

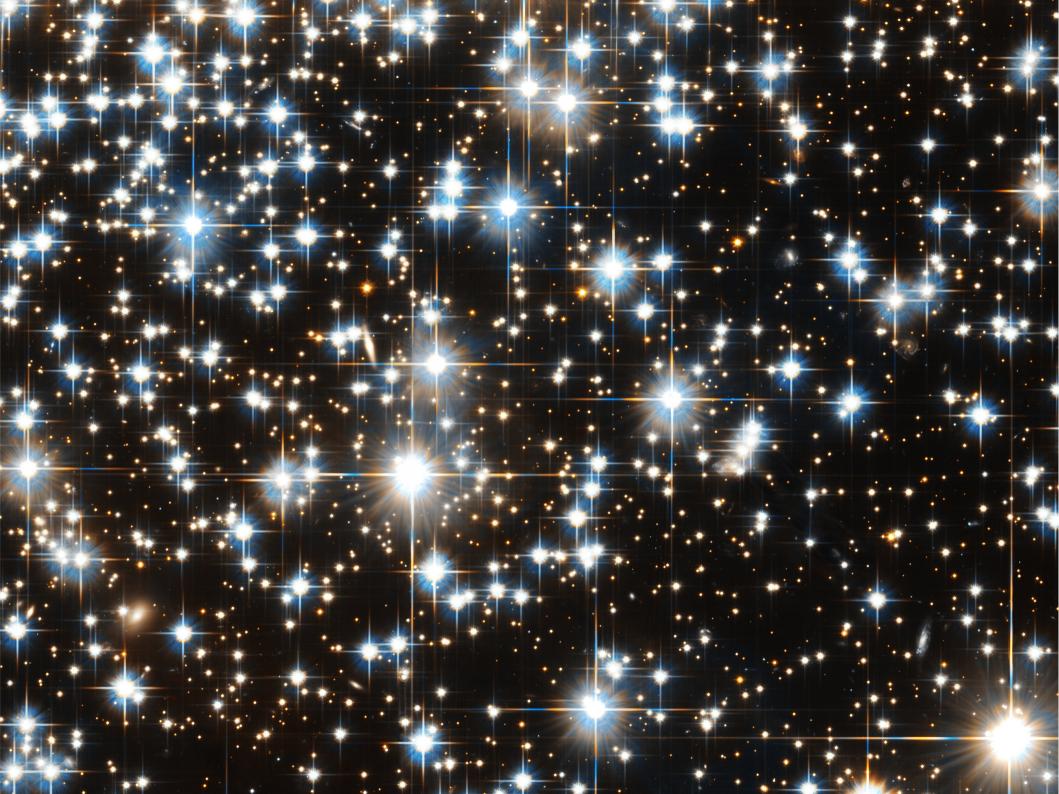
Aufbegehren gegen die Macht der Gravitation

Wie Supernovae explodieren

Hans-Thomas Janka
Max-Planck-Institut für Astrophysik
Garching

Max-Planck-Institut für Astrophysik

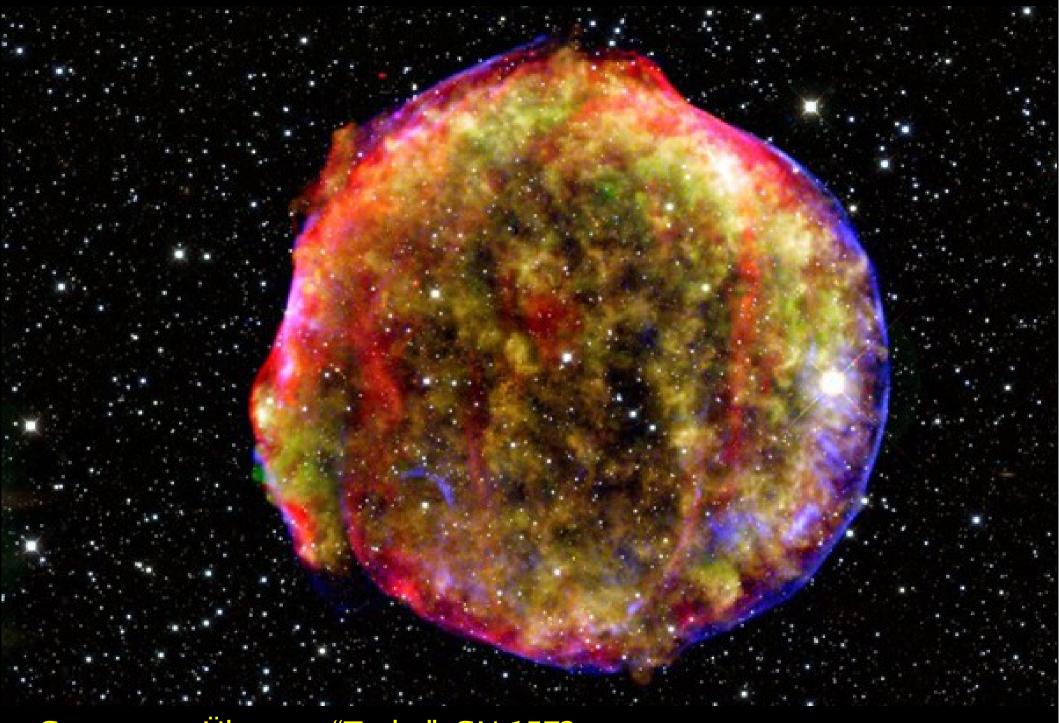




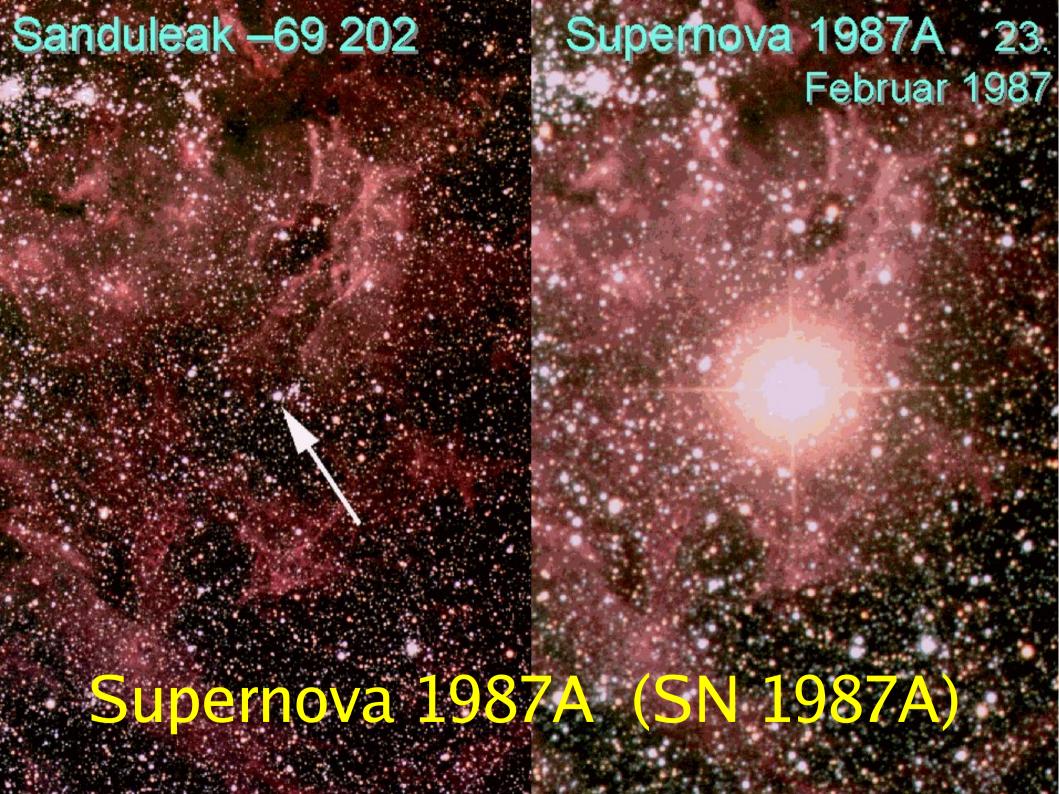


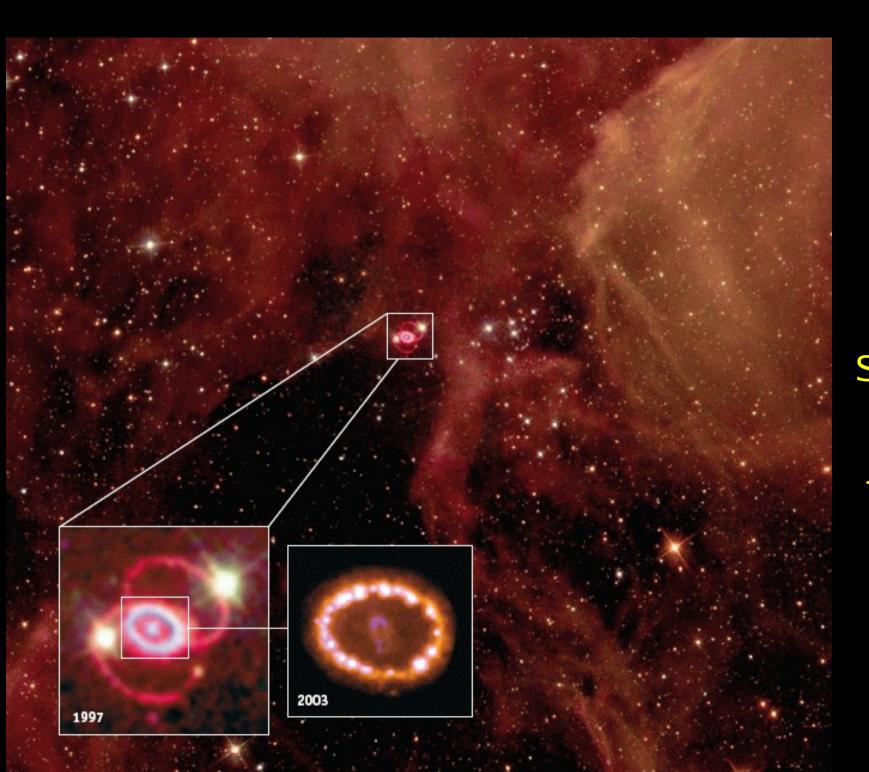






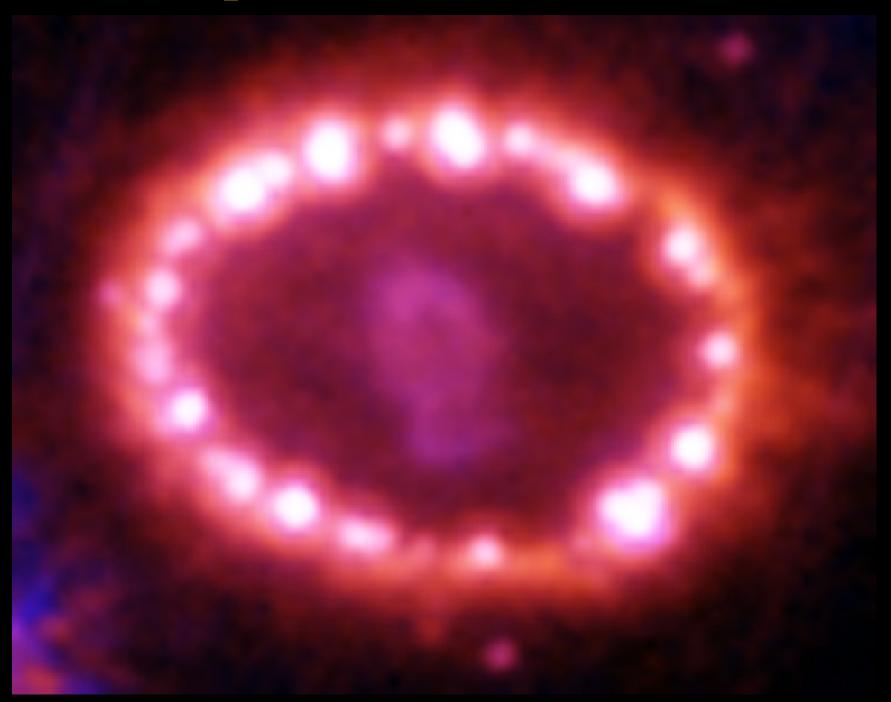
Supernova Überrest "Tycho" SN 1572 (Röntgenbild durch CHANDRA-Satelliten)

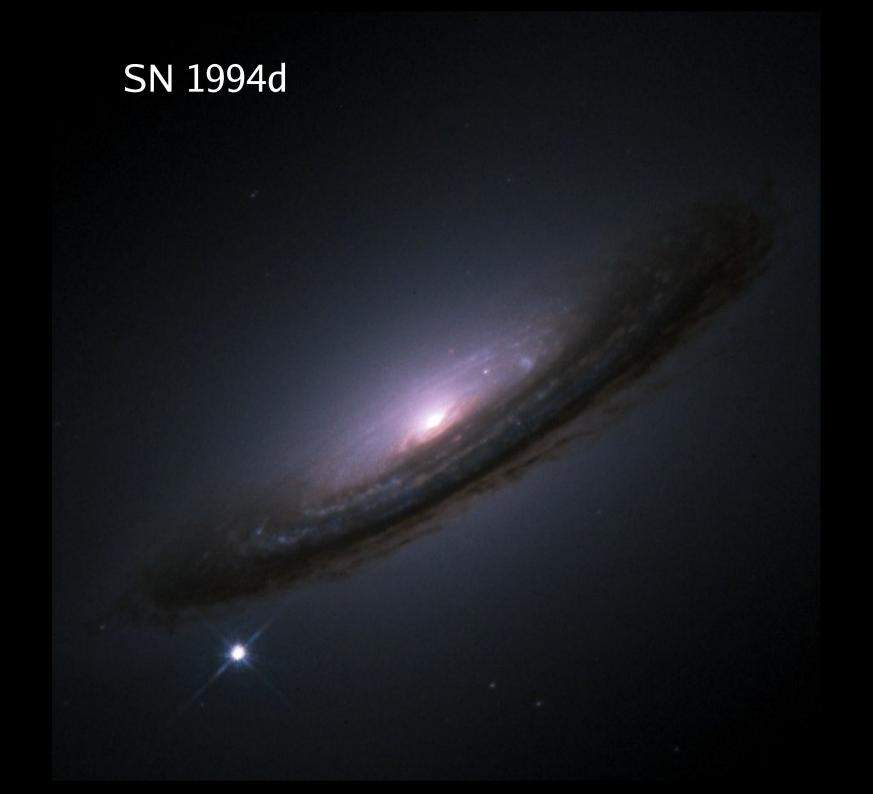




Supernova 1987A als Teenager

Supernova 1987A heute







- Die Sterne werden bei einer katastrophalen Explosion zerstört.
- Geburtsstätten für Neutronensterne und Schwarze Löcher.
- Leuchtfeuer zur Entfernungsmessung im Universum.
- **Quellen von Gravitationswellen und Neutrinos.**
 - trsprung schwerer chemischer Elemente.

Die Suche nach Gravitationswellen

Die turbulenten Vorgänge im Supernovazentrum verursachen winzige Störungen ("Kräuselungen") der Raumzeit: "Gravitationswellen"



VIRGO bei Pisa in Italien mit 3 km Armlänge



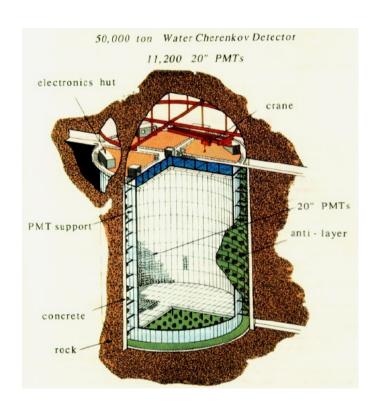
LIGO: Zwei Anlagen in den USA mit 4 km, eine dritte mit 2 km Armlänge



GEO600 bei Hannover mit 0.6 km Armlänge

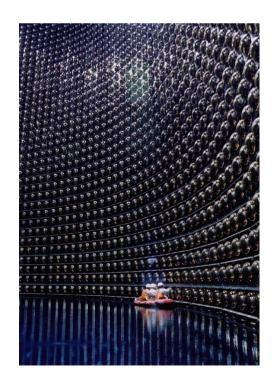
Die Jagd nach Supernova-Neutrinos

Der Superkamiokande-Detektor in Japan





50.000 Tonnen ultrareines Wasser, 11.146 Photonenvervielfacher

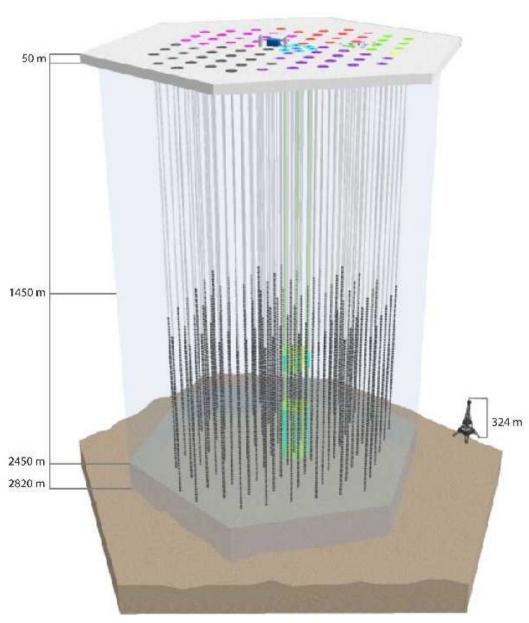


Die Jagd nach Supernova-Neutrinos

Das IceCube Neutrino-Teleskop am Südpol



1 Milliarde Tonnen Eis,5.160 Photonenvervielfacher an86 Trossen



Pro Sekunde explodi<mark>ere</mark>n 5-10 Supernovae irgendwo im sich<mark>tbar</mark>en Universum!



Astronomen entdecken pro Jahr mehrere 100 Supernovae in anderen Galaxien im fernen Weltall.



Bislang wurden mehr als 10000 Supernovae beobachtet.



In unserer Milchstraße ereignen sich 2–3 Supernovae pro Jahrhundert.



Supernovae sind die stärksten und hellsten Explosionen im Weltall!



Supernovae strahlen für Wochen so hell wie alle Sterne einer Galaxie zusammen!

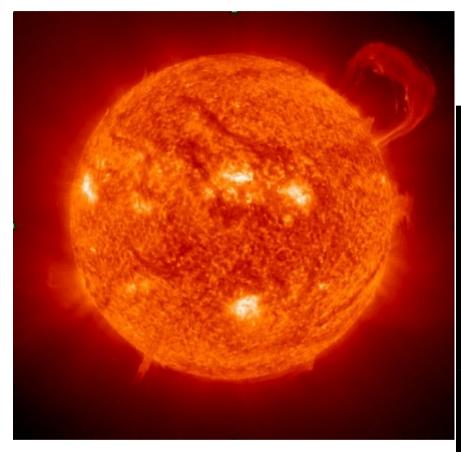


Supernovae setzen in Tagen so viel Energie frei wie die Sonne in 10 Milliarden Jahren ihres Lebens!

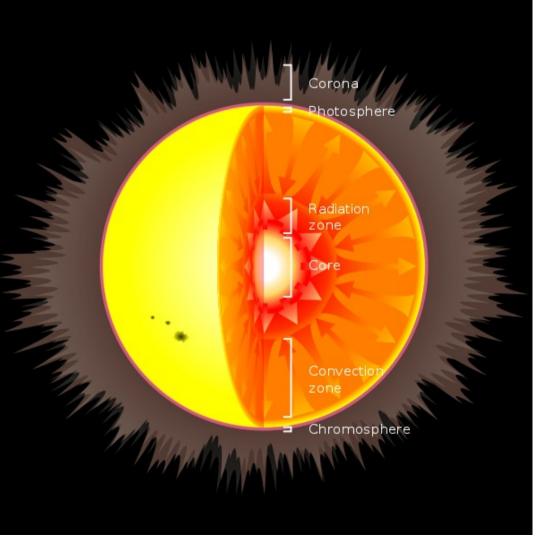
Was verursacht diese Sternkatastrophen?

Wie altern und sterben Sterne?

Die Sonne



Das Innere der Sonne

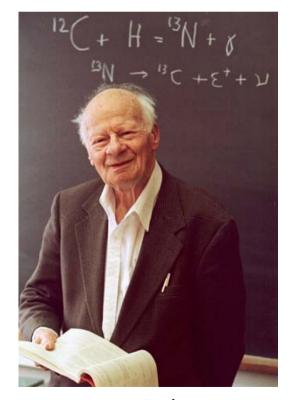


Nukleare Energieerzeugung in der Sonne

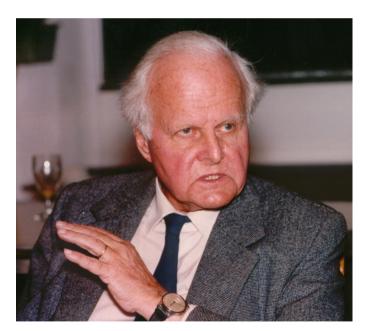
Kernfusion: Verschmelzung von Wasserstoff-Atomkernen zu Helium



Protonen



Hans Bethe



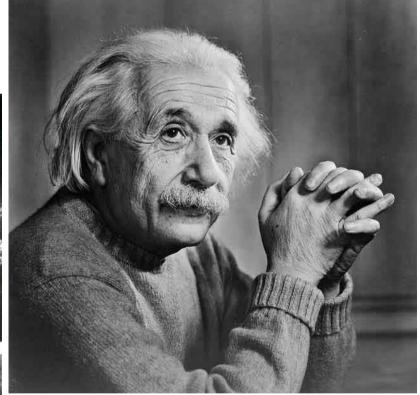
Carl Friedrich v. Weizsäcker

Energieerzeugung in Sternen

Kernspaltung und Kernfusion setzen zehntausendfach bzw. millionenfach mehr Energie frei als chemische Reaktionen

Die Sonne erzeugt ihre abgestrahlte Energie durch Kernfusion von Wasserstoff (Protonen) zu Helium



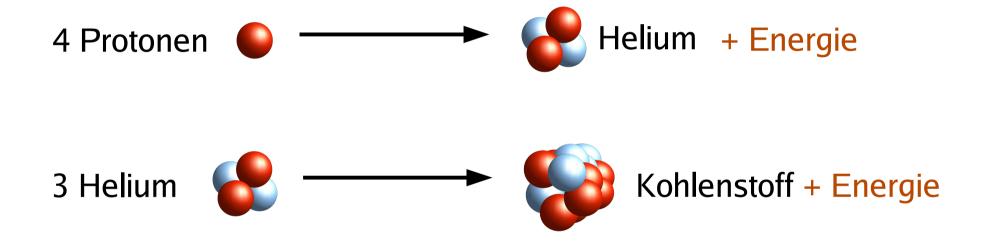


Albert Einstein

 $E = m*c^2$

Energie und Masse sind ineinander umwandelbar

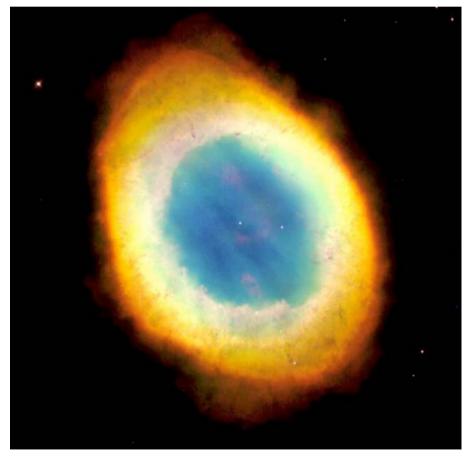
Energieerzeugung in der Sonne



Das Ende der Sonne

Der Kernbereich sonnenähnlicher Sterne endet als Weißer Zwerg, während die Hülle in einem Planetarischen Nebel abgestoßen wird.



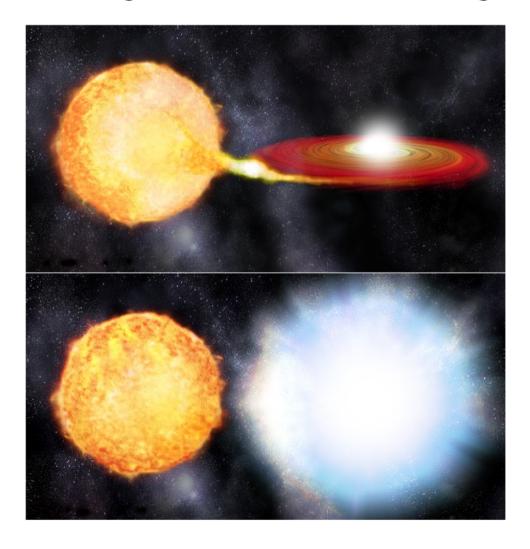


Katzenaugen-Nebel

Ring-Nebel

Wäre die Sonne ein enger Doppelstern...

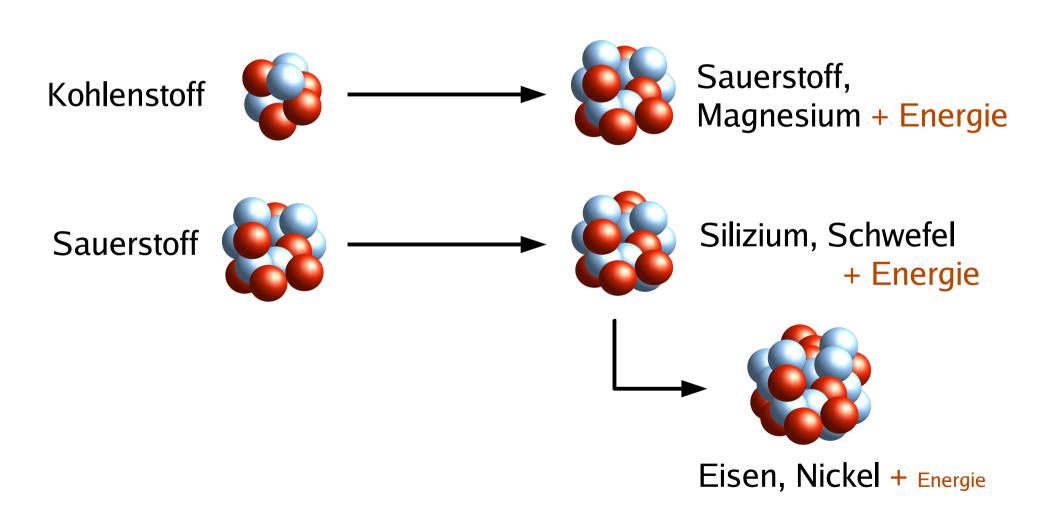
Gasübertrag von einem Begleiter kann den Weißen Zwerg "wiederbeleben".

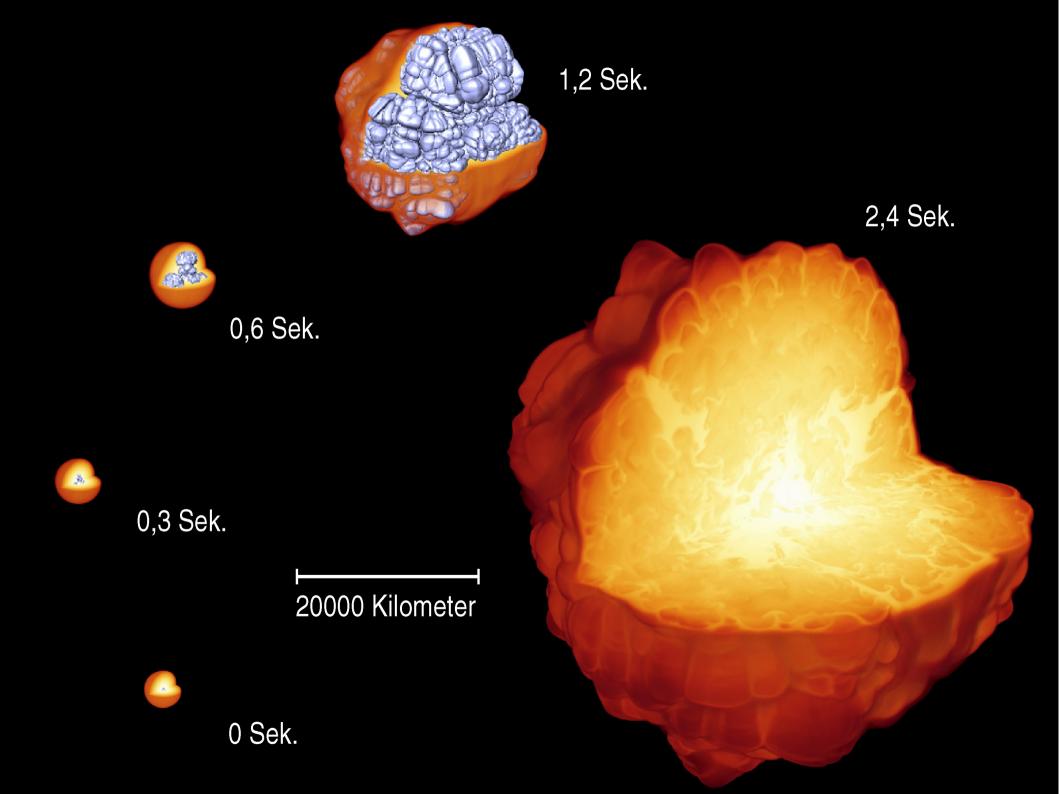


Weißer Zwerg explodiert als Supernova



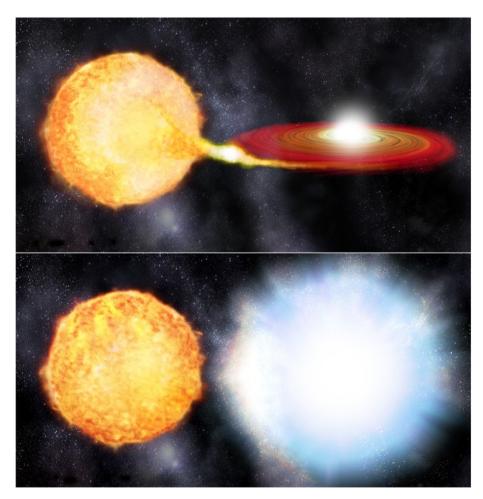
Energieerzeugung in explodierenden Weißen Zwergen



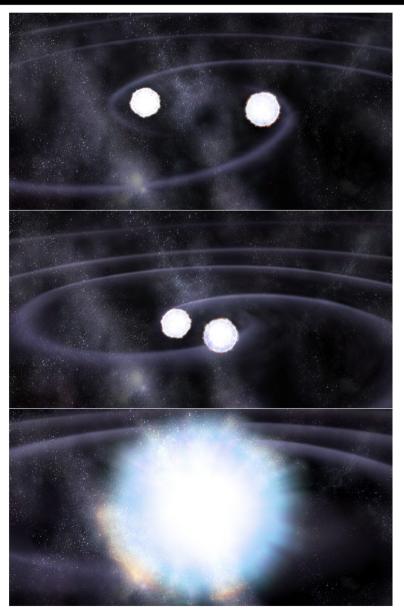


Wäre die Sonne ein enger Doppelstern...

Die Wechselwirkung mit einem Begleiter kann den Weißen Zwerg "wiederbeleben".



Gasübertrag vom Begleitstern

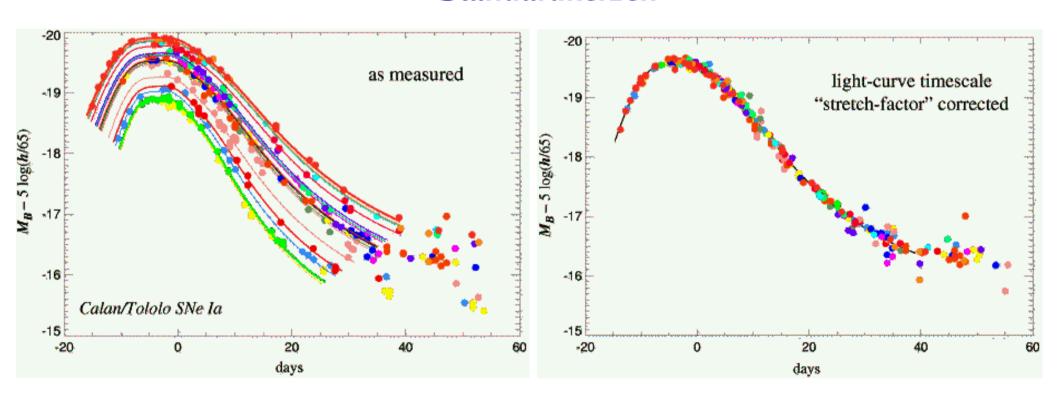


Verschmelzung vom zwei Weißen Zwergen

Typ Ia Supernovae

Explodierende Weiße Zwerge in Doppelsternsystemen

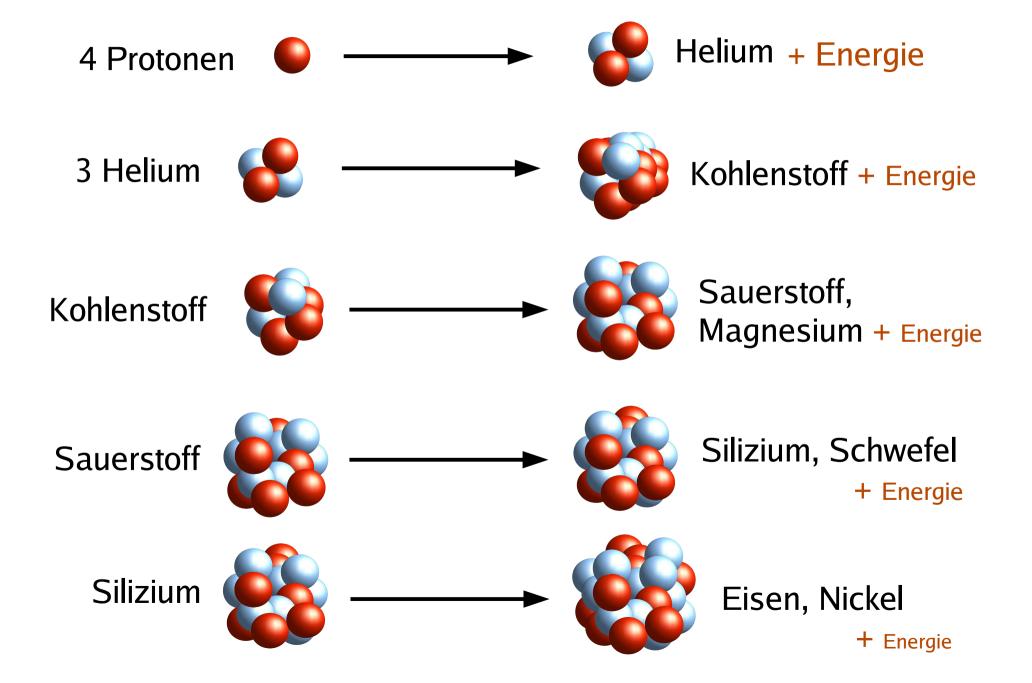
"Standardkerzen"



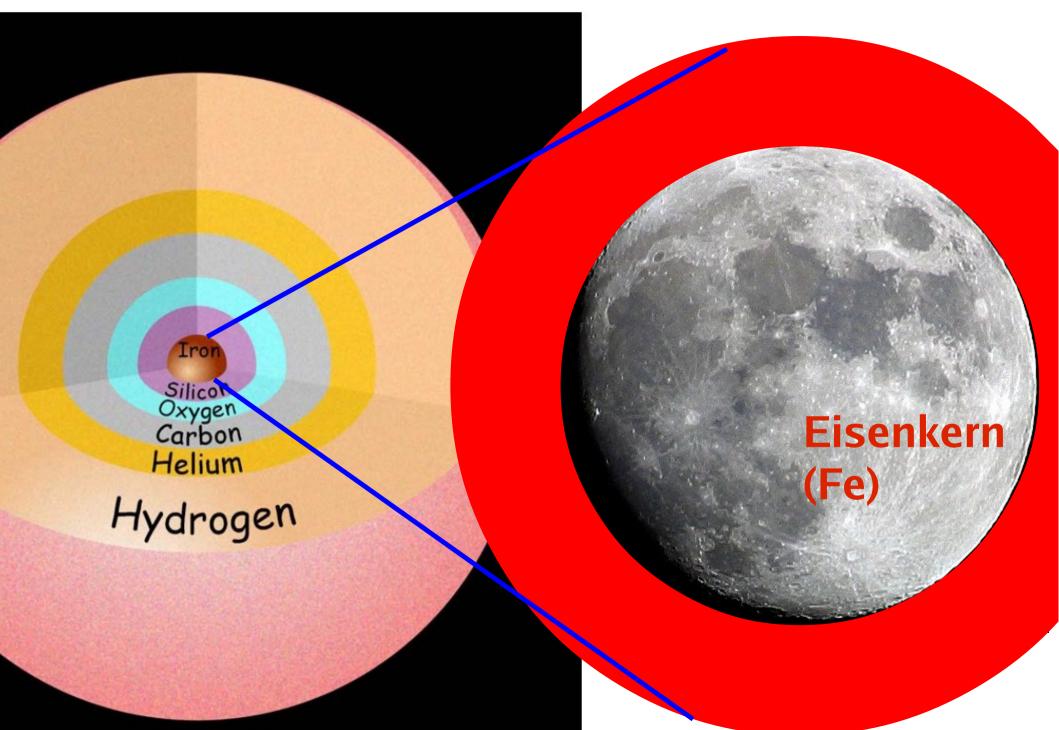
Kalibration mittels Phillips-Relation

Wie entwickeln sich Sterne, die viel schwerer sind als die Sonne?

Energieerzeugung in schweren Sternen

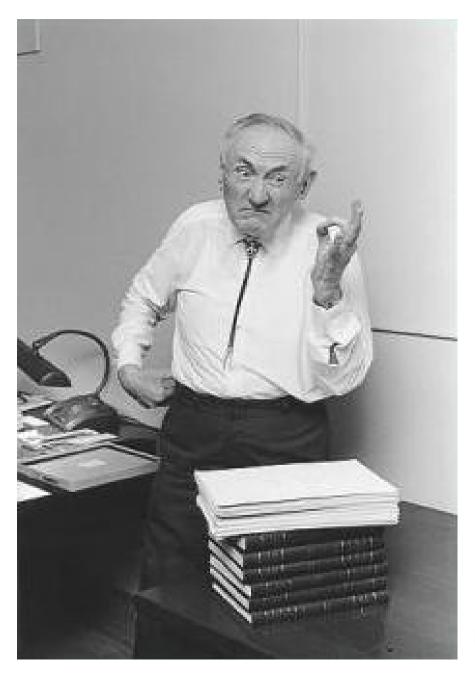


Massereicher Stern mit Zwiebelschalenstruktur



Was passiert dann?

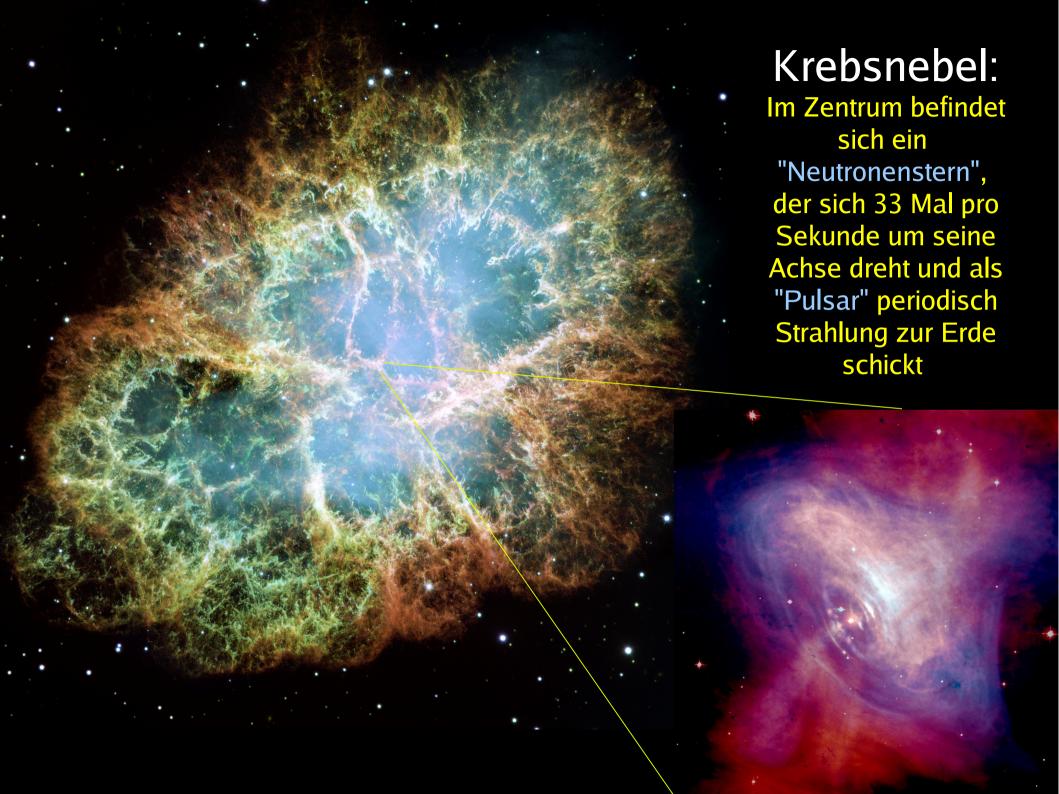
Supernova-Theorie



Walter Baade und Fritz Zwicky (1933):

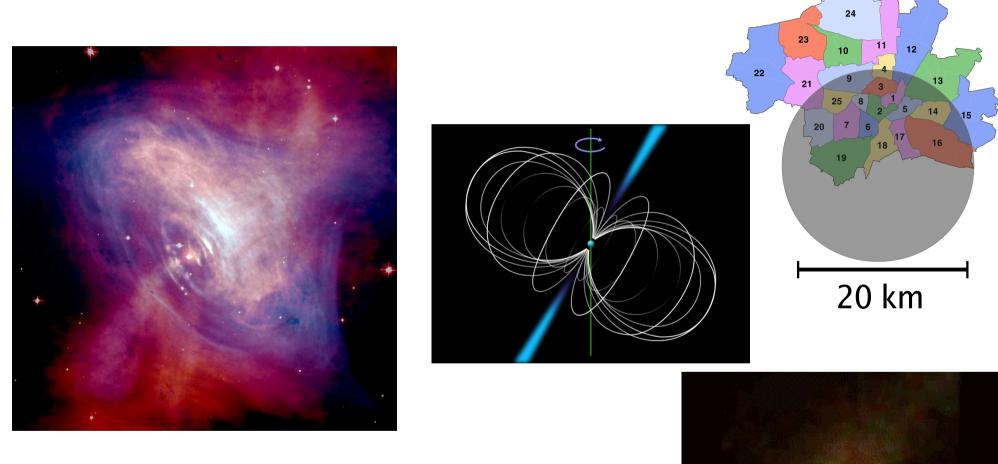
Der Kernbereich eines entwickelten, massereichen Sterns kollabiert zu einem Neutronenstern, während der Stern als Supernova explodiert.

Fritz Zwicky (1898–1974)

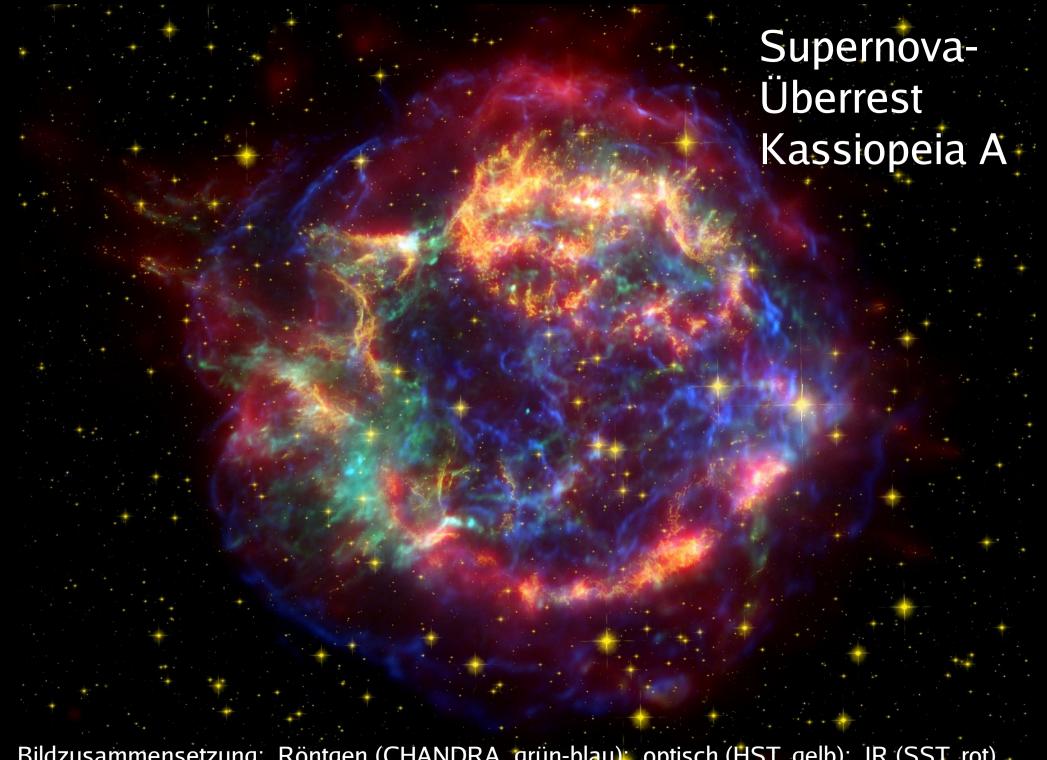


Neutronensterne als Pulsare

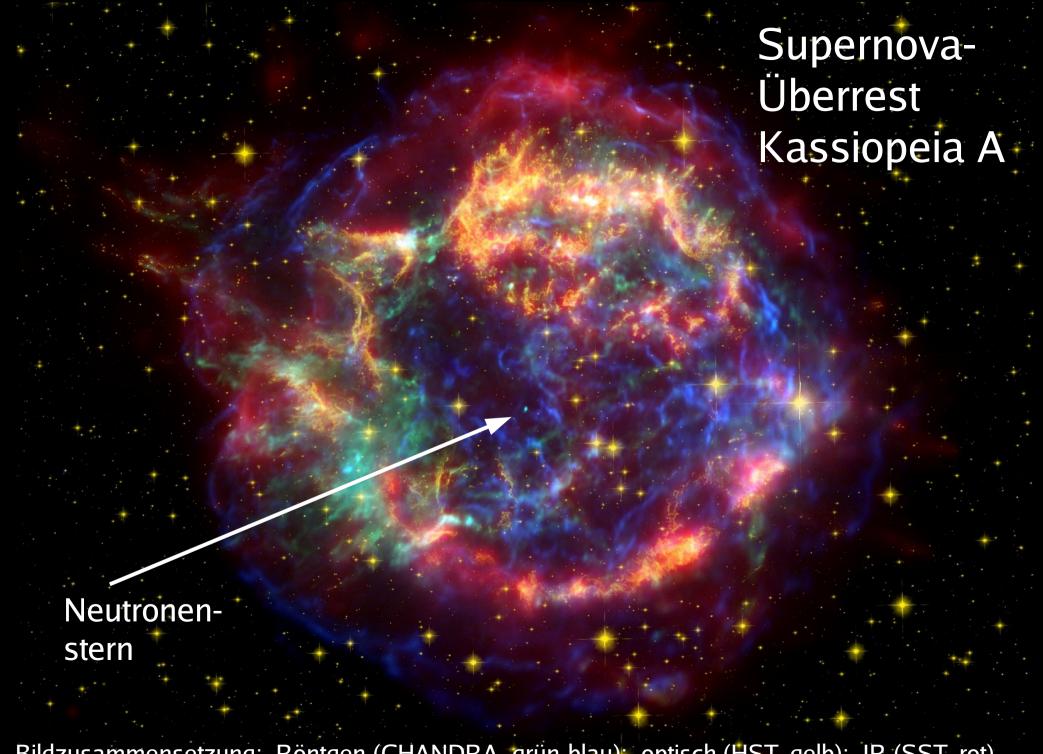
Stadtbezirke München



1,5 × Masse der Sonne



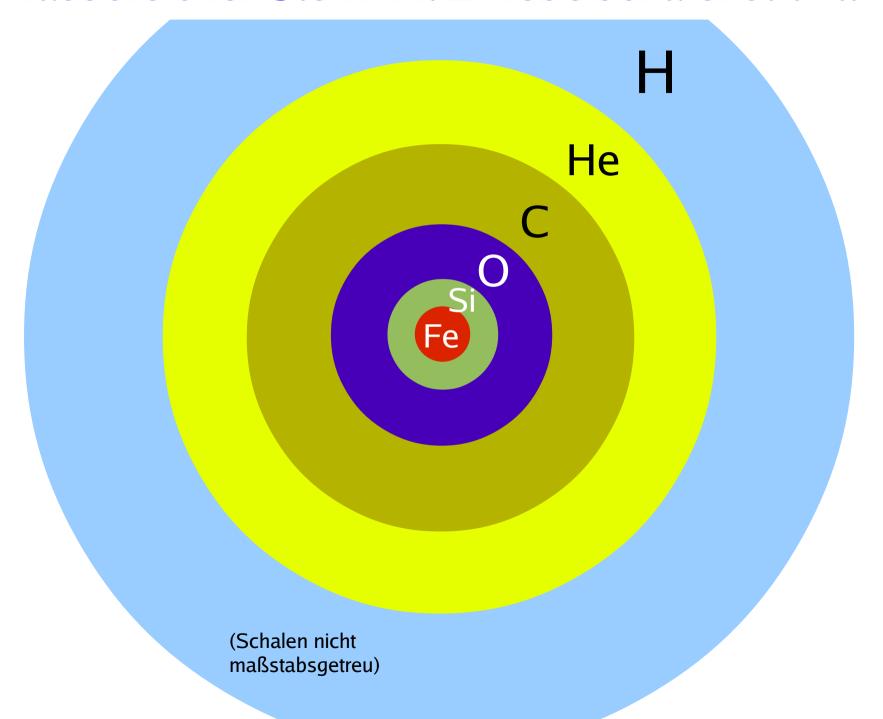
Bildzusammensetzung: Röntgen (CHANDRA, grün-blau); optisch (HST, gelb); IR (SST, rot)



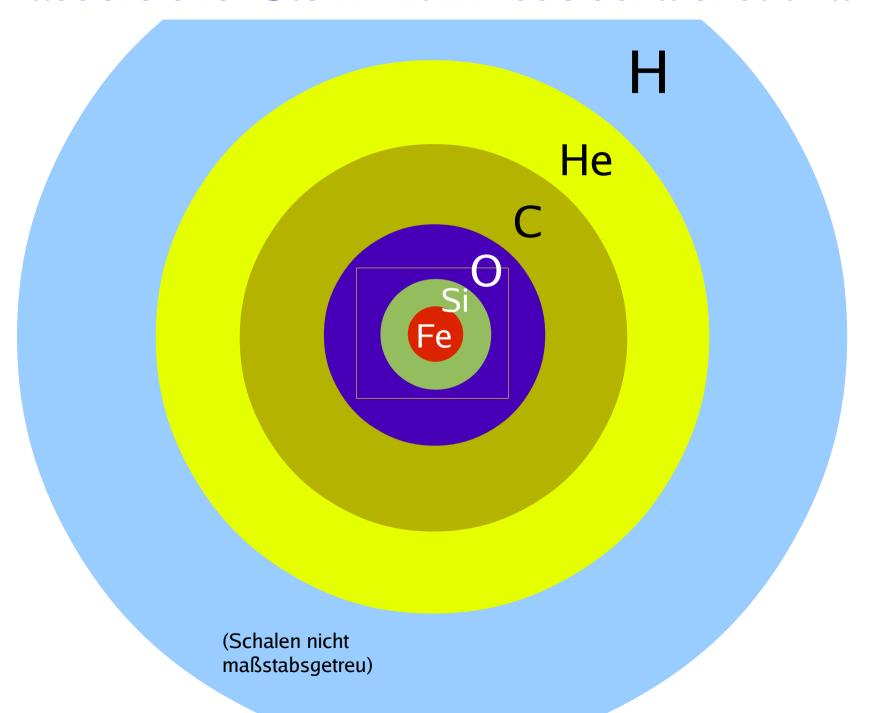
Bildzusammensetzung: Röntgen (CHANDRA, grün-blau); optisch (HST, gelb); IR (SST, rot)

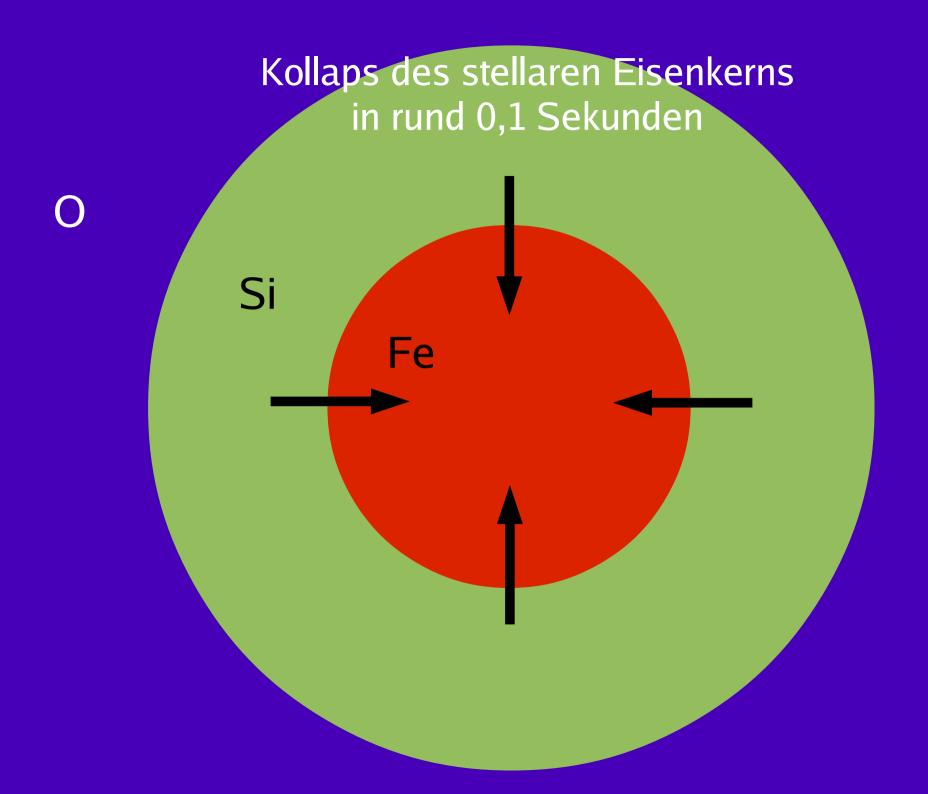
Was verursacht die Explosion schwerer Sterne?

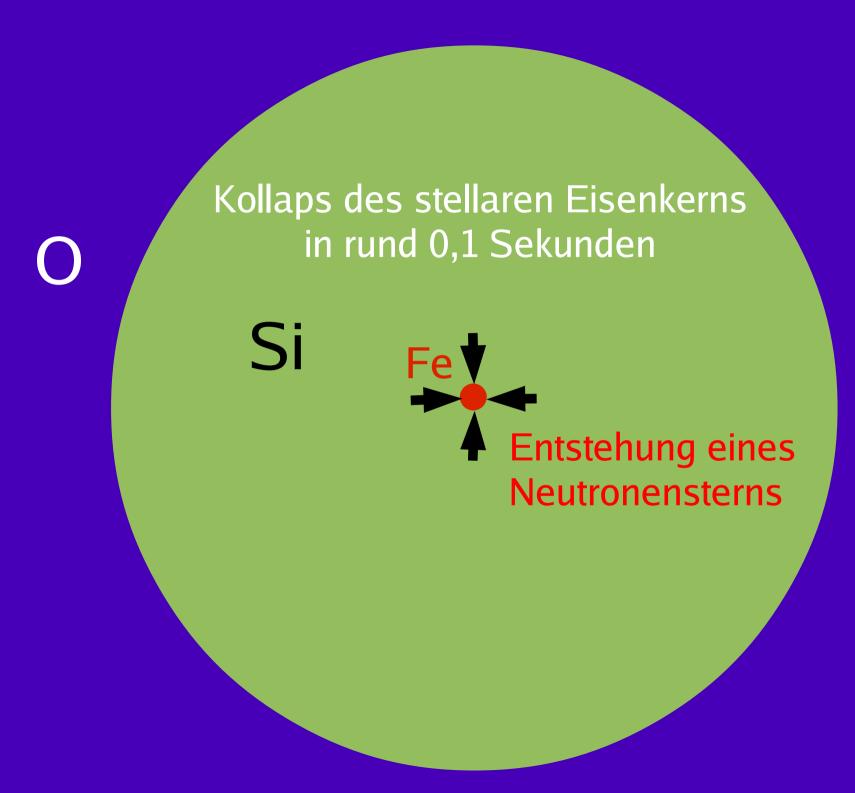
Massereicher Stern mit Zwiebelschalenstruktur

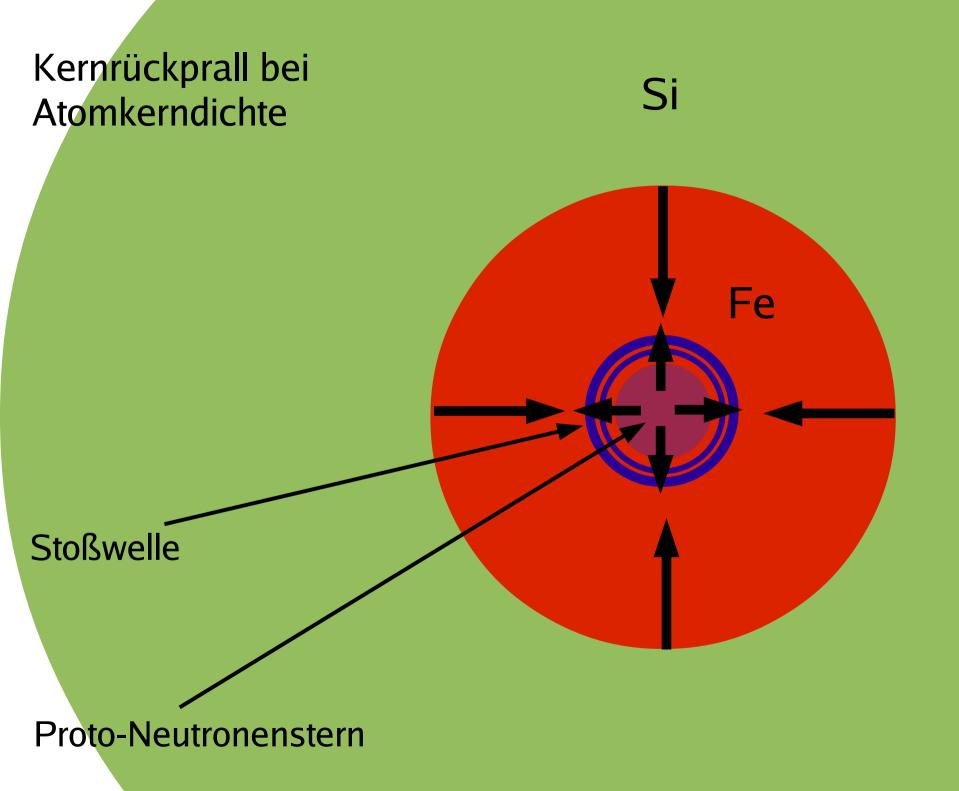


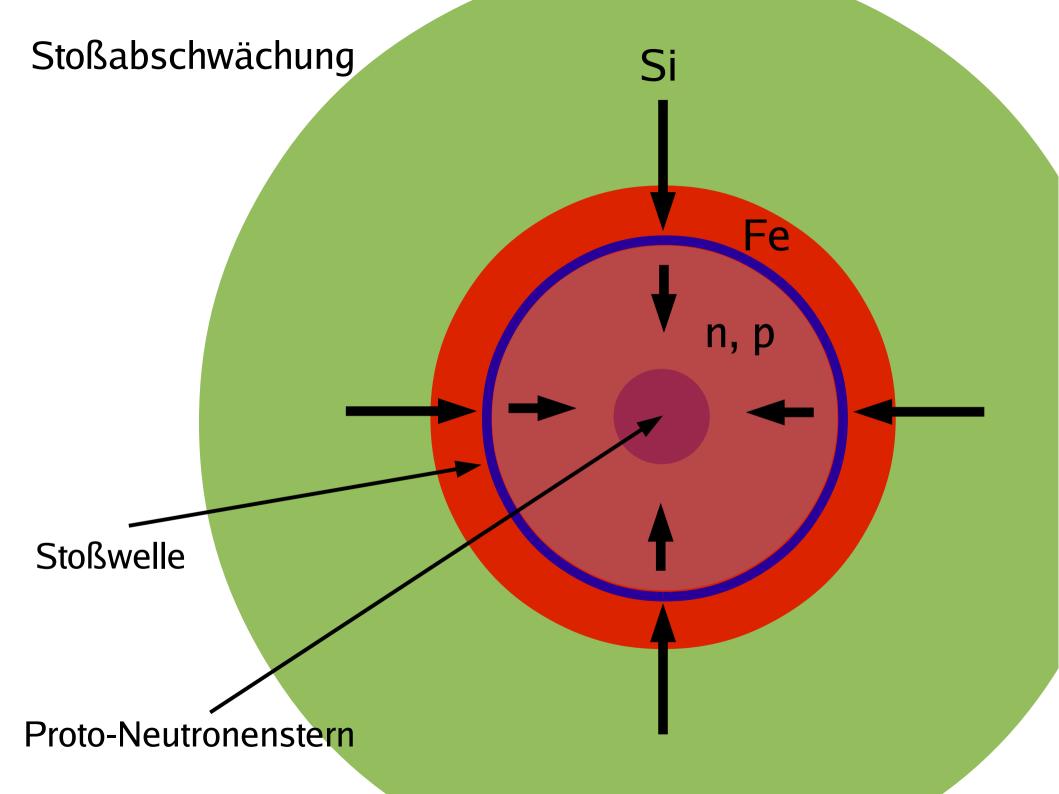
Massereicher Stern mit Zwiebelschalenstruktur

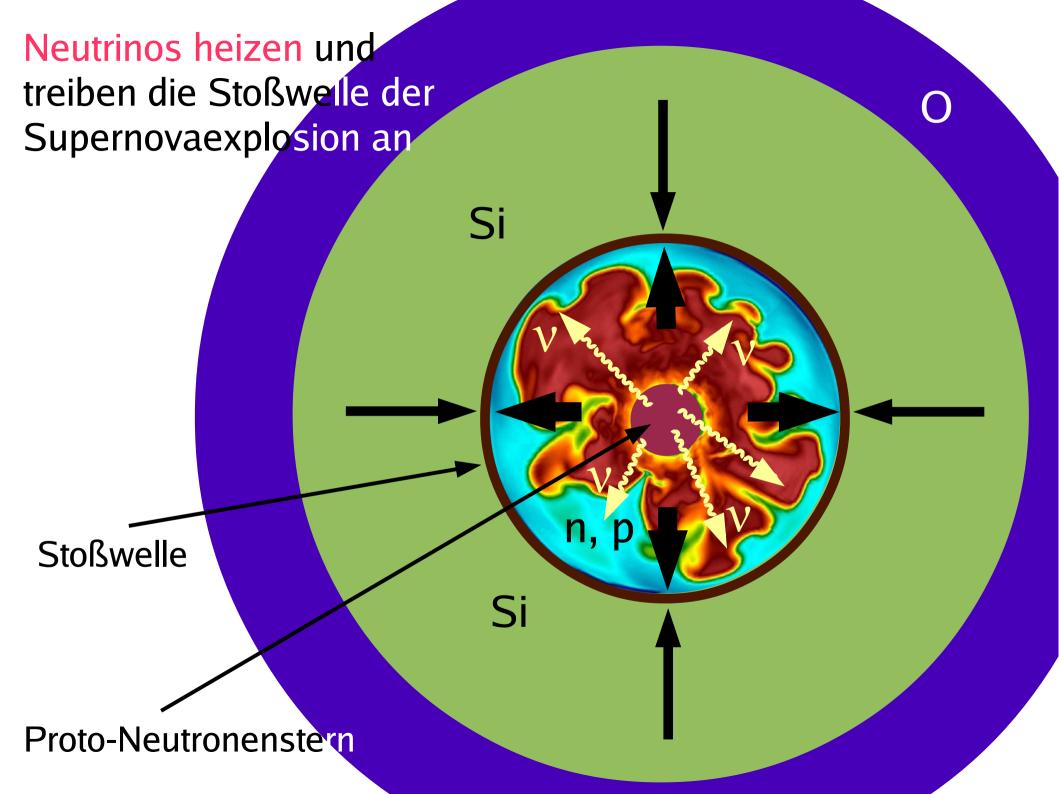


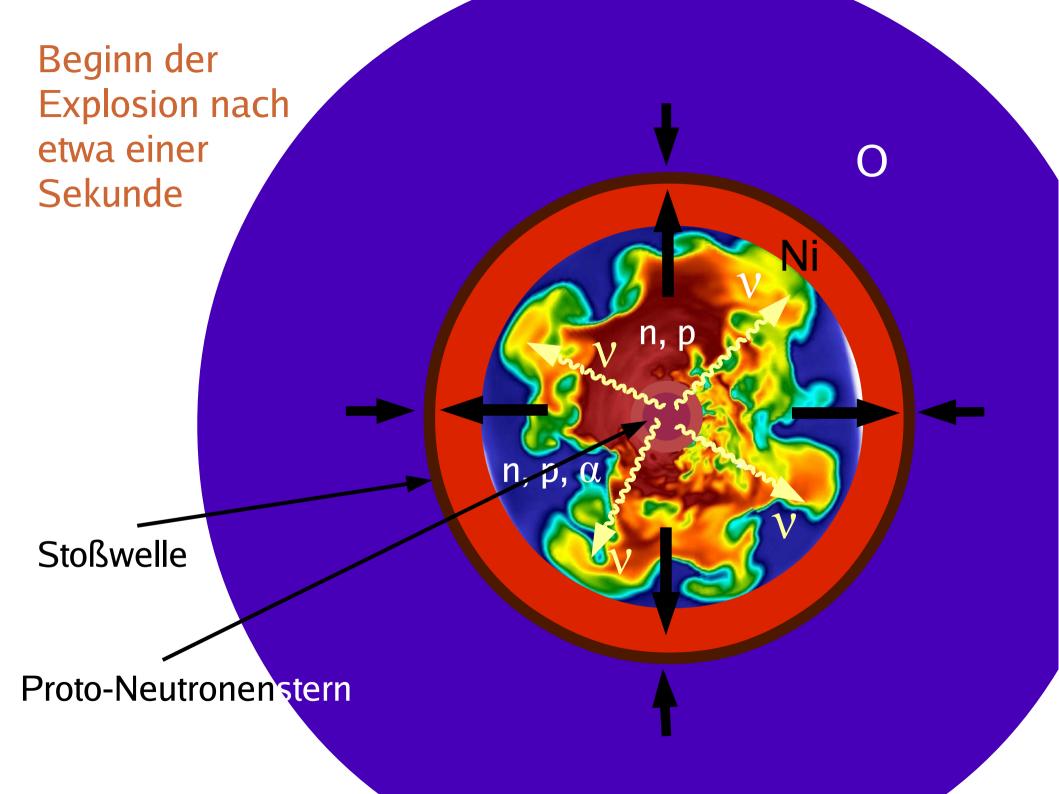


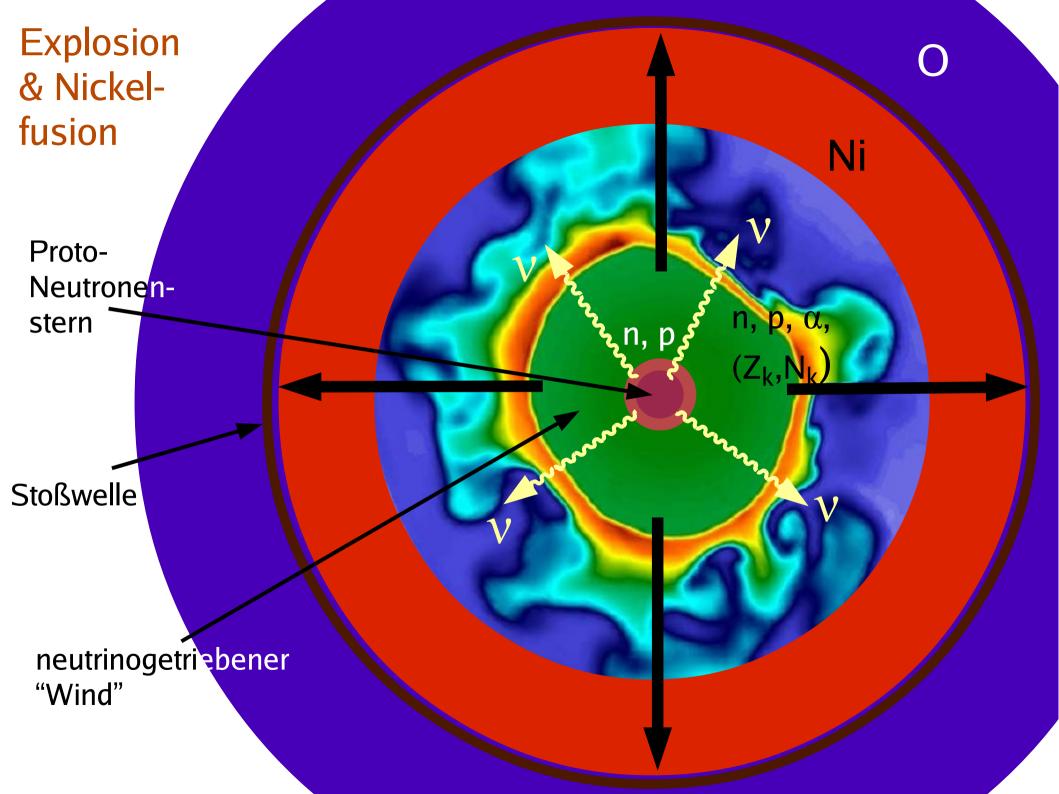






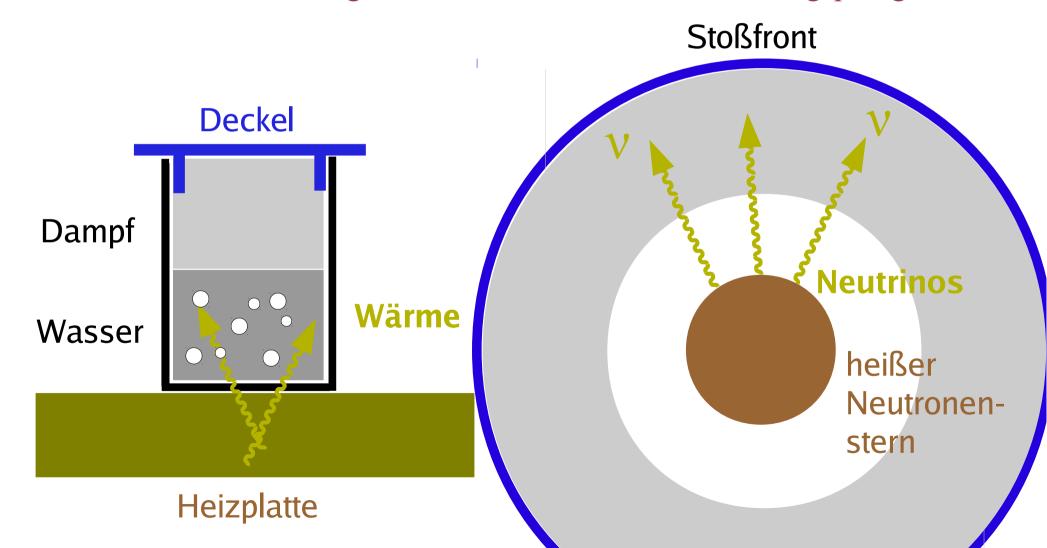






Das kleinste (und billigste) Supernovamodell-Experiment der Welt

Neutrinoheizen baut hinter der Stoßfront einen hohen Druck auf, der den Stoß und die umliegende Materie wie einen Deckel wegsprengt.



Ist diese Theorie richtig?

$$\frac{\partial\sqrt{\gamma}\rho W}{\partial t} + \frac{\partial\sqrt{-g}\rho W\hat{v}^{i}}{\partial x^{i}} = 0, \qquad (2.5)$$

$$\frac{\partial \sqrt{\gamma}\rho h W^{2}v_{j}}{\partial t} + \frac{\partial \sqrt{-g}\left(\rho h W^{2}v_{j}\hat{v}^{i} + \delta_{j}^{i}P\right)}{\partial x^{i}} = \frac{1}{2}\sqrt{-g}T^{\mu\nu}\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{j}} + \left(\frac{\partial\sqrt{\gamma}S_{j}}{\partial t}\right)_{C}, \qquad (2.6)$$

$$\frac{\partial\sqrt{\gamma}\tau}{\partial t} + \frac{\partial\sqrt{-g}\left(\tau\hat{v}^{i} + Pv^{i}\right)}{\partial x^{i}} = \alpha\sqrt{-g}\left(T^{\mu0}\frac{\partial\ln\alpha}{\partial x^{\mu}} - T^{\mu\nu}\Gamma_{\mu\nu}^{0}\right) + \left(\frac{\partial\sqrt{\gamma}\tau}{\partial t}\right)_{C}.$$

$$\frac{\partial\sqrt{\gamma}\rho W Y_{e}}{\partial t} + \frac{\partial\sqrt{-g}\rho W Y_{e}\hat{v}^{i}}{\partial x^{i}} = \left(\frac{\partial\sqrt{\gamma}\rho W Y_{e}}{\partial t}\right)_{C}, \qquad (2.8)$$

$$\frac{\partial\sqrt{\gamma}\rho W X_{k}}{\partial t} + \frac{\partial\sqrt{-g}\rho W X_{k}\hat{v}^{i}}{\partial x^{i}} = 0. \qquad (2.9)$$

Allgemeinrelativistische Modellgleichungen für Supernovae in 2D

AR Hydrodynamik

(Müller B., PhD Thesis (2009); Müller & THJ, ApJS, (2010))

$$\hat{\Delta}\Phi = -2\pi\phi^5 \left(E + \frac{K_{ij}K^{ij}}{16\pi}\right), \qquad (2.10)$$

$$\hat{\Delta}(\alpha\Phi) = 2\pi\alpha\phi^5 \left(E + 2S + \frac{7K_{ij}K^{ij}}{16\pi}\right), \qquad (2.11)$$

CFC Metrik- Gleichungen

$$\hat{\Delta}\beta^{i} = 16\pi\alpha\phi^{4}S^{i} + 2\phi^{10}K^{ij}\hat{\nabla}_{j}\left(\frac{\alpha}{\Phi^{6}}\right) - \frac{1}{3}\hat{\nabla}^{i}\hat{\nabla}_{j}\beta^{j}, \qquad (2.12)$$

$$\frac{\partial W\left(\hat{J}+v_{r}\hat{H}\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}\left[\left(W\frac{\alpha}{\phi^{2}} - \beta_{r}v_{r}\right)\hat{H} + \left(Wv_{r}\frac{\alpha}{\phi^{2}} - \beta_{r}\right)\hat{J}\right] - \qquad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon}\left\{W\varepsilon\hat{J}\left[\frac{1}{r}\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right) + 2\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right)\frac{\partial\ln\phi}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right] + W\varepsilon\hat{H}\left[v_{r}\left(\frac{\partial\beta_{r}\phi^{2}}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right) - \frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial\ln\alpha W}{\partial r} + \alpha W^{2}\left(\beta_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} - \frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] - \varepsilon\hat{K}\left[\frac{\beta_{r}W}{r} - \frac{\partial\beta_{r}W}{\partial r} + Wv_{r}r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\alpha}{r\phi^{2}}\right) + W^{3}\left(\frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} + v_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right]\right\} - W\hat{J}\left[\frac{1}{r}\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right) + 2\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right)\frac{\partial\ln\phi}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right] - W\hat{H}\left[v_{r}\left(\frac{\partial\beta_{r}\phi^{2}}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right) - \frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial\ln\alpha W}{\partial r} + \alpha W^{2}\left(\beta_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} - \frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] + \hat{K}\left[\frac{\beta_{r}W}{r} - \frac{\partial\beta_{r}W}{\partial r} + Wv_{r}r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\alpha}{r\phi^{2}}\right) + W^{3}\left(\frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} + v_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] = \alpha\hat{C}^{(0)},$$

$$\frac{\partial W\left(\hat{H}+v_{r}\hat{K}\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}\left[\left(W\frac{\alpha}{\phi^{2}} - \beta_{r}v_{r}\right)\hat{K} + \left(Wv_{r}\frac{\alpha}{\phi^{2}} - \beta_{r}\right)\hat{H}\right] - \qquad (2.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon}\left\{W\varepsilon\hat{H}\left[\frac{1}{r}\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right) + 2\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right)\frac{\partial\ln\phi}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right] + W\varepsilon\hat{K}\left[v_{r}\left(\frac{\partial\beta_{r}\phi^{2}}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right) - \frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial\ln\alpha W}{\partial r} + \alpha W^{2}\left(\beta_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} - \frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] - \varepsilon\hat{L}\left[\frac{\beta_{r}W}{r} - \frac{\partial\beta_{r}W}{\partial r} + Wv_{r}r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\alpha}{r\phi^{2}}\right) + W^{3}\left(\frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} + v_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right]\right\} + \left(\hat{J} - \hat{K}\right)\left[v_{r}\left(\frac{\beta_{r}}{r} - \frac{\partial\beta_{r}}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{W\alpha}{\phi^{2}}\right) - \frac{W\alpha}{r\phi^{2}} + W^{3}\left(\frac{\partial v_{r}}{\partial t} - \beta_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial r}\right)\right] + \left(\hat{H} - \hat{L}\right)\left[\frac{W^{3}\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} + \frac{\beta W}{r} - \frac{\partial\beta W}{\partial r} - Wv_{r}r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\alpha}{r\phi^{2}}\right) + \frac{\partial W}{\partial t}\right] - W\hat{H}\left[\frac{1}{r}\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right) + 2\left(\beta_{r} - \frac{\alpha v_{r}}{\phi^{2}}\right)\frac{\partial\ln\phi}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right] - W\hat{K}\left[v_{r}\left(\frac{\partial\beta_{r}\phi^{2}}{\partial r} - 2\frac{\partial\ln\phi}{\partial t}\right) - \frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial\ln\alpha W}{\partial r} + \alpha W^{2}\left(\beta_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} - \frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] + \hat{L}\left[\frac{\beta_{r}W}{r} - \frac{\partial\beta_{r}W}{\partial r} + Wv_{r}r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\alpha}{r\phi^{2}}\right) + W^{3}\left(\frac{\alpha}{\phi^{2}}\frac{\partial v_{r}}{\partial r} + v_{r}\frac{\partial v_{r}}{\partial t}\right)\right] = \alpha\hat{C}^{(1)}.$$

Neutrino Wechselwirkung in Supernovae

Beta-Prozesse:

Neutrino-Streuung:

Thermische Paar-Prozesse:

Neutrino-Neutrino-Reaktionen:

•
$$e^- + p \rightleftharpoons n + v_e$$

•
$$e^+ + n \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e$$

•
$$e^- + A \rightleftharpoons \nu_e + A^*$$

$$\bullet$$
 $\nu + n, p \rightleftharpoons \nu + n, p$

$$\bullet \quad \nu + A \rightleftharpoons \nu + A$$

•
$$v + e^{\pm} \rightleftharpoons v + e^{\pm}$$

•
$$N + N \rightleftharpoons N + N + \nu + \bar{\nu}$$

$$\bullet e^+ + e^- \rightleftharpoons \nu + \bar{\nu}$$

•
$$v_x + v_e, \bar{v}_e \rightleftharpoons v_x + v_e, \bar{v}_e$$

 $(v_x = v_\mu, \bar{v}_\mu, v_\tau, \text{ or } \bar{v}_\tau)$

•
$$v_e + \bar{v}_e \rightleftharpoons v_{\mu,\tau} + \bar{v}_{\mu,\tau}$$

Modellberechnungen mit Supercomputern sind unverzichtbar!

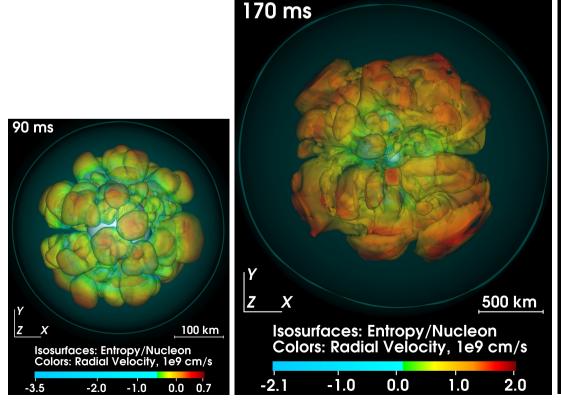
Werkzeuge der Theoretiker

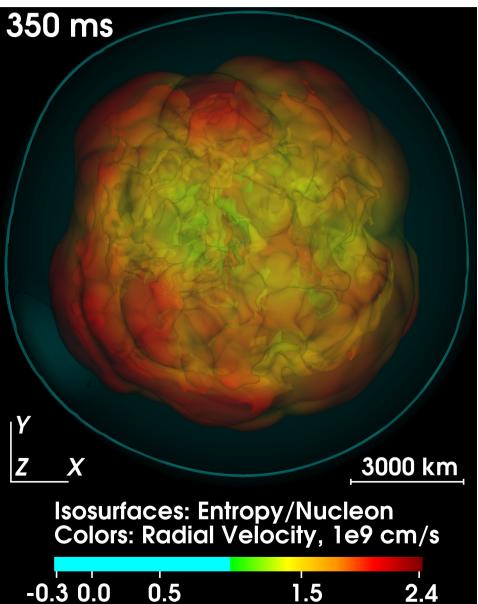


3D Computersimulation einer SN-Explosion

Stern mit 9.6 Sonnenmassen

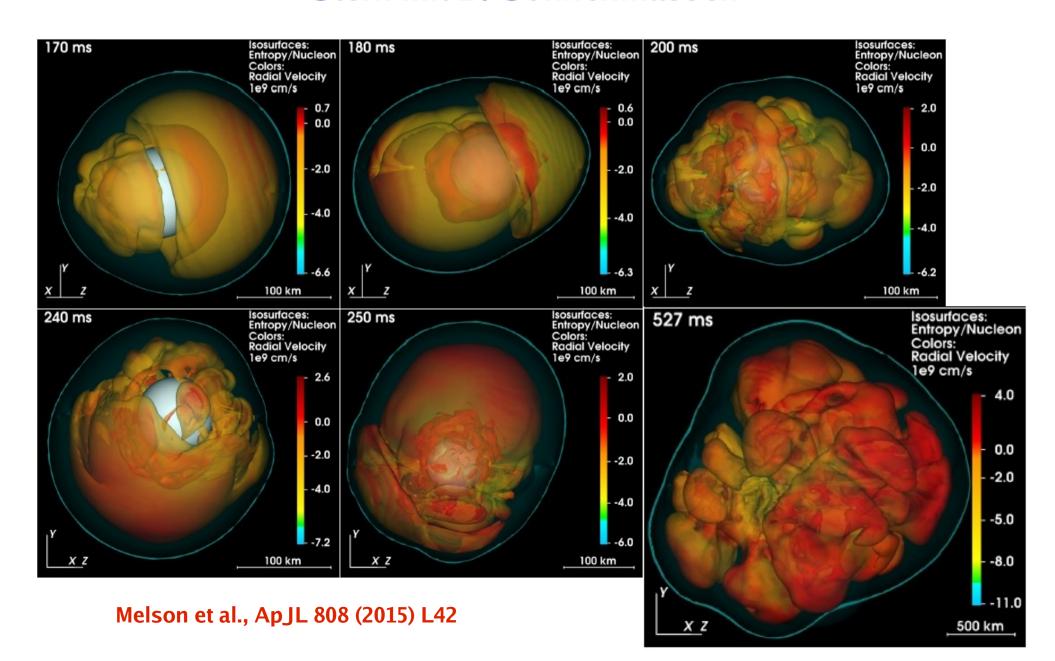
Melson et al., ApJL 801 (2015) L24

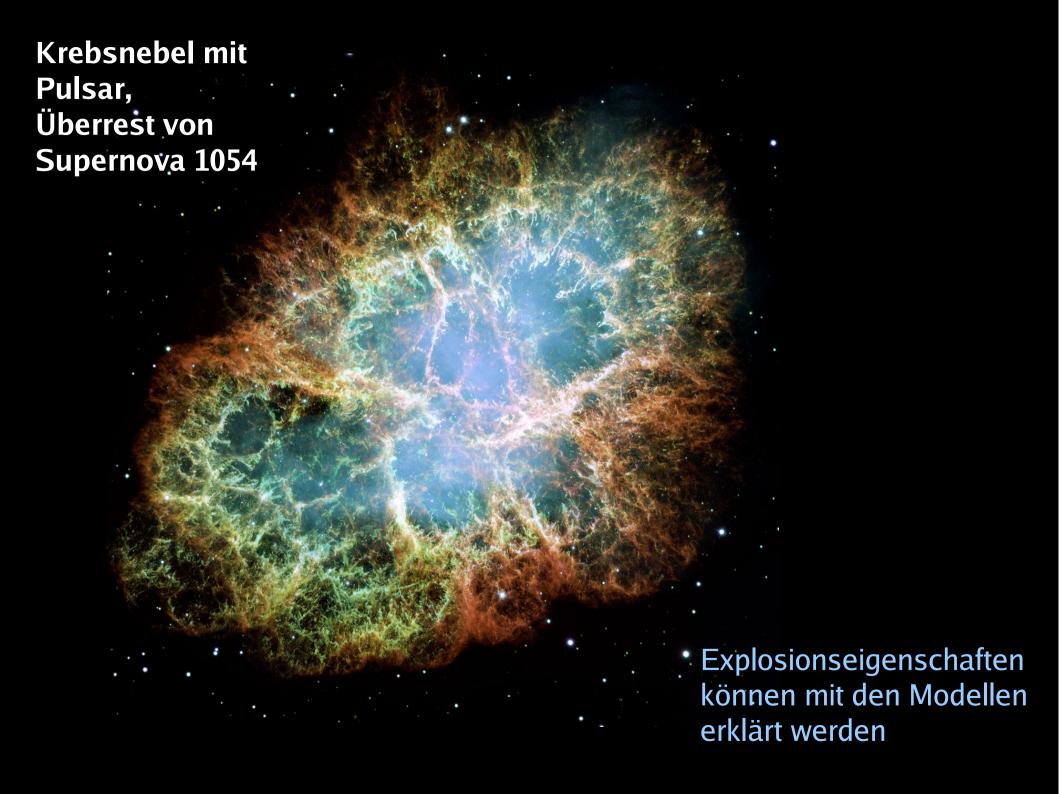




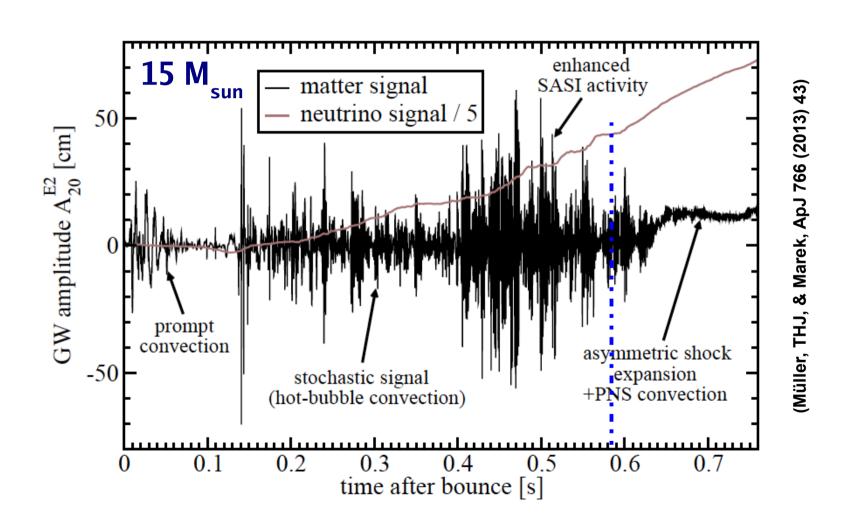
3D Computersimulation einer SN-Explosion

Stern mit 20 Sonnenmassen

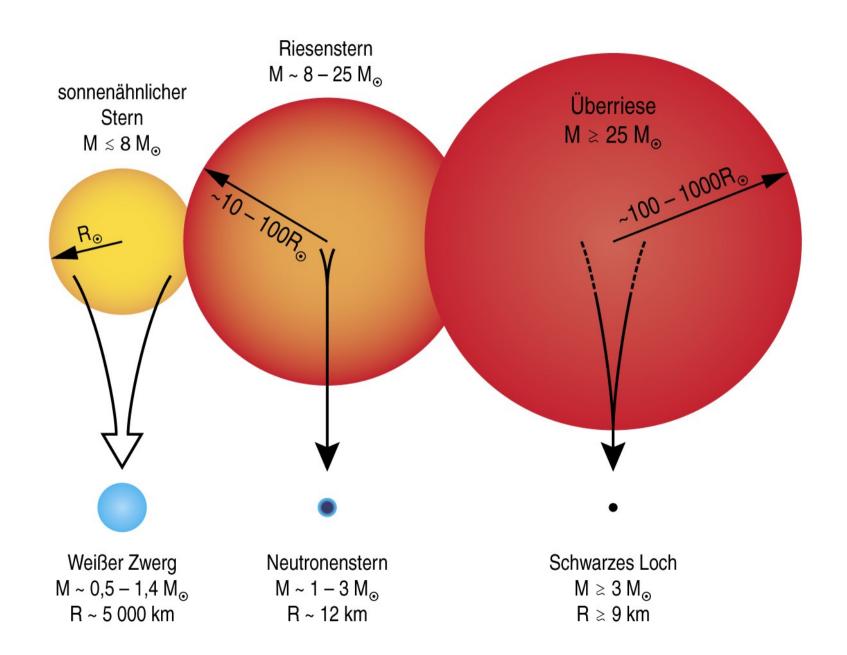




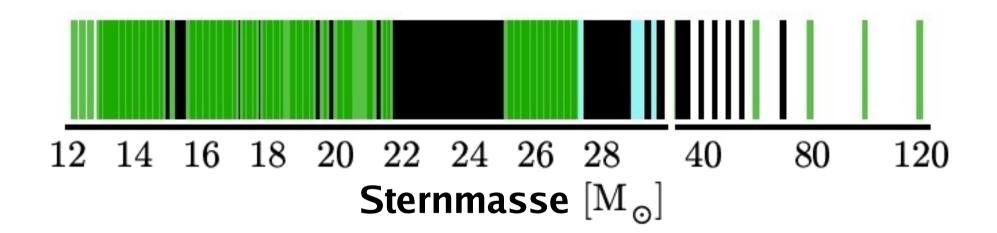
Gravitationswelle eines kollabierenden und explodierenden Sterns mit 15 Sonnenmassen



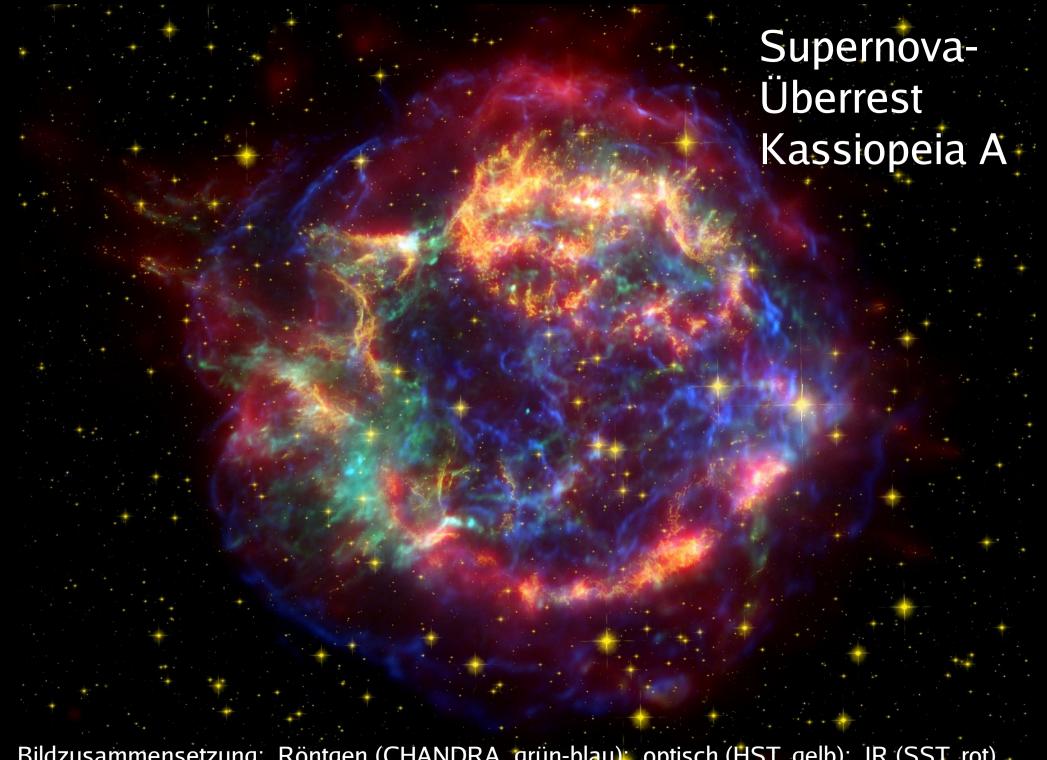
Endstadien massereicher Sterne



Neutronensterne und Schwarze Löcher

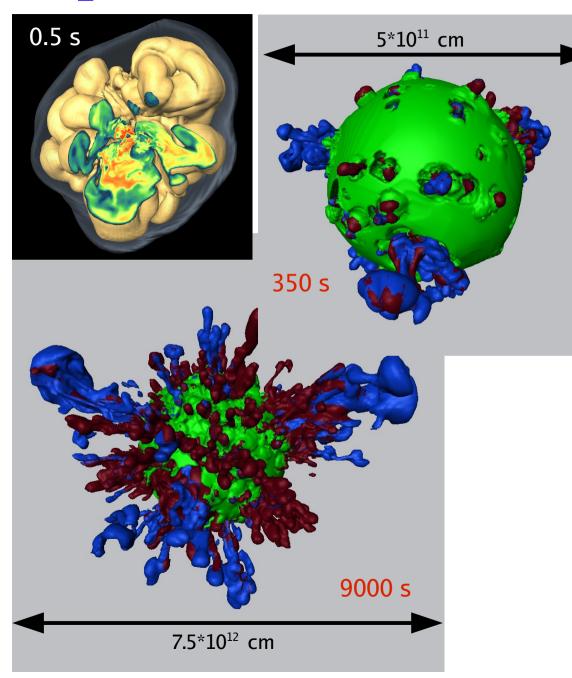


(Ugliano, THJ, Marek & Arcones 2012; Sukhbold, Ertl, Woosley, Brown, THJ, ApJ, submittiert)



Bildzusammensetzung: Röntgen (CHANDRA, grün-blau); optisch (HST, gelb); IR (SST, rot)

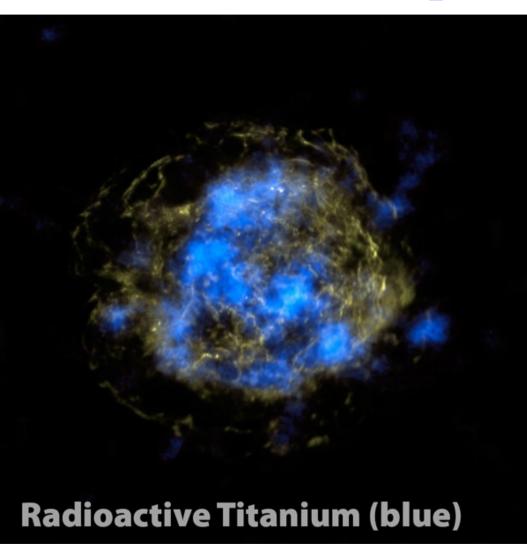
Explosion einer Kernkollaps-Supernova

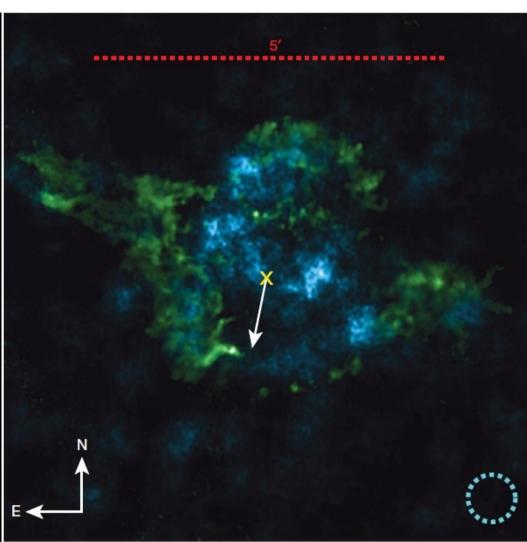


Grün: Kohlenstoff Rot: Sauerstoff Blau: Nickel/Eisen

(Hammer, Janka, Müller, ApJ 2010)

⁴⁴Titan Asymmetrie im Cassiopeia A Überrest

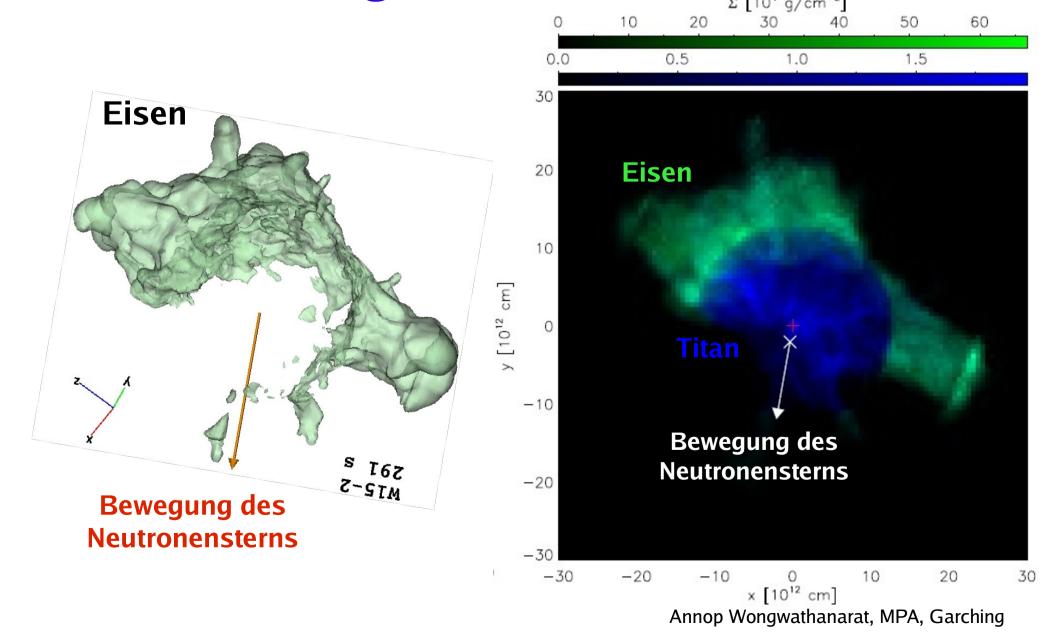




Grefenstette et al., Nature 506 (2014) 340

NuSTAR Beobachtung

Neutronsternbeschleunigung und Verteilung von Eisen und 44 Titan



Hans-Thomas Janka

Supernovae und kosmische Gammablitze

Ursachen und Folgen von Sternexplosionen

