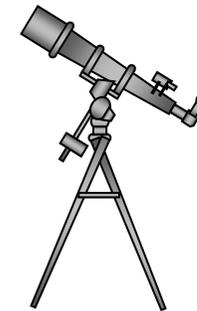


# PHYSIK MIT ASTROPHYSIK



## ENDSTADIEN DER STERNE

# 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

H - Vorrat im Kern verbraucht.

→ Kern besteht aus Helium.

Gasdruck < Gravitationsdruck

→ Kern schrumpft.

Fusion von H zu He um den Kern  
(Schalenbrennen).

Kern:

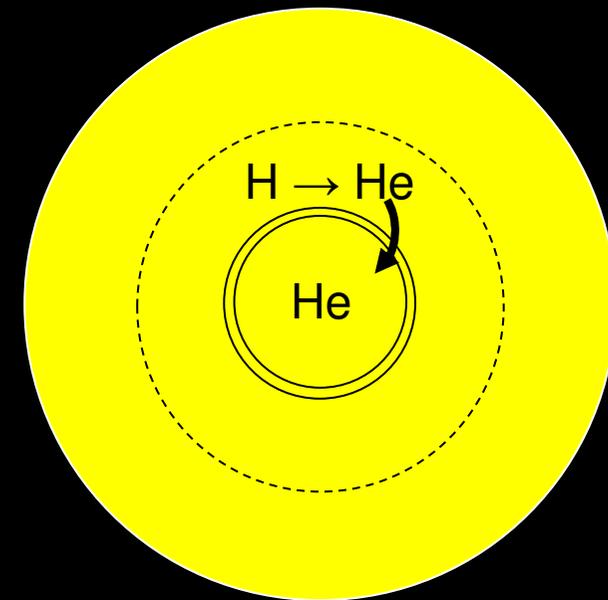
He aus Schale reichert sich  
zusätzlich an.

Druck und Temperatur nimmt zu.

Entartung:

Keine Volumenzunahme trotz  
steigender Temperatur

(Quanteneffekt) → „Fermi - Druck“



# 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

Schalenbrennen nimmt zu.

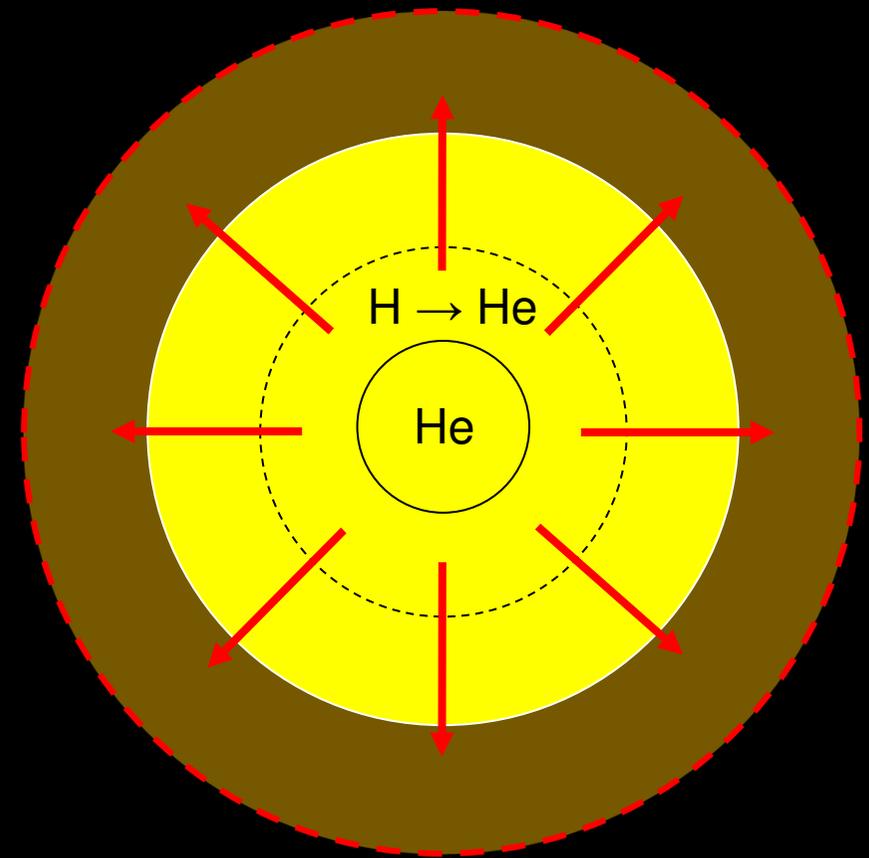
Stern bläht sich auf.

Energie durch große Oberfläche: Rot

**ROTER RIESE**

**100-facher Radius**

Bis zu 20 % der Sternmasse werden weggeblasen.



# 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

He-Kern kontrahiert weiter.

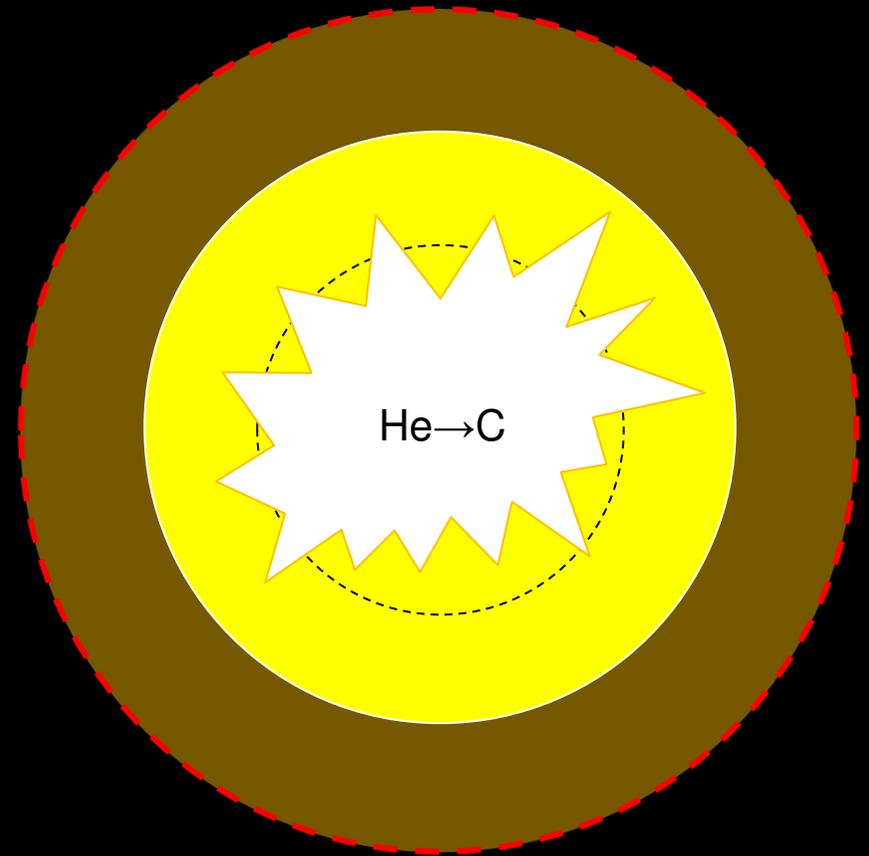
Schalenbrennen liefert He nach.

Bei 100 Mio. K:

He-Flash:  
schlagartige Fusion von  $\text{He} \rightarrow \text{C}$

Energie ( $10^{11} L_{\odot}$ ) wird vollständig  
im Stern absorbiert.

Temperatur zu niedrig für C-Fusion.



## 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

Gravitationsdruck lässt Kern trotz Fermi-Drucks kontrahieren.

→ He- und H- Fusion wird verstärkt.

Sternradius wächst gewaltig.

**ROTER ÜBERRIESE**

Bis 30% Massenverlust.

He-Vorrat aufgebraucht.

Stern kontrahiert -

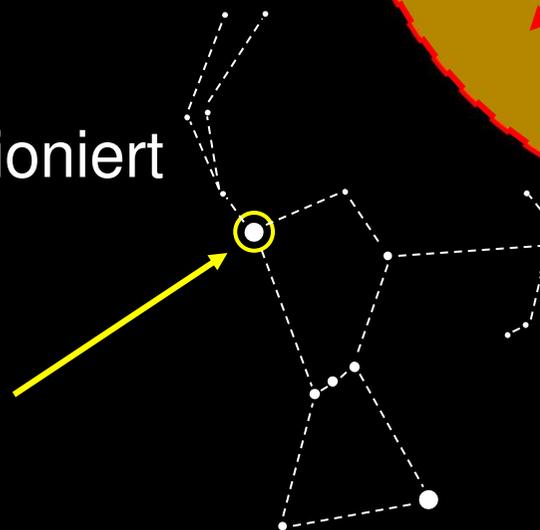
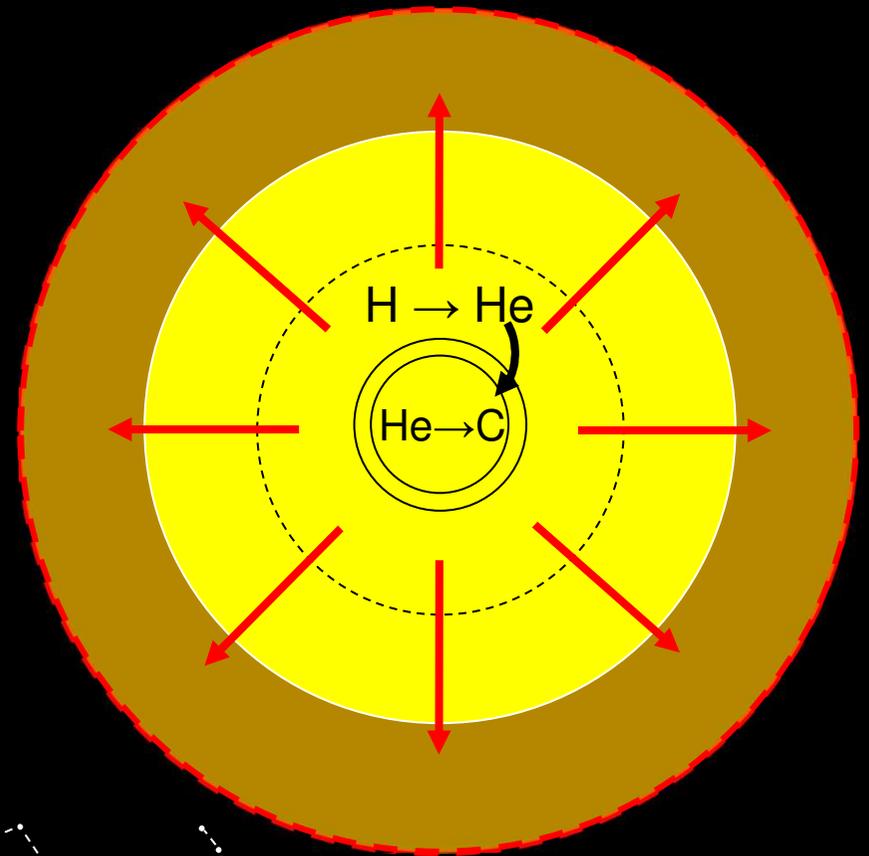
H-Fusion nimmt zu -

He wird nachgeliefert - fusioniert

- Stern wird wieder größer.

→ „Veränderlicher“

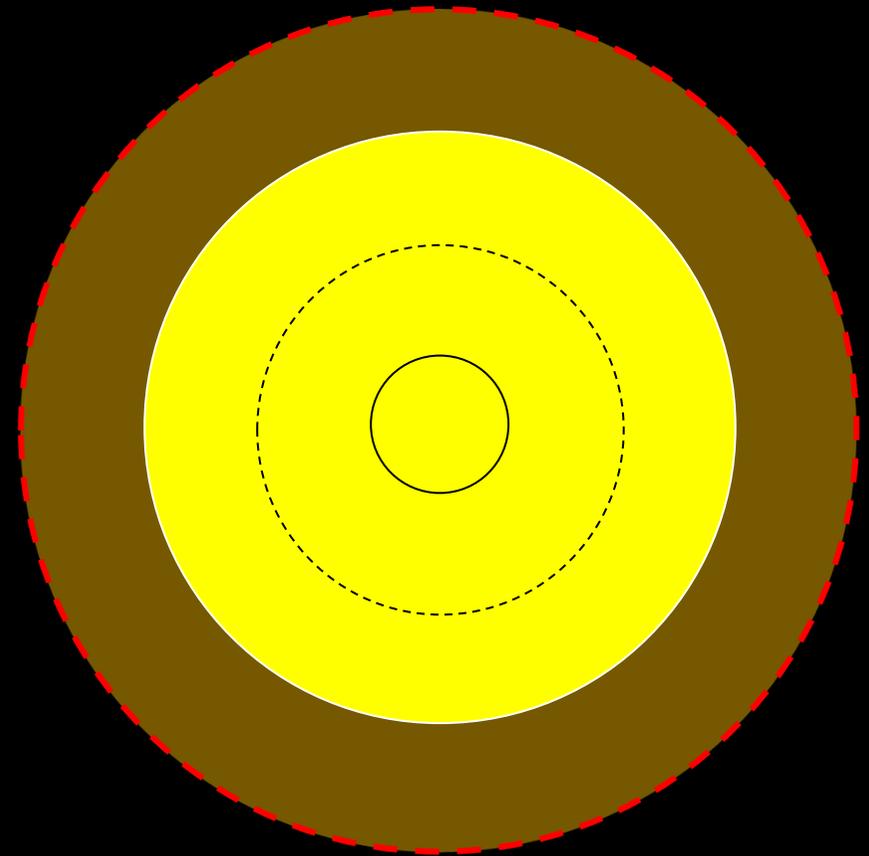
(z.B. Beteigeuze im Orion)



## 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

Die Massenabstöße werden von der UV-Strahlung des Sterns zum Leuchten angeregt.

Sichtbar werden die sogenannten „Planetarischen Nebel“.



# Planetarische Nebel



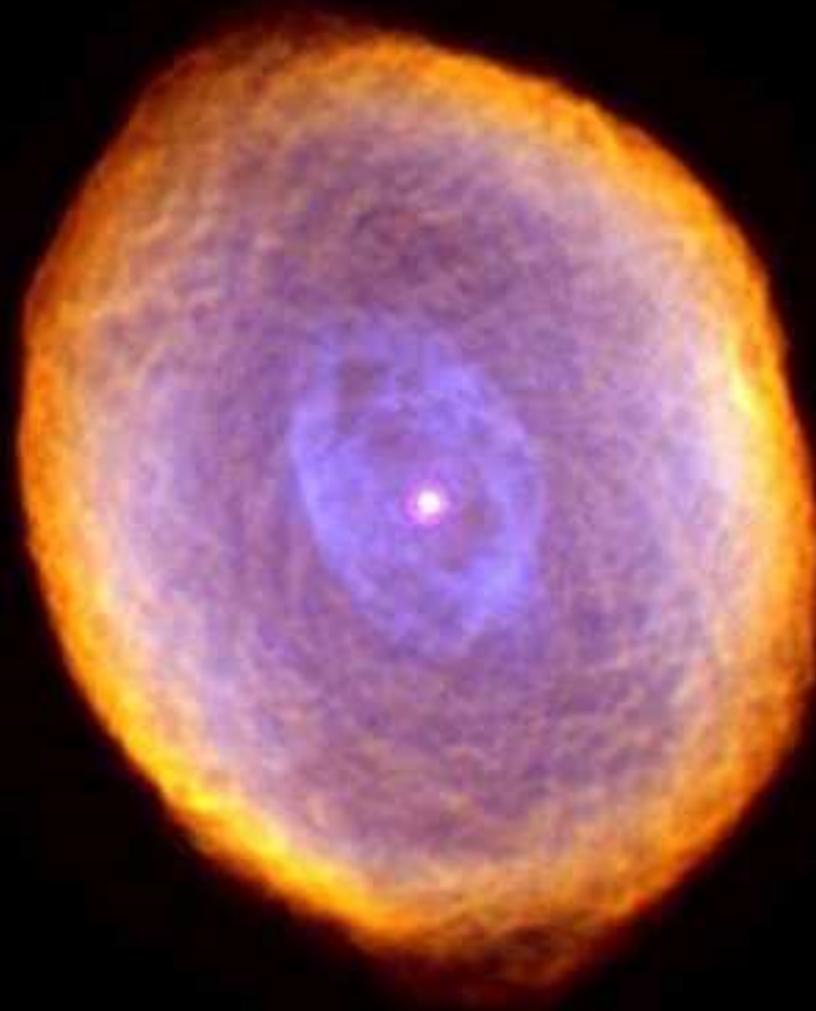
Bilder: NASA/HST



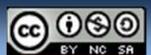
Bilder: NASA/HST

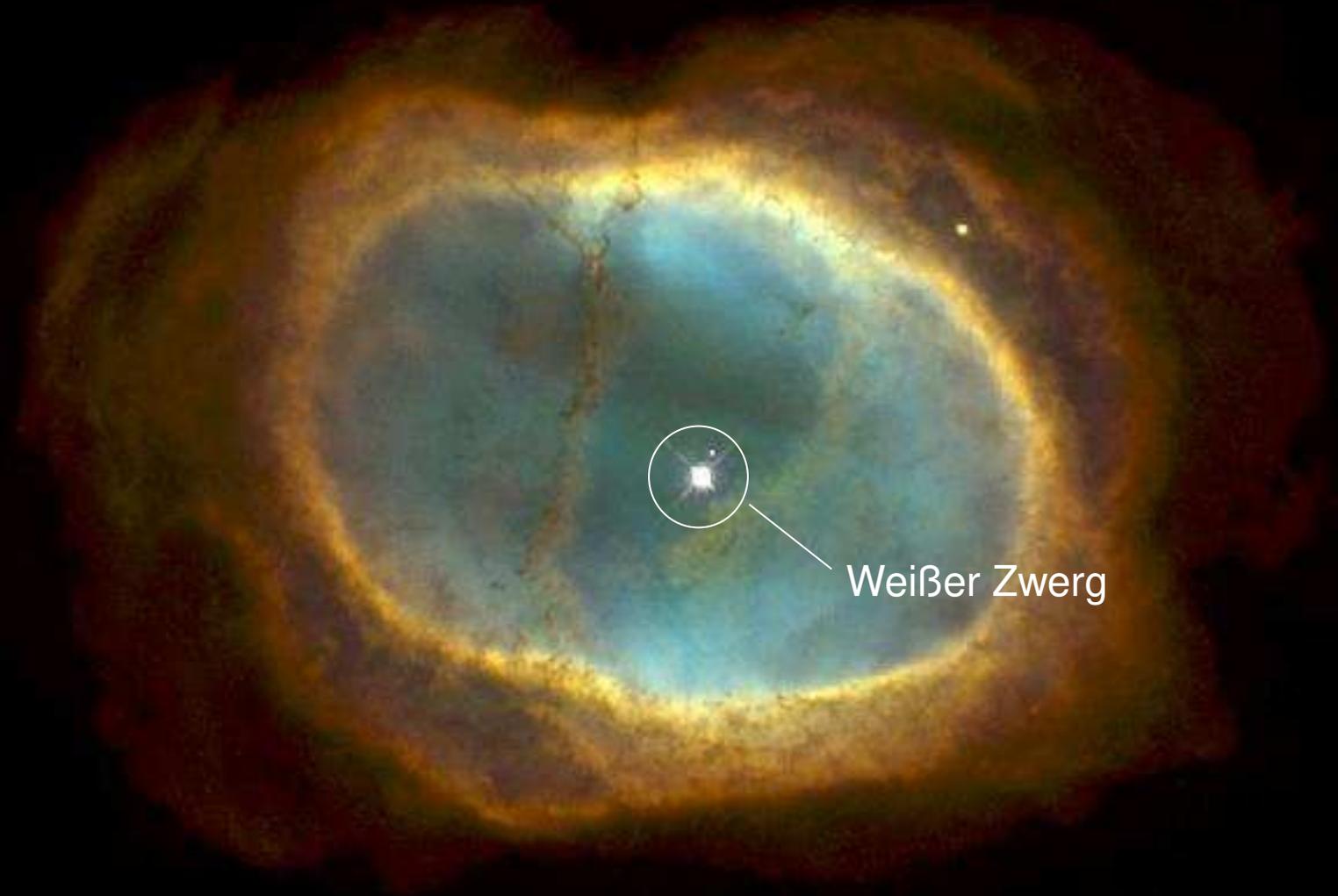


Bilder: NASA/HST



Bilder: NASA/HST





Weißer Zwerg

Bilder: NASA/HST

# 1. STERNE MIT $0,75 M_{\odot}$ BIS $8 M_{\odot}$

Nach  $\sim 10\,000$  Jahren:

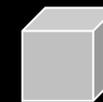
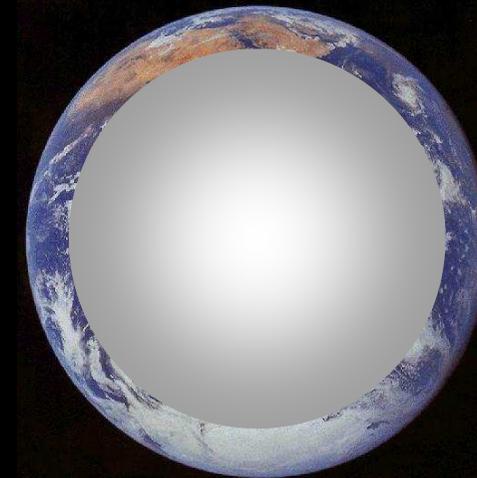
Kernbrennstoff verbraucht.

Übrig bleibt ein hochdichter, heißer, kohlenstoff- und sauerstoffhaltiger Kern:

„Weißer Zwerg“

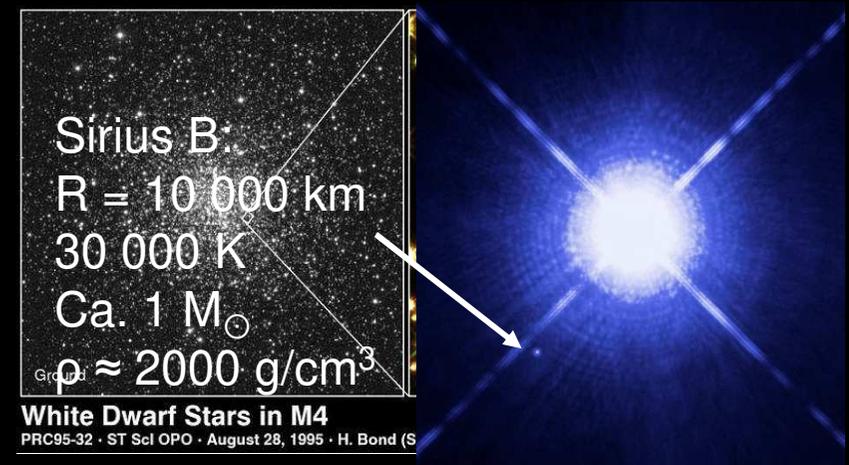
- Radius:  $\sim 1000$  km  
(vgl. Erde  $6378$  km)
- Dichte:  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>

→ kühlt über Jahrtausende langsam aus, wird rot, dann unsichtbar.



$m = 1$  t

$1$  cm<sup>3</sup>



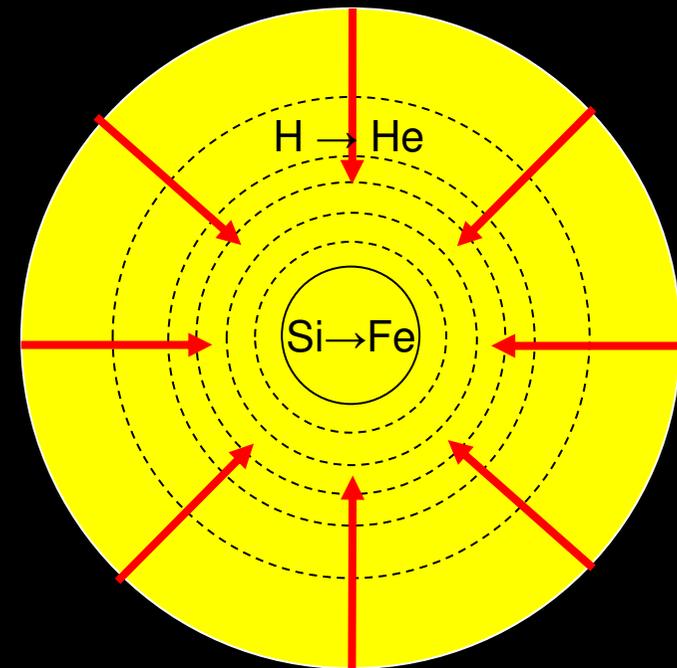
Bilder: NASA, Grafiken: S. Hanssen

## 2. STERNE MIT $8 M_{\odot}$ BIS $25 M_{\odot}$

Durch Kontraktion kann  
Gravitationsenergie in thermische  
Energie umgewandelt werden.  
→ Schalenbrennen ohne Entartung.

Von außen nach innen:

H	→	He
He	→	C, O
C	→	N, Mg
N	→	O, Mg
O	→	Si
Si	→	Fe

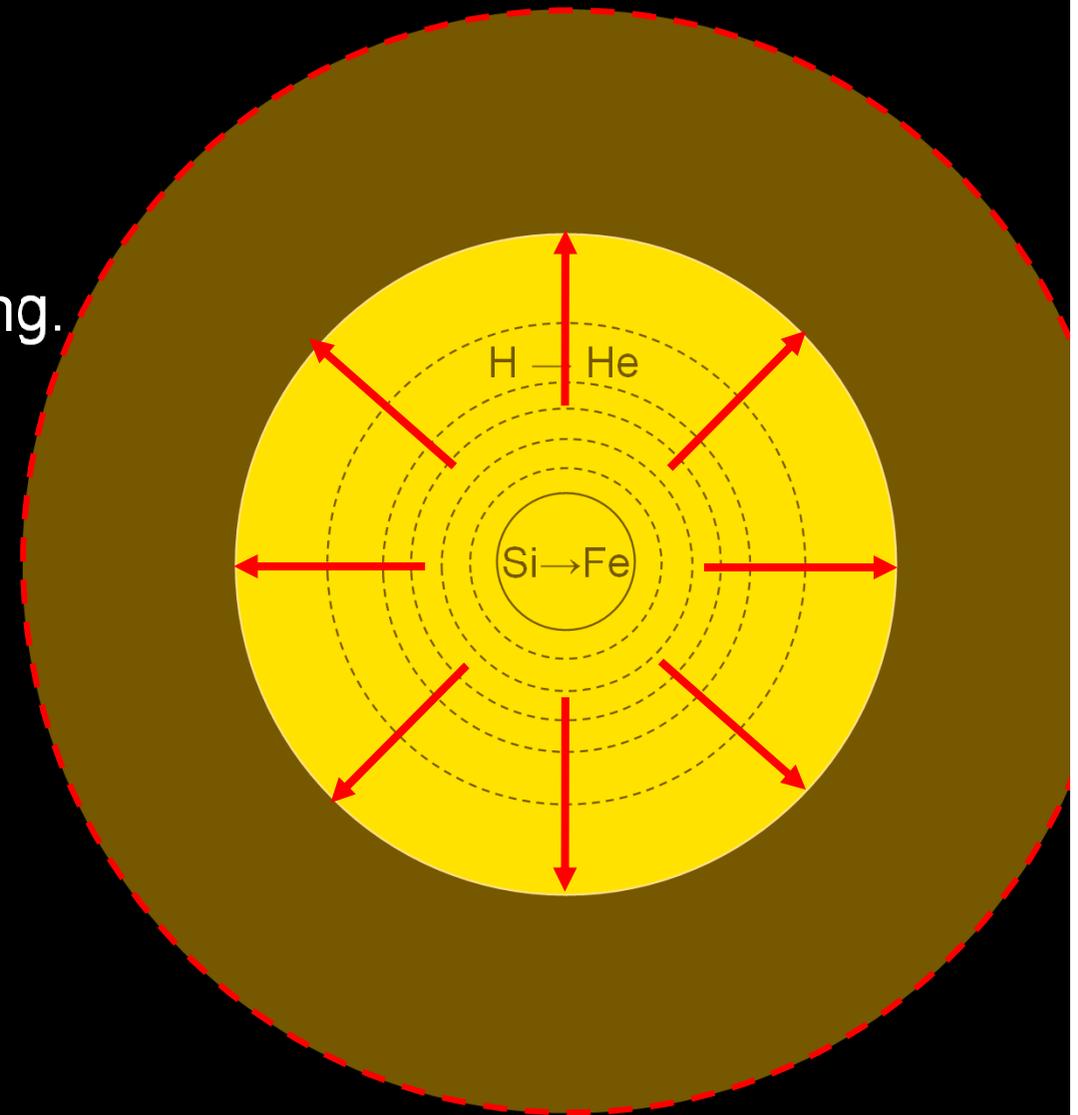


## 2. STERNE MIT $8 M_{\odot}$ BIS $25 M_{\odot}$

Durch Kontraktion kann  
Gravitationsenergie in thermische  
Energie umgewandelt werden.  
→ Schalenbrennen ohne Entartung.

Von außen nach innen:

H	→	He
He	→	C, O
C	→	N, Mg
N	→	O, Mg
O	→	Si
Si	→	Fe



Stern wächst gewaltig: **ROTER ÜBERRIESE**

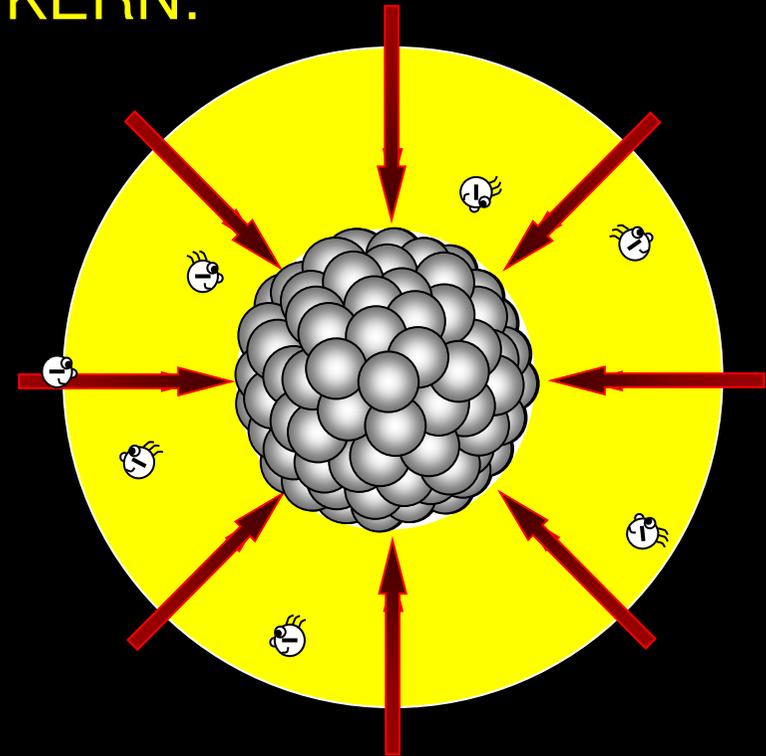
## 2. STERNE MIT $8 M_{\odot}$ BIS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $1,2 M_{\odot}$  des Eisenkerns  
(Chandrasekhar-Grenze):

Fermi-Druck  $<$  Gravitationsdruck

- Elektronen reagieren mit den Protonen.
- Neutronenkern

KERN:



## 2. STERNE MIT $8 M_{\odot}$ BIS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $1,2 M_{\odot}$  des Eisenkerns  
(Chandrasekhar-Grenze):

Fermi-Druck  $<$  Gravitationsdruck

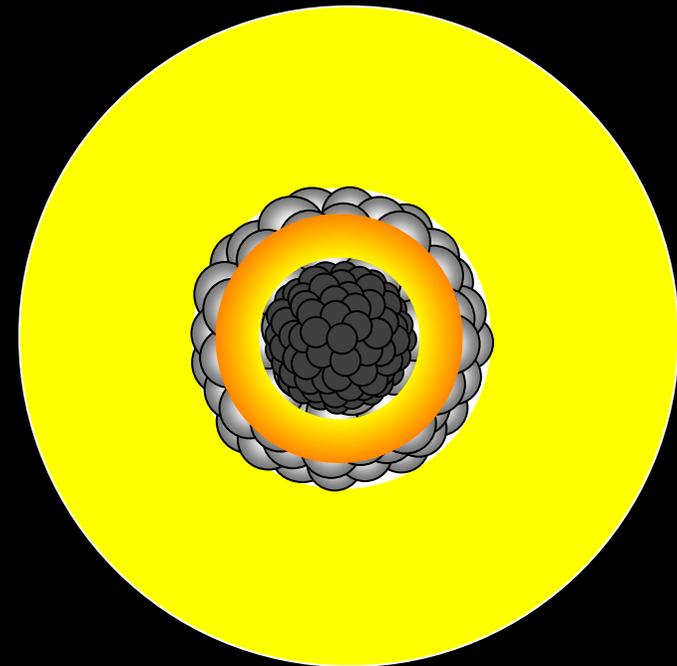
- Elektronen reagieren mit den Protonen.
- Neutronenkern
- Kern schrumpft - entartet

Nachfolgende herabfallende Materie  
wird schlagartig abgebremst und  
zurückgeschleudert.

Es entstehen in endothermen  
Fusionsprozessen Stoffe größerer  
Ordnungszahlen als Eisen.

→ **SUPERNOVA**

**KERN:**



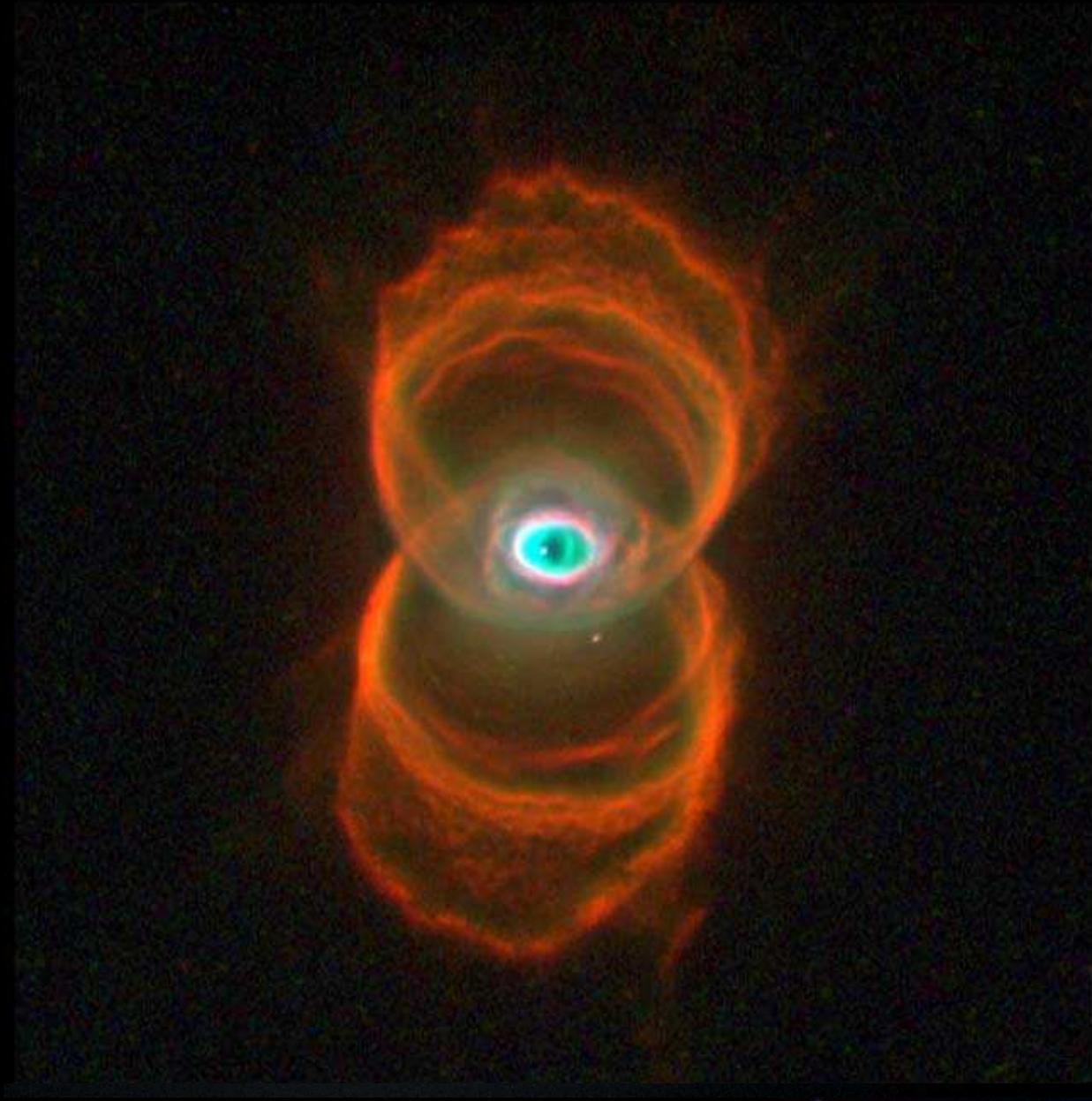
# Supernovae



Bilder: NASA/HST



Bilder: NASA/HST



Bilder: NASA/HST



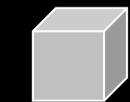
Bilder: NASA/HST

## 2. STERNE MIT $8 M_{\odot}$ BIS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $1,2 M_{\odot}$  des Eisenkerns  
(Chandrasekhar-Grenze):

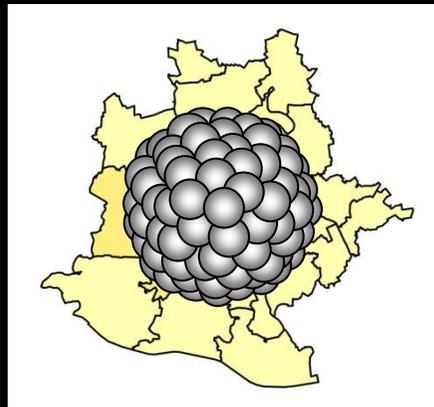
Neutronensterne:

- Radius:  $\sim 10$  km
- Dichte:  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>



1 cm<sup>3</sup>

m = 100 Mio. t



Stuttgart



Vela Pulsar (Sternbild Segel)

### 3. STERNE MIT MEHR ALS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $3,2 M_{\odot}$  des Kerns:

Fermi-Druck der Neutronen kollabiert.

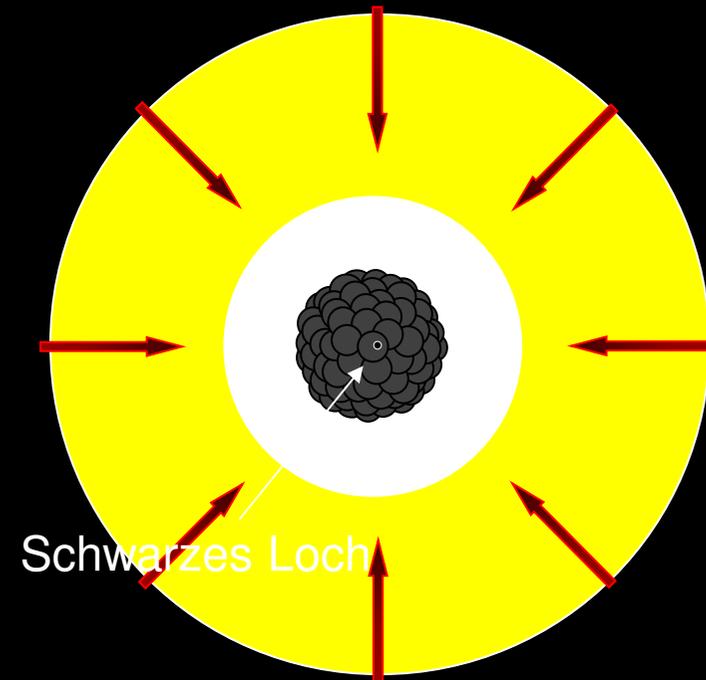
Kontraktion geht weiter.

Schwarzschildradius wird erreicht:

Licht kann den Bereich nicht verlassen.

→ SCHWARZES LOCH

KERN:



### 3. STERNE MIT MEHR ALS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $3,2 M_{\odot}$  des Kerns:

Fermi-Druck der Neutronen kollabiert.

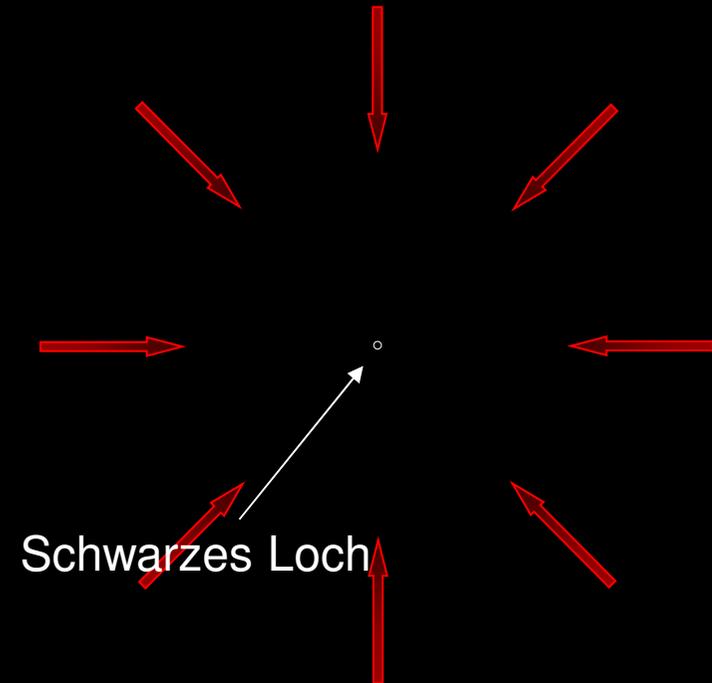
Kontraktion geht weiter.

Schwarzschildradius wird erreicht:

Licht kann den Bereich nicht verlassen.

→ SCHWARZES LOCH

KERN:



### 3. STERNE MIT MEHR ALS $25 M_{\odot}$

Bei mehr als  $3,2 M_{\odot}$  des Kerns:

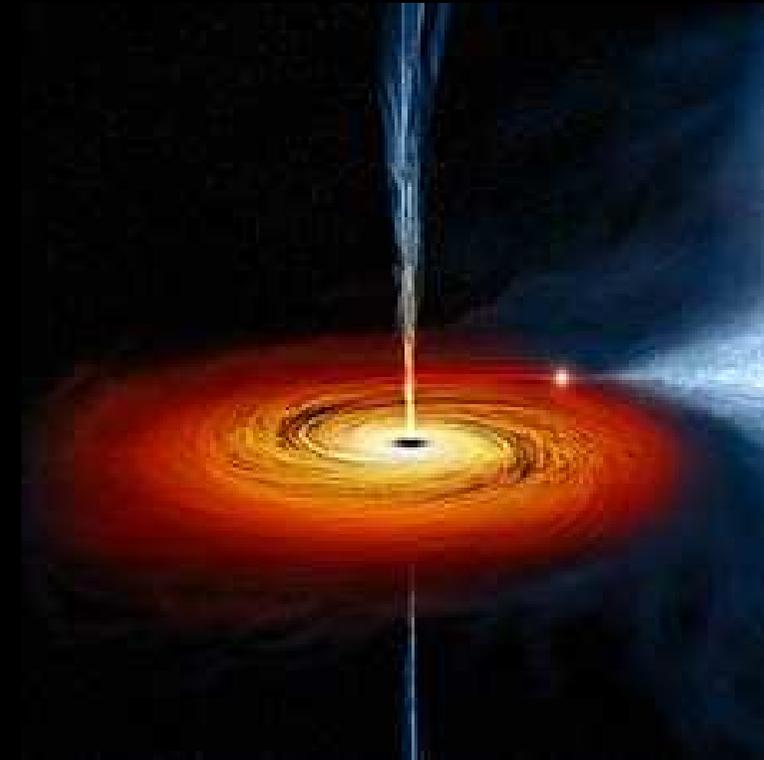
Fermi-Druck der Neutronen kollabiert.

Kontraktion geht weiter.

Schwarzschildradius wird erreicht:

Licht kann den Bereich nicht verlassen.

→ SCHWARZES LOCH



Cygnus X-1:  
Erster bestätigter Kandidat für ein  
stellares Schwarzes Loch  
(künstlerische Darstellung)

Bild:

Von NASA/CXC/M.Weiss - <http://www.sun.org/images/black-hole-cygnus-x-1>,  
Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27481945>