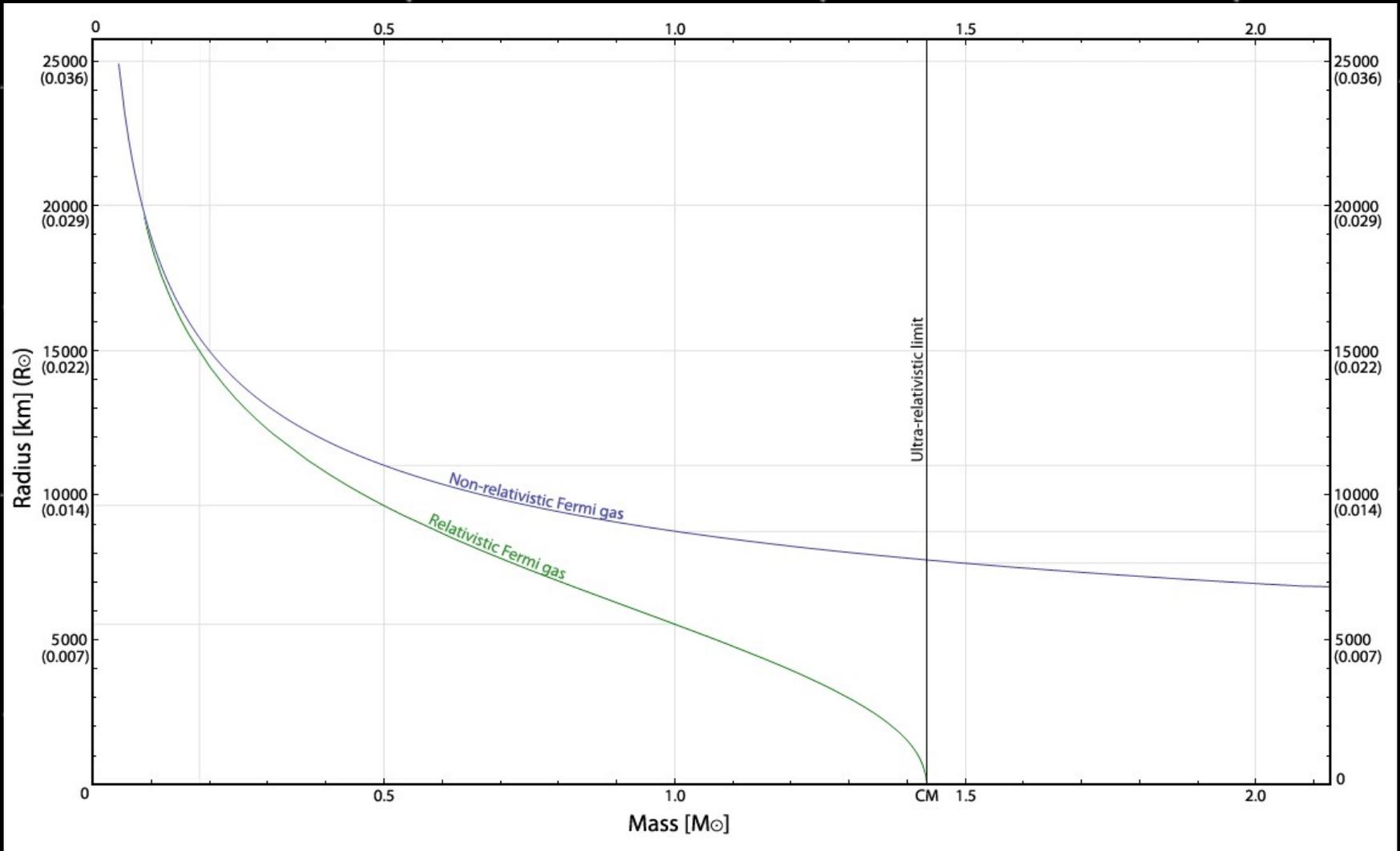


15 Milliarden Jahre

# Letzte Stufe: Der Weiße Zwerg

- Nachdem die äußersten Schalen abgestoßen wurden, fällt der Kern nach Erlöschen der Fusion in sich zusammen
- Bildet Kern aus entartetem Elektronengas
- **Entartetes Gas:**
  - Quantenmechanischer Effekt (Pauli-Prinzip):  
2 Fermionen können nie im selben Zustand sein  
→ Fermi-Gasdruck, unabhängig von T
  - Stabile Sternkonfiguration ohne Fusion,
  - Nichtrelativistisch:  $R \sim 1/M^{1/3}$
  - Hinzufügen von Masse: R nimmt ab

# Entartetes Gas



# Entartetes Gas

- Hinzufügen von Masse: R nimmt ab

- Chandrasekhar-Masse:

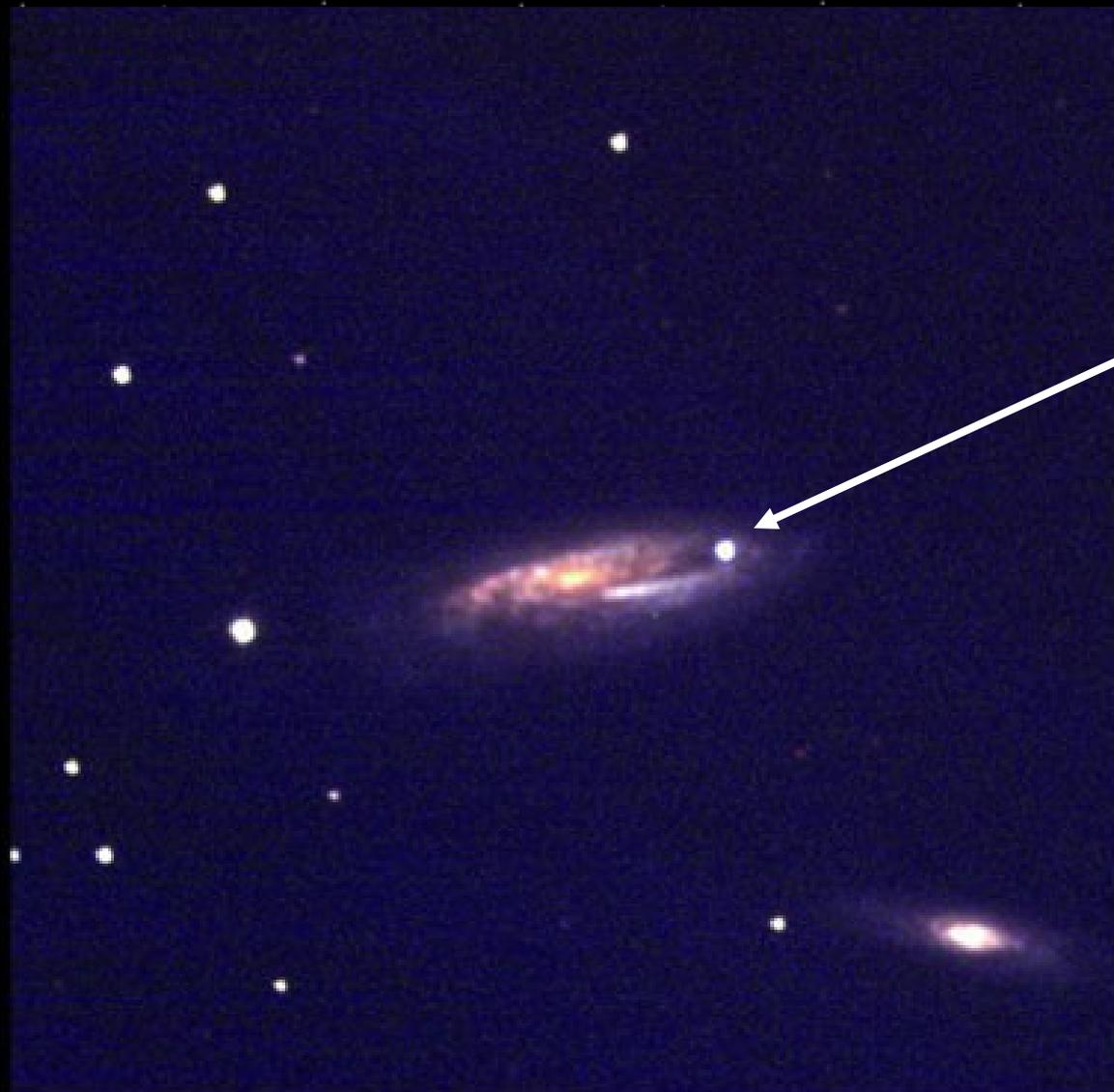
$$R=0 \text{ bei } M = 2.018 \frac{\sqrt{3\pi}}{2} \left( \frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{(\mu_e m_h)^2} = 1.4 M_\odot$$

- Wenn die Masse bis zur kritischen Masse wächst kollabiert der Stern
- Die Gravitationsenergie wird mit einem Schlag frei
- $L = 10^9 L_\odot$ , genauso hell wie Galaxie

## Supernova

- Freigesetzte Energie = Gesamtenergie der Sonne in 10 Milliarden Jahren

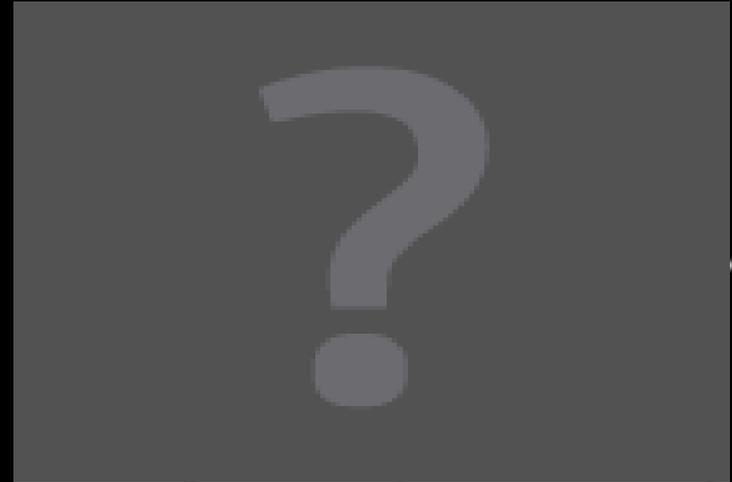
# Supernovae

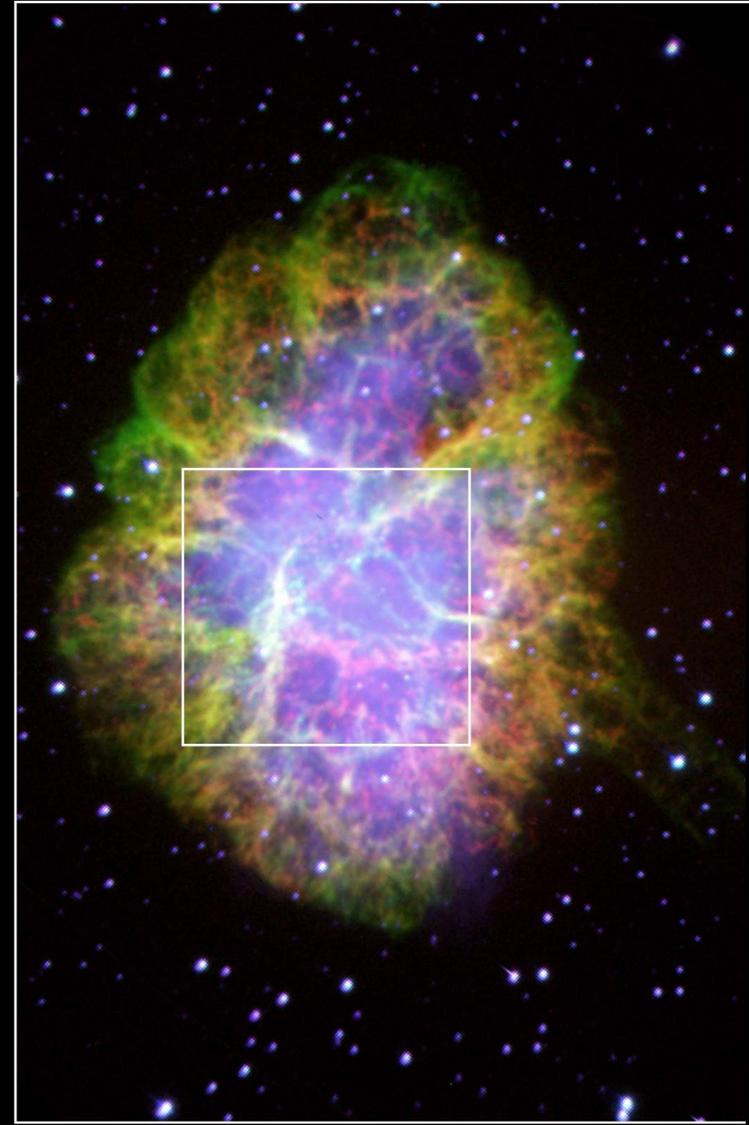


SN

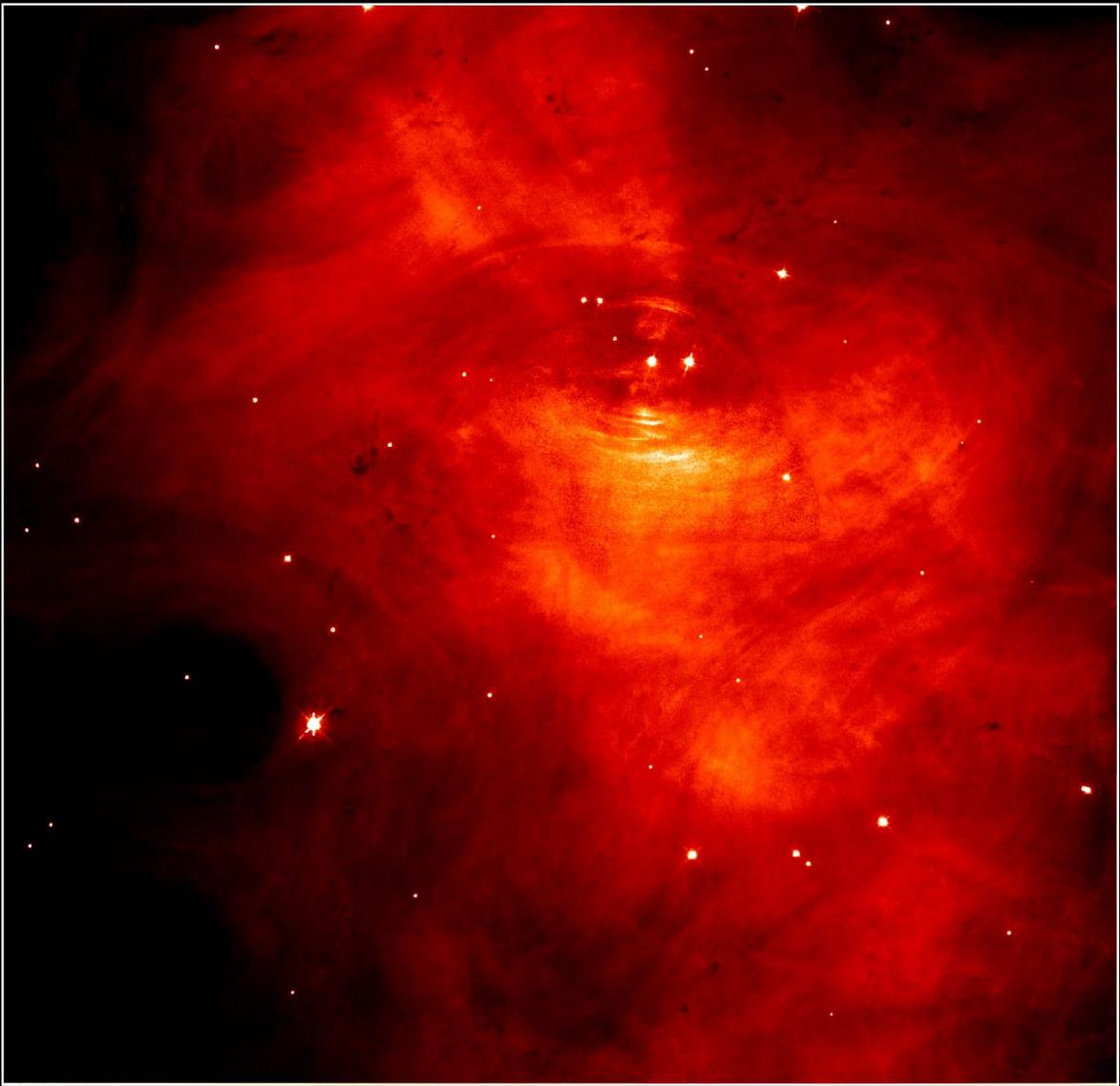
# Supernovae

- Explosion + Kollaps
- $> 1.4 M_{\odot}$





Palomar



# Crab Nebula

Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

# Supernova-Typen

**Type Ia:** kein H im Spektrum

Konstante Helligkeit:  $4 \times 10^9 L_{\odot} = -19^m$

Scharfes Helligkeitsmaximum

Schnelle Helligkeitsabnahme

**Type II:** H-Emission im Spektrum

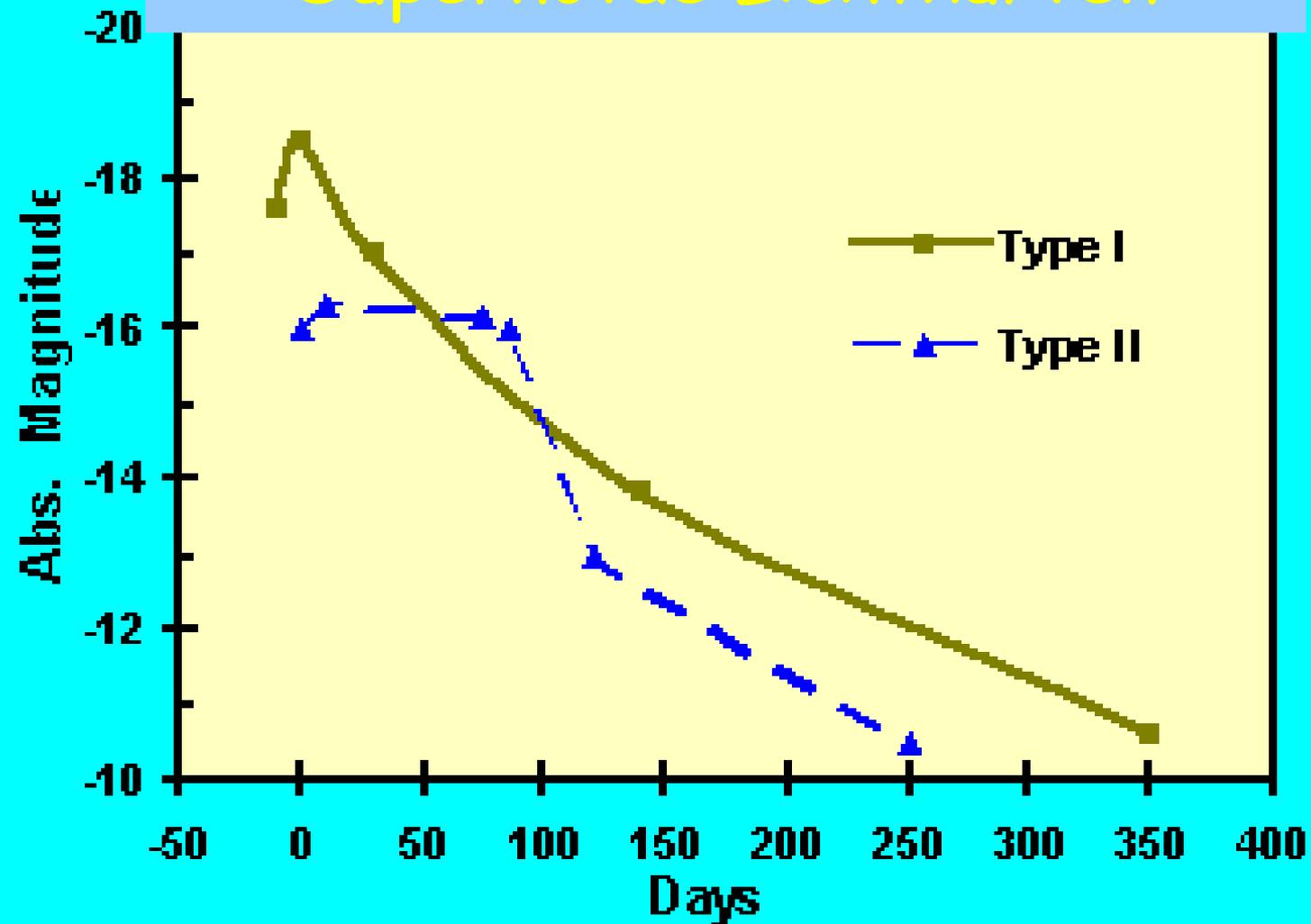
Helligkeit  $< 10^9 L_{\odot} > -17^m.5$

Unregelmässige Helligkeitsabnahme

Breites Helligkeitsmaximum

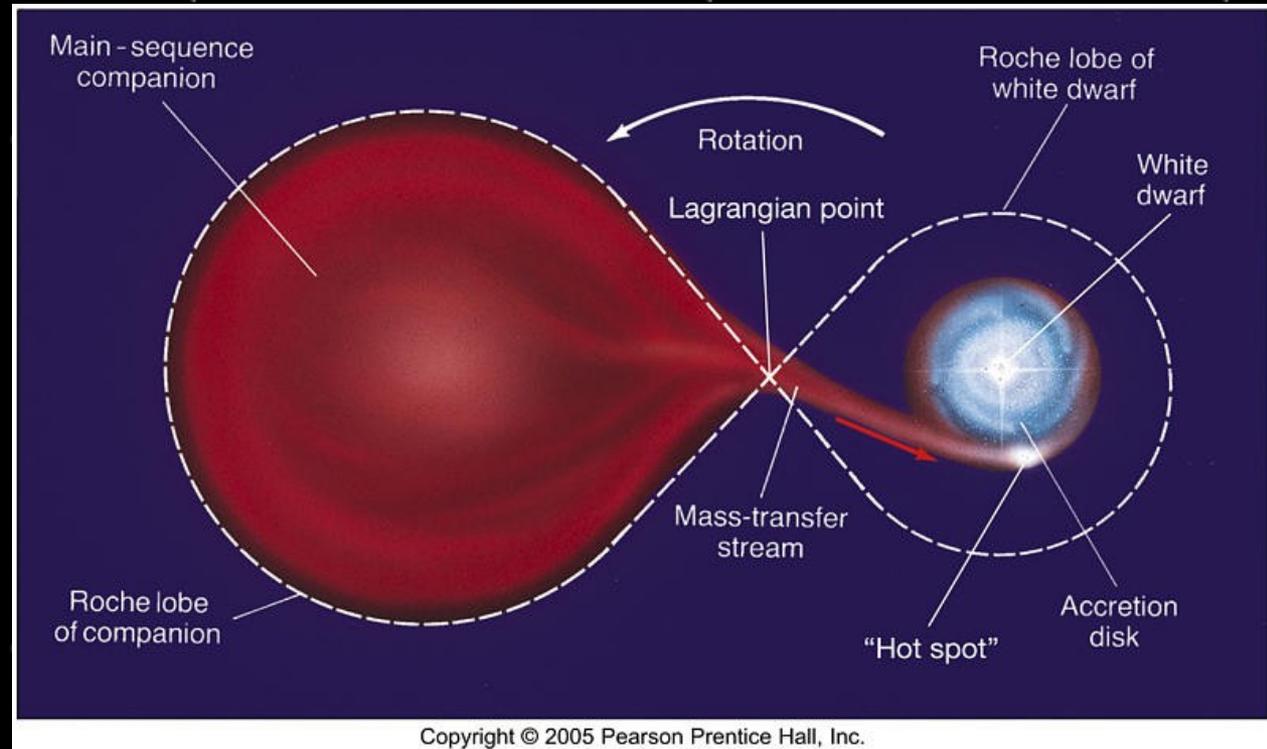
**Typen Ib, Ic (selten):** kein H aber breites Maximum

# Supernovae Lichtkurven



# Supernova-Typen

Type Ia: Weißer Zwerg nimmt Masse von Begleiter auf



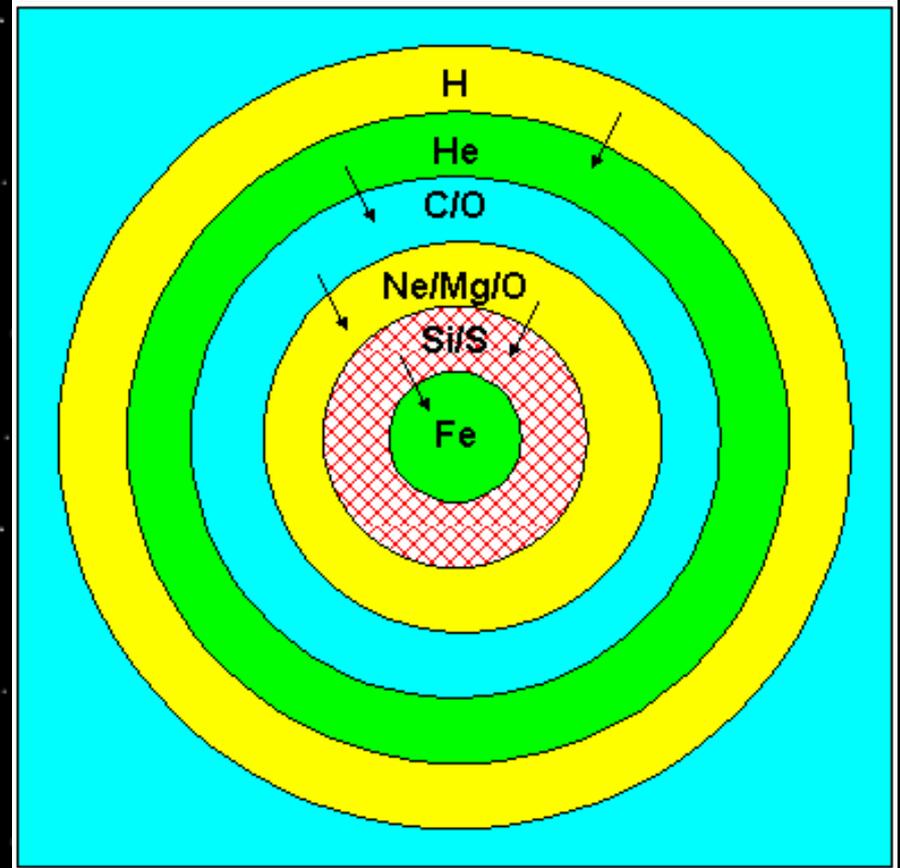
- Hervorragende "Standardkerze" durch genau definierte Bedingungen

# Supernova-Typen

**Type II:** Eisenkernzusammenfall nach Schalenbrennen

Sobald entarteter Kern groß genug geworden ist, kollabiert er.

Genauer Verlauf abhängig von Restschalen



**Type Ib, Ic:** wie Typ II aber H-Hüllen vorher weggeblasen

# Verlauf der Typ-II SN-Explosion ( $25M_{\odot}$ -Stern)

- Kern fällt zusammen wenn Chandrasekhar-Masse durch Fe Ablagerung erreicht ist:  $0.2 \text{ s}$ ,  $T=5 \times 10^9 \text{ K}$
- Kern wandelt sich um in Neutronenstern: Unverdichtbar  
→ Core bounce:
  - Die einstürzenden Schalen prallen ab
  - Neutrinos und Gammastrahlen aus dem Kern sprengen die Hülle explosionsartig ab
- Supernova leuchtet auf um Faktor  $10^8$
- $20 M_{\odot}$  der Hülle werden abgeworfen
- In der Hülle werden durch den Druck der Neutrinos und der Schockwelle schwere Elemente gebildet

**Alle Elemente schwerer als Eisen stammen aus  
Supernova-Explosionen**

# Verlauf der Typ-II SN-Explosion ( $25M_{\odot}$ -Stern)

Table 12-1  
Evolutionary Stages of a  $25M_{\odot}$  Star

Stage	Central temperature (K)	Central density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Duration of stage
Hydrogen fusion	$4 \times 10^7$	$5 \times 10^3$	$7 \times 10^6$ yr
Helium fusion	$2 \times 10^8$	$7 \times 10^5$	$5 \times 10^5$ yr
Carbon fusion	$6 \times 10^8$	$2 \times 10^8$	600 yr
Neon fusion	$1.2 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	1 yr
Oxygen fusion	$1.5 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$	6 mo
Silicon fusion	$2.7 \times 10^9$	$3 \times 10^{10}$	1 d
Core collapse	$5.4 \times 10^9$	$3 \times 10^{12}$	0.2 s
Core bounce	$2.3 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{17}$	milliseconds
Supernova explosion	about $10^9$	varies	10 s

# Bekannte Supernovae

(in unserer Milchstraße)

man erwartet etwa eine Supernova pro 100 Jahre:

Von 7-10 Supernovae hat man die „Reststrahlung“ (im Optischen, Radio, Röntgen) gefunden. Nur 4 SN in den letzten 1000 Jahren:

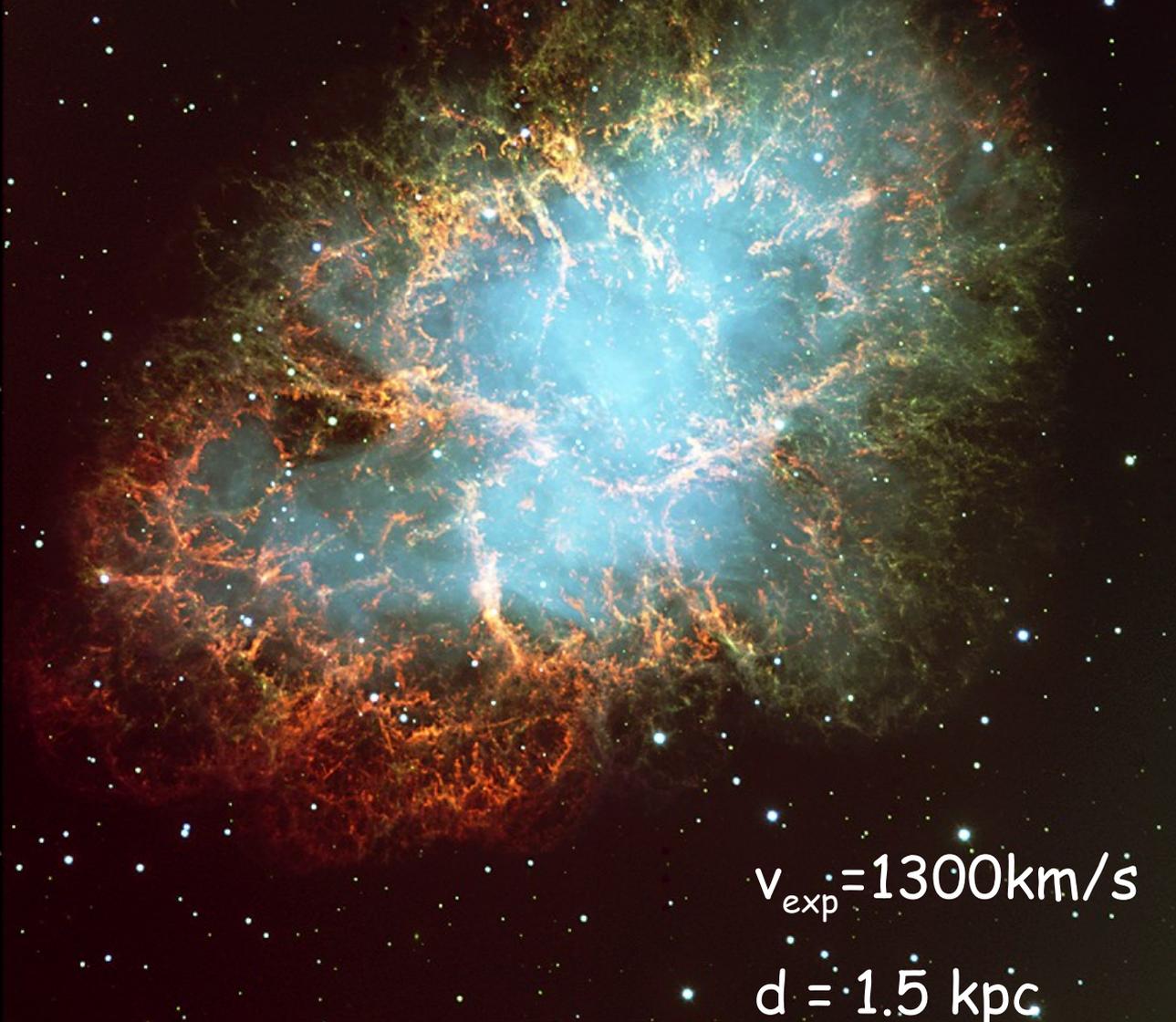
**SN 1006** - Centaurus A am Südhimmel

**SN 1054** - Die Krebs Supernova in Taurus

**SN 1572** - Tychos Supernova

**SN 1604** - Keplers Supernova

# SN 1054: Der Krebsnebel

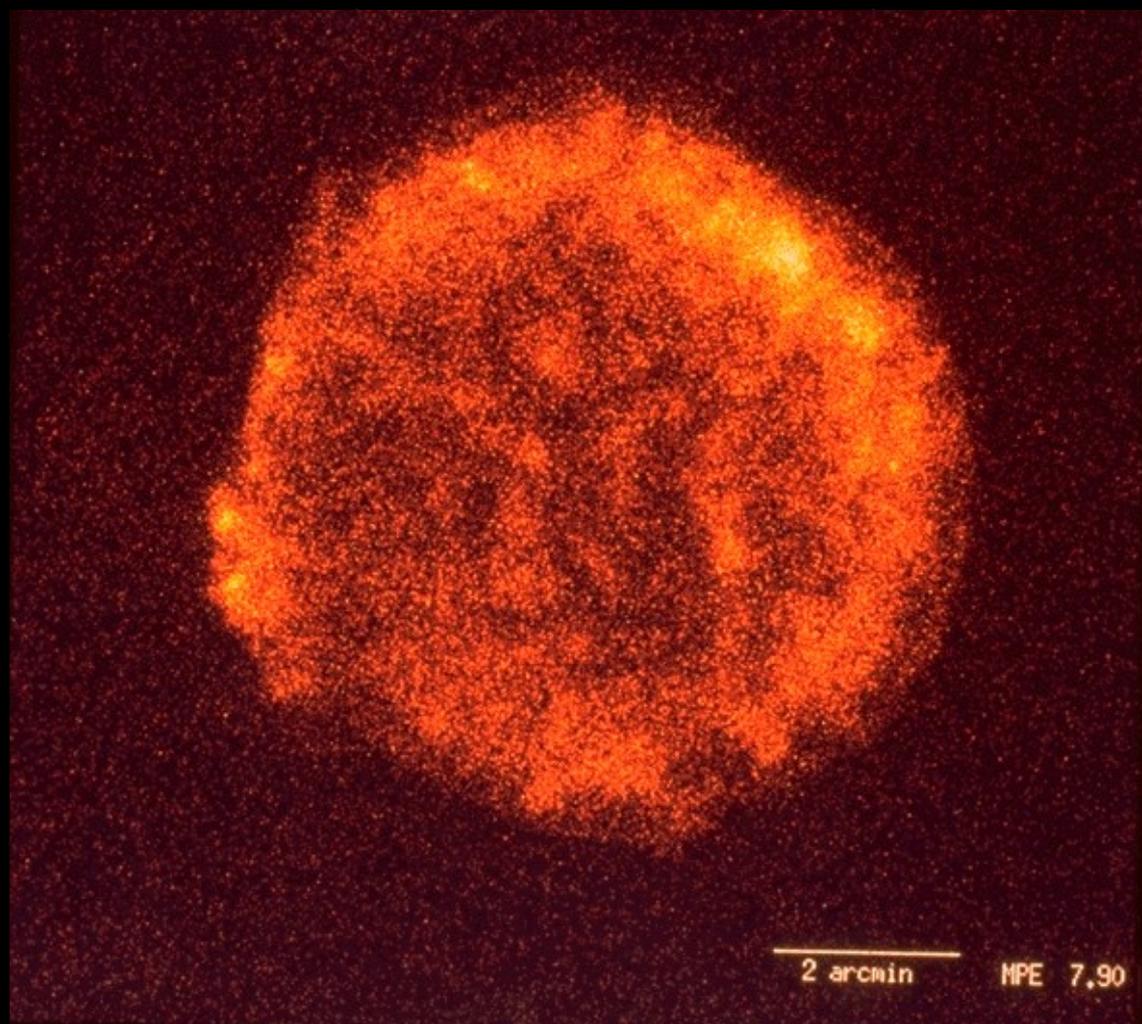


$$v_{\text{exp}} = 1300 \text{ km/s}$$

$$d = 1.5 \text{ kpc}$$

The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

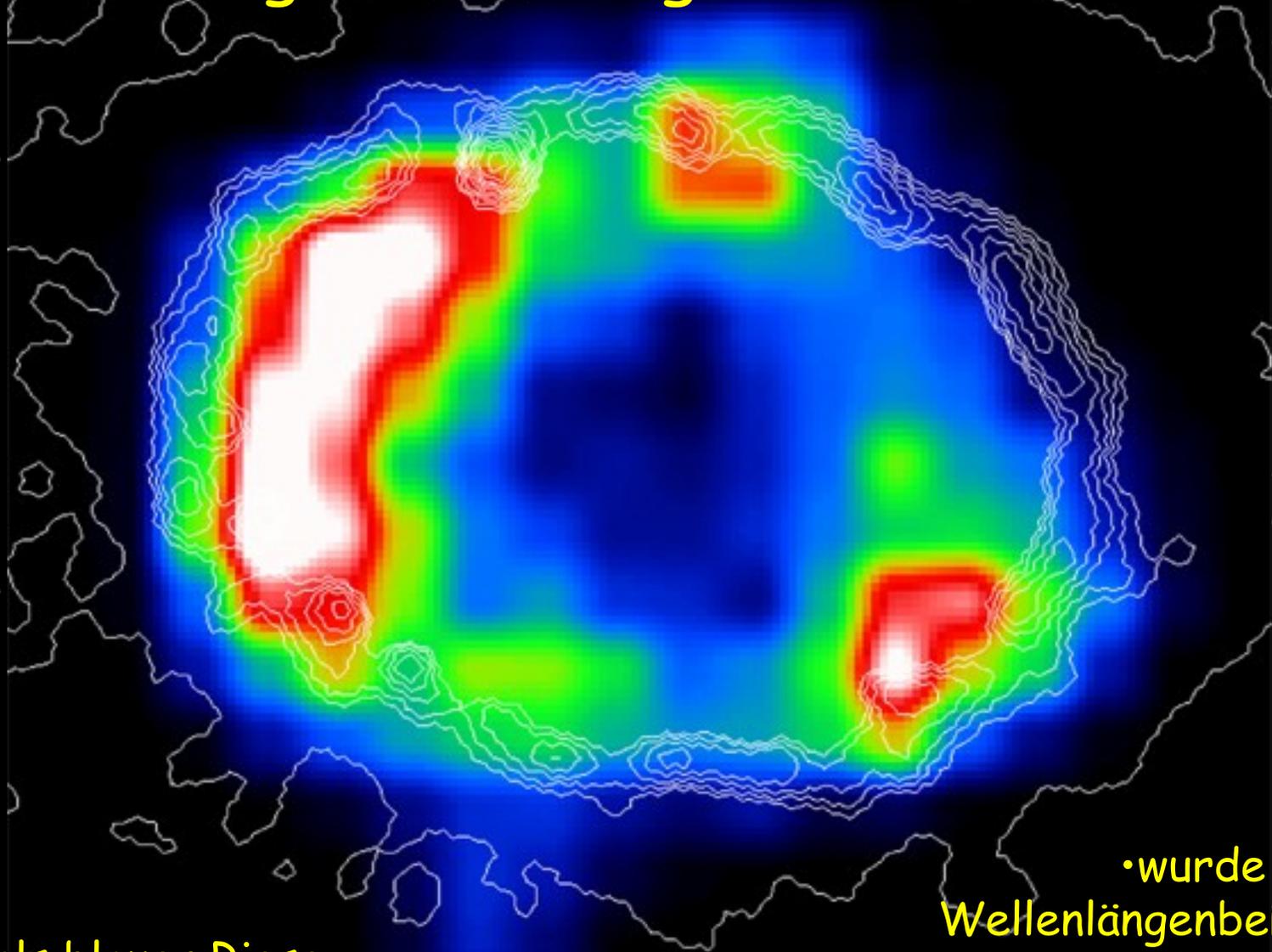
# Tychos SNR 1572



# Die Supernova 1987A in der LMC



# Röntgenstrahlung in SN 1987a



- ehemals blauer Riese  
mit 15 Sonnenmassen

- wurde in allen  
Wellenlängenbereichen  
beobachtet, auch Neutrinos  
wurden aufgefangen (19 Stück)

# SN 1987A

- Typ II
- Zusammenfall eines heißen, blauen Superriesen (nur  $15 M_{\odot}$ )
- Neutrinos (Detektion mehrere Stunden vor der optischen Beobachtung)
  - $20 \times 10^{12}$  durch einen Menschen
- Zwei sichtbare Ringe:  
Abgestoßene Schalen ionisiert durch SN:
  - Exakte Abstandsbestimmung durch "Echo" der Explosion
- SNR: noch nicht nachgewiesen

# Supernova 1987 A



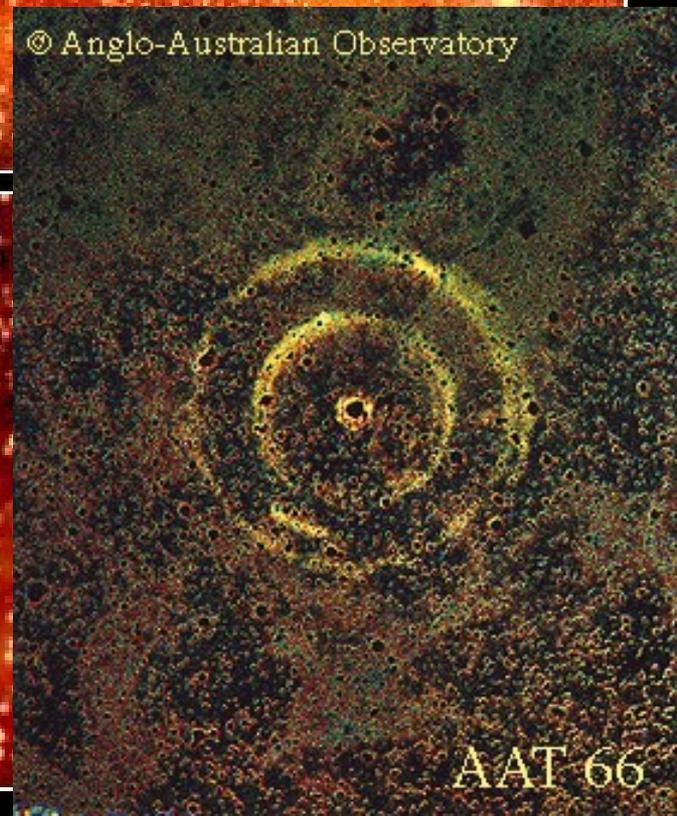
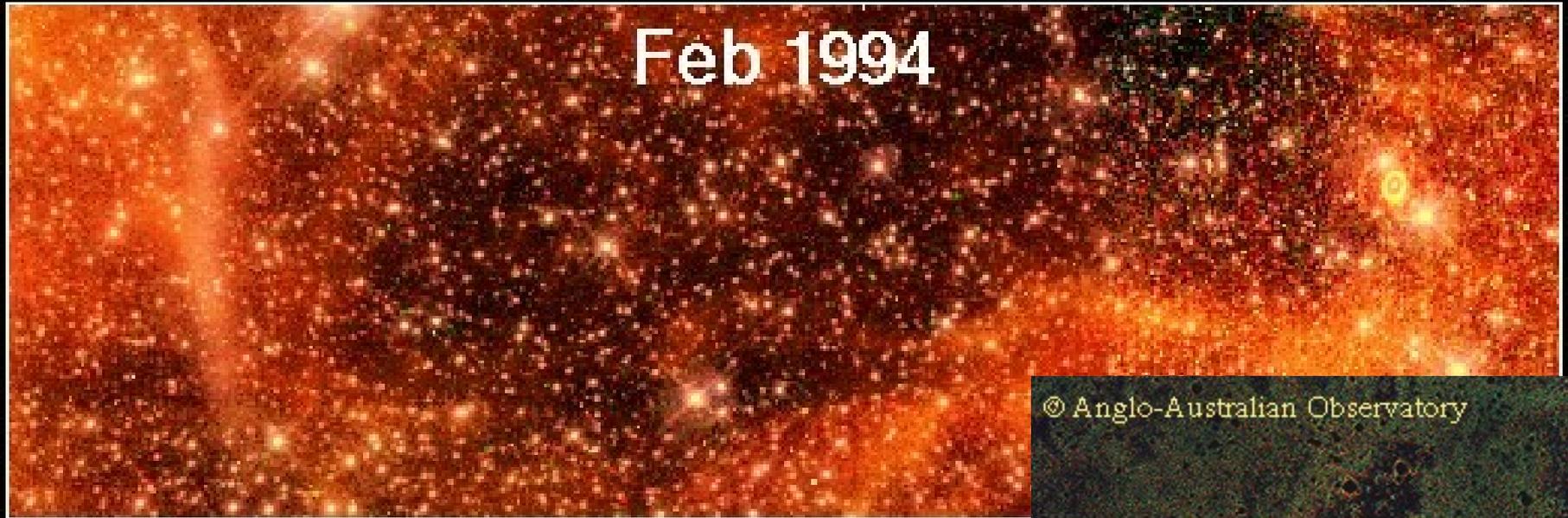
Hubble  
Heritage

# Die Ringe der SN1987a



Hubble Space Telescope  
Wide Field Planetary Camera 2

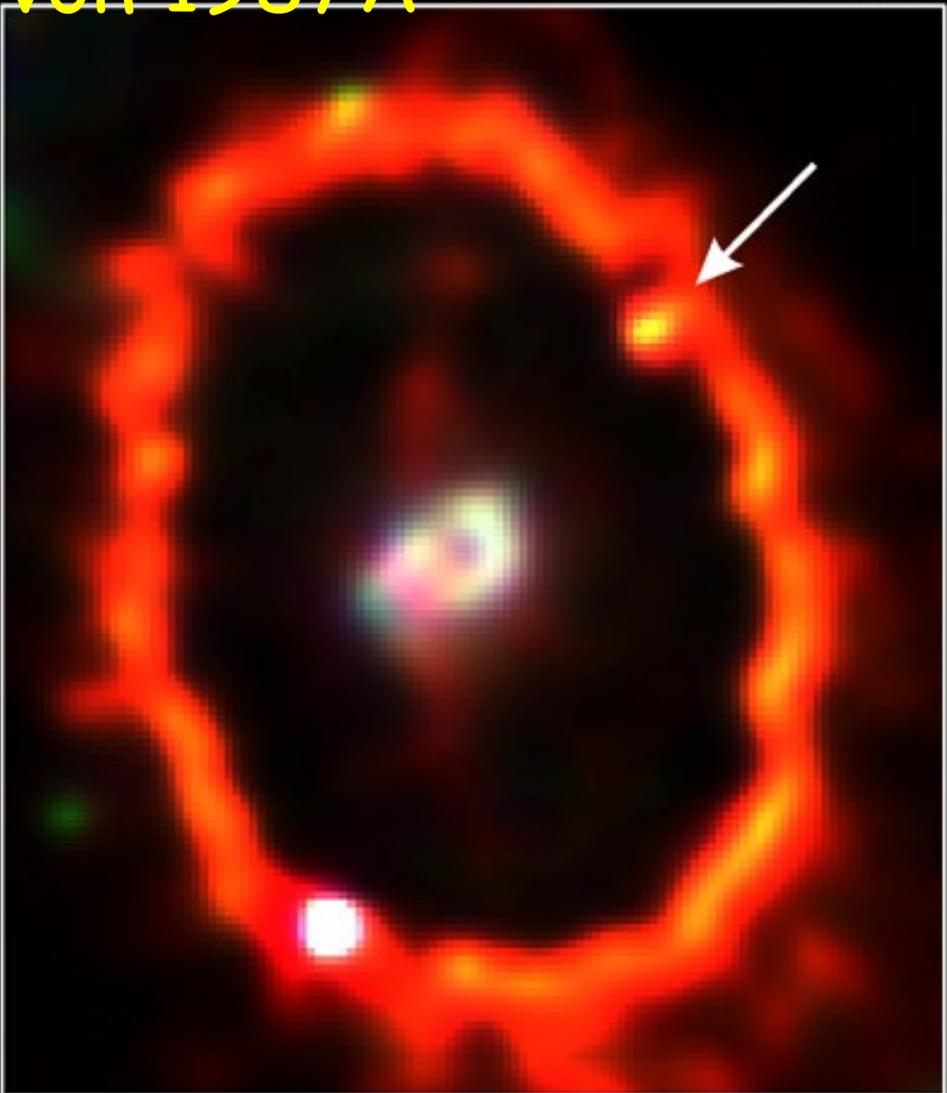
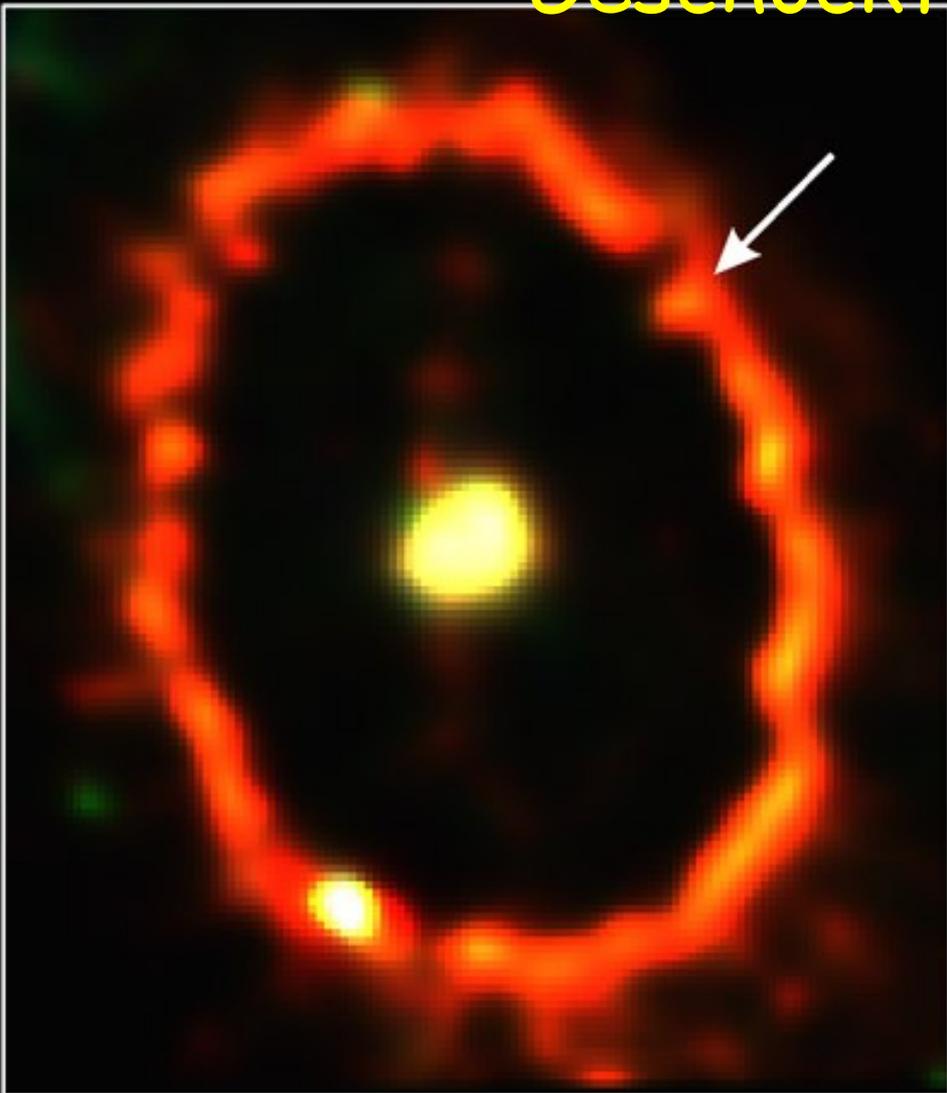
# Echos einer Explosion



# Geschockt von 1987A

1994

1997



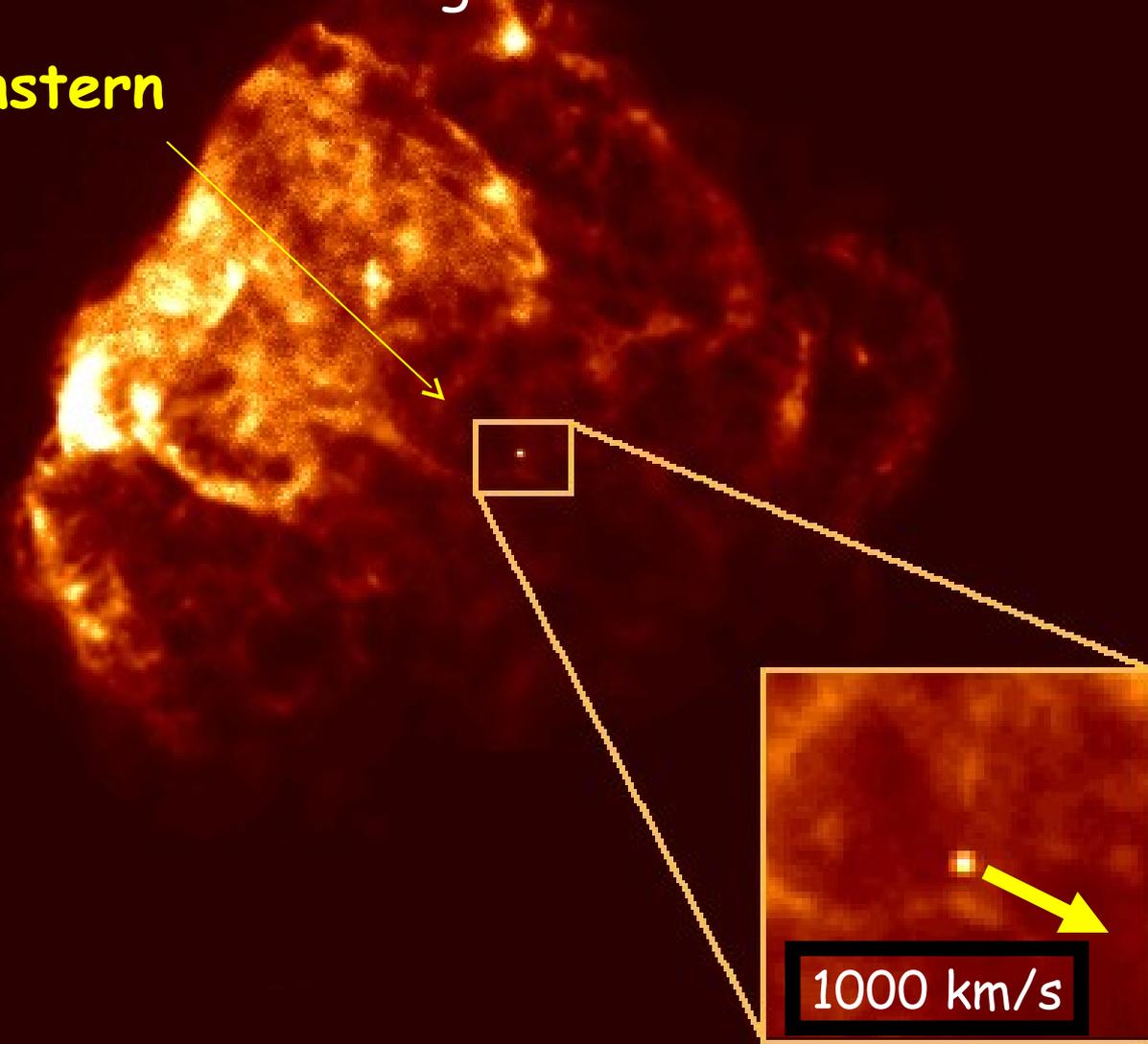
**Bright Knot in Supernova 1987A Ring**

HST • WFPC2

PRC98-08b • February 10, 1998 • ST ScI OPO  
P. Garnavich (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) and NASA

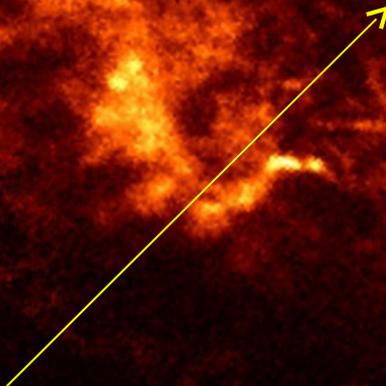
# Puppis A

Zurück bleibt ein undurchdringbarer Kern:  
der **Neutronenstern**



# Cassiopeia A

Neutronenstern



300 Jahre alt

$v_{\text{exp}} = 4000 \text{ km/s}$

$d = 10 \text{ LJ}$

# Neutronensterne - die Supernova-Überreste (SNR)

- Kern fällt zusammen, wenn entartetes Elektronengas dem Gravitationsdruck nicht mehr widerstehen kann
- Photodisintegration:  $\gamma$ -Photonen zerteilen Kerne in "Suppe" aus  $p, n, e$
- Dichte =  $4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$   
(vgl. Wasser  $10^3$ , weißer Zwerg  $10^9 \text{ kg/m}^3$ )
- Unter Druck fusionieren:  $e + p \rightarrow n + \nu_e$
- Neutronenentartung setzt ein
- SNR: Für  $8 - 25 M_{\odot} \rightarrow$  Neutronenstern ( $1.4 - 3M_{\odot}$ )

# Neutronensterne

Eigenschaften:

$$R = 10\text{km (für } 2 M_{\odot}\text{)}$$

$$\text{Dichte} = 10^{14}\text{g/cm}^3 = 100 \text{ Mio t/cm}^3$$

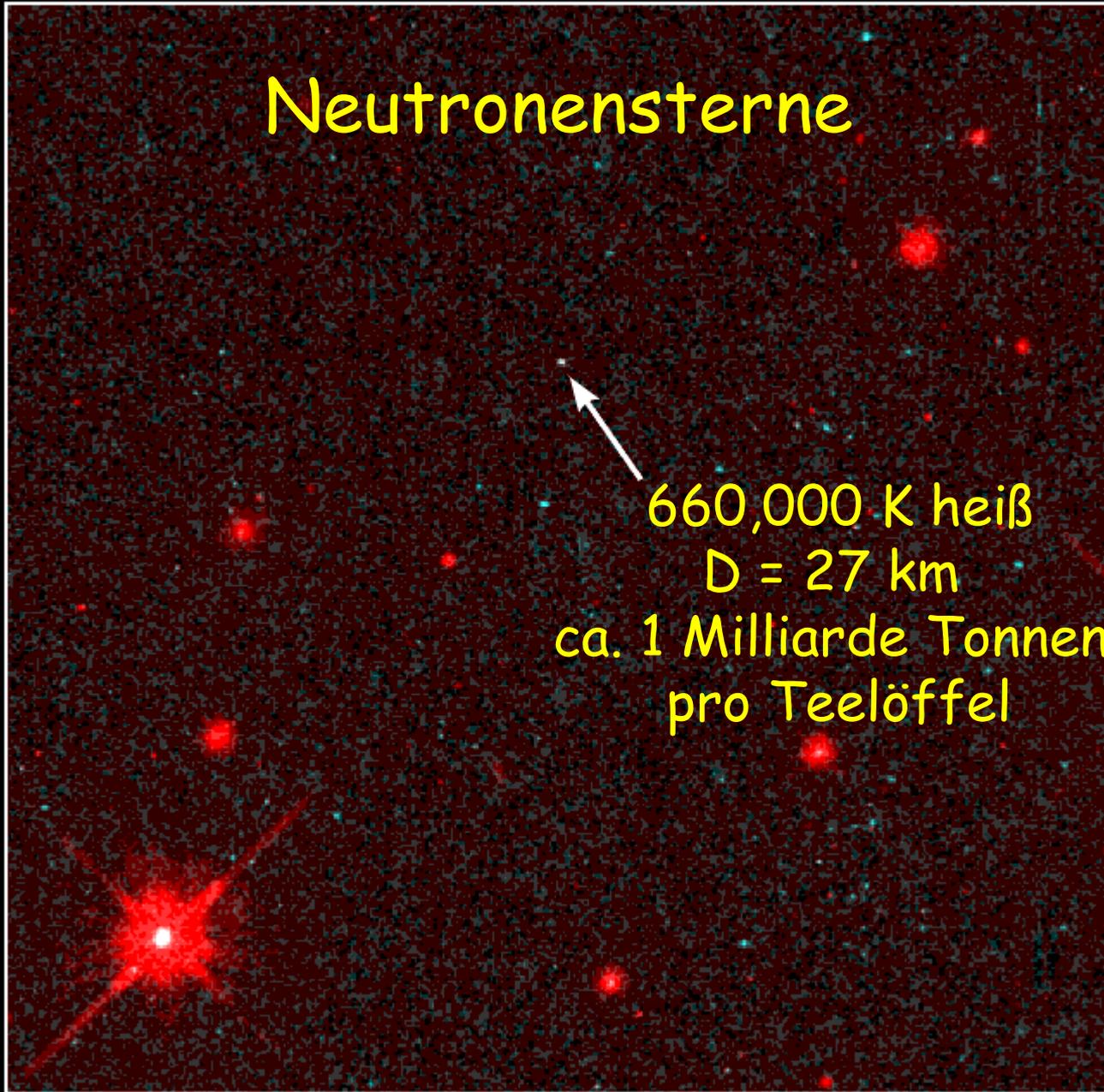
$$T = 1000\ 000\text{K}$$

$$\text{Rotation} = 100/\text{s}$$

$$B = 10^{12}\text{G}$$

$$L = 15\% L_{\odot} \rightarrow \text{schwer zu beobachten}$$

# Neutronensterne



660,000 K heiß  
D = 27 km  
ca. 1 Milliarde Tonnen  
pro Teelöffel

**Isolated Neutron Star RX J185635-3754**

HST • WFPC2

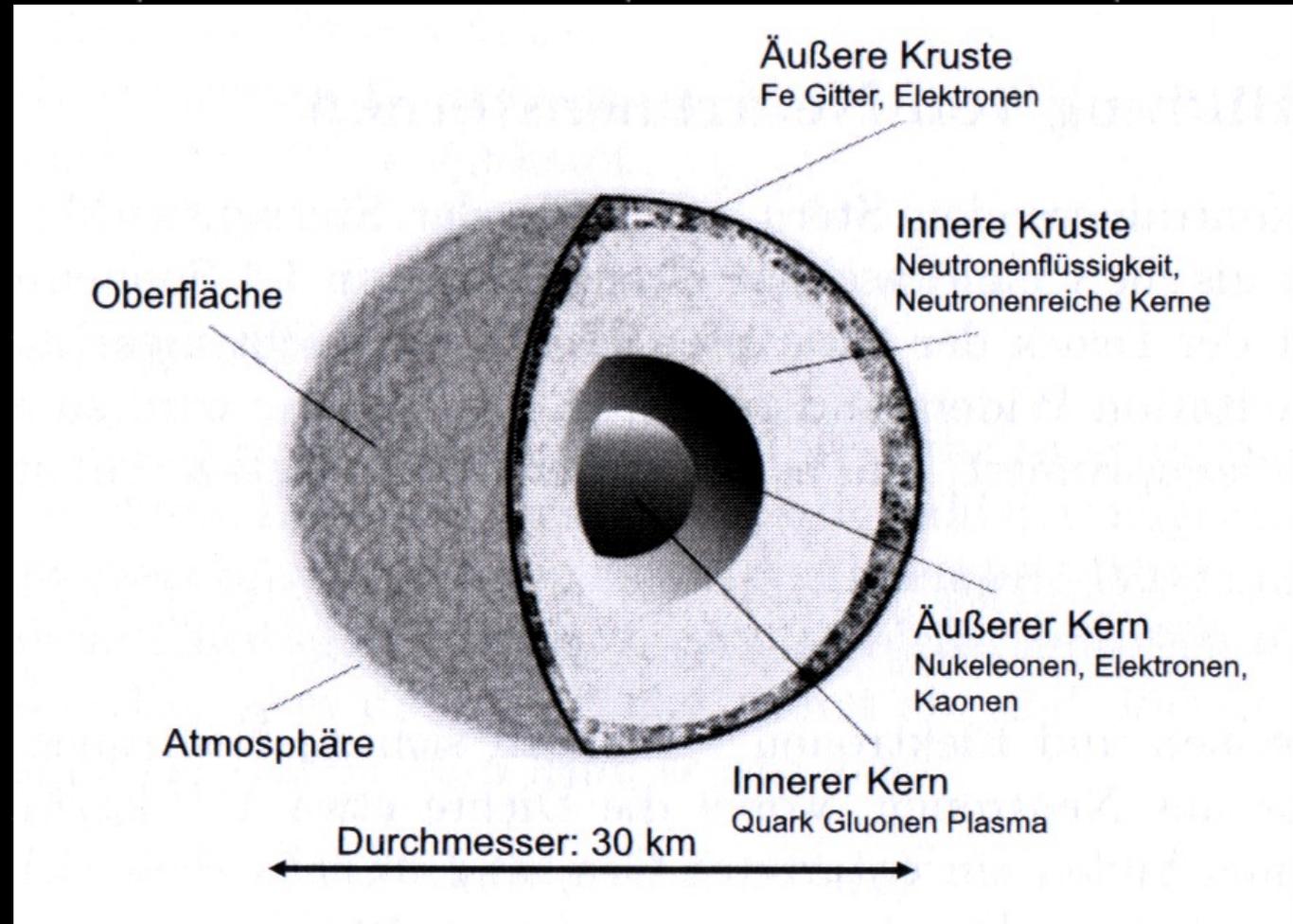
PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997

F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

# Innerer Aufbau

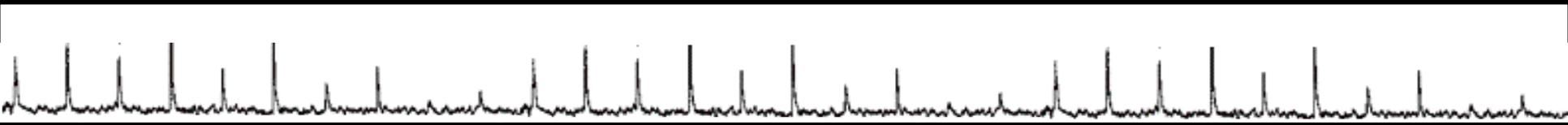
Auch das Neutronen-Fermigas bildet noch Unterstrukturen

Oberfläche:  
Elektronen-  
Fermi-Gas  
mit Fe-  
Rümpfen



# Beobachtung - Pulsare

Extrem regelmäßige Pulse  $\sim 30/s$ ,  
Pulslänge  $\sim 0.001$  s



$\sim 1000$  Pulsare bekannt



Vela: 11 Hz



Krebs: 30 Hz



J0437: 147 Hz



B1937: 642 Hz

# Pulsare

Erklärung: **Leuchtturm-Theorie**

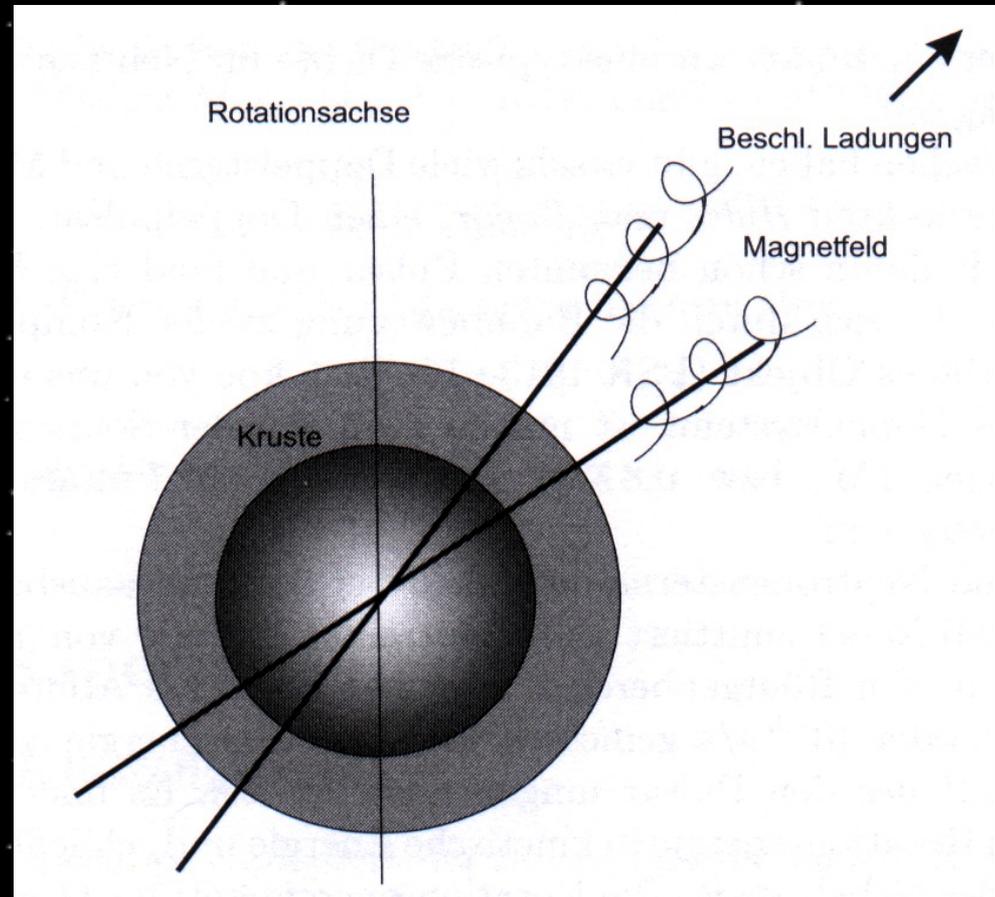
Das Magnetfeld bleibt beim Kollaps eingefangen

-> wird komprimiert

-> Feldstärke wächst  
auf  $10^{12}G$

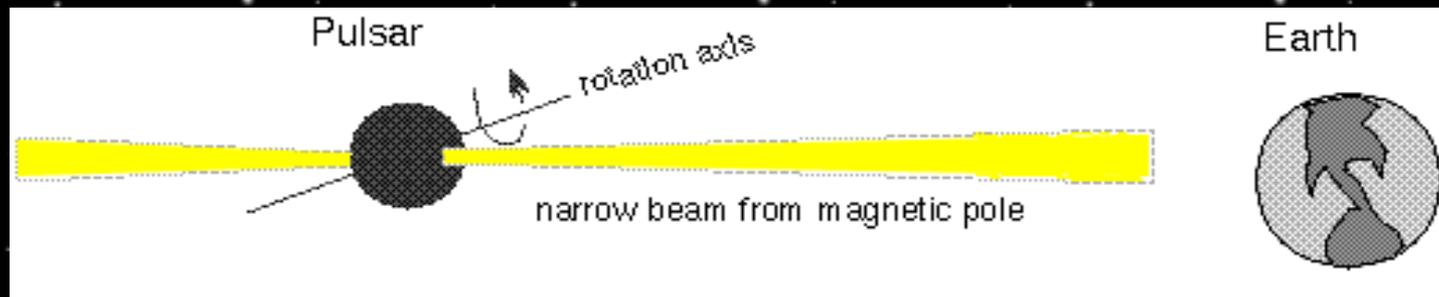
- rotierendes Magnetfeld  
ruft elektr. Feld hervor,  
dass Elektronen aus  
Stern rausreißt

- $e^-$  Strahl  
→ Synchrotron-  
Strahlung



# Pulsare

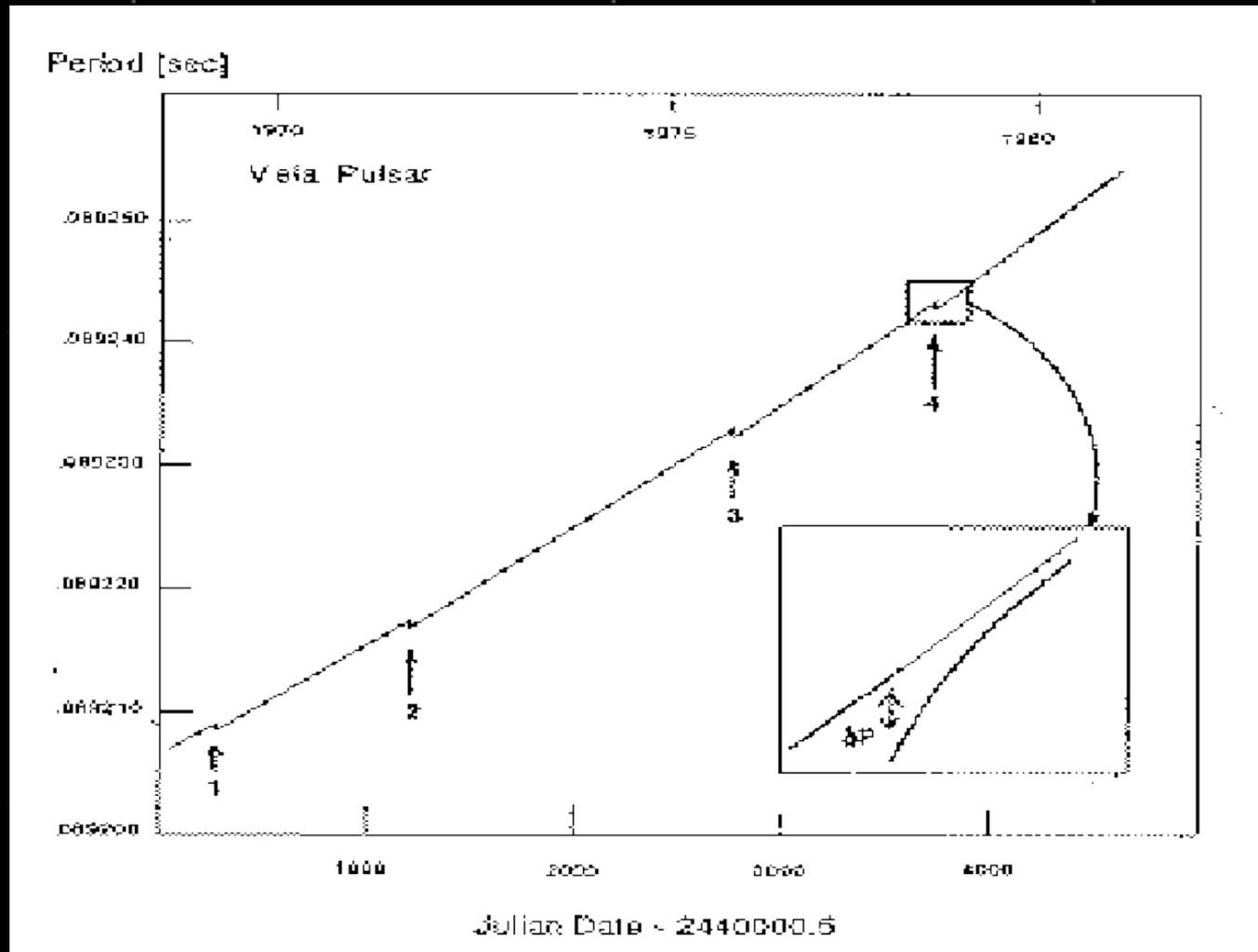
- Die Rotationsachse muss verschieden von der Magnetfeldachse sein, um den Elektronenstrahl zu induzieren  
→ Lichtpulse



- Beobachtung als Pulsar, wenn wir vom Lichtkegel getroffen werden  
→ Es muss noch viel mehr Pulsare geben

Die Pulsationsperiode ist nicht absolut konstant sondern wächst langsam an:  $dP/dt=10^{-5} \text{ s/a}$

## Vela Pulsar:



# Entwicklung von Neutronensternen

- i. Starke Konvektion, Sternzusammenfall, NS fliegt mit ca. 450km/s weg, dreht sich schnell
  - ii. Langsame Abnahme der Drehgeschwindigkeit,  $B$  nimmt ab
- z.B. Vela (11 000 Jahre alt, emittiert auch im Sichtbaren)

Durchschnittsalter:  $2 \times 10^6$  Jahre

# Schwarze Löcher

Allgemein:

Entweichgeschwindigkeit von der Oberfläche eines Objektes:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Wann wird die Entweichgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit  $c$ ?

-> **Schwarzschildradius**

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Wenn das Objekt kleiner als der Schwarzschildradius wird, kann kein Licht und keine Information mehr nach außen dringen.

# Schwarze Löcher

## Schwarzschildradien

Objekt	M [ $M_{\odot}$ ]	Radius [km]	$v_e$	$R_S$
Erde	$1/3 \times 10^5$	6 357	11,3	9 mm
Sonne	1	$7 \times 10^5$	617	2,9 km
Weißer Zwerg	0.8	$10^4$	5 000	2,4 km
Neutronenstern	2	8	$2,5 \times 10^5$	5,9 km
Galakt. Kern	$50 \times 10^6$	?	?	$150 \times 10^6$

Neutronensterne bilden bei einer Masse  $> 3M_{\odot}$  Schwarze Löcher.

# Schwarze Löcher

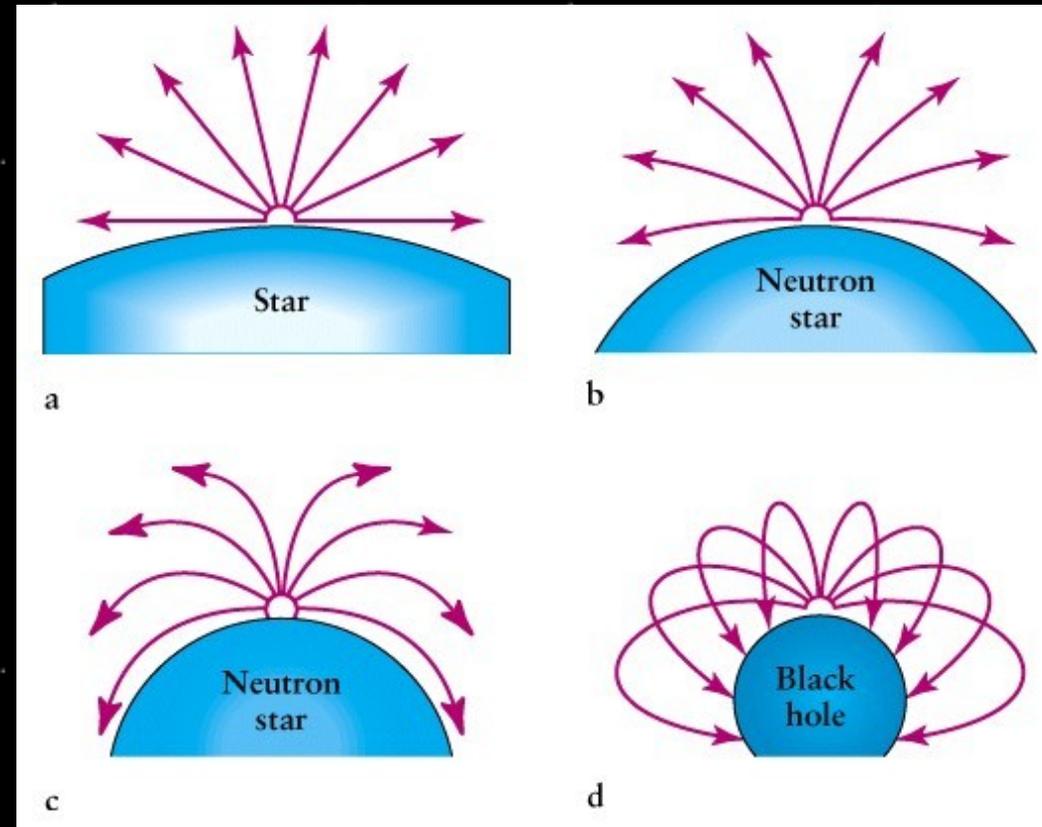
Allgemeine  
Relativitätstheorie:

Äquivalenz von schwerer  
und träger Masse

$$E = mc^2$$

Lichtstrahlen werden  
von Masse gekrümmt.

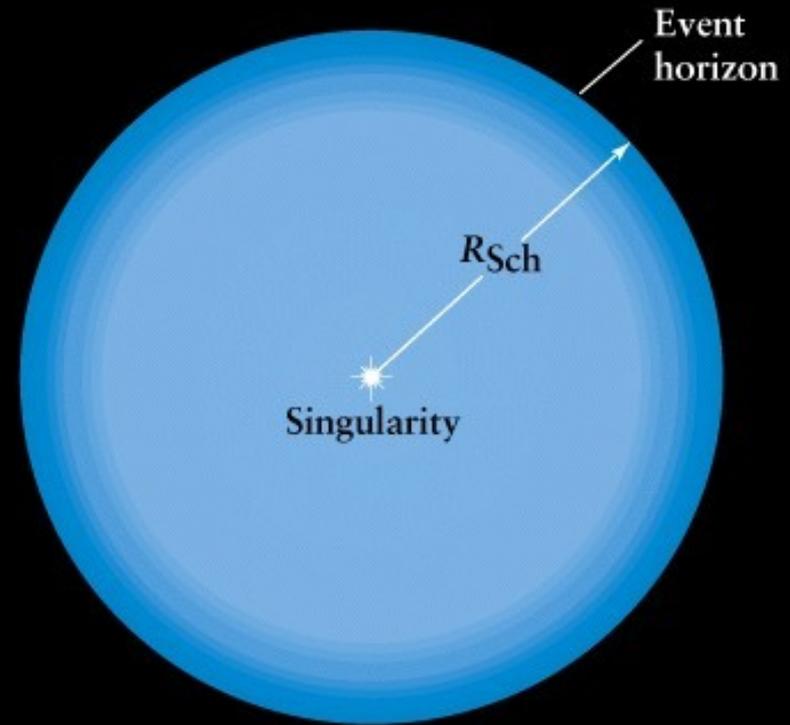
Der Raum krümmt sich auf sich selbst.



# Schwarzschildradius

Der Raum krümmt sich auf sich selbst.

Es entsteht eine Singularität.



Die Gesetze der Physik in einem schwarzen Loch sind uns unbekannt.

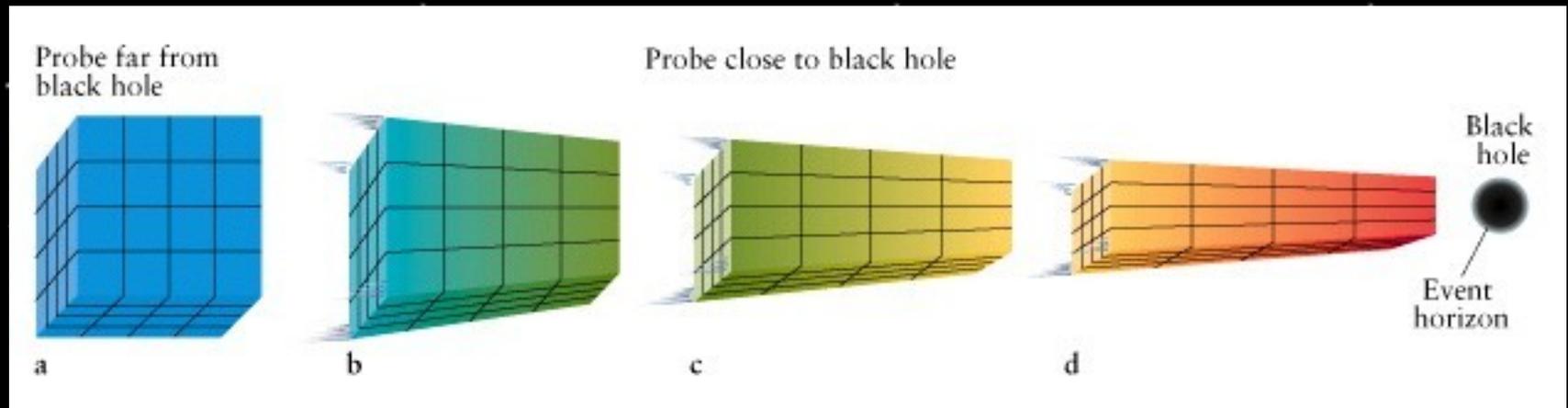
# Fall ins Schwarze Loch

Bei ca  $10 R_S$ : Unterschiedliche Gravitation über betrachtetes Volumen  $\rightarrow$  gequetscht und langgezogen

Rotverschiebung, Zeitdilatation (für äuß. Beob.)

Akkretionsscheibe  $\rightarrow$  Röntgen und Gammastrahlung

Umkehr von Raum und Zeit



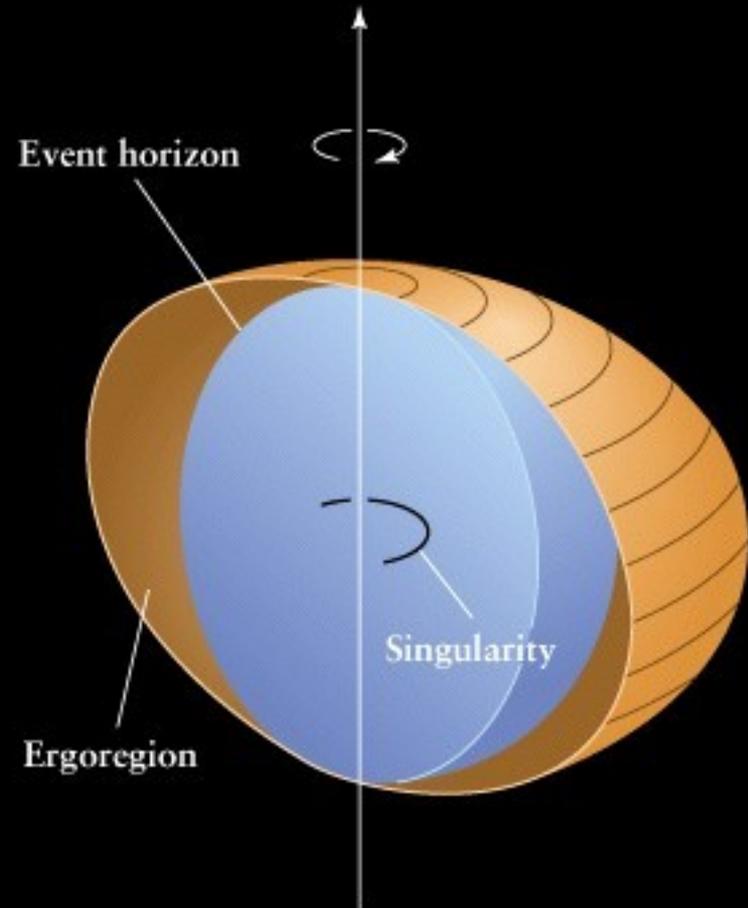
# Kerr-Schwarzes Loch

Mit Rotation:

Ergoregion: Teilchen wird mitgedreht  
Teilchen/Energie kann entkommen

Ereignishorizont: Keine Information kann uns erreichen

-> Ringförmige Singularität



# Eigenschaften von schwarzen Löchern

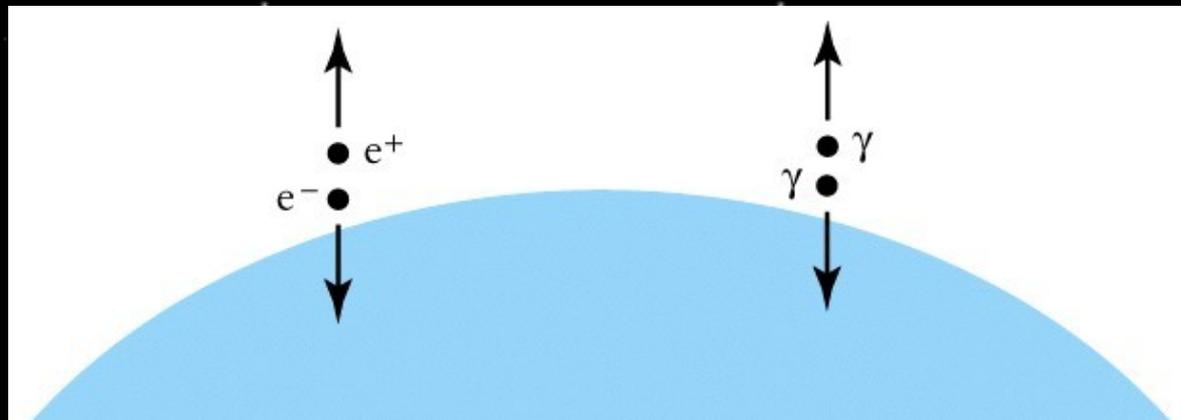
Masse	$M$	$M$
Drehmoment	$0$	$L$
Elektr. Ladung	$0$	$0$
	Schwarz- schild BH	Kerr BH

Schwarze Löcher haben keine Haare

# Verdampfen von schwarzen Löchern

## Hawking Strahlung:

- Vakuum-Oszillationen: Virtuelle Teilchen (Lebenszeit ca.  $10^{-21}$  s)
- Können am Rand des Ereignishorizontes entstehen
- Eins fällt ins SL, das andere entkommt



- Es entsteht ein "Loch", der Energie ( $E=mc^2$ ) im SL
- Zeitskala:  $5M_{\odot}$   $10^{62}$  Jahre  
 $10^{10}$  kg (Mount Everest, Premordiales SL)  
15 Milliarden Jahre (Alter Universum)

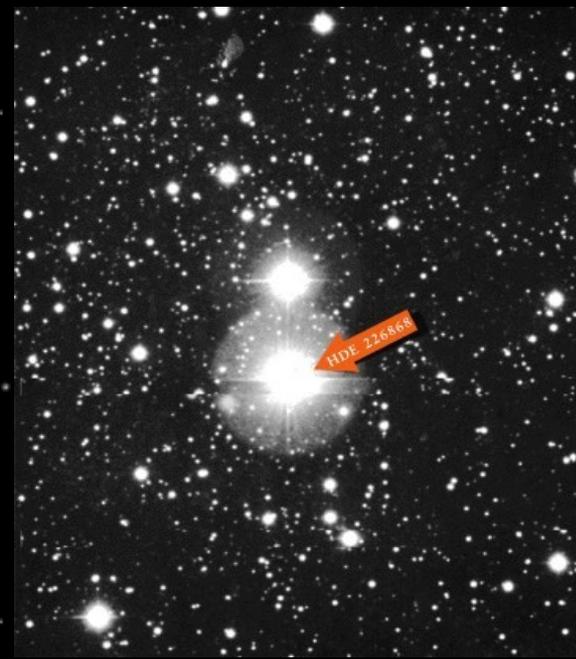
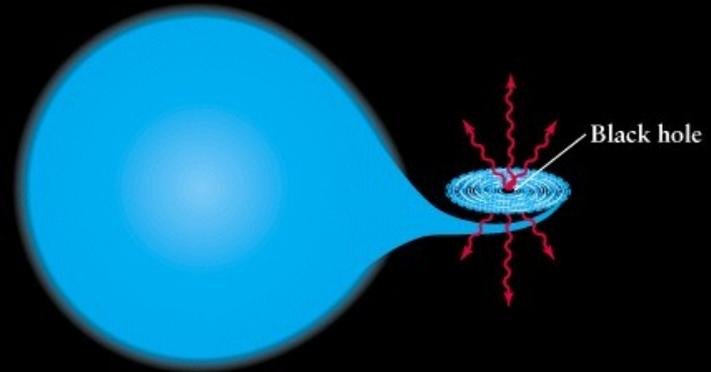
# Wo und wie findet man schwarze Löcher?

## 1) Doppelsternsysteme:

- 1) Akkretionsscheibe um schwarzes Loch emittiert Röntgenstrahlung

z.B. Cygnus X-1 (Uhuru - Satellit, 1970), schnelles flackern  $\rightarrow$  kleiner als Erde

Begleiter: HDE226868 B0  
Roter Überriese,  
spektroskopischer  
Doppelstern (T=5.6 Tage)  
 $\rightarrow \sim 7M_{\odot}$

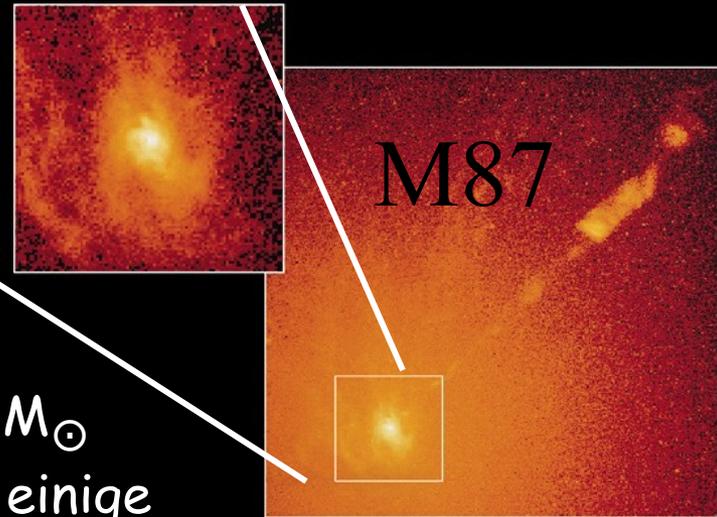


# Wo und wie findet man schwarze Löcher?

2) Galaktische Zentren haben meistens supermassive schwarze Löcher

Bei Galaxienentstehung sammelt sich Gas in Zentrum und verdichtet sich zu schwarzen Loch

- z.B. M87 (1994 HST), aus Sternumlafbahnen: 30 Mrd  $M_{\odot}$
- Zentrum der Milchstrasse einige Millionen  $M_{\odot}$



3) Premordiale Schwarze Löcher: Theorie von Hawking: bei Urknall Verdichtungen von Gramm bis Erdmasse

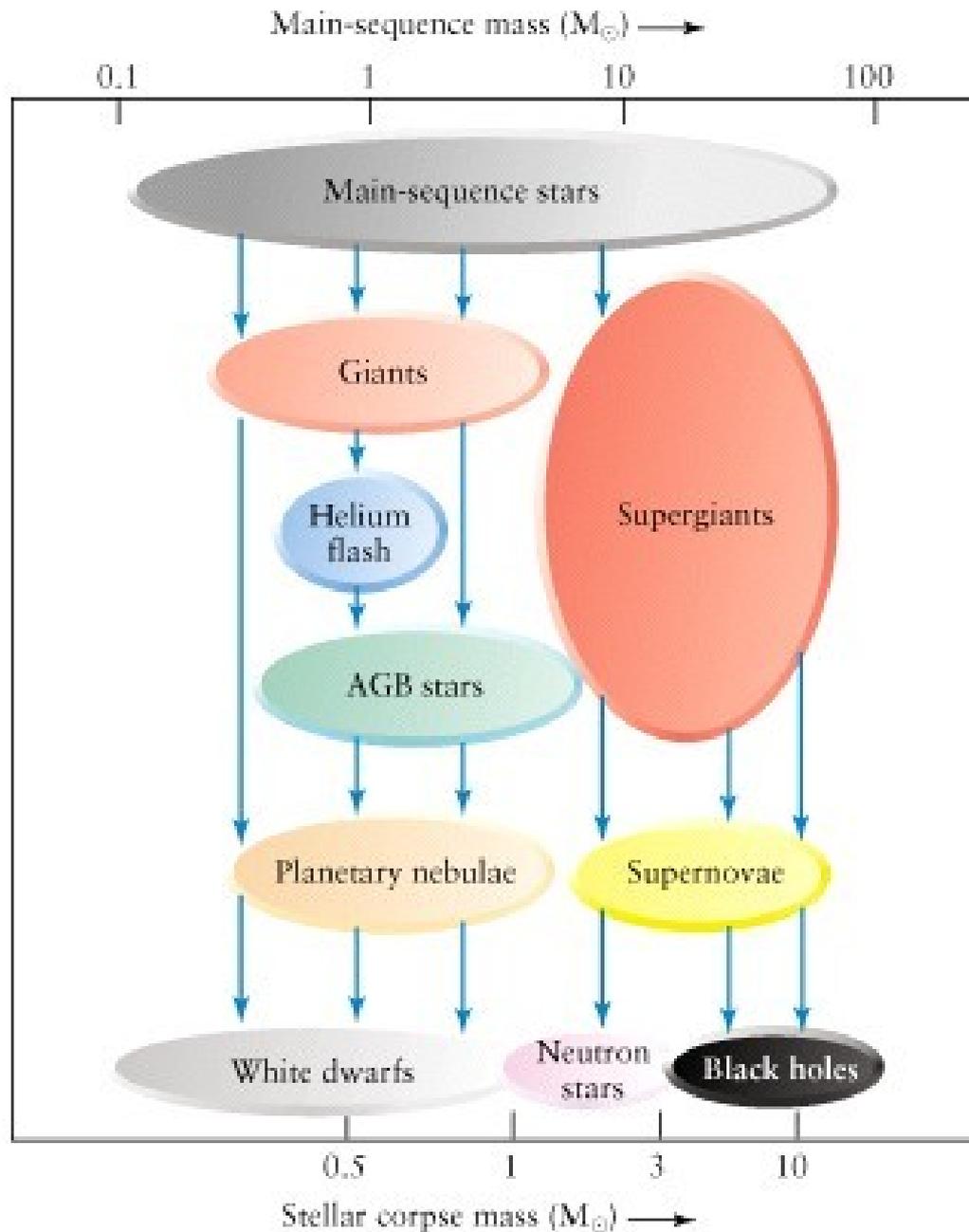
# Bildung eines schwarzen Lochs

- **Gravitationswellen:**

- Wenn Neutronensterne kollabieren
- Wenn Neutronenstern oder SL kollidieren oder umeinander rotieren
- Gravitationswellen ändern temporär die Raumzeit
- Nobelpreis 1993:  
J. Taylor & R. Hulse
- Detektoren gebaut  
bisher keine Detektion

LISA  
(Laser Interferometer  
Space Antenna)





## Zusammenfassung

WD: entartete  
Elektronen

NS: entartete  
Neutronen

BH: Singularität

Dichte  $\rightarrow \infty$

Radius  $\rightarrow 0$