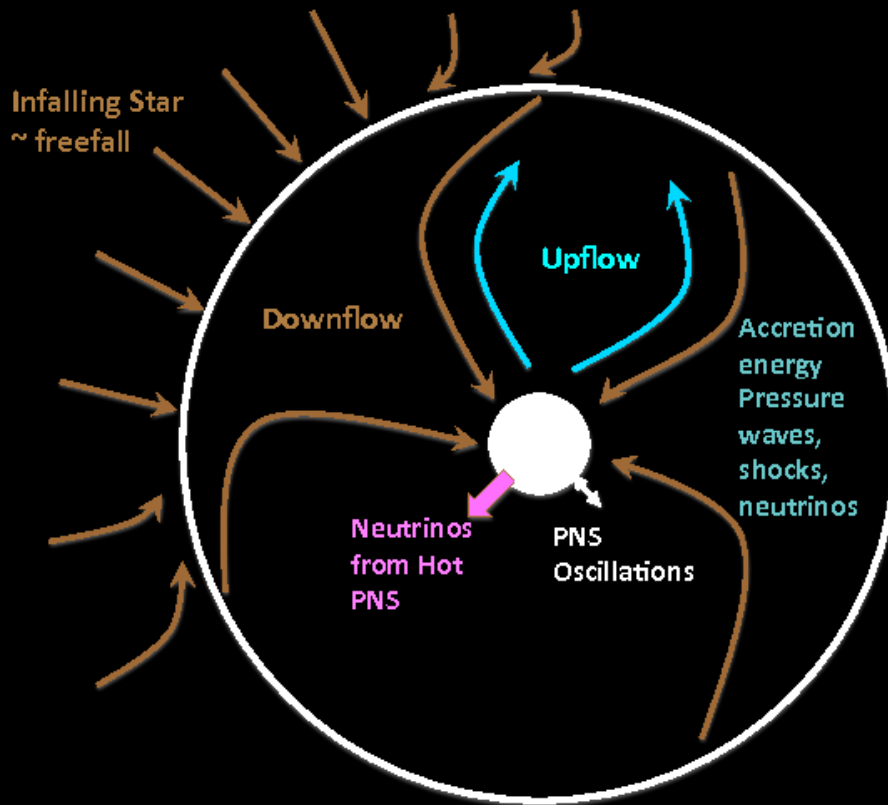


# Extreme Materie 3 – Kompakte Sterne

## Protoneutronensterne



# Was sind Protoneutronensterne?

Ein Protoneutronenstern ist der heiße kompakte Überrest des Kernkollaps einer Supernova, aus dem sich durch Abkühlung ein gewöhnlicher Neutronenstern entwickelt:

„Geburtstemperatur“  $6 \cdot 10^{11}$  K (entspricht  $\sim 50$  MeV)

„Endtemperatur“  $5 \cdot 10^{10}$  K (entspricht  $\sim 4$  MeV)

→ typische Zeitskala, um die es hier geht:  $\sim 20$  Sekunden

Im Bereich der Grenzmasse kann es auch noch verzögert zur Phasenumwandlung in einen Quarkstern oder Black hole kommen

Frage: Wie gelingt es dem sich bildenden Neutronenstern innerhalb einer so kurzen Zeit einen großen Teil seiner Wärme loszukriegen?

# Der Geburtsvorgang eines kompakten Sterns...

Innerhalb von **0,08 Sekunden** kollabiert der **Fe-Kern** von ca. 20.000 km Durchmesser auf ca. 30 bis 40 km Durchmesser

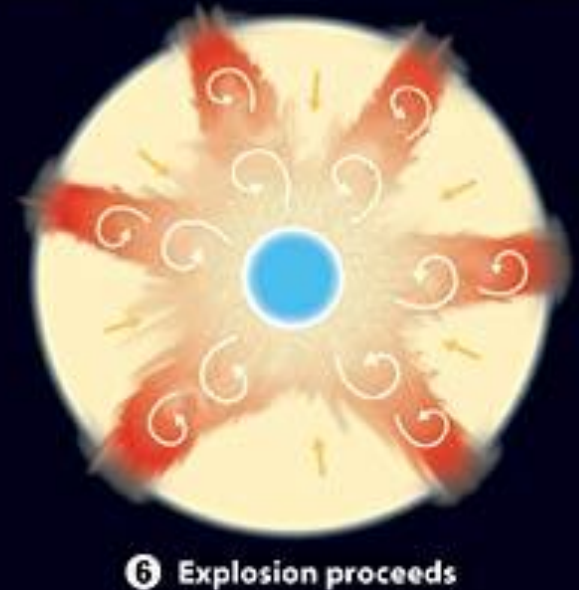
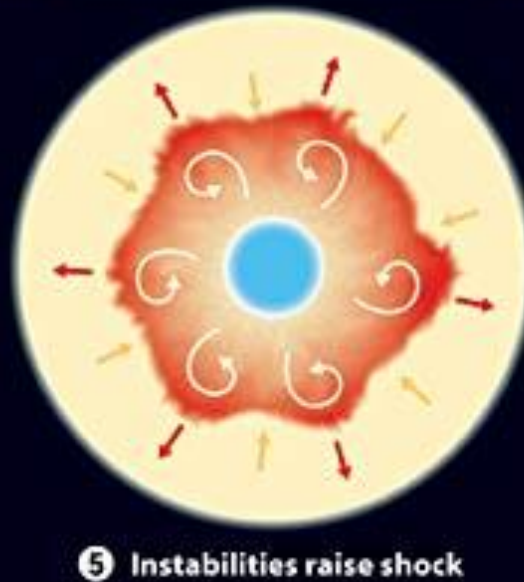
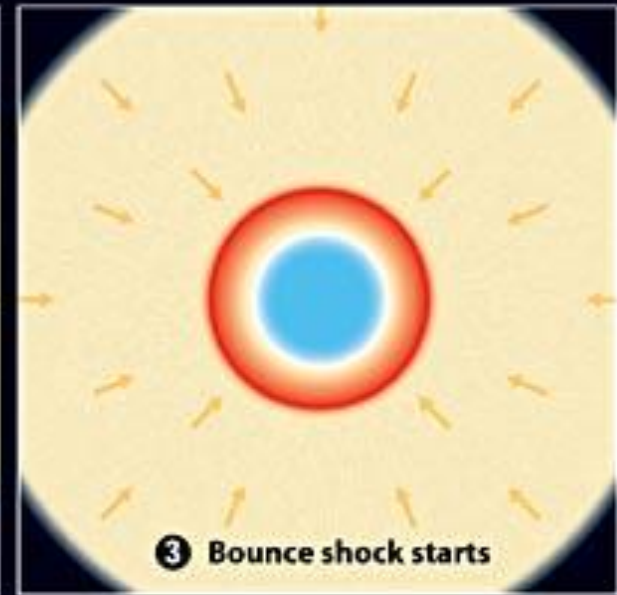
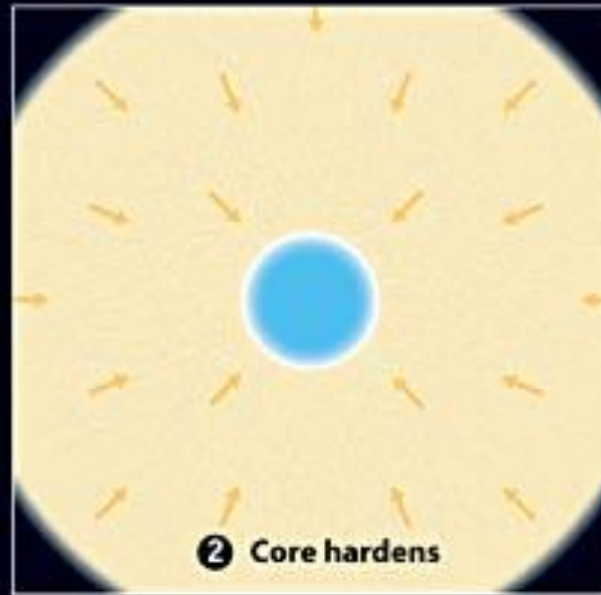
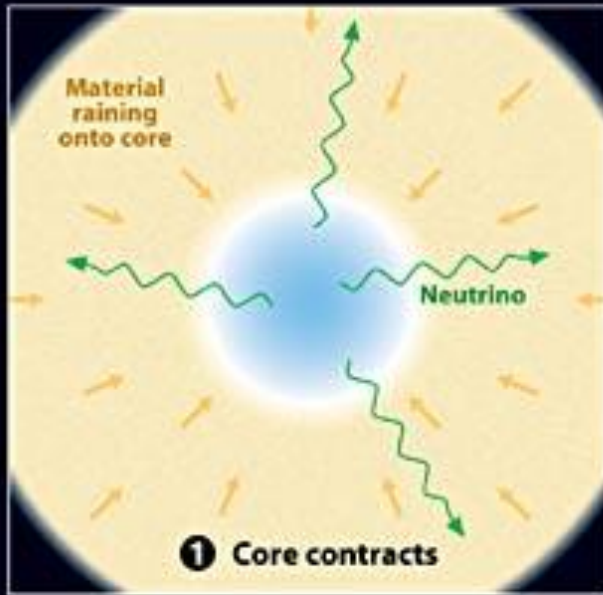
$$\tau_{FF} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

$$7 \cdot 10^{11} \text{ kg/m}^3$$

→ **mittlere Dichte** →

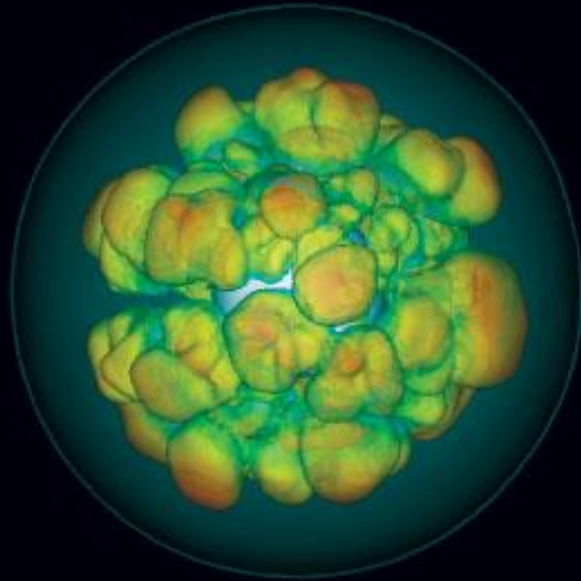
$$8 \cdot 10^{14..16} \text{ kg/m}^3$$

# Nach dem Moment des Kernkollaps bildet sich eine Schockwelle aus...



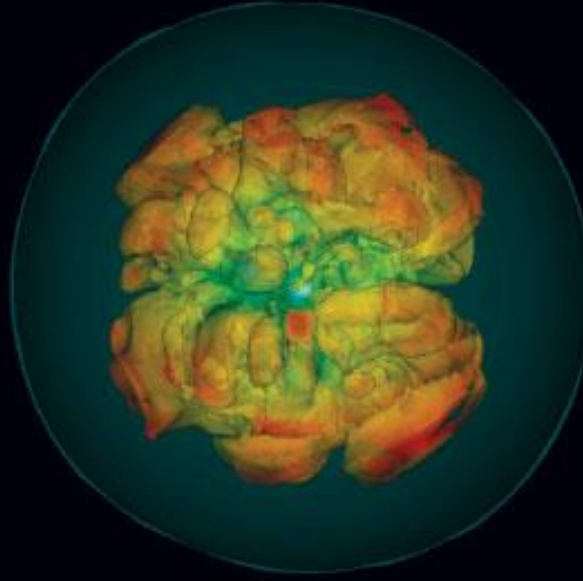
# Computersimulation der Ausbildung einer Schockwelle nach dem Kollaps

90 ms



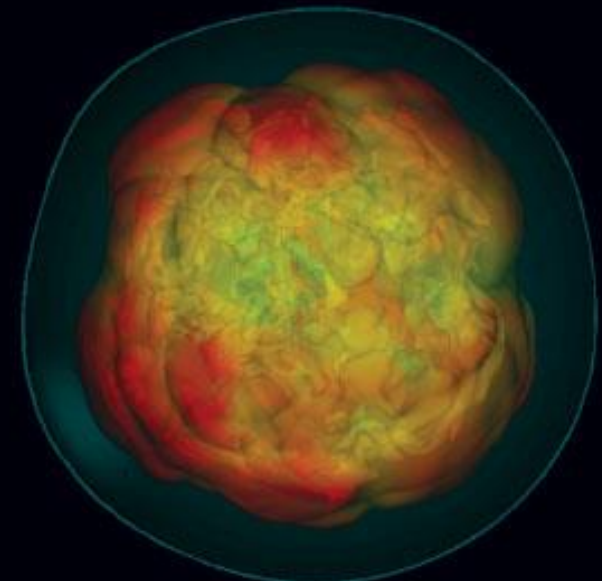
100 km

170 ms



500 km

350 ms



3,000 km

rot auswärts gerichtete, blau inwärts gerichtete Bewegungen  
Umfangslinie = Schockfront

# Timeline der Proto-Neutronensternentwicklung

Nach dem Kollaps hat sich der Eisenkern des Riesensterns bis auf Kerndichte komprimiert und seine Materie ist in eine Form von Kernmaterie übergegangen, die sich noch stark von der Materie des zukünftigen Neutronensterns unterscheidet:

## → Protoneutronensternmaterie

Wenn der innere Kern stoppt, wird die nachstürzende Materie abrupt abgebremst und es kommt zu einem Zurückschnellen (core bounce), der eine nach außen durch die einfallende Materie laufende Schockwelle produziert.

### **Protoneutronensternmaterie**

Sehr komplexes Gemisch aus Baryonen (n,p) und Leptonen ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\nu$ ), wobei der Leptonenanteil anfangs noch hoch und in der ersten Sekunde relativ konstant ist. Der Grund dafür ist in der geringen freien Weglänge der Neutrinos zu suchen ( $\sim 1$  m), wodurch die Neutrinos noch im Protoneutronenstern „eingeschlossen sind“.

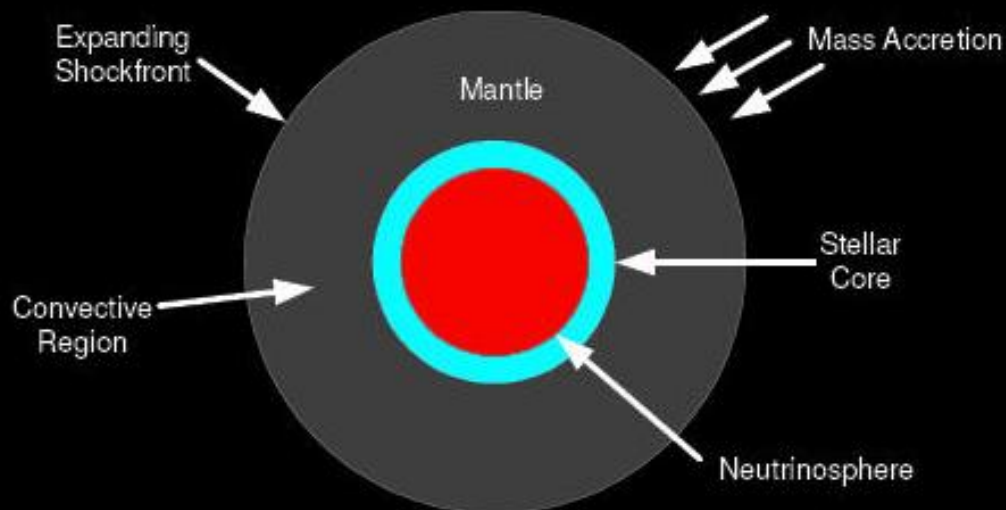
Fe-Kern des Sterns enthält  $\approx 10^{57}$  Elektronen, und wenn quasi jedes davon von einem Proton gemäß



eingefangen und dabei ein Neutrino mit einer Energie von 10 MeV emittiert wird, dann wird absolut gesehen eine Energie von  $\approx 10^{45}$  J innerhalb von wenigen Millisekunden freigegeben ( $10^{19}$  mal mehr, als die Sonne pro Sekunde abgibt)

→ Neutronisation durch Elektroneneinfang der Protonen

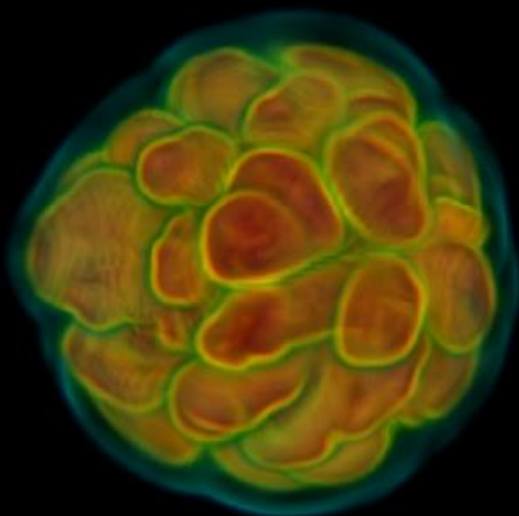
Da anfänglich die Protoneutronensterne für Neutrinos trotz ihres geringen Wechselwirkungsquerschnitts noch opak ist, bleibt die Leptonenzahldichte hoch.



Ungefähr 0,5 s nach dem core bounce ist auch die Akkretion der nachstürzenden Materie abgeschlossen

Mit dem Zurückschnellen des Kerns nimmt dessen Dichte ab und die mittlere freie Weglänge der Neutrinos erhöht sich, so dass sie den Kern verlassen und dabei die auslaufende Schockwelle weiter antreiben können. Hinter der Schockwelle kommt es zu Rayleigh-Helmholtz-Instabilitäten, welche das Material durchmischen und in denen Kernprozesse (z. B. Ni-Bildung) stattfindet

180 ms



### **Aufbau:**

Neutrino undurchlässiger Kern  
Neutrino(photo)sphäre  
Neutrino durchlässige Hülle

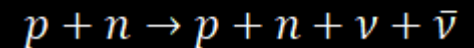
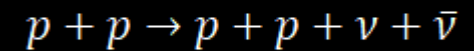
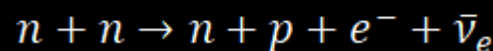
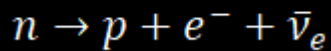
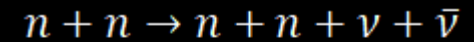
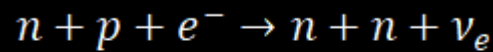
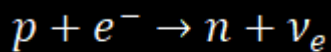
Durch das Entweichen der Neutrinos aus der Hülle wird diese schnell abgekühlt.

z  
600 km



Die „**Deleptonisierung**“ des Neutronensterns ist 10 bis 15 Sekunden nach dem core bounce abgeschlossen. Sie führt zu einer kurzzeitigen Erwärmung des Kernbereichs. Je nach Modell bilden sich im Kernbereich Hyperonen („Seltsame Materie“, Pionen-Kondensate oder ein Quark-Gluonenplasma.

In den nächsten 10 bis 20 Sekunden werden die durch URCA-Prozesse entstehenden Neutrinos in Form von thermischen Neutrinos emittiert, was die Neutronensternmaterie schnell auf Temperaturen unterhalb von  $10^{10}$  K bringt. Der heiße Protoneutronenstern hat sich in einen kalten „normalen“ Neutronenstern umgewandelt.



URCA-Prozess

Modifizierter URCA-Prozess

Nukleonen-Nukleonen-Bremsstrahlung

Nach etwa 50 Sekunden nach dem core bounce erreicht die mittlere freie Weglänge der Neutrinos die Größenordnung des Sternradius, d. h. sie können weitgehend ungehindert den Stern verlassen. Insgesamt trägt dieser Neutrinostrom ca. 99% der beim Sternkollaps freigesetzten gravitativen Bindungsenergie (ca.  $0.7 \text{ Sonnenmassen} \cdot c^2$ ) fort, was einer intensiven Kühlleistung des Protoneutronensterns bzw. Neutronensterns entspricht (nur 1% der Energie wird für die Expansion der Sternhülle verwendet und nur 0,001% bis 0,01% als optische Strahlung freigesetzt).

### **Abkühlung:**

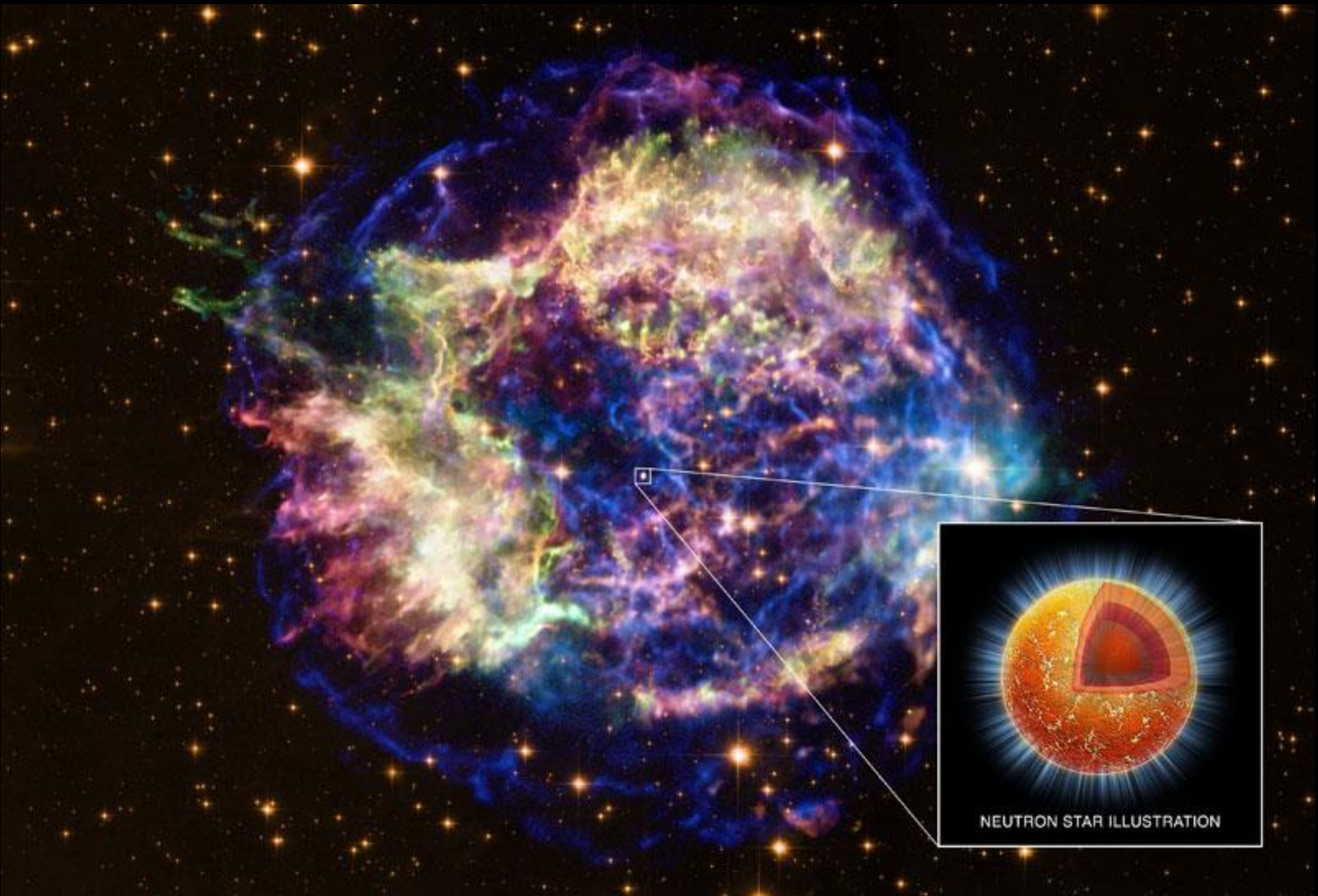
Innerhalb der folgenden 10.000 bis 100.000 Jahre spielt der Anteil der thermische Abkühlung durch Emission von Röntgen- und Gammastrahlung in der Gesamtbilanz kaum eine Rolle (d. h. bis eine effektive Temperatur von  $\sim 1 \text{ Million K}$  erreicht ist). Die Abkühlung der Neutronensternkruste selbst hat aber selbstverständlich Einfluss auf das Maximum der thermischen Gamma- und Röntgenstrahlung (Wiensches Verschiebungsgesetz), so dass sich an dessen zeitlicher Veränderung der von Neutrinos dominierten Abkühlung beobachten lässt.

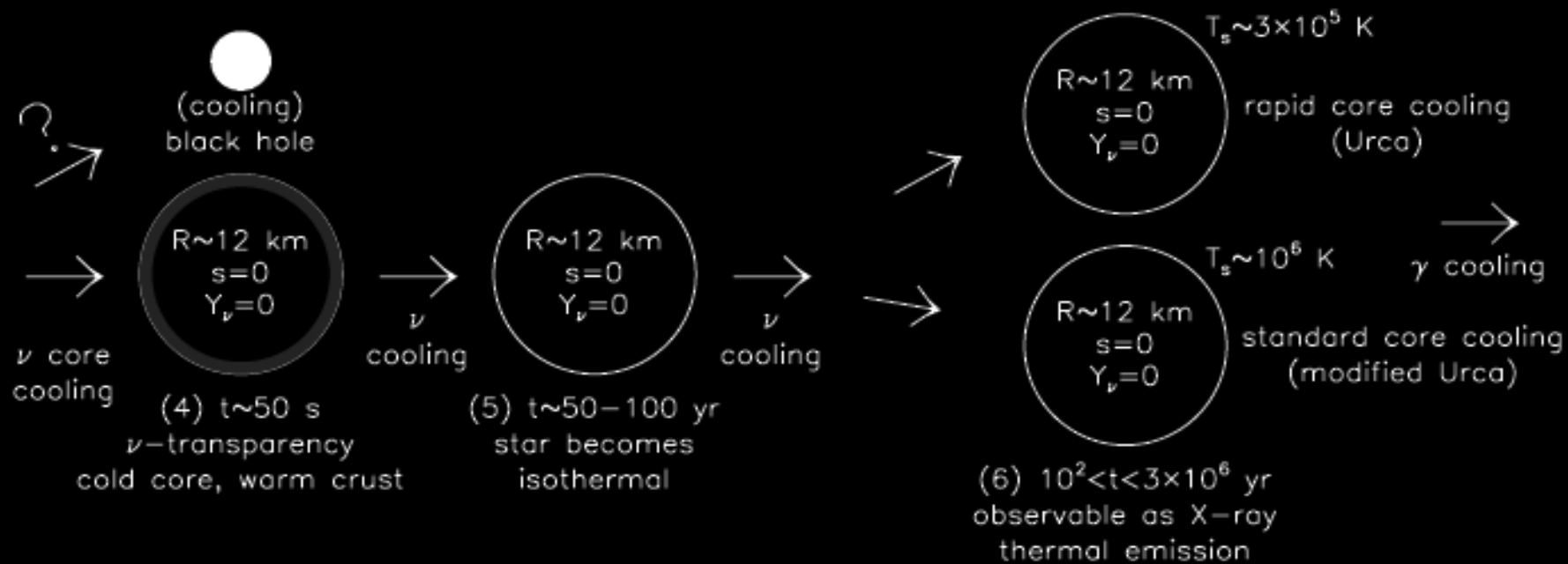
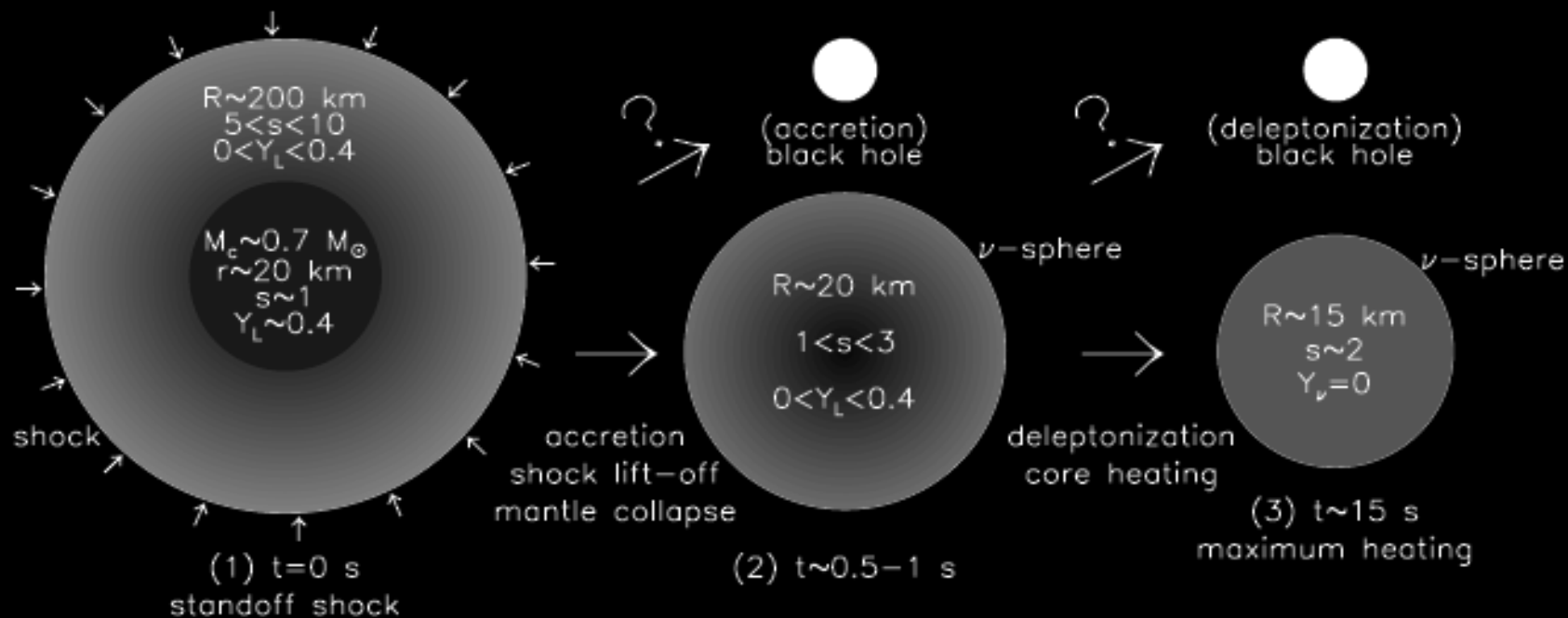
**Beispiel:** Neutronenstern im Kern des SN-Überrestes Cassiopeia A (Ausbruch 1680)



Cas A im optischen Spektralbereich

# Cas A mit isolierten Neutronenstern, der sich als Röntgenstrahlungsquelle bemerkbar macht





**Thin atmosphere:**  
H, He, C,...

**Outer crust:** ions, electrons

**Inner crust:** ion lattice, soaked  
in superfluid neutrons (SFn)

**Outer core liquid:**  $e^-$ ,  $\mu^-$ , SFn,  
superconducting protons

**Inner core:** *unknown*

12-15? km

~10 km

0.5 km

0.1 km

$\sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$

$\sim 2x$  nuclear density

$2 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$   
 $\sim$  nuclear density

$4 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$   
"neutron drip"