

J. Wirths Aktuelle Astronomie

J. Wirths Aktuelle Astronomie

Montagsvortrag: „Neutronensterne – kompakte Reste stellarer Explosionen“

Themen

1. **Geschichtliches**
2. **Sternentwicklung und die Entstehung von Neutronensternen**
3. **Der Aufbau von Neutronensternen**
4. **Beobachtung von Neutronensternen**
5. **Supernovae und die Supernova SN 1987A**
6. **Das Ereignis GW 170817 / GRB 170817a**
7. **Pulsare**

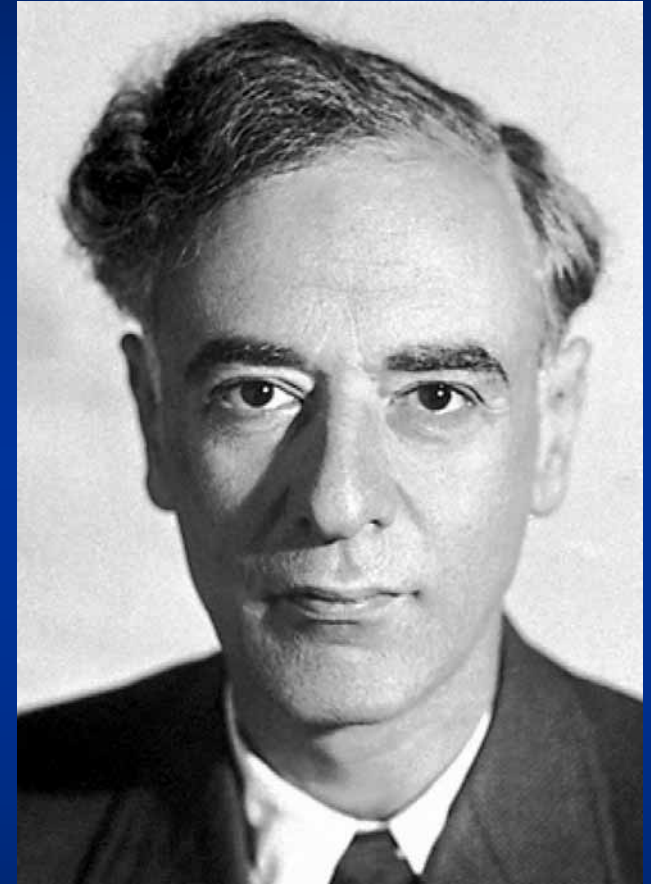
Neutronensterne

1. Geschichtliches



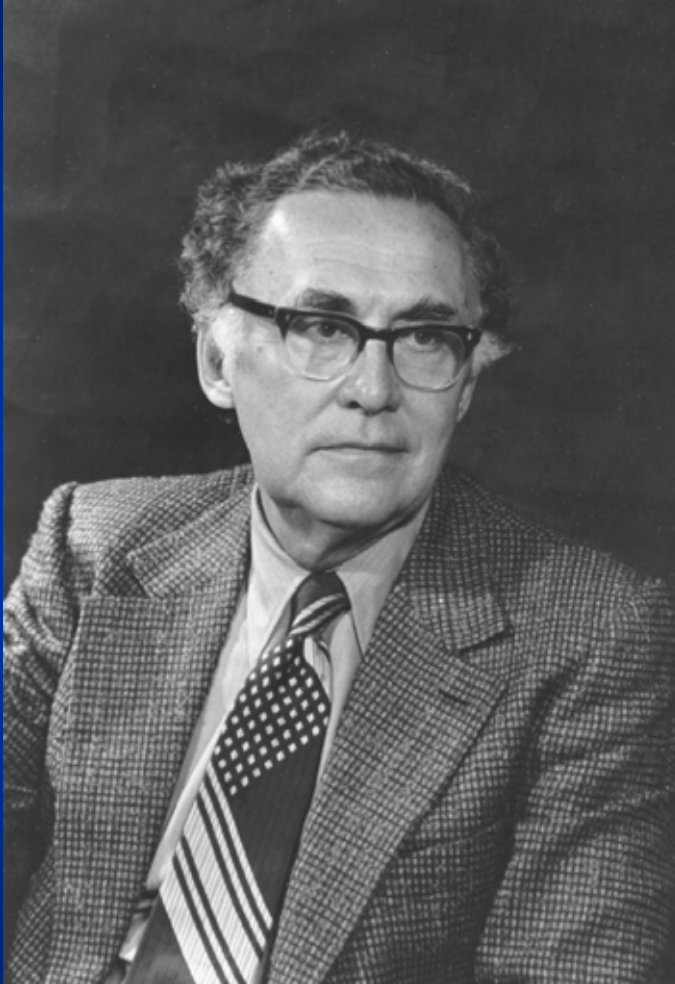
1932 - James Chadwick entdeckt das Neutron und erhält dafür 1935 den Nobelpreis für Physik

Bereits da hält Lew Landau (Лев Давидович Ландау) die Existenz von Neutronensternen für möglich. 1962 Nobelpreis für Arbeiten zur Theorie kondensierter Materie.

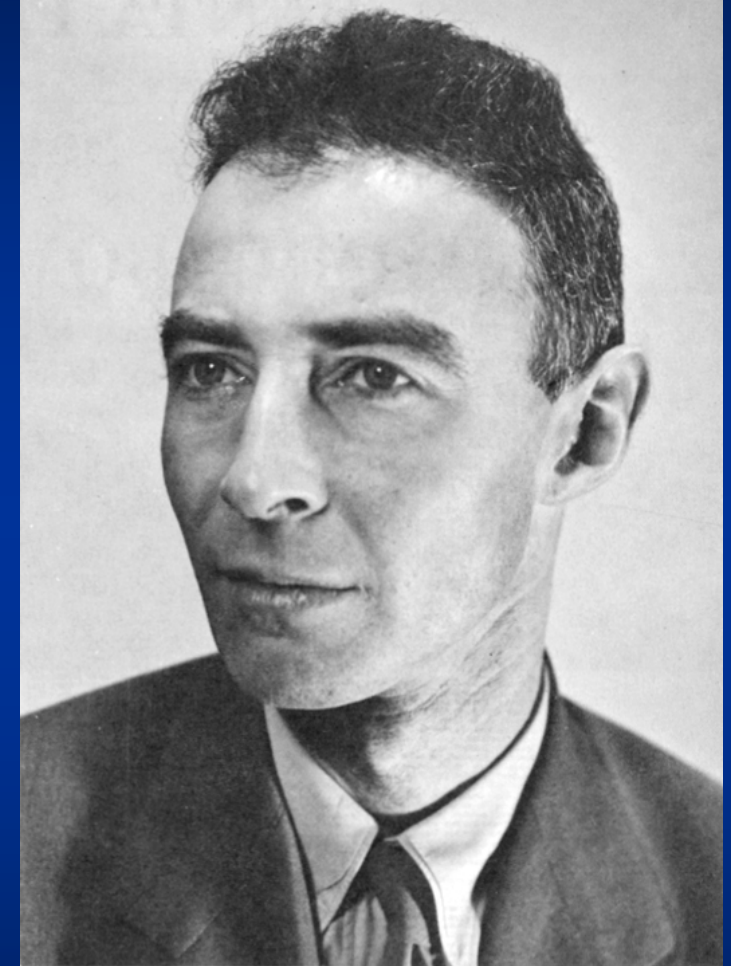


Neutronensterne

1. Geschichtliches



(Atomic Heritage Foundation)



(1944 - DOE)

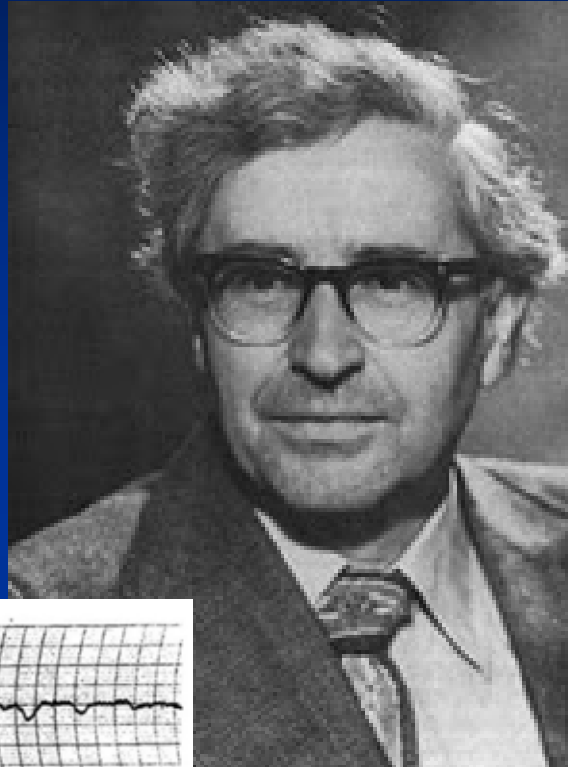
1939 berechnen J. Robert Oppenheimer (r.) und sein Schüler George Michael Volkoff (l.) ein theoretisches Modell eines Neutronensterns mit der maximalen Masse von $0.7 M_{\odot}$. (Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze).

Neutronensterne

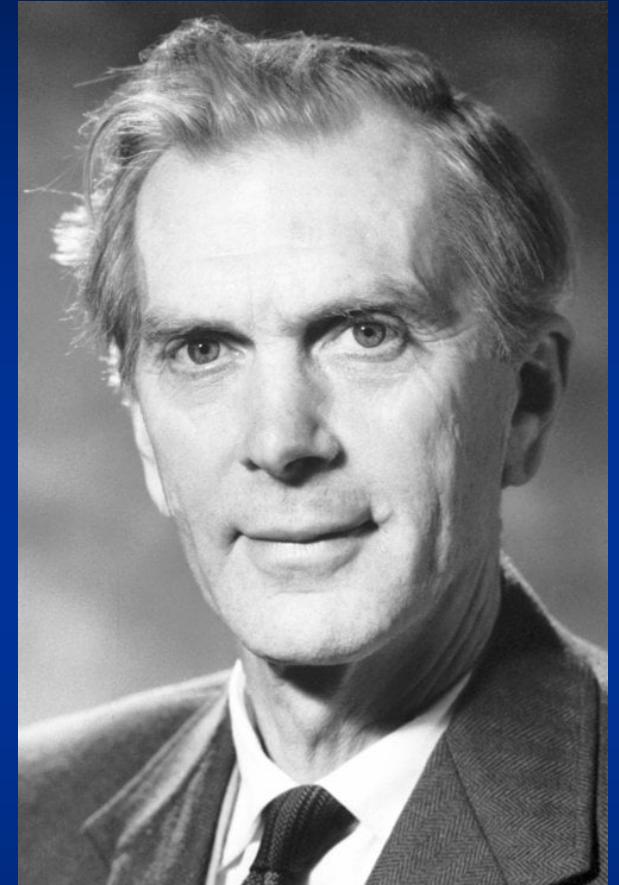
1. Geschichtliches



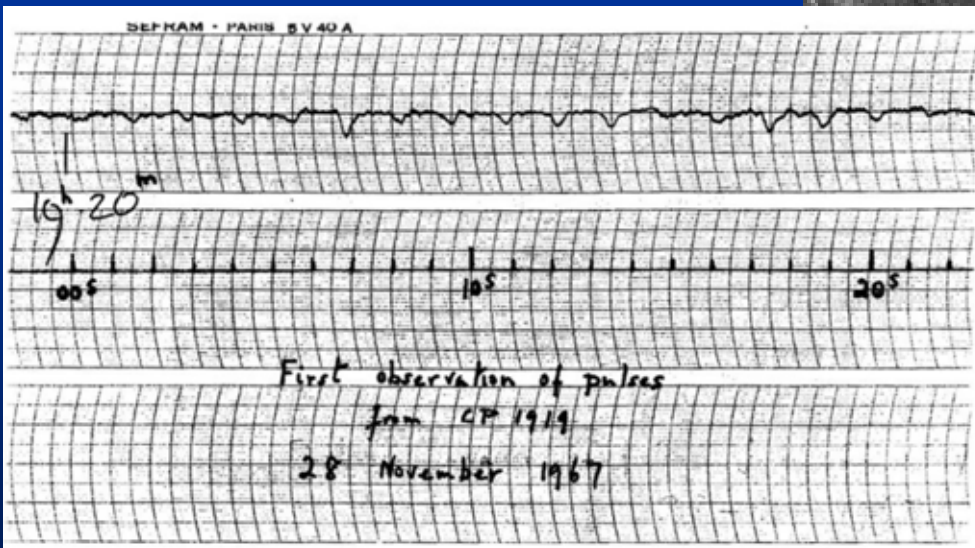
(Jocelyn Bell-Burnell)



(Anthony Hewish)



(Martin Ryle)



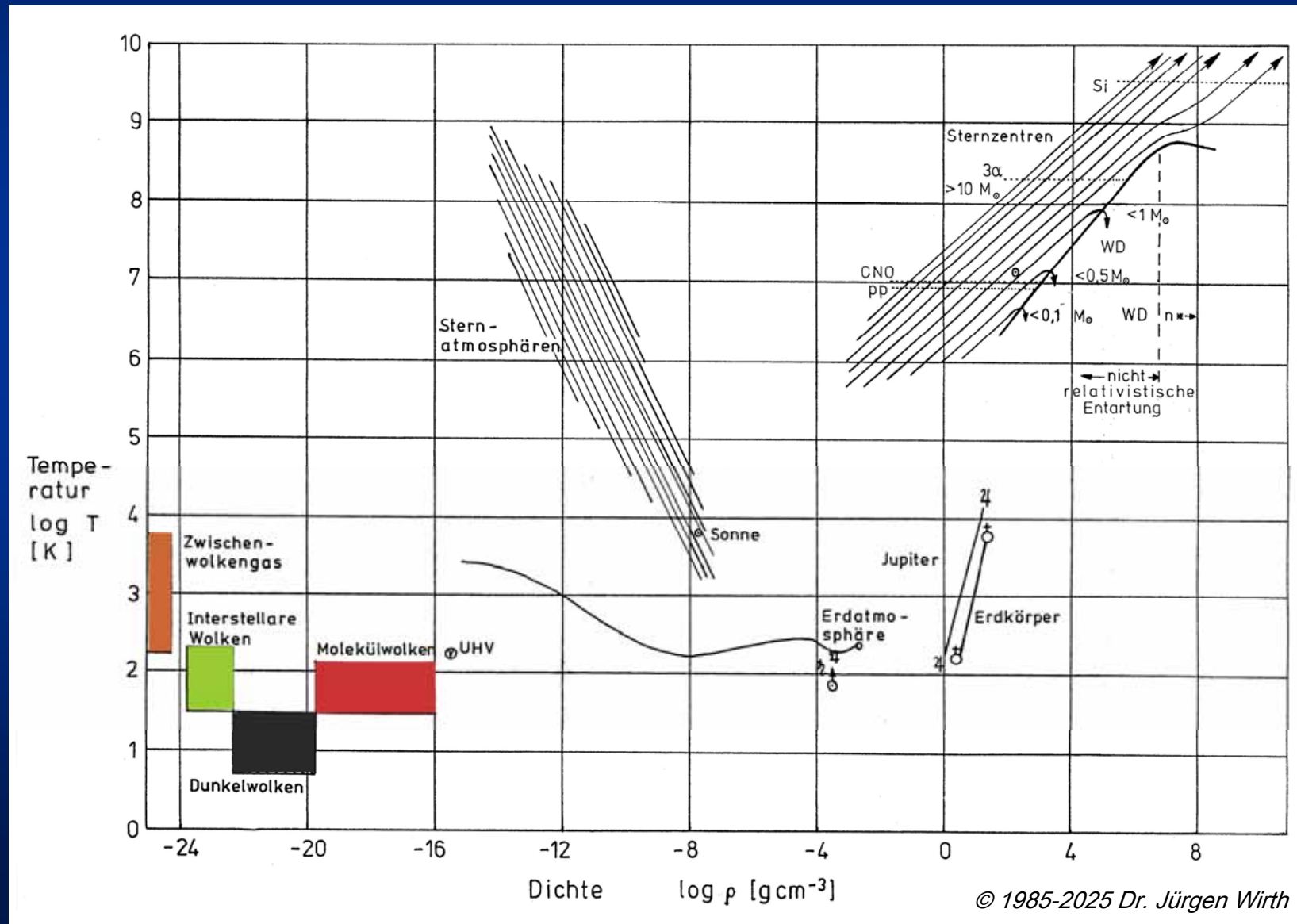
1967 Nov. 28 entdecken Jocelyn Bell, Anthony Hewish und Martin

Ryle die Radiosignale des ersten bekannten Pulsars. Die beiden letzten erhalten 1974 den Nobelpreis. Heute sind ca. 2000 bekannt.

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

Sterne entstehen aus kalter, dichter interstellarer Materie.



Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



**Dunkelwolken als
Orte der Sternentstehung:**

IC434 Pferdekopfnebel

*(T. Rector und Hubble-Team,
WIYN Observatory Kitt Peak,
Arizona)*

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



IC434 Pferdekopfnebel

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

Horsehead Nebula in Infrared



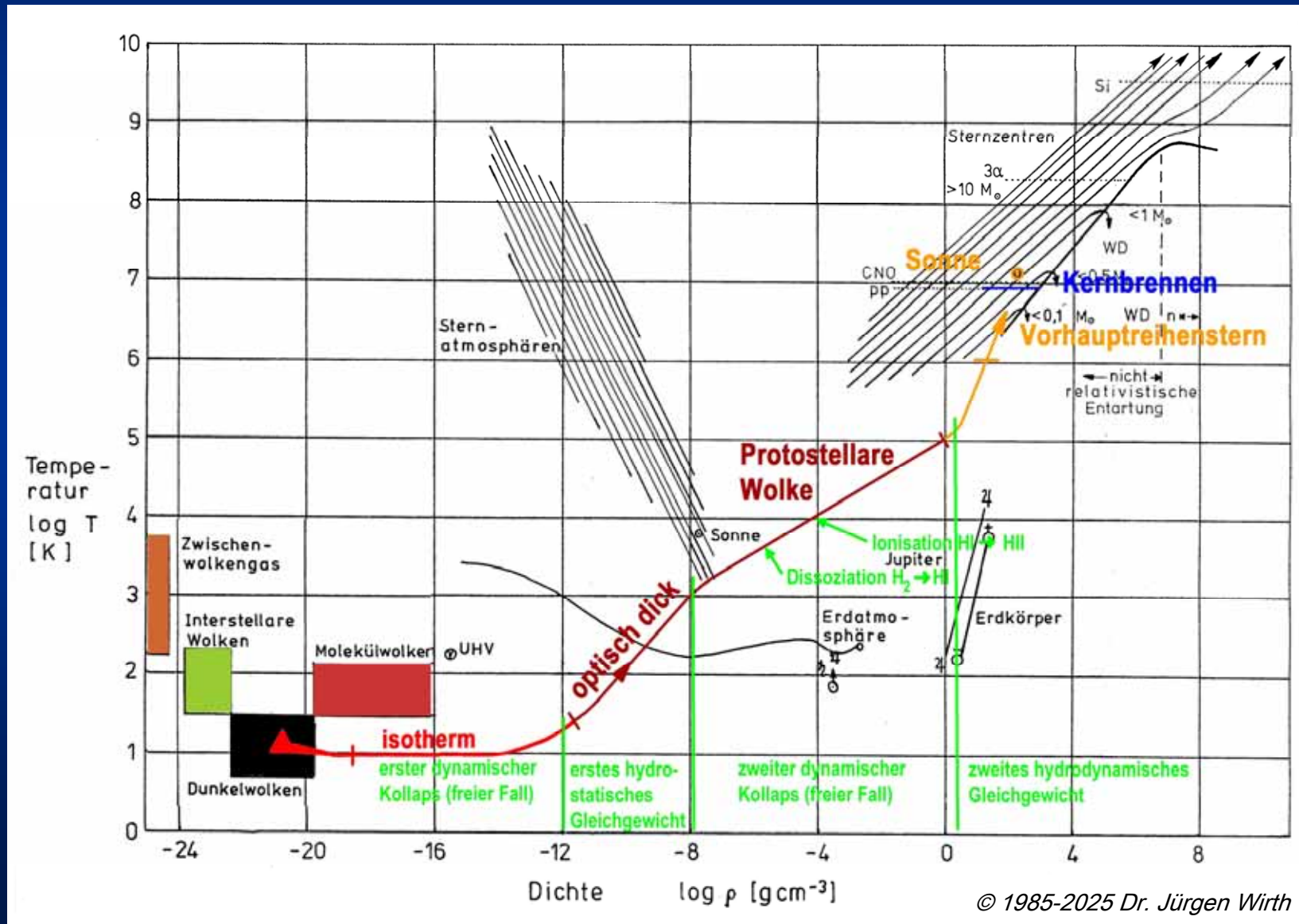
Hubble
Heritage

NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
HST WFC3/IR • STScI-PRC13-12a

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

Der Entwicklungsweg vom interstellaren Gas zum Stern



Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

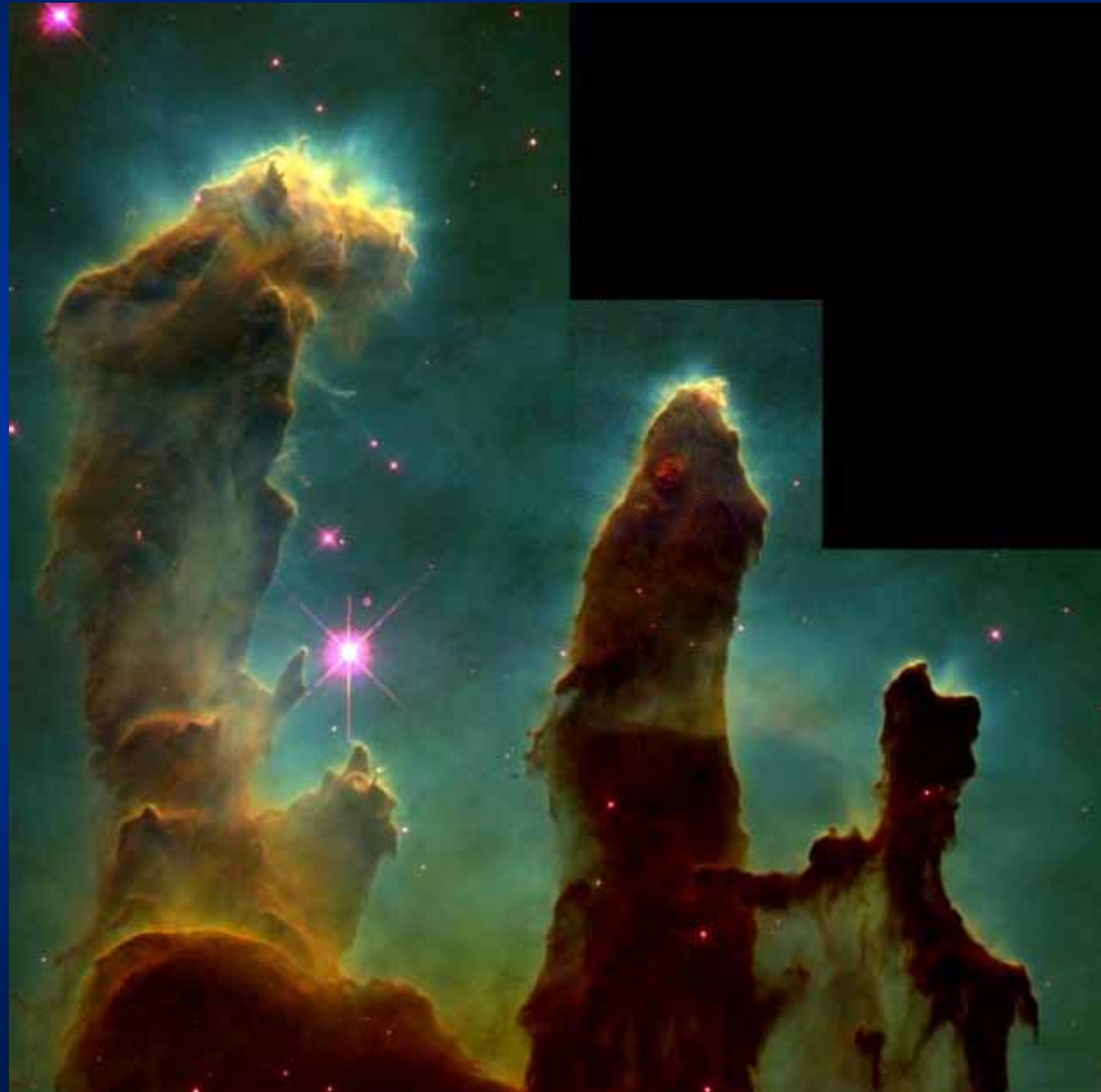


M 16 Adler-Nebel

(Palomar Observatory 60-inch telescope, Paul Scowen, Arizona State Univ.)

Neutronensterne

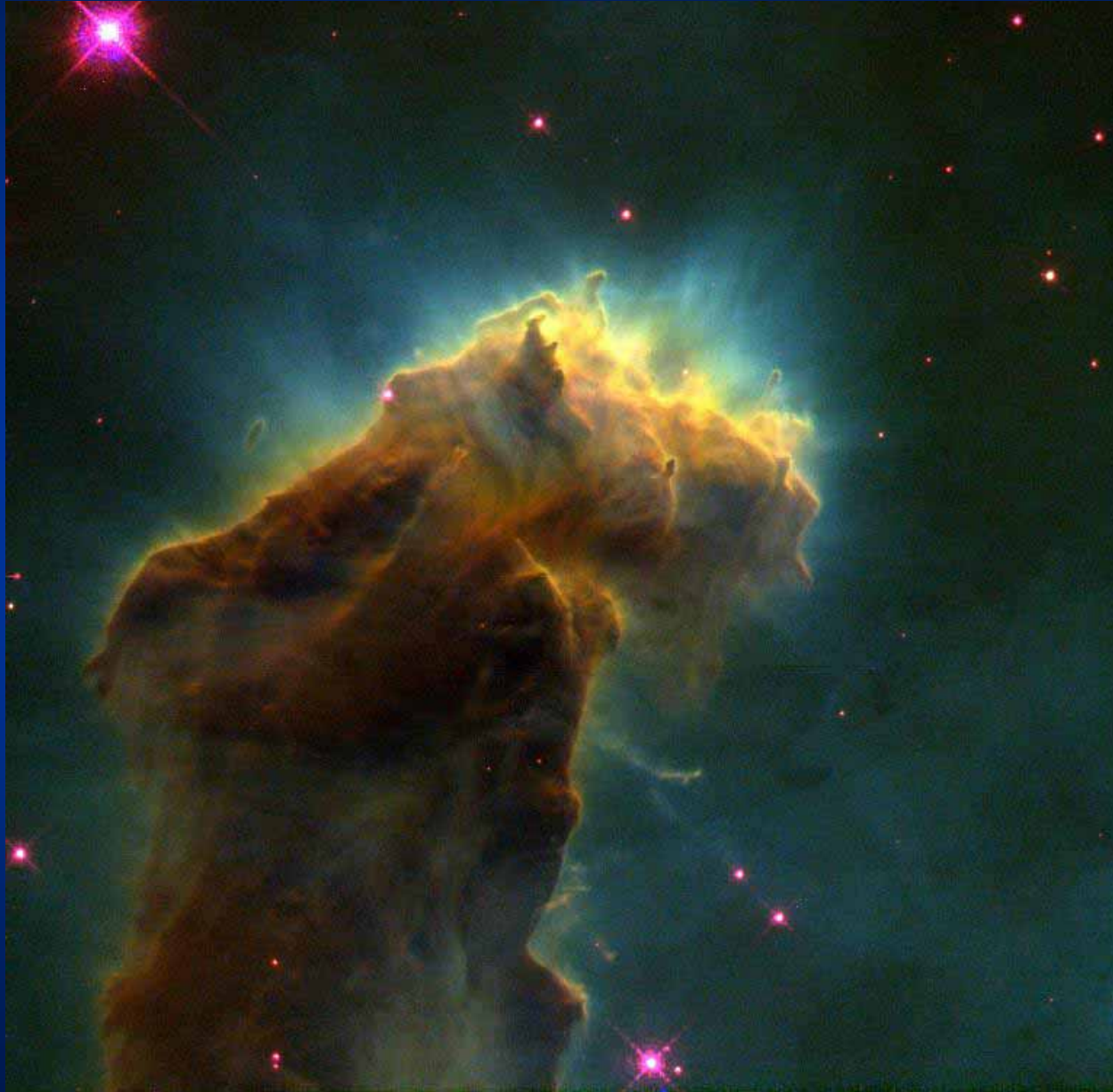
2. Sternentwicklung und die Entstehung



M 16 Adler-Nebel (*Hubble Space Telescope*)

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



M 16 Adler-Nebel (*Hubble Space Telescope*)

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

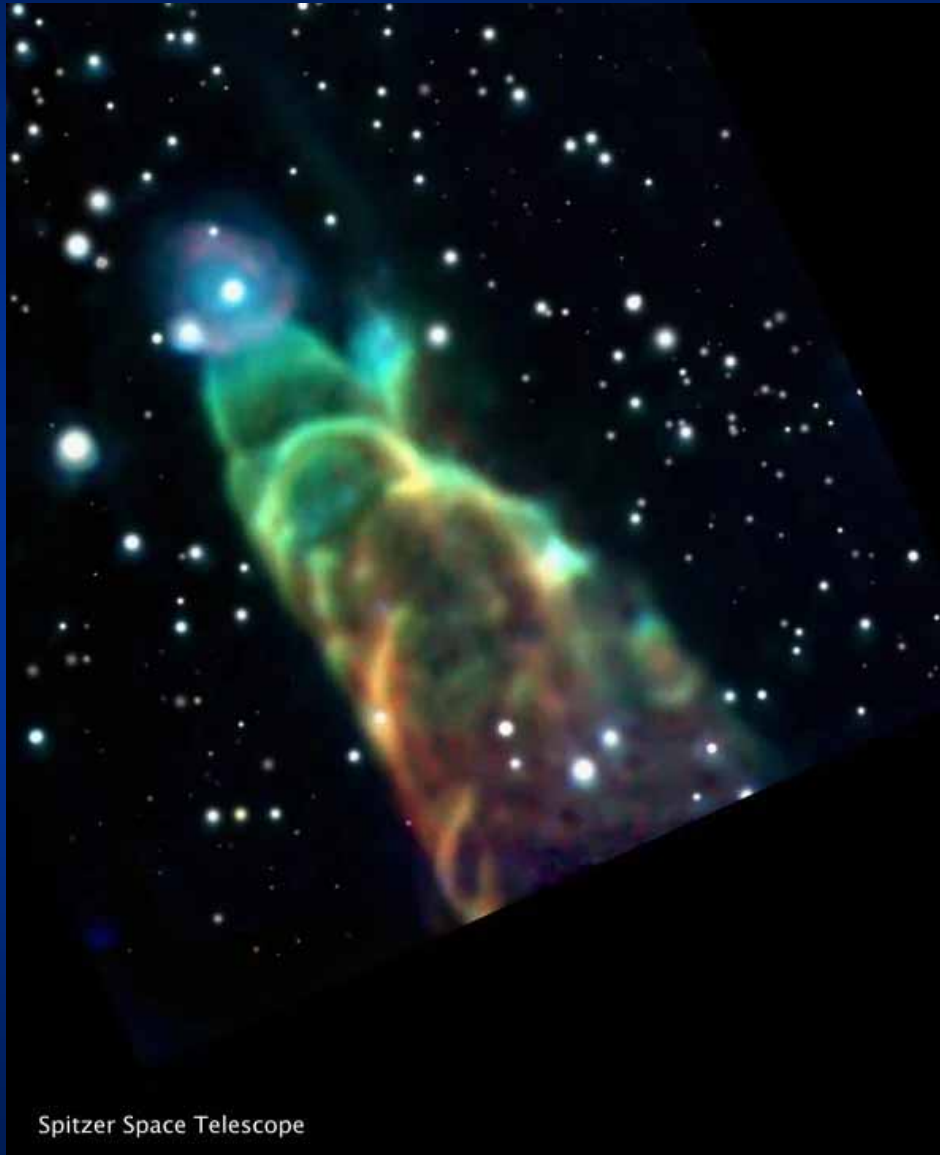


„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025

Bugwelle bei LL Orionis im Orion-Nebel M42 (*Hubble Space Telescope*)₂₇

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025

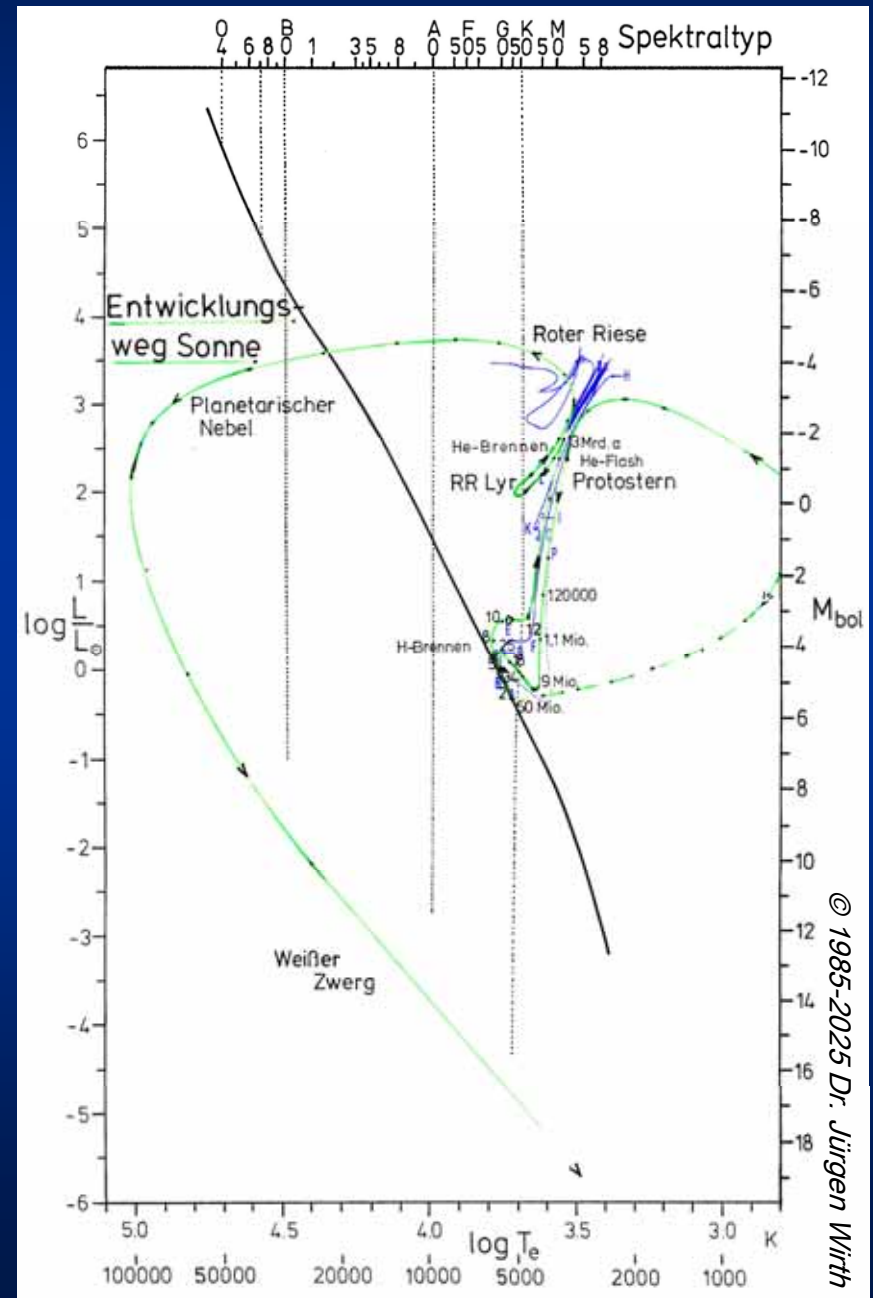
Herbig-Haro HH49/50 im NIR/MIR (*Spitzer ST / JWST*)

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

Der Entwicklungsweg der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Auf dem Weg zum Planetarischen Nebel (PN) verlieren die Roten Riesen durch den Abstoß ihrer äußeren Hülle bis zu 90 % ihrer Masse.



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025

© 1985-2025 Dr. Jürgen Wirth

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



Planetarischer Nebel (PN): M57/NGC6720 Ringnebel in der Leier (*HST*)
mit dem Weißen Zwerg WD1851+329 im Zentrum

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025

PN: NGC6543 Katzenaugennebel (Cats Eye) im Vis und XR (*HST+CXO*)

Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung

Die Masseabhängigkeit der Nach-Hauptreihen-Entwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm (M/M_{\odot}) :

- 0-0.012 ($13 M_{\text{Jup}}$) Planeten
- 0.012-0.075 ($80 M_{\text{Jup}}$) Braune Zwerge (Sterne ohne Kernbrennen)
- 0.075-2.5 He-WD (Weiße Zwerge) mit PN [in Doppelsternsystemen]
- 2.5-8 CO-WD mit PN
- 8-10 ONeMg-WD mit PN
- 8-12 Neutronensterne ($1.25 M_{\odot}$) [in wechselwirkenden Doppelsterns.]
- 12-40 Neutronensterne ($1.3-2.7/3.0 M_{\odot}$) [Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze]
- >40 BH (Schwarze Löcher) ($>3 M_{\odot}$)

Neutronensterne

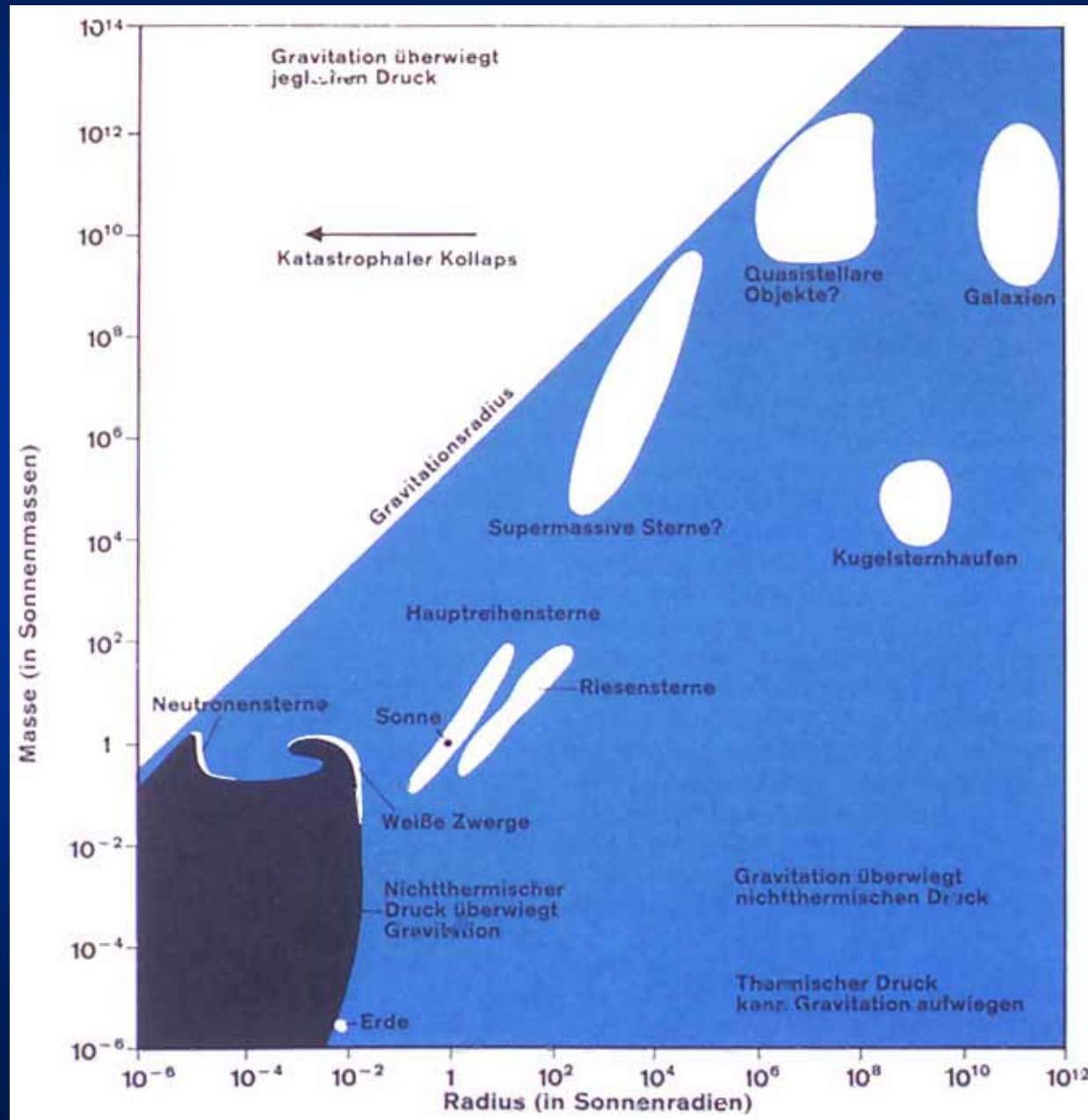
2. Sternentwicklung und die Entstehung

Die Masseabhängigkeit der Nach-Hauptreihen-Entwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm (M/M_{\odot}), zusammengefasst:

Anfangsmasse / M_{\odot}		Anfangsmasse / M_J	voraussichtliches Endstadium
< 0.00475	< 1/210	< 5	Planet
0.00475 ... 0.012	1/210 ... 1/80	5 ... 13	?
0.012 ... 0.075	1/80 ... 1/13	13 ... 80	Brauner Zwerg
0.075 ... 0.25	1/13 ... 1/4		Planetarischer Nebel \rightsquigarrow Weißer Zwerg (He)
0.25 ... 8			Planetarischer Nebel \rightsquigarrow Weißer Zwerg (C - O)
8 ... 12			Planetarischer Nebel \rightsquigarrow Weißer Zwerg (O - Ne - Mg)
12 ... 40			Supernova \rightsquigarrow Neutronenstern
40 ... 80			Supernova \rightsquigarrow Schwarzes Loch
80 ... 120			Supernova \rightsquigarrow Schwarzes Loch

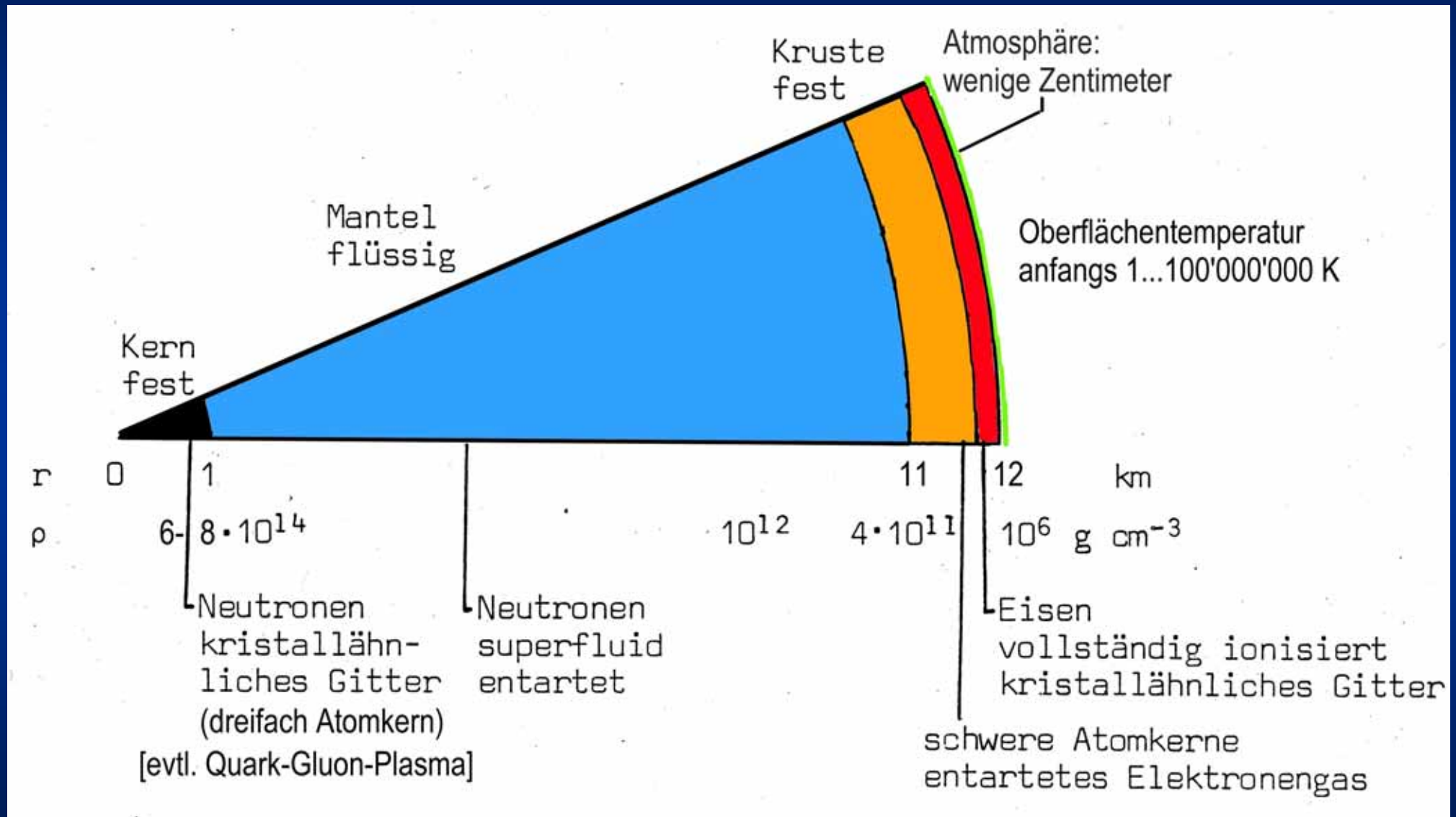
Neutronensterne

2. Sternentwicklung und die Entstehung



Neutronensterne

3. Der Aufbau von Neutronensternen



Die Gesamtzahl der Neutronen beträgt $\sim 10^{57}$ n.

Ein Fingerhut voll wiegt eine Milliarde Tonnen.

Neutronensterne

3. Der Aufbau von Neutronensternen

Die Atmosphäre eines Neutronensterns besteht aus Kohlenstoff-Staub (Ruß) aus der Schale des Progenitor-Sterns oder aus der Schicht direkt unter der Oberfläche des Neutronensterns, wo bei Temperaturen von anfangs mehr als 100 Millionen Kelvin noch Kernfusion stattfinden kann. Erst wenn diese mit sinkender Temperatur abklingt, entsteht eine Atmosphäre aus Helium und Wasserstoff, die der Neutronenstern nach und nach aus der Umgebung aufammelt.

Neutronensterne

3. Der Aufbau von Neutronensternen

Bei Weißen Zwergen und Neutronensternen liegt entartete Materie vor.

Entartung

- ⇒ Gasdruck wird temperatur-unabhängig: $p = 0.19 \frac{h^2}{m_F} n^{\frac{5}{3}} = c_F n^{\frac{5}{3}}$
- mit $c_F = 9.35 \cdot 10^{-38}$ (Elektronen); $5.08 \cdot 10^{-41}$ (Neutronen)
- ⇒ keine weitere Kontraktion
- ⇒ Entartungsgrenze ist massenabhängig
 - ↳ Entartung erst des Elektronengases (→ Weiße Zwerge)
 - ↳ bei höheren Massen / Temperaturen / Dichten:
Entartung des Neutronengases (→ Neutronensterne)
- ⇒ Aufhebung der Entartung möglich bei Massenzunahme von außen
 - ↳ Überschreiten der Chandrasekhar-Masse ($1.457 M_{\odot}$)
 - ↳ Zünden eines Kernprozesses
 - ↳ keine Druckerhöhung, keine Ausdehnung
 - ↳ dadurch vollständige Umwandlung in Temperatur
 - ↳ Aufhebung der Entartung, wenn $E_{\text{thermisch}} > E_{\text{fermi}}$
 - ↳ plötzlich einsetzende Expansion / Explosion
 - ↳ Supernovae Typ SN Ia

Neutronensterne

4. Beobachtung von Neutronensternen

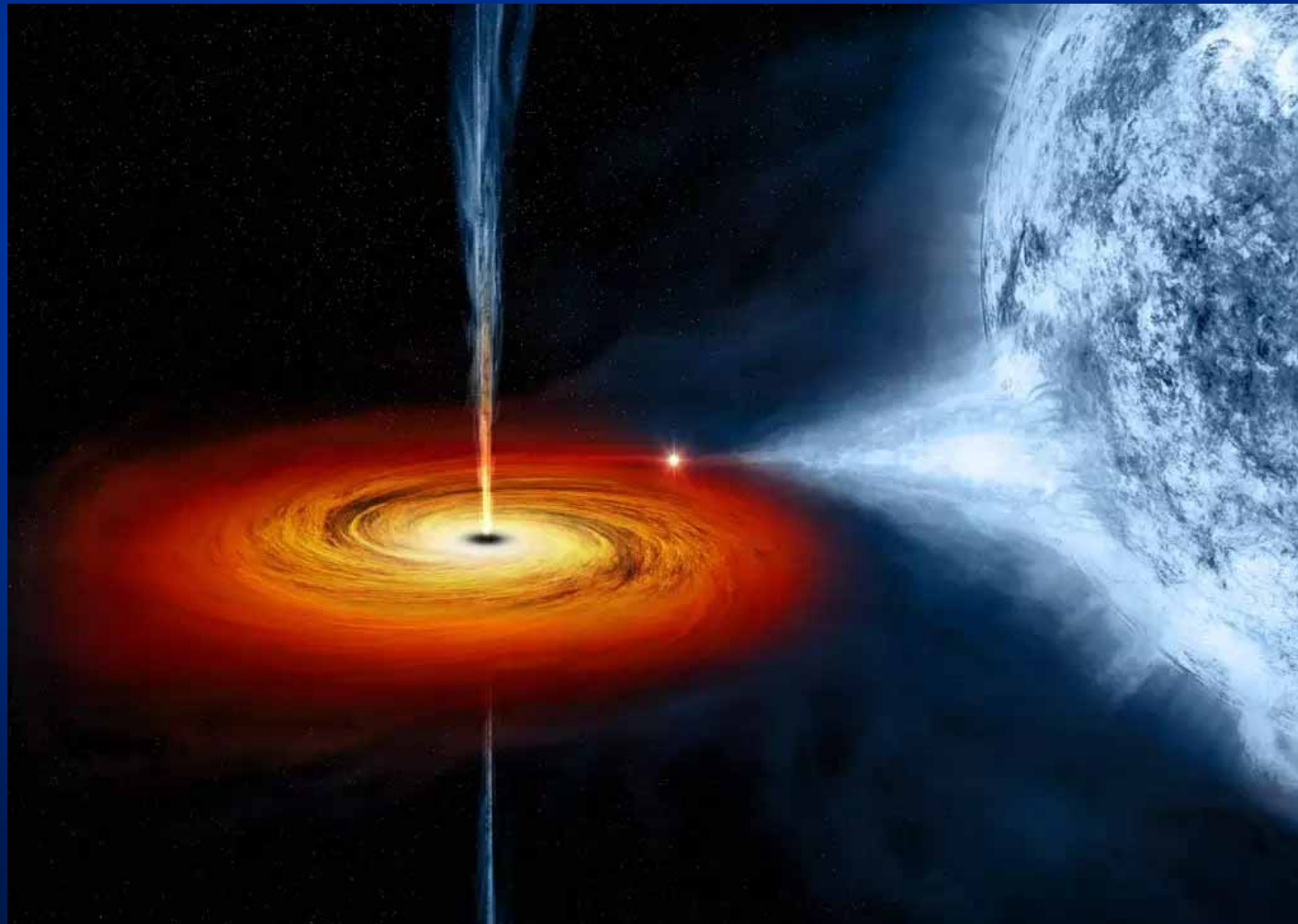
Neutronensterne können nicht wie andere Sterne in einem thermischen Spektrum direkt beobachtet werden.

In bestimmten Fällen kann die Röntgenstrahlung der anfangs extrem heißen Oberfläche (bis zu 100 Mio. K) beobachtet werden.

Neutronensterne

4. Beobachtung von Neutronensternen

Die Beobachtungsmöglichkeiten beschränken sich auf indirekte Beobachtungen in Doppelsternsystemen mit Wechselwirkung der beiden Komponenten und die Beobachtung von Pulsaren.



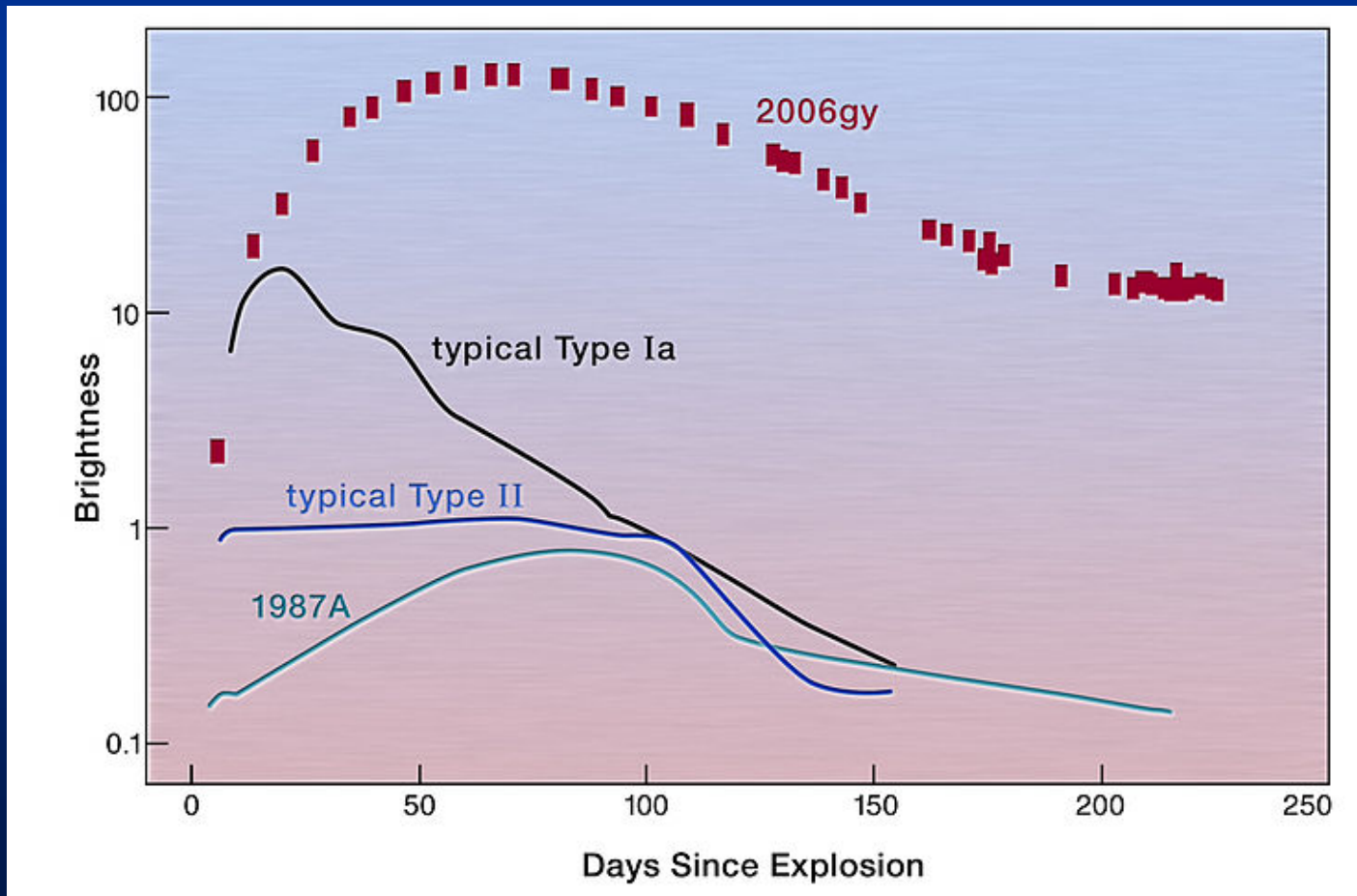
(NASA/CXC/M. Weiss)

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Der Übergang von einem Roten Riesen mit Massenabstoss und Bildung eines Planetarischen Nebels zu einem Neutronenstern erfolgt im Rahmen einer Supernova-Explosion vom Typ II. MW: 3/100 a

„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025



Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Supernova-Typen:

SN Ia Thermonukleare Explosion eines Weißen Zwergs in einem kataklysmischen System nach Massenüberströmen und Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze ($1.457 M_{\odot}$)

SN Ib Vor der Explosion Abstoßung einer Wasserstoffhülle

SN Ic wie SN Ib, aber mit Abstoßung einer Heliumhülle

SN II Kernkollaps- oder hydrodynamische Supernovae mit dominanten Wasserstofflinien

SN IIb wie SN II, aber Heliumlinien dominieren

SN IIL Licht geht nach Maximum linear zurück

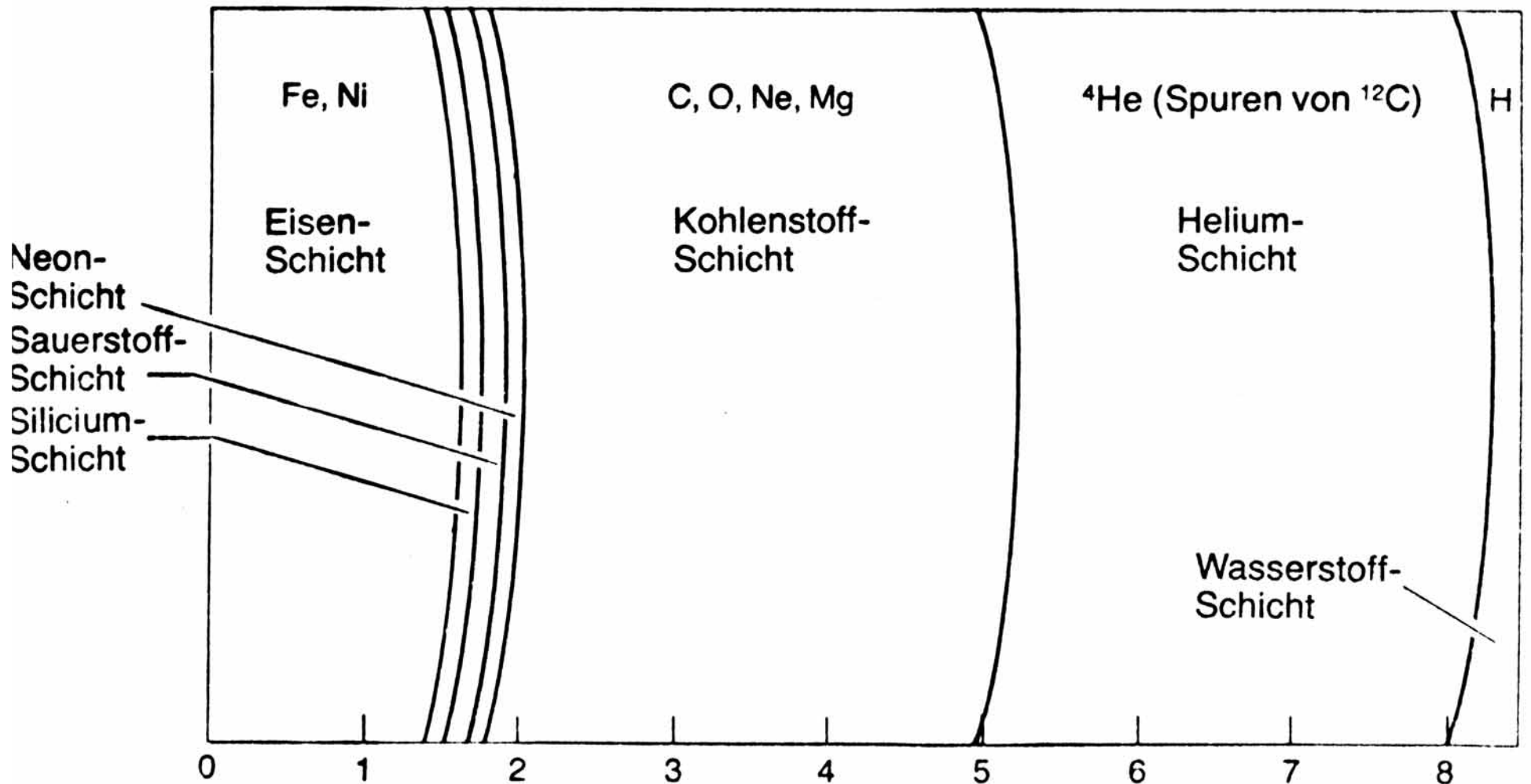
SN IIP Licht bleibt nach Maximum zunächst hoch

Hypernovae Extrem massereiche Ausgangsterne $> 100 M_{\odot}$
Kerntemperaturen von $> 10^{10}$ K, Quelle der GRB's

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

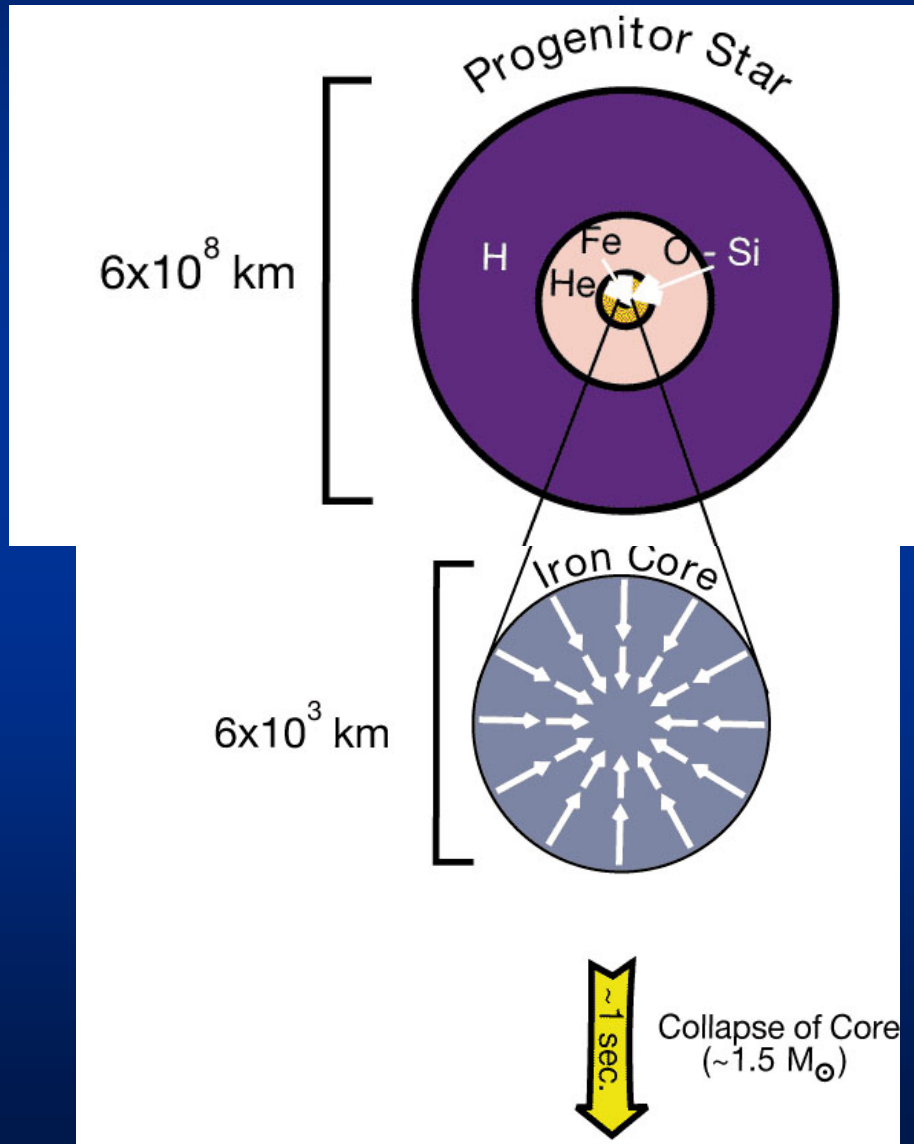
SN II: Prae-Supernova-Aufbau



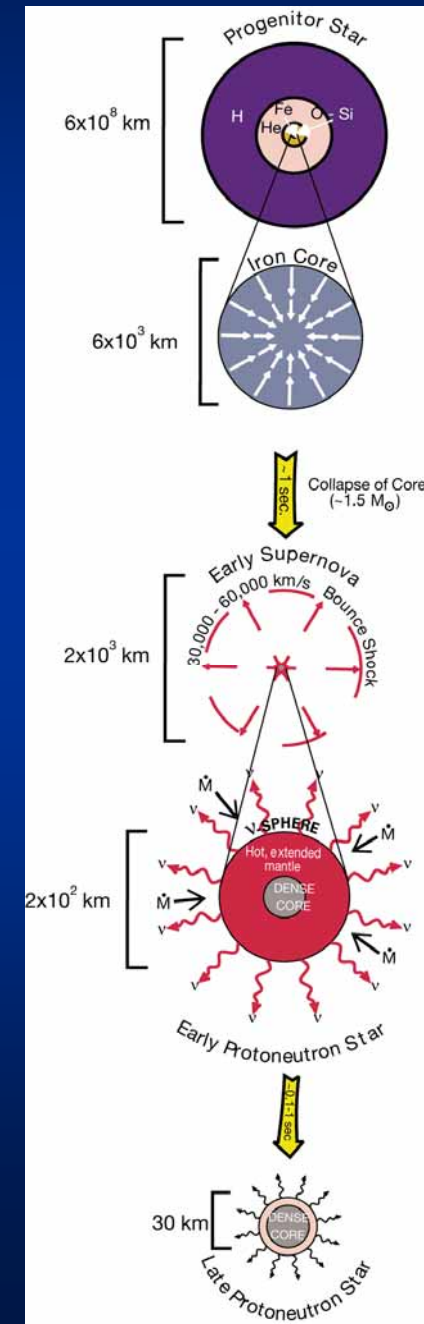
Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf



Kernkollaps



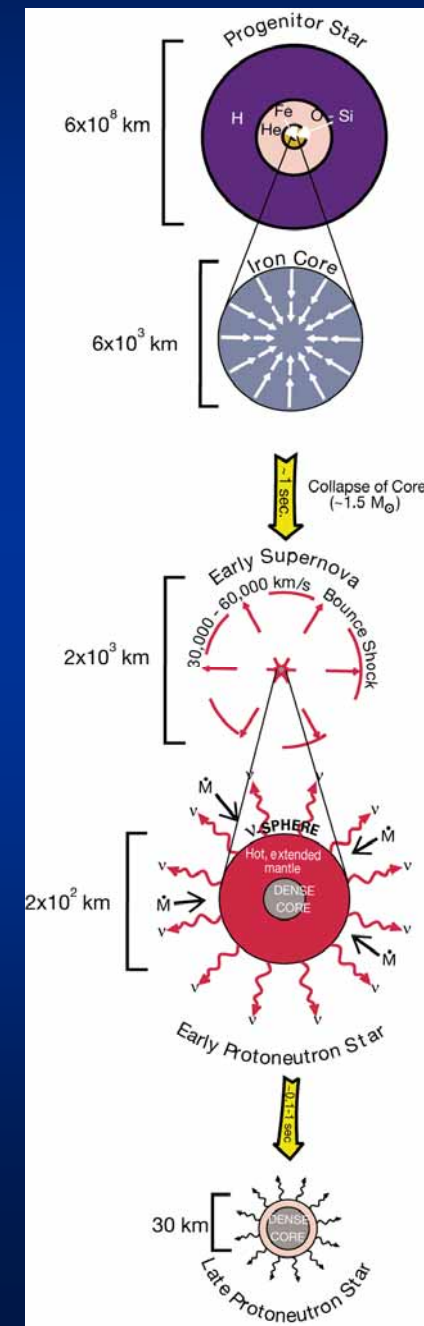
Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf

Durch das Siliziumbrennen und den anschließenden Kernkollaps durch die Gravitation steigen die Temperaturen im Zentralbereich auf $>3 \cdot 10^9$ K sehr stark an. Die nunmehr instabilen Atome werden durch harte Photonen in Nukleonen dissoziiert, und im inversen Betazerfall, bei dem die Protonen p in den Eisenkernen sich mit den Elektronen e vereinigen, entstehen neben den Neutronen n ebenso viele Neutrinos ν_e ($\sim 10^{57}$). Ein Neutronenstern entsteht.

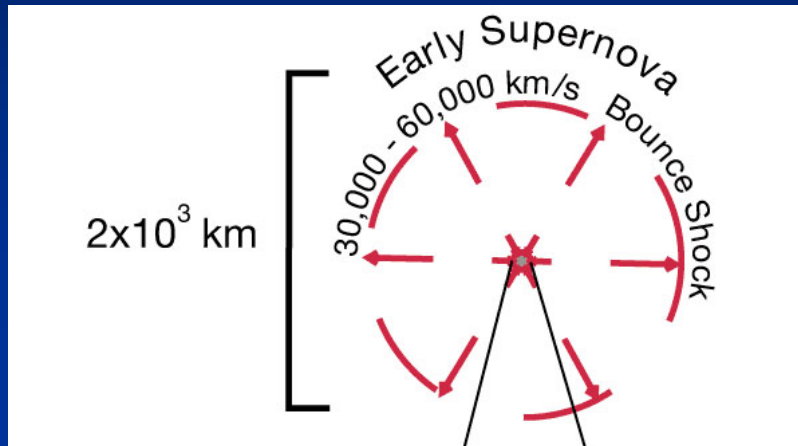
Inverser Betazerfall:



Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

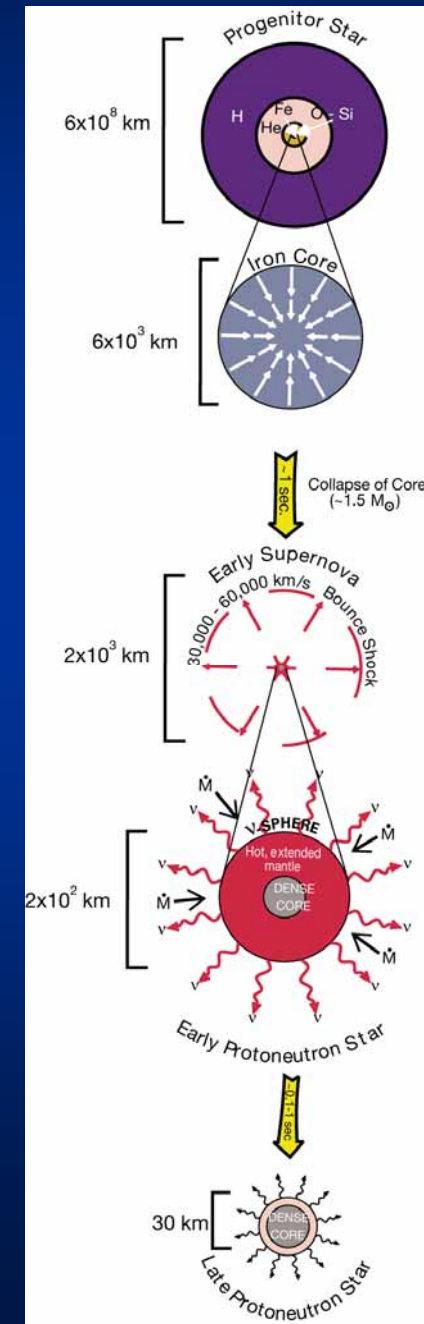
SN II: Aufbau und Ablauf



Rückstoß-Schockwelle

Der Kollaps des Sterns wird plötzlich gestoppt, wenn die Dichte die Nukleonendichte ($\sim 10^{15} \text{ kg m}^{-3}$) überschreitet – der Entartungsdruck der Neutronen ist dann größer als der Gravitationsdruck – und eine Rückstoßwelle, die radial mit einer Geschwindigkeit von einigen 1000 km/s nach außen läuft, reißt die Hüllen des Sterns auseinander.

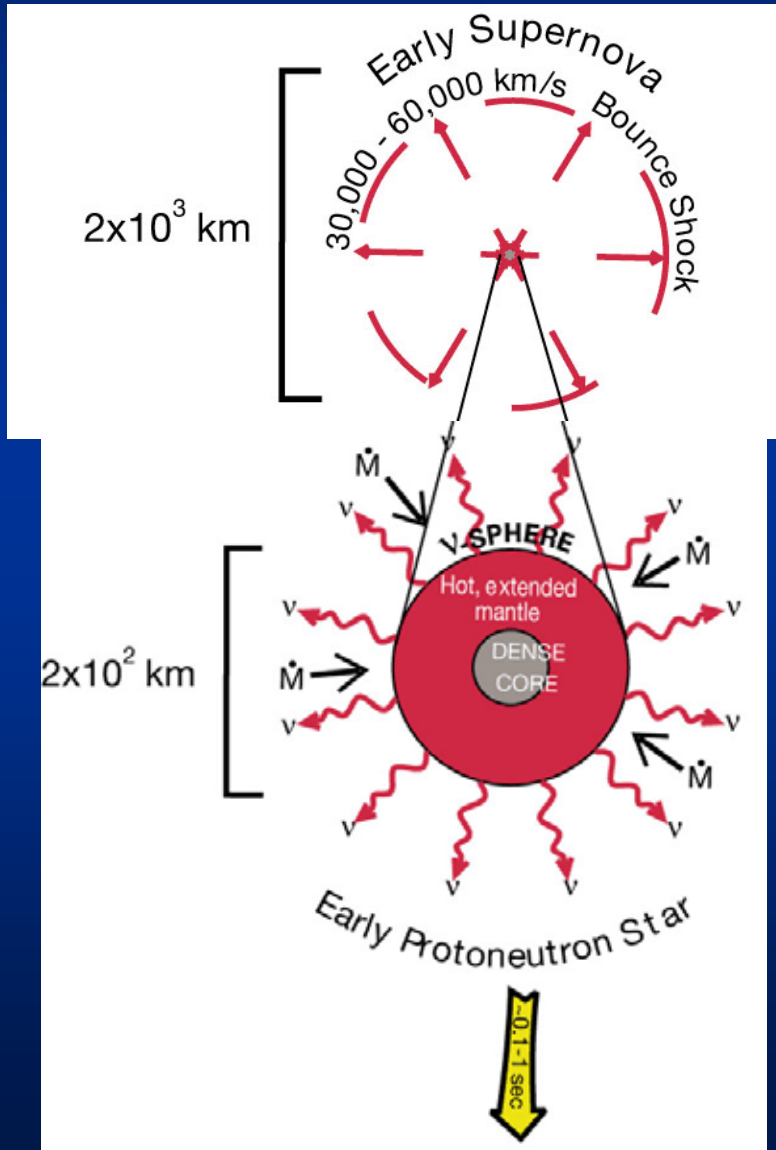
Die Energie der Stoßwelle trägt zur Synthese von schwereren Elementen als Eisen bei. Desweiteren wird die Energie beim Erreichen der Oberfläche zur Aufheizung derselben aufgewendet und als Strahlung abgegeben.



Neutronensterne

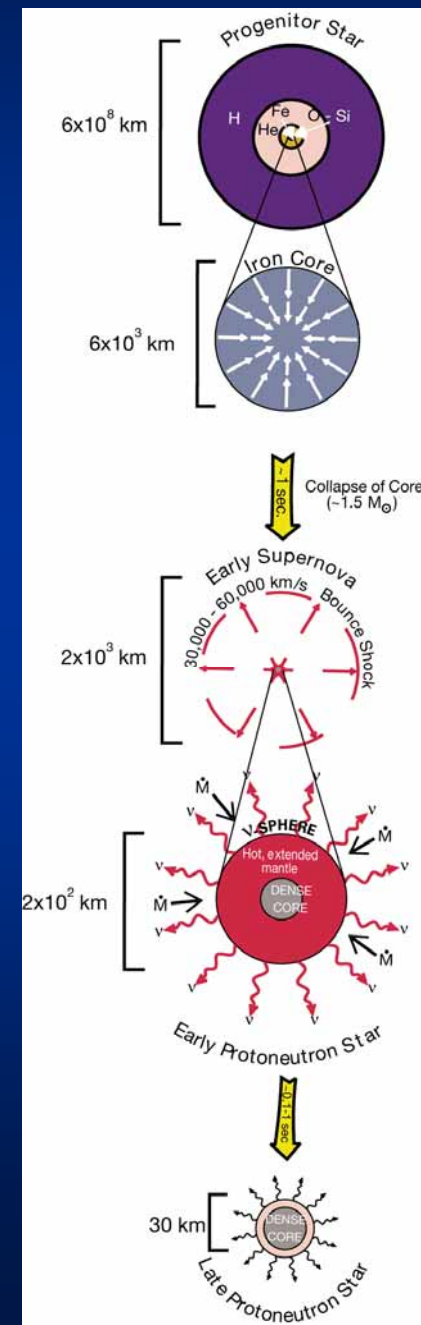
5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf



Masseneinsturz und
Neutrinoemission

99% der Energie in
Neutrino-getriebenem
Wind

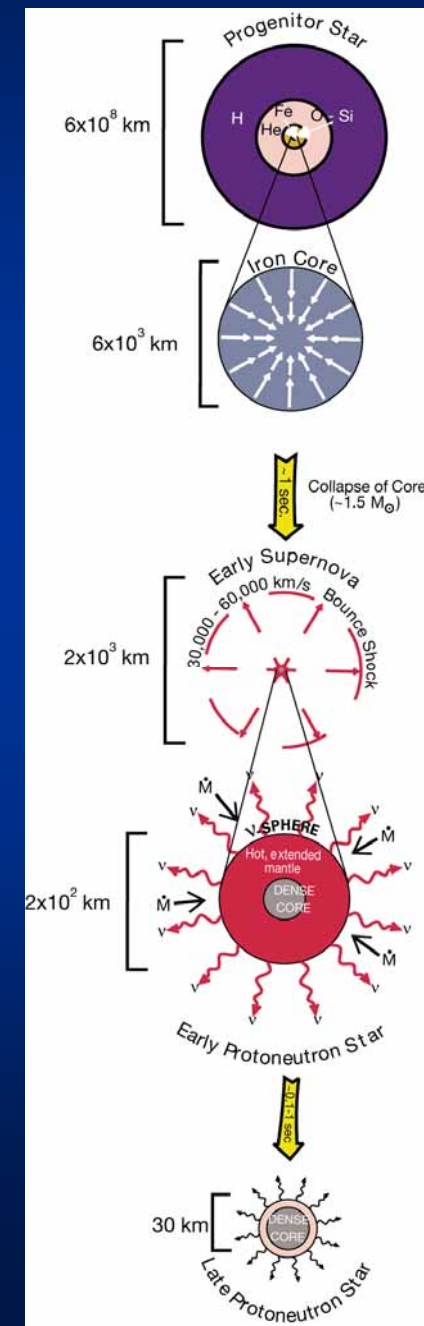
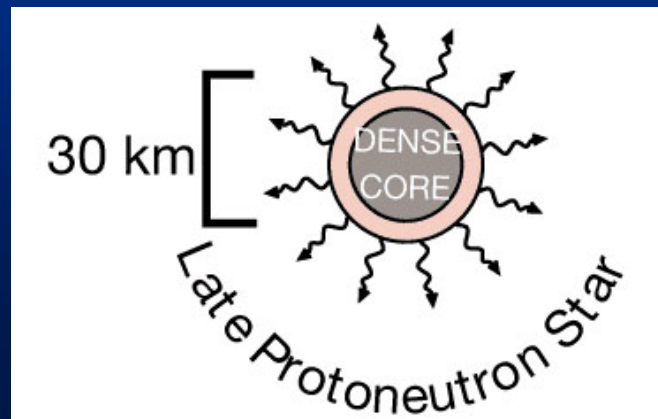


Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf

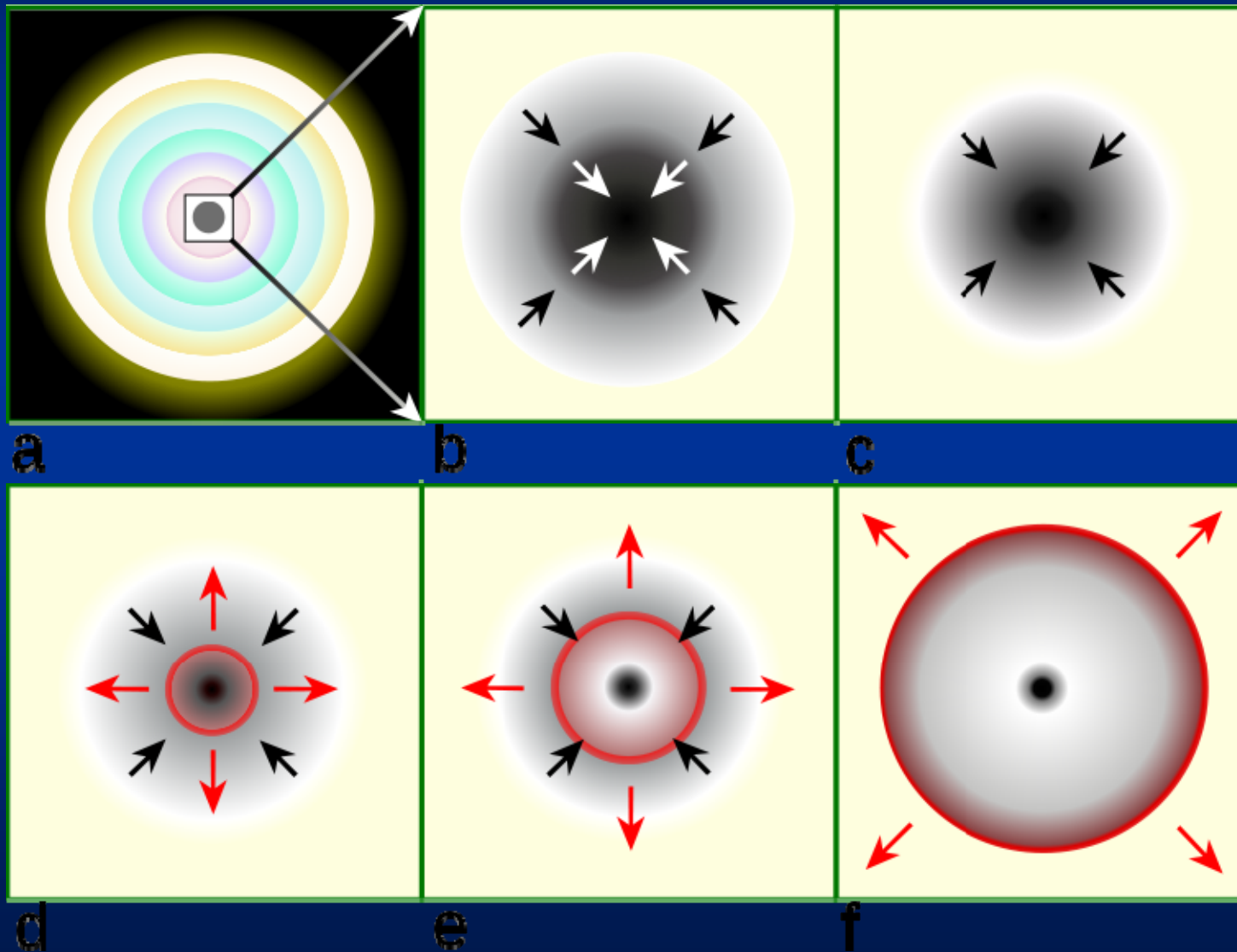
Neutrinos haben eine äußerst geringe Wechselwirkung mit Materie. Dass sie hier eine solch dominante Rolle spielen, hängt mit der extrem hohen Dichte der Materie zusammen. Die hohen Neutrino Flüsse entstehen beim inversen Betazerfall während des Kernkollapses.



Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf

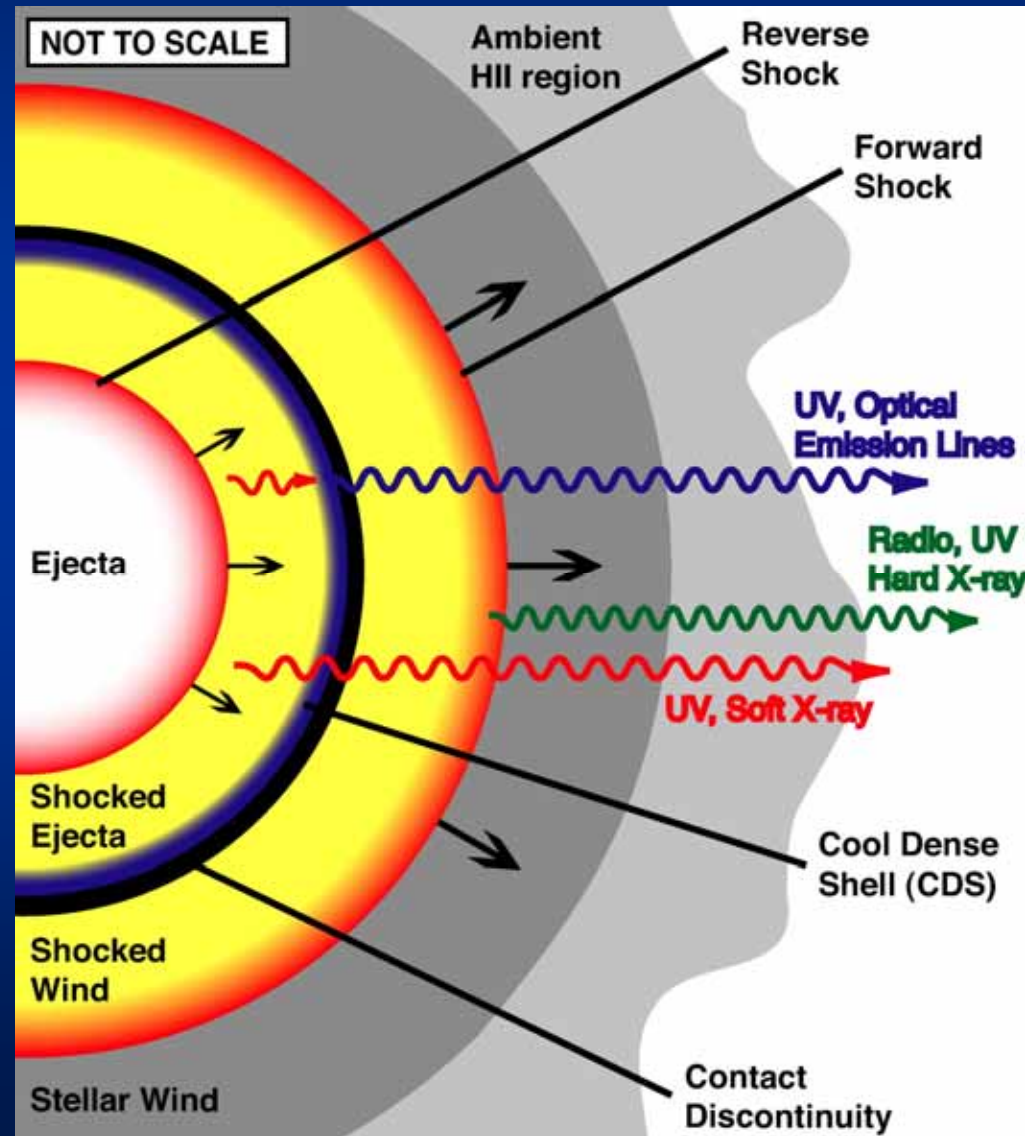


Leuchtkraft eines Supernova-Ausbruchs: $\sim 3 \cdot 10^9 L_{\odot}$

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

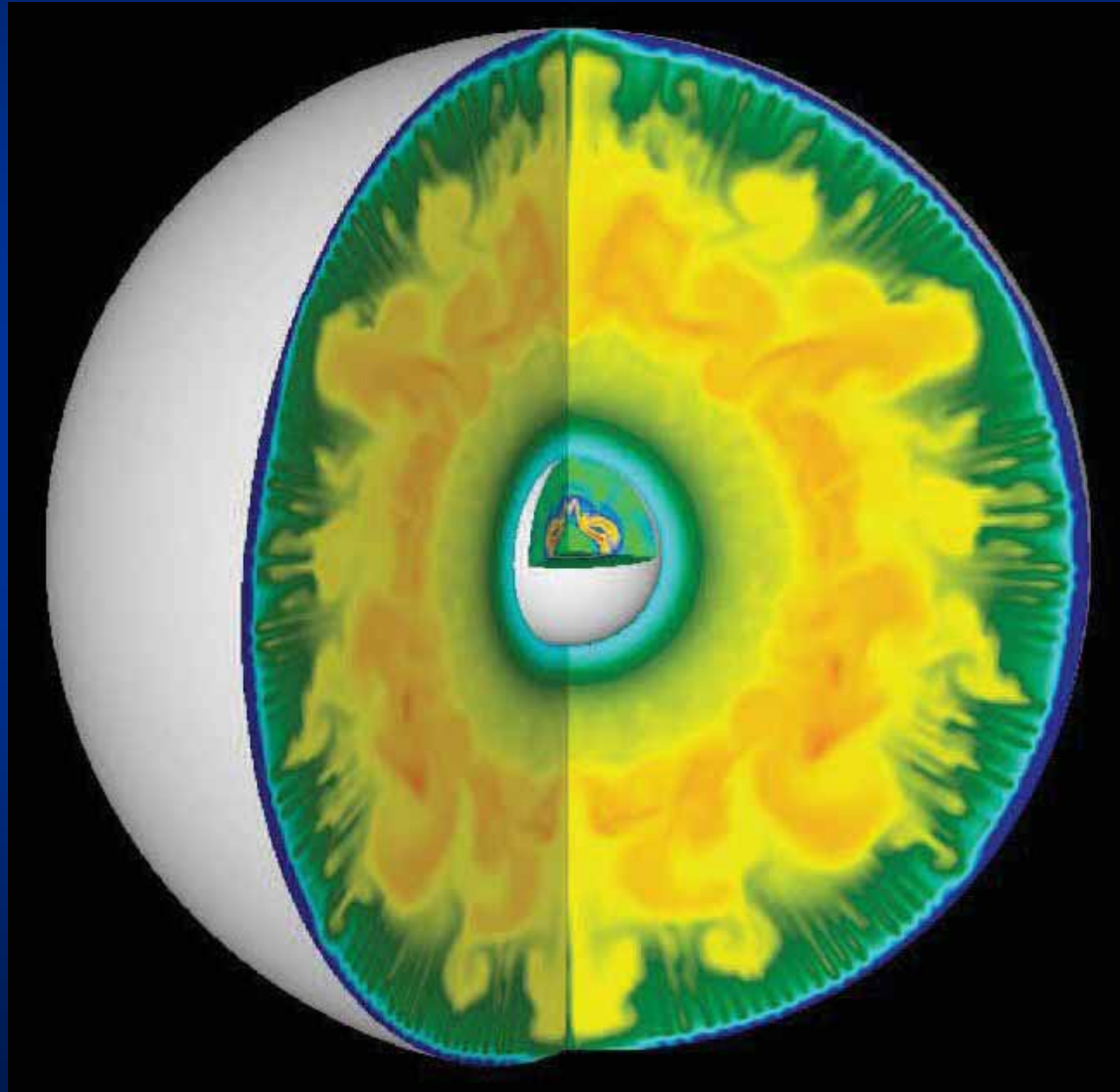
SN II: Aufbau und Ablauf



Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf

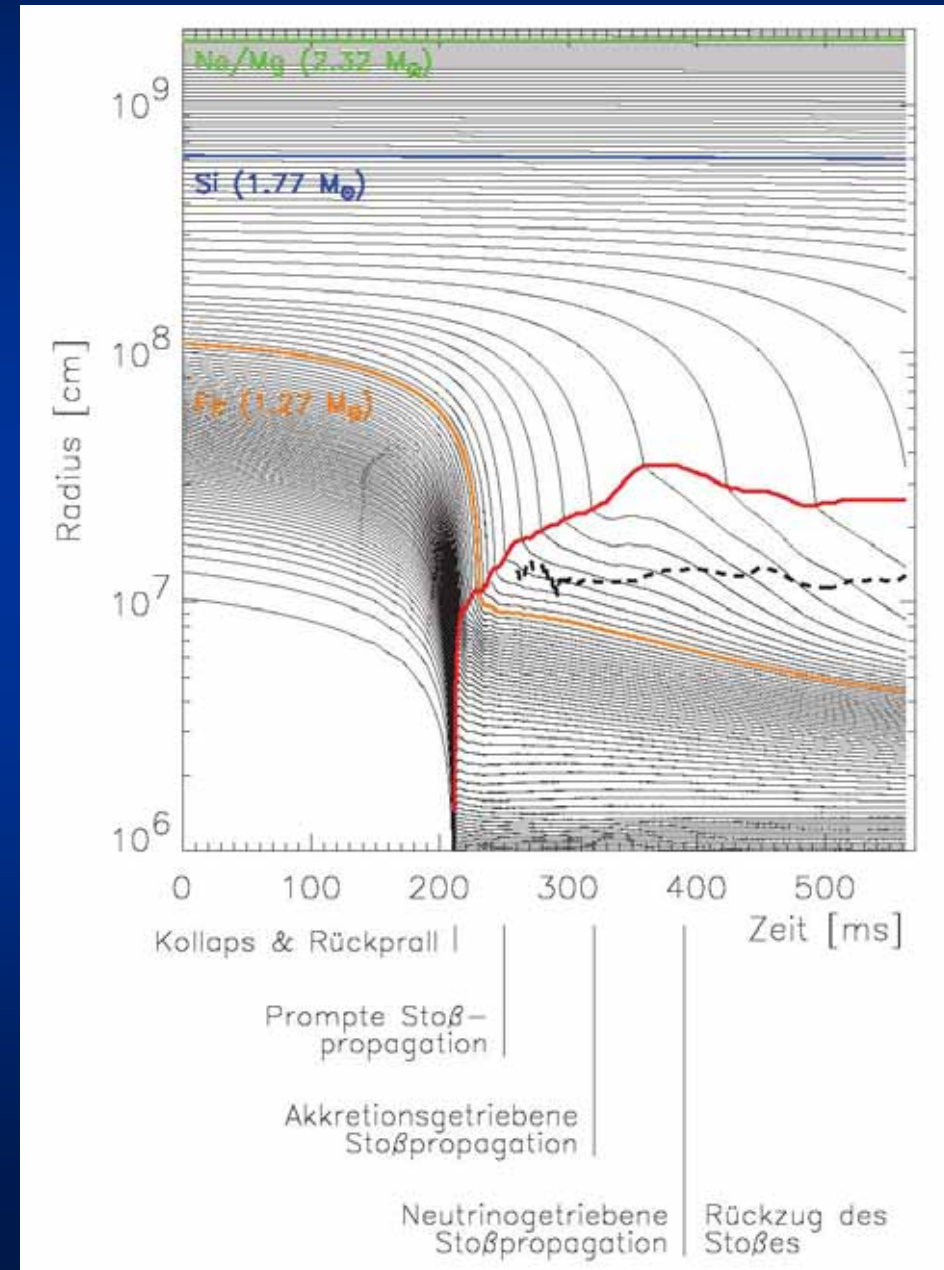


Die Rückstoßfront entwickelt sich nicht kugelsymmetrisch.

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

SN II: Aufbau und Ablauf



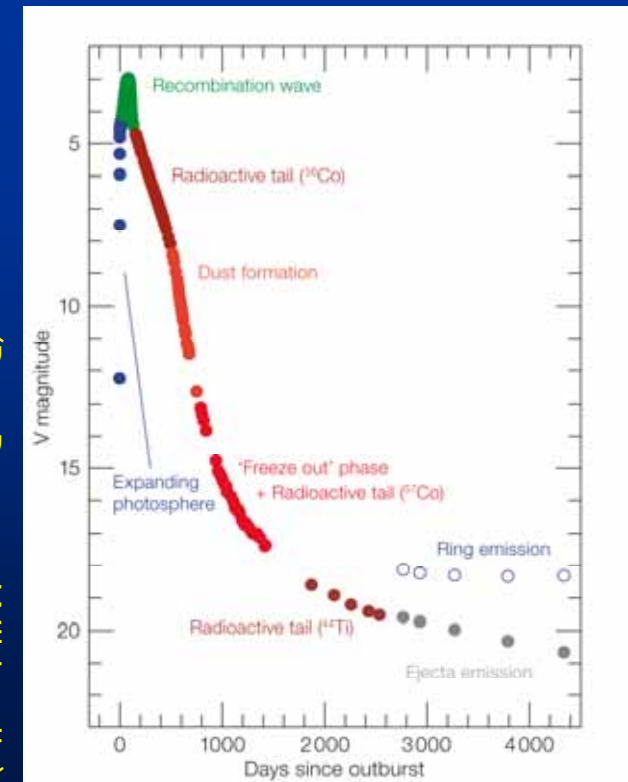
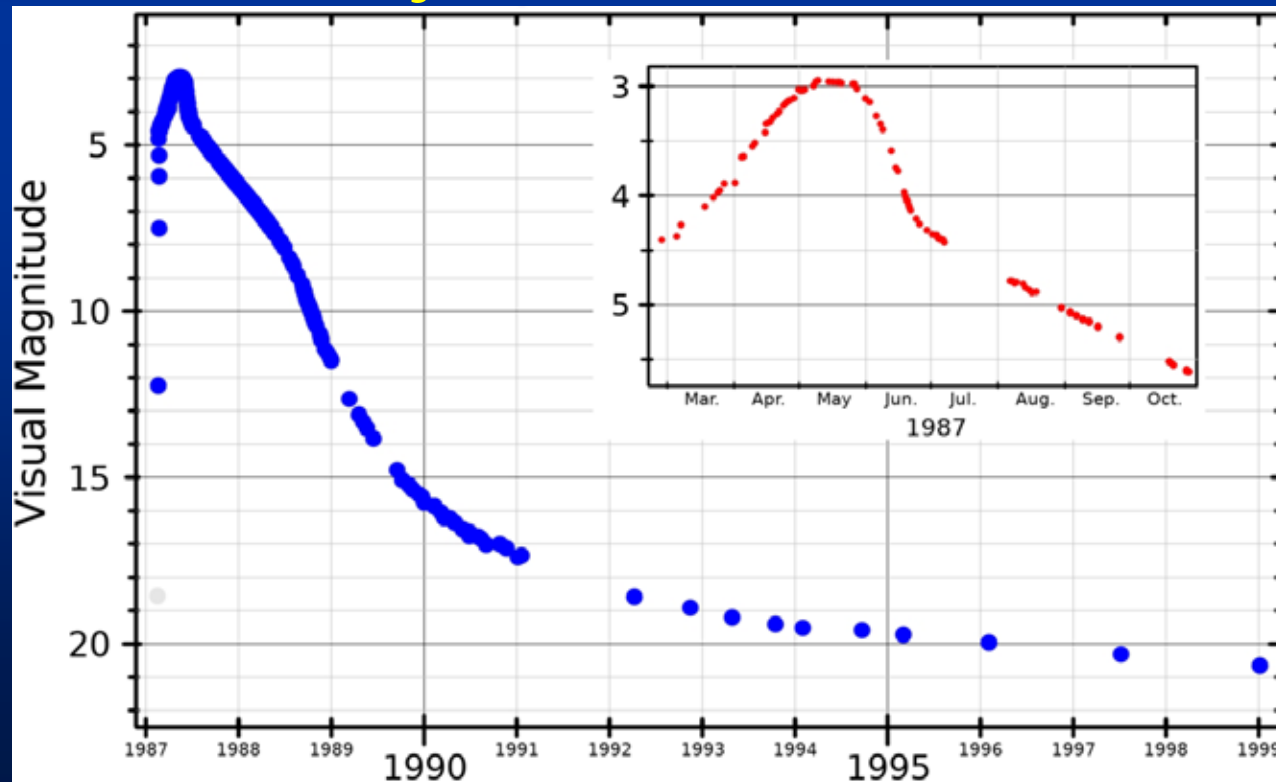
Die zeitliche Entwicklung der Rückstoßfront.

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A

1987 Februar 24 leuchtete in der LMC in 56 ± 7 kpc Entfernung eine Supernova auf, deren Progenitorstern als Sanduleak $-69^{\circ}202$ bereits zuvor bekannt war - der erste derartige Fall. Es handelte sich um einen Blauen Überriesen mit $17 M_{\odot}$, Mitglied eines Dreifach-Systems, etwa 20 Mio. Jahre alt.

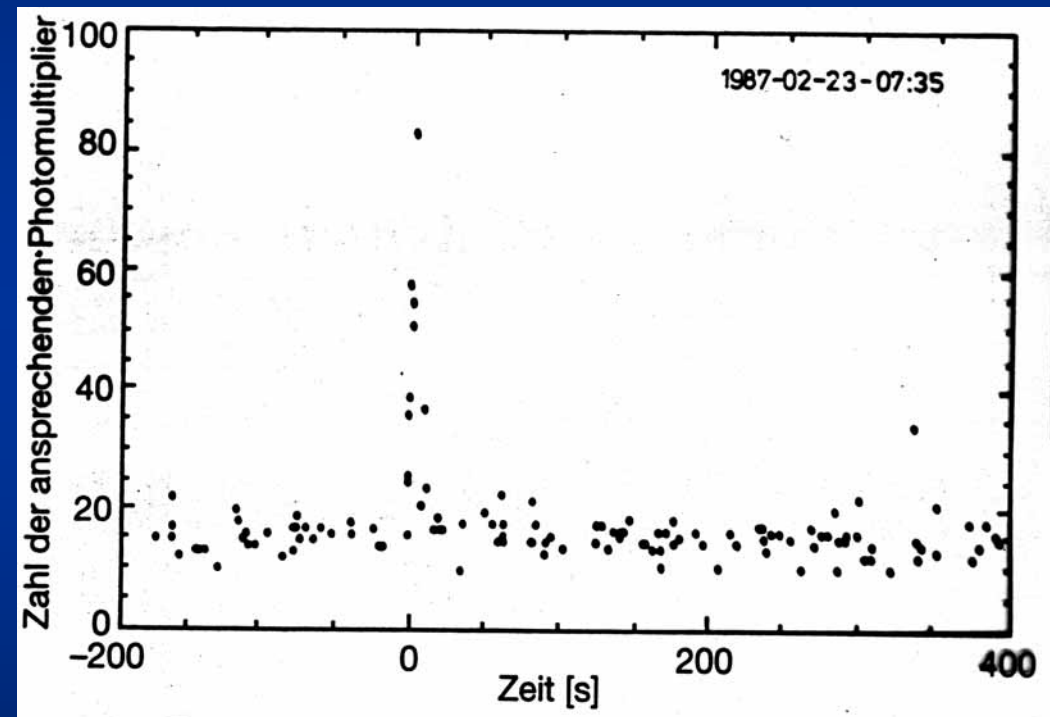
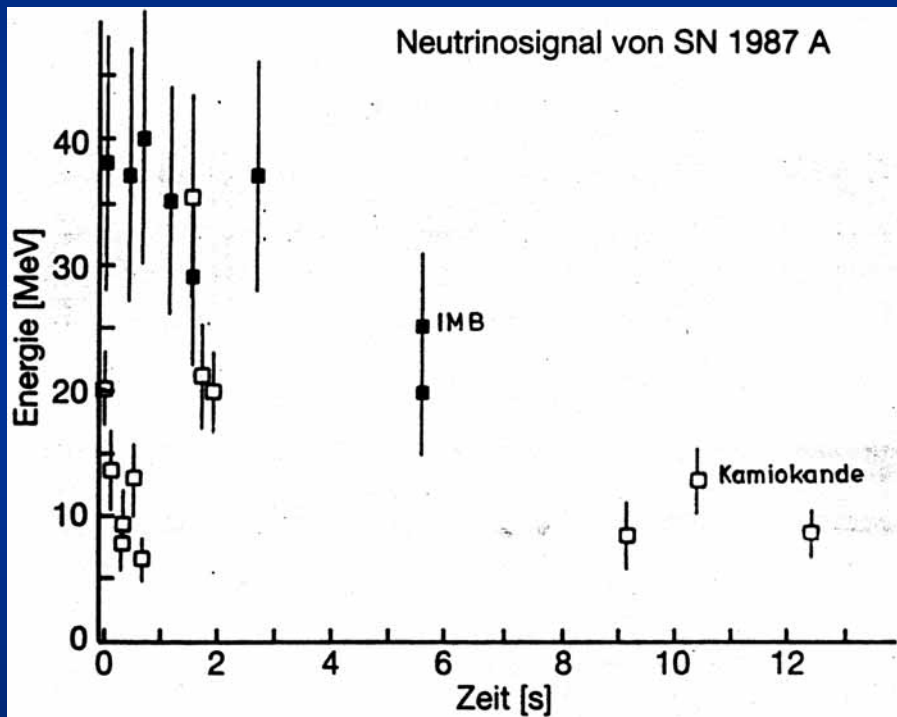


(PopePompus Wikipedia)

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A



Neutrinosignal der Explosion, zwei Tage vor dem optischen Ausbruch, der während dieser Zeit durch die mit anfänglich 19'000 km/s abgestoßene Hülle verdeckt war

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A

Die Supernova →

(eso-Schmidt-Teleskop, 2007-02-24)

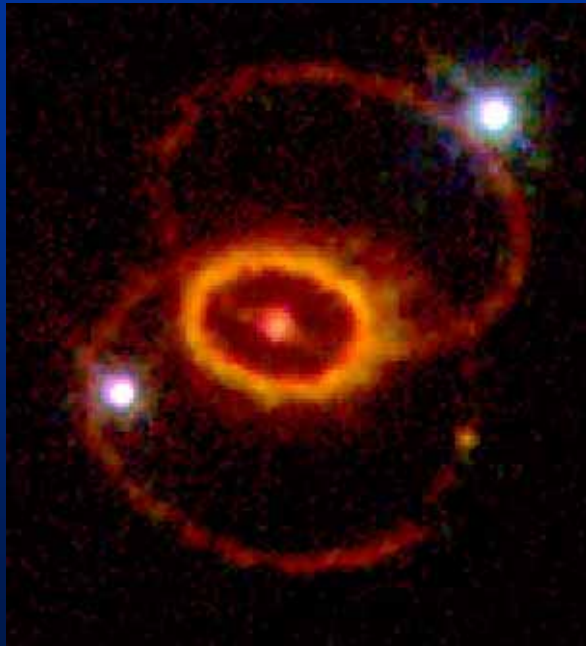


Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A

Mit 2300-3000 km/s
abgestoßene Ringe →



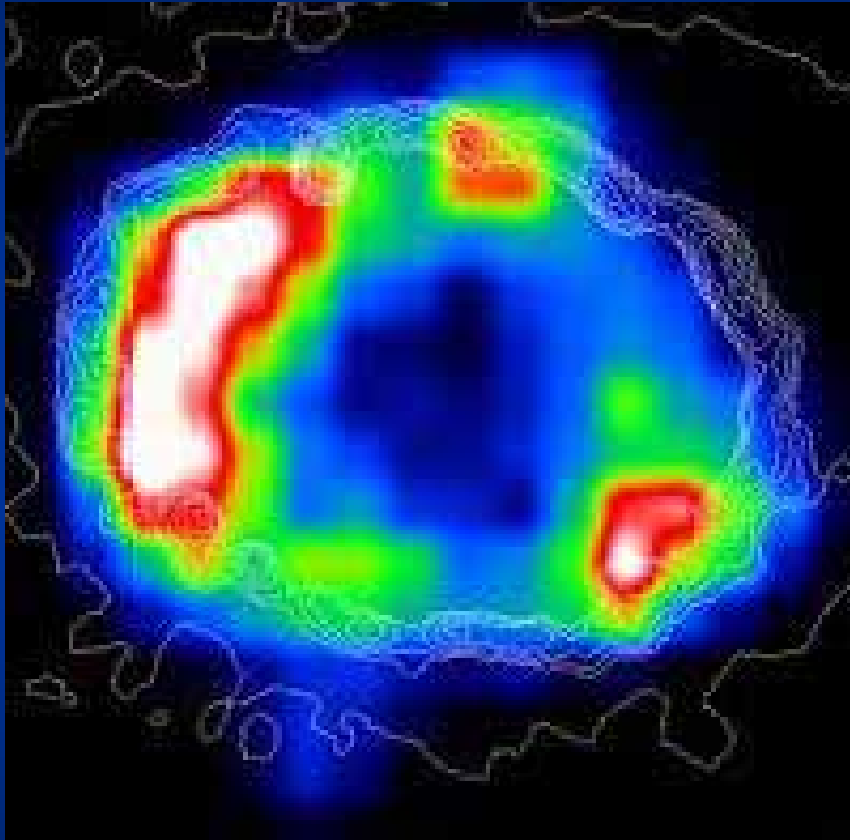
(HST 1999-04)



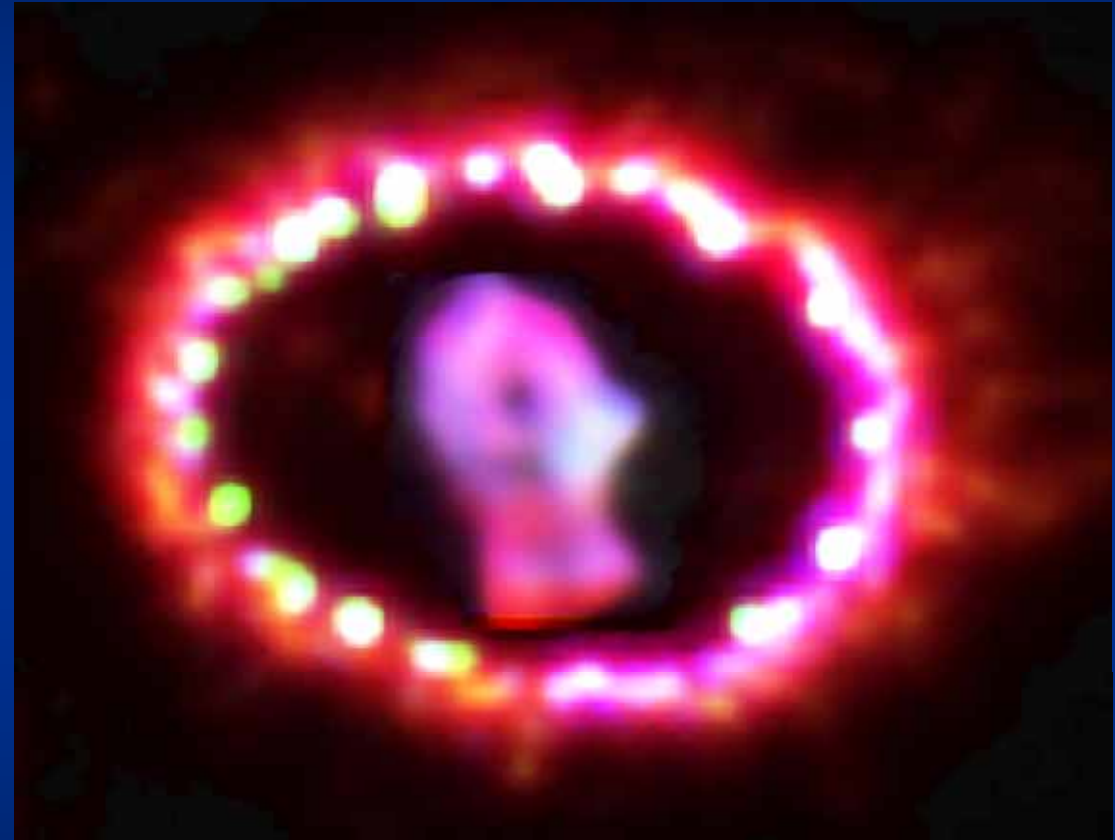
Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A



Chandra XR-Bild 2000 Januar
Ring: 1 x 1.3 Lj



Durch Röntgenstrahlung angeregt,
strahlen die Ringe im Sichtbaren.

STScI 2011 Juni

*(NASA, ESA, and P. Challis (Harvard-Smithsonian Center
for Astrophysics))*

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A

Insgesamt wurden ca. $6 \cdot 10^{45}$ J Energie freigesetzt. Der Vergleich der Energiewerte untereinander zeigt, dass der überwiegende Teil (ca. 80 %) der Energie auf die Neutrinoemission und der restliche Teil von ca. 20 % auf die kinetische Energie der ausgestossenen Sternenhülle entfällt - die als elektromagnetische Strahlung abgegebene Energie stellt nur einen verschwindend geringen Teil der insgesamt freigesetzten Energie dar.

(Quelle: Ruhr-Universität Bochum 2004)

Neutronensterne

5. Supernovae und die Supernova SN 1987A

Die Supernova SN1987A

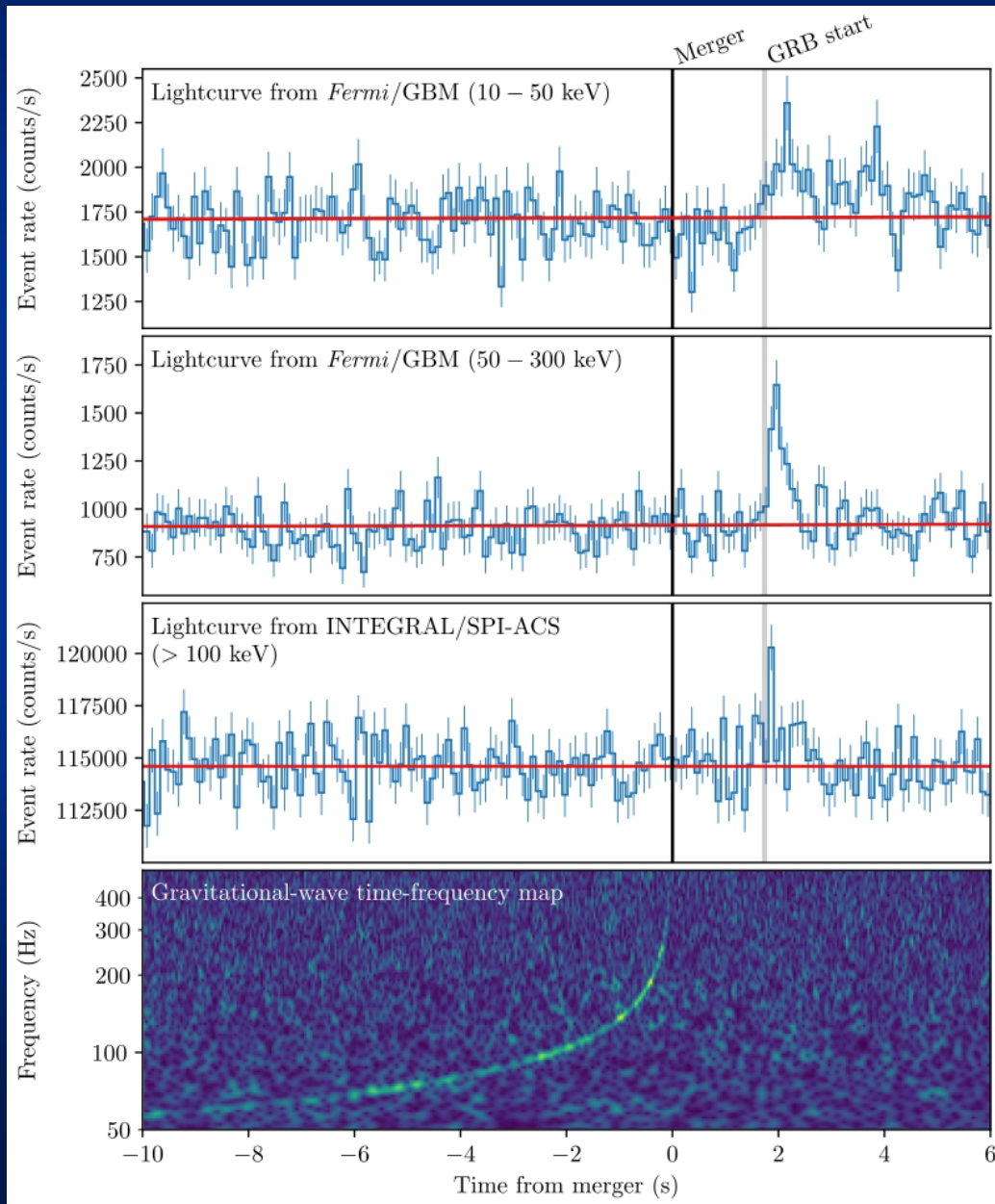


(WEBB SPACE TELESCOPE NIRSPEC/J. LARSSON)

James-Webb-Teleskop-Aufnahme 2023 im NIR und MIR. In der Strahlung aus dem Zentrum konnten ionisierter Schwefel und Argonionen nachgewiesen werden, entstanden entweder durch die UV- und XR-Strahlung eines ca. 100 Mio. K heißen Neutronensterns oder dessen immens schnelle Rotation, die Umgebungsteilchen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Damit ist die Existenz eines Neutronensterns nahezu sicher bewiesen.

Neutronensterne

6. Das Ereignis GW 170817 / GRB 170817a

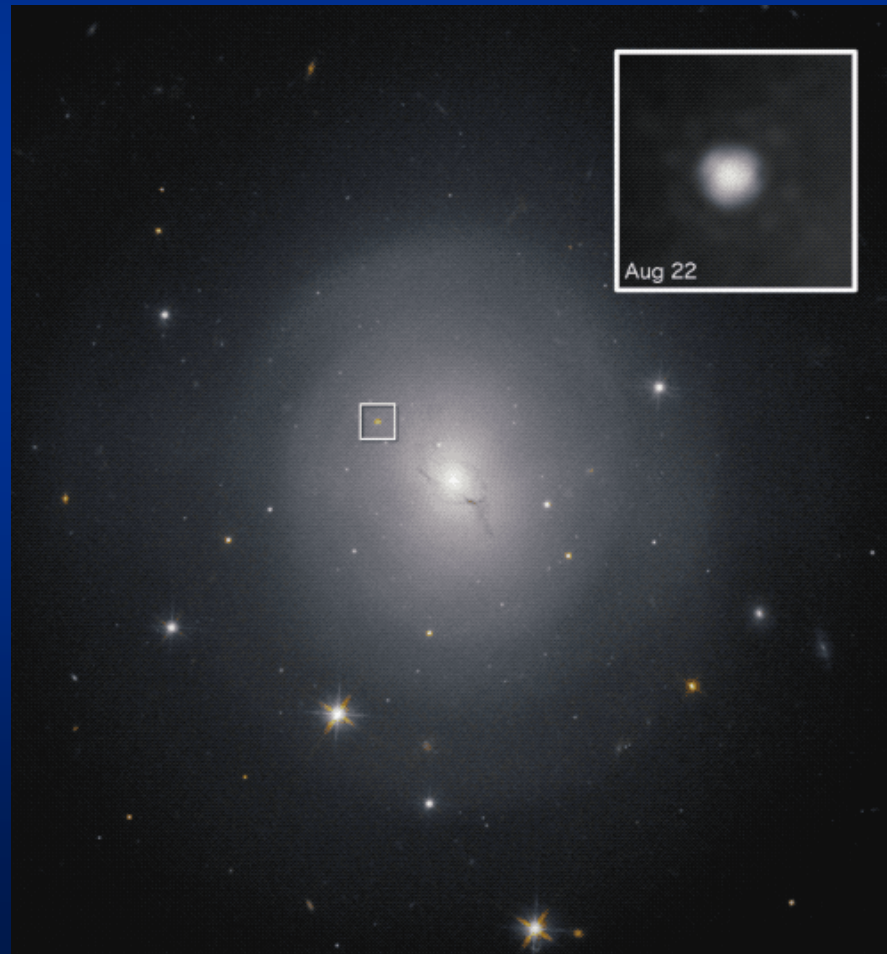


2017 August 17 wies das LIGO-Gravitationswellen-observatorium ein Ereignis nach, bezeichnet als GW170817, auf das 1.7s später der Gamma-Ray-Burst GRB170817a folgte. Viele spätere Beobachtungen zeigten ein Nachleuchten (after glow):

Neutronensterne

6. Das Ereignis GW 170817 / GRB 170817a

Viele spätere Beobachtungen zeigten ein Nachleuchten (after glow), jedoch kein Neutrinosignal. Nach zwei Wochen war Radio- und Röntgenstrahlung zu beobachten.



Neutronensterne

6. Das Ereignis GW 170817 / GRB 170817a

Die Interpretation dieses Ereignisses:

Der Zusammensturz zweier Neutronensterne in der Galaxie NGC 4993 in 41.0 ± 3.1 Mpc Entfernung, von denen der massereichere mit ca. $1.36\text{--}1.60 M_{\odot}$ durch seine Gezeitenkräfte den kleineren mit ca. $1.17\text{--}1.36 M_{\odot}$ zerstört und dessen Masse geschluckt und damit auf $2.73\text{--}2.82 M_{\odot}$ angewachsen ist.

Dabei sind $0.025 M_{\odot} c^2$ in Gravitationswellen-Energie umgewandelt worden. Ein Teil der Masse des zerstörten Sterns wurde mit hoher Geschwindigkeit ($0.1\text{--}0.2c$) ausgestossen. Durch Stöße mit umgebendem Gas entstehen in r- und s-Prozessen schwere und radioaktive Elemente. Deren Zerfall kann tagelang als fortwährender Ausbruch beobachtet werden.

Chandra-Röntgenbeobachtungen lassen darauf schließen, dass das verschmolzene Objekt ein Schwarzes Loch gebildet hat.

Neutronensterne

6. Das Ereignis GW 170817 / GRB 170817a

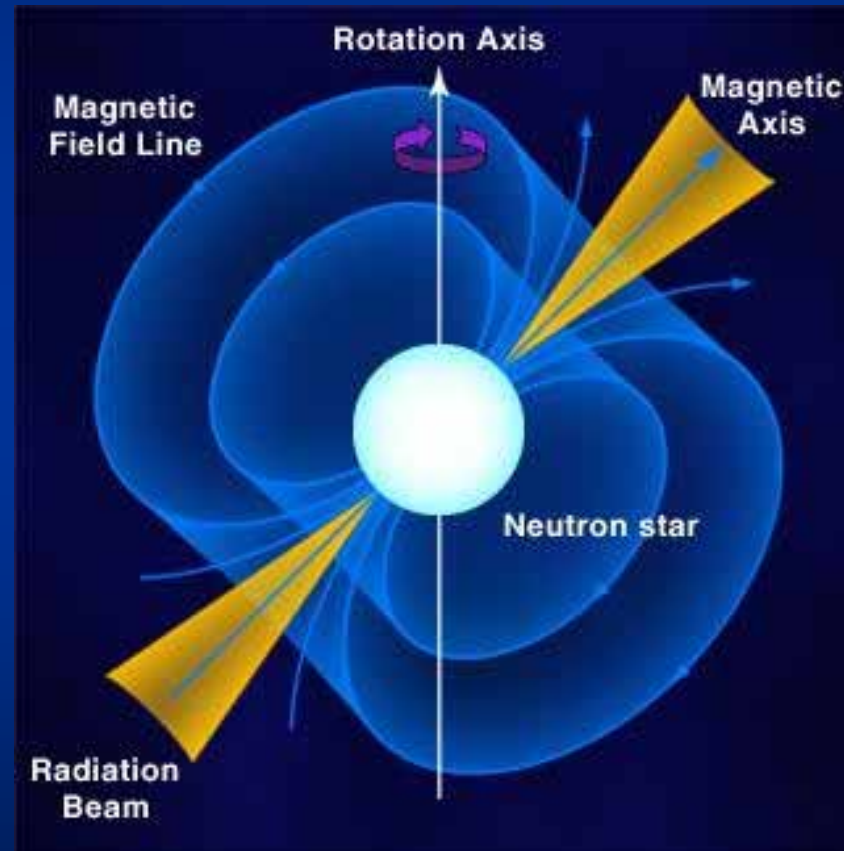
Drei weitere Nachweise lassen die Beobachtungen zu:

1. Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.
2. Die GW lassen eine genaue Entfernungsbestimmung zu, die zusammen mit der Rotverschiebung eine unabhängige Bestimmung des Lemaître-Hubble-Parameters H zu: $H=70 \pm 12-8 \text{ km/s Mpc}$ erlauben. Der Bestwert aus anderen Bestimmungen beträgt: 69.96.
3. Alternative Gravitationstheorien und Modifikationen der Allgemeinen Relativitätstheorie können ausgeschlossen werden.

Neutronensterne

7. Pulsare

Pulsare (pulsierende Radioquellen) sind die am leichteste zu beobachtende Ausprägung von Neutronensternen:



Beim Zusammensturz im SN-Ausbruch verdichtet sich das Magnetfeld extrem stark, und die Rotation beschleunigt sich ebenso extrem (Pirouetten-Effekt).

Neutronensterne

7. Pulsare



HST und CXO

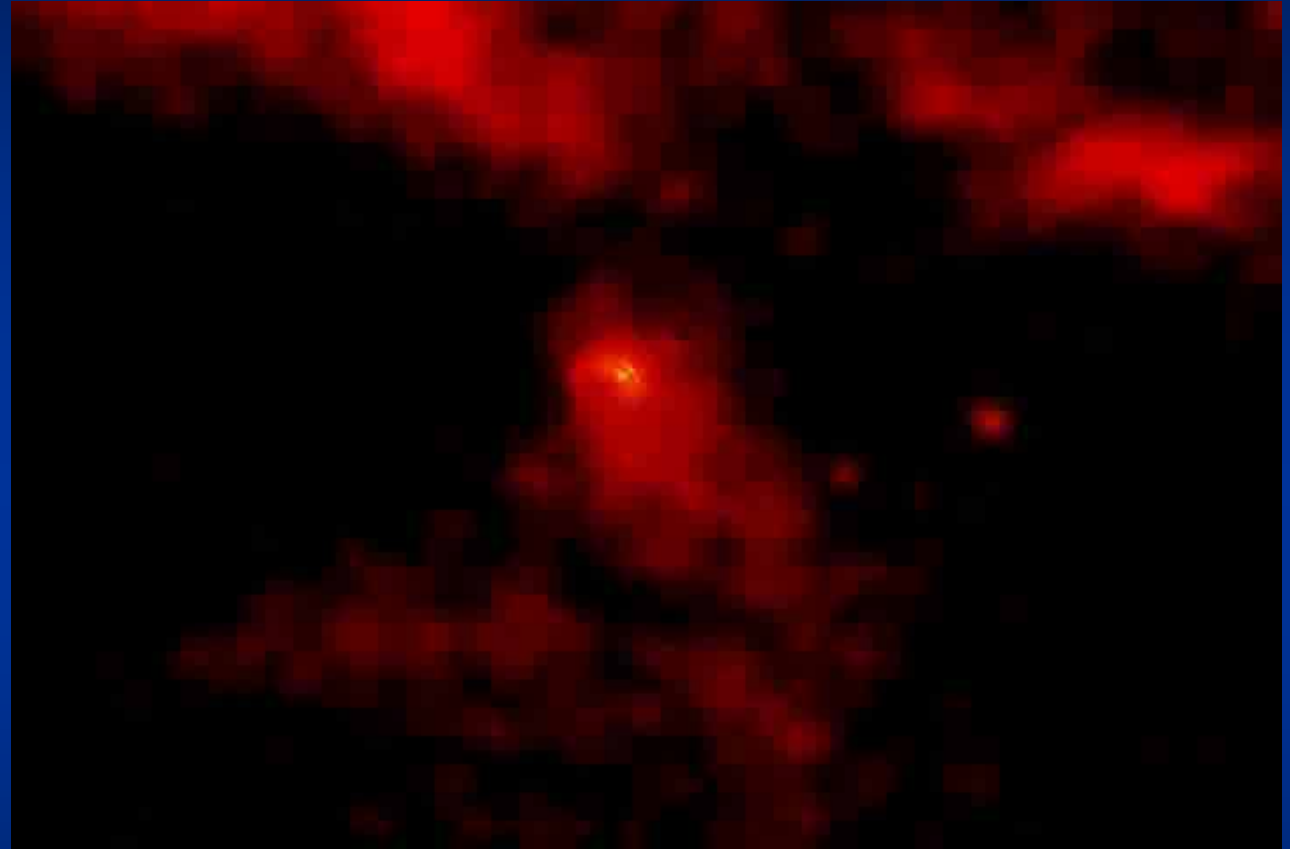
(J. Hester (ASU), CXC, HST, NRAO, NSF, NASA)



**Crabnebel M1 / NGC 1952, Supernova-Überrest
mit Pulsar und polarem Jet**

Neutronensterne

7. Pulsare



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2025

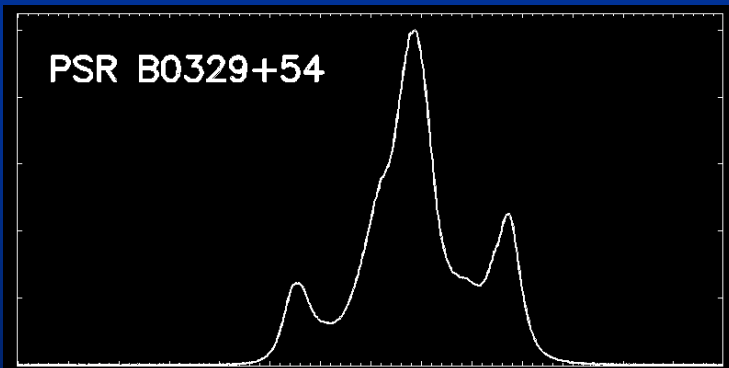
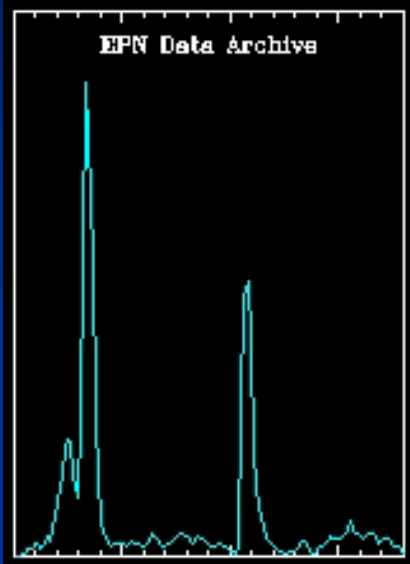
Vela-PSR B0833-45

Rekonstruktion anhand von Röntgenbeobachtungen und Animation

(NASA-GSFC/DOE/Fermi LAT Collaboration)

Neutronensterne

7. Pulsare



Crabnebel-Pulsar PSR B0531+21

PSR 0329+54 Jodrell-Bank-Obs.



PSR 0329+54 bei 410 MHz, $P=0.715$ s
(NRAO 92 m-Teleskop)



PSR 0950+08 wie vor, $P=0.253$ s,
Alter: 17,5 Mio. a, $d=262$ pc



PSR 0833-45, Vela-PSR bei 1665 MHz,
 $P=89$ ms (NRAO 42 m-Teleskop)



PSR 0329+54 (100 m-Radioteleskop
Effelsberg)

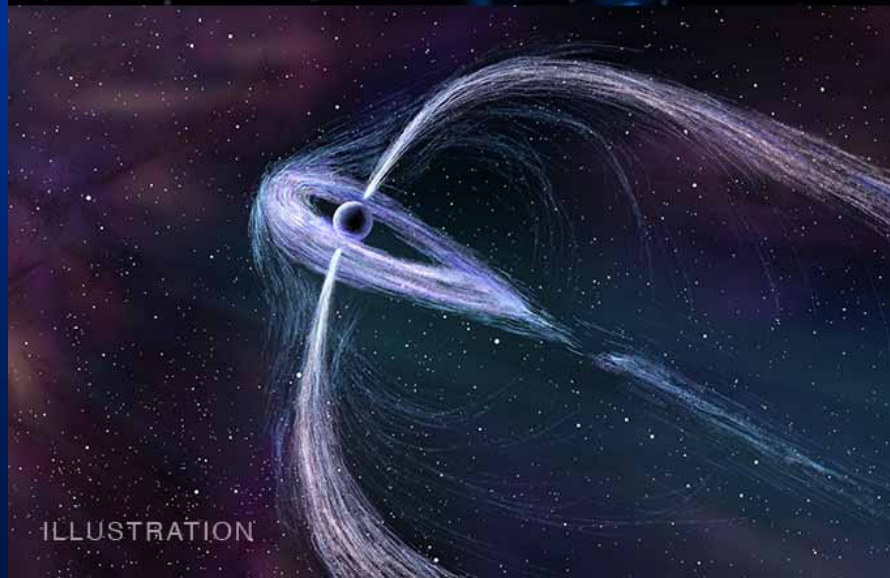
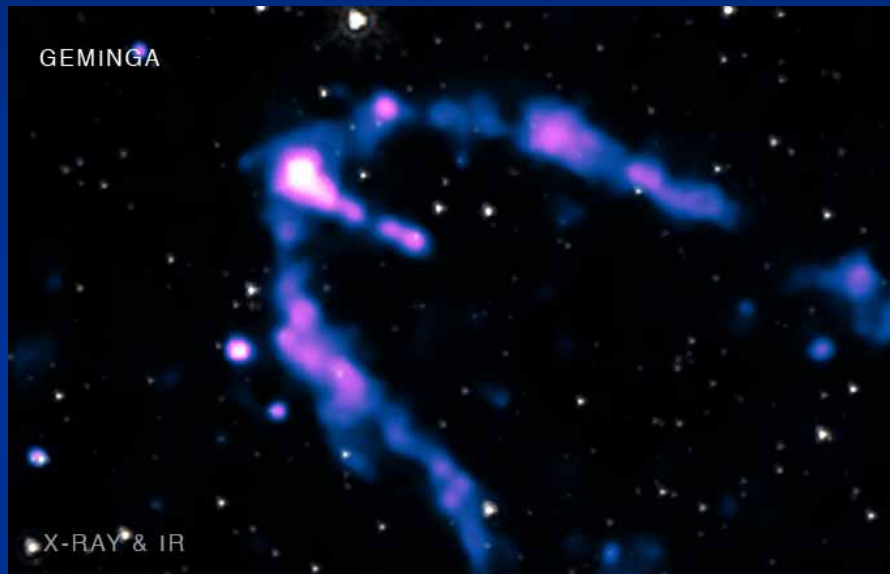


Millisekunden-Pulsare (sehr jung) im
Kugelsternhaufen 47 Tuc mit $P=2-8$ ms
(vermutlich Hunderte)

Neutronensterne

7. Pulsare

Pulsarwinde



Pulsare senden einen bis zu einem halben Lichtjahr reichenden „Pulsarwind“ aus, wie das Chandra-Röntgenobservatorium CXO beobachtet hat.

Neutronensterne

7. Pulsare

Magnetare

Pulsare mit extrem intensiven Magnetfeldern, die mit 10^{11} bis 10^{12} T etwa tausendmal stärker sind als sonst bei Neutronensternen üblich. Schätzungsweise 10 % aller Neutronensterne sind Magnetare.

1979 bei Satellitenbeobachtungen entdeckt, sind sie möglicherweise für Gammastrahlenausbrüche (Soft Gamma Repeaters SGR) verantwortlich.

Die etwa 30'000 Lichtjahre entfernte Quelle SGR J1550-5418 ist mit der Rotationsperiode von 2.07 s der am schnellsten rotierende zurzeit bekannte Magnetar. Er sendet zusätzlich in rascher Folge Gammastrahlungsblitze aus (mehr als 100 Blitze in weniger als 20 Minuten).

Neutronensterne

7. Pulsare

Rotation und Frequenz der Pulsare nehmen ab. Auf dieser Grundlage kann das Alter eines Pulsars geschätzt werden (Spin Down Age).

Aufgrund ihrer sehr konstanten Rotation können Pulsare quasi als Zeitgeber bei astronomischen Beobachtungen benutzt werden.

Gravitationswellen dehnen und stauchen die Raumzeit und beeinflussen so die Laufzeit und verändern die Ankunftszeit der Pulsarsignale im Bereich von 30 Milliardstel Sekunden.

Im Rahmen des European Pulsar Timing Array werden unter Beteiligung des MPIfR Bonn (Prof. M. Kramer) derartige Messungen durchgeführt und damit ein Hintergrundrauschen aus langwelligen Gravitationswellen bestimmt, zu deren Messung das LIGO nicht in der Lage ist.