

Universität Regensburg
Naturwissenschaftliche Fakultät II

Ausbildungsseminar: Kerne und Sterne

Susanne Neueder: Kernkollaps Supernovae



22. 5. 2007

Gliederung

1. Einführung	
1.1. Zwei unterschiedliche Mechanismen zur Entstehung von Supernovae(SNe).....	3
1.2. Einteilung der SNe in Typen und ihre Spektre.....	3
2. Kernkollaps	
2.1. Zwiebelstruktur des Sterns.....	5
2.2. Kerninstabilität und Kollaps.....	6
2.3. Schockwelle und Rolle der Neutrinos bei der Explosion.....	7
2.4. Supernovaüberreste.....	9
3. s-, r- und p-Prozess.....	10
4. Die Supernova 1987A.....	10
5. Literatur.....	12

1. Einführung

1.1. Zwei unterschiedliche Mechanismen zur Entstehung von Supernovae (SNe)

Es gibt zwei unterschiedliche Mechanismen, nach denen Sterne als Supernova enden können:

1) Ein weißer Zwerg befindet sich in einem Doppelsternsystem zusammen mit einem normalen Begleiter, der sich soweit entwickelt hat, dass seine Atmosphäre die Roche-Fläche erreicht. Auf diese Weise gelangt Materie des normalen Sterns in den Gravitationsbereich des weißen Zwergs, der diese Masse akkretiert. Bei genügend großen Akkretionsraten zündet eine kontinuierlich brennende Wasserstoff-Fusion, welche die Masse des weißen Zwergs anwachsen lässt. Dieser Prozess läuft solange ab, bis der weiße Zwerg die Chandrasekhar-Grenze überschreitet. Dabei ereignet sich eine explosive Zündung von Kohlenstoff bzw. Sauerstoff im Innern des weißen Zwergs und führt zu einer thermonuklearen Supernova, welche den Stern völlig zerstört. Man spricht in diesem Fall von einer SN vom Typ Ia.

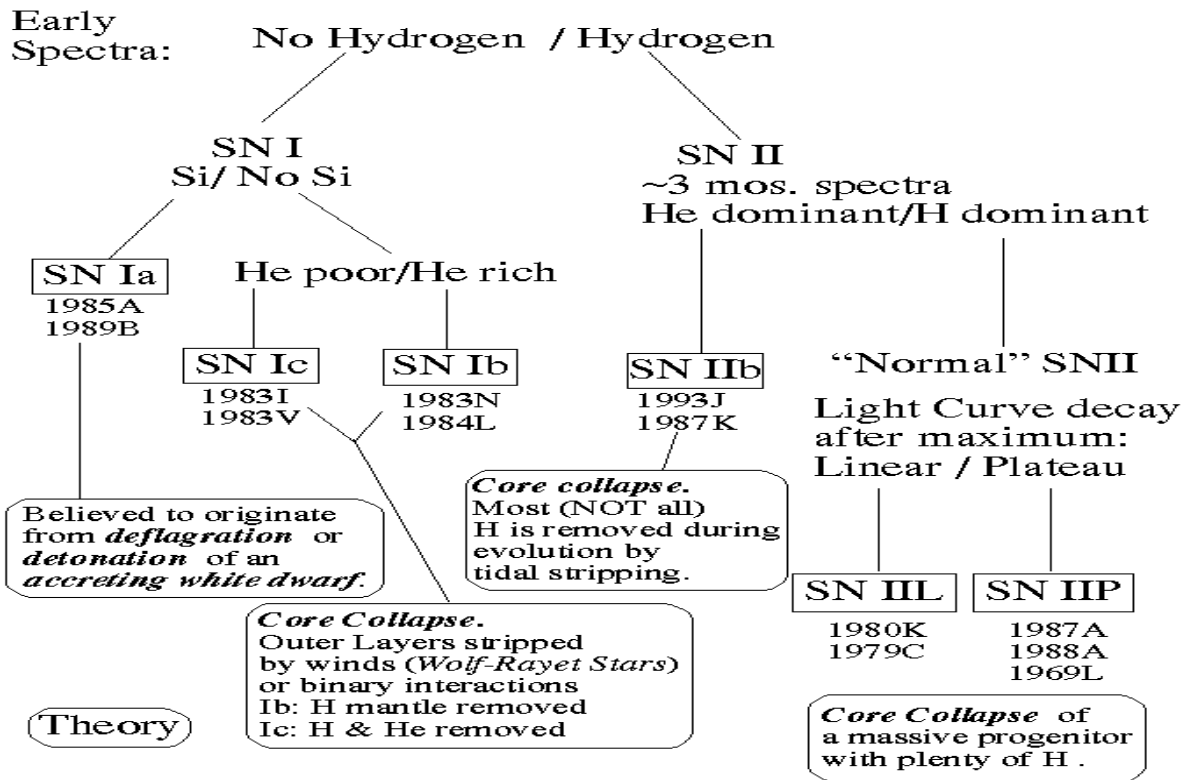
2) Die andere Möglichkeit bietet sich, wenn ein massereicher Stern mit einer Anfangsmasse von mehr als acht Sonnenmassen nach dem Verbrauch seines nuklearen Brennstoffs seine Entwicklung mit einem Kernkollaps beendet. Das ist das Thema dieses Vortrags.

Man teilt SNe in unterschiedliche Typen ein, allerdings nicht nach ihren physikalischen Explosionsmechanismen, sondern nach ihren Spektren.

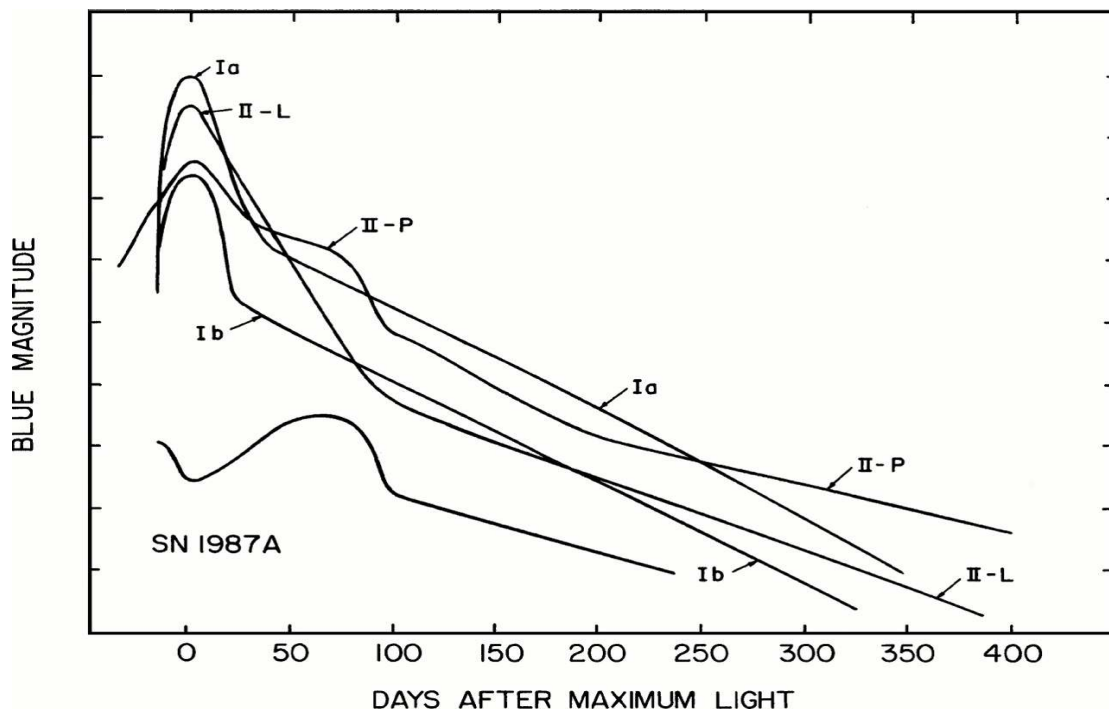
1.2. Einteilung der SNe in Typen und ihre Spektren

Das Hauptkriterium bei der Einteilung ist die Stärke der Balmer-Linien des Wasserstoffs im Spektrum. Bei SN I findet man keine Wasserstofflinien, bei SNe vom Typ II sind sie dagegen mehr oder weniger stark ausgeprägt. Der Wasserstoff ist immer dann spektroskopisch nachweisbar, wenn der Vorläuferstern noch seine Wasserstoffhülle besaß. Es kann aber auch vorkommen, dass der Stern die Wasserstoffhülle durch einen starken Teilchenwind abgestreift hat und dadurch Wasserstoff nicht mehr nachweisbar ist. Bei Typ II SNe unterscheidet man noch zwei verschiedene Abklingverhalten, je nachdem ob die Lichtkurve nach der Explosion linear oder mit Plateau abfällt.

Grafik zur Typeinteilung von SNe:



Lichtkurven verschiedener SNe:



Allen Lichtkurven ist gemeinsam, dass sie schnell bis zu einer Maximalleuchtkraft ansteigen, um dann langsam wieder abzufallen. Der Anstieg dauert typischerweise ein paar Stunden, während sich der Abfall über Wochen und Monate hinzieht.

Der Verlauf der Kurven wird durch den Zerfall radioaktiver Elemente bestimmt, die durch explosive Nukleosynthese entstehen, wenn sich die Schockwelle ihren Weg durch den Stern nach außen bahnt. Vor allem ^{56}Co kommt in großen Mengen vor, seine Abklingzeit bestimmt im Wesentlichen die Steigung der Kurve.

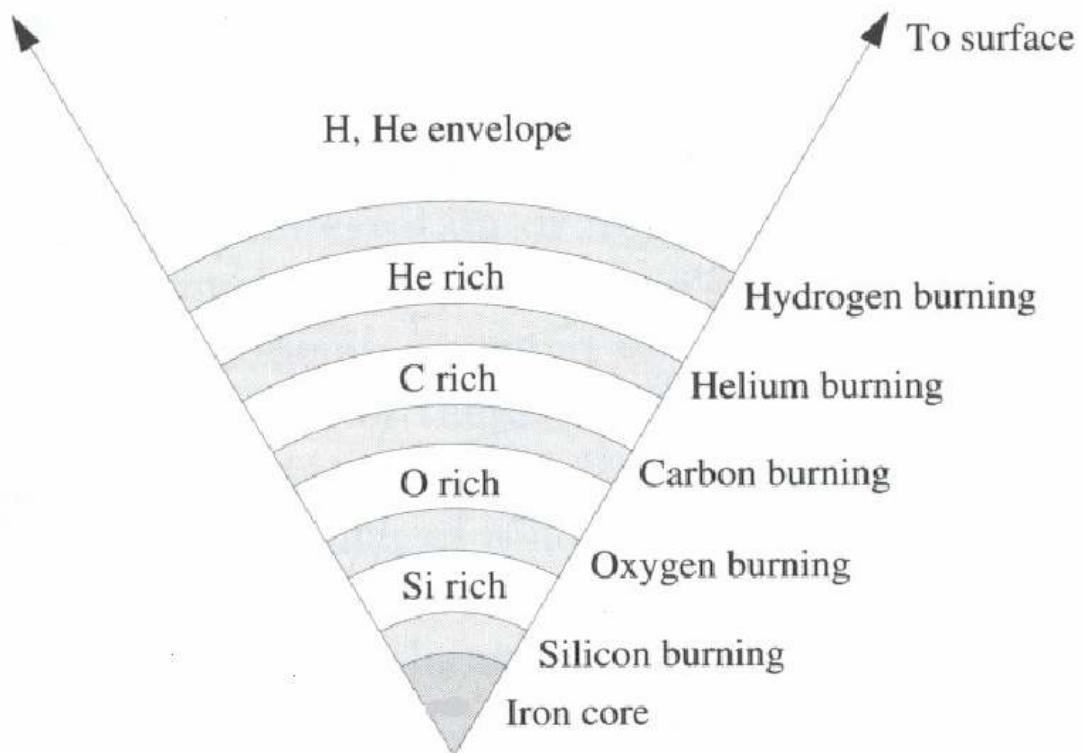
Der Grund für das Plateau in der Lichtkurve von SN II P, ist der radioaktive Zerfall von Nickel. Die Zerfallsenergie wird in einer optisch dichten Schicht absorbiert und erst verzögert wieder abgestrahlt, was in dem beobachteten Plateau resultiert.

2. Kernkollaps

2.1. Zwiebelstruktur des Sterns

Ein Stern mit einer Anfangsmasse von mehr als acht Sonnenmassen durchwandert der Reihe nach die Stadien des Wasserstoff-, Helium-, Kohlenstoff-, Neon-, Sauerstoff- und Siliziumbrennens. Letzteres lässt einige Kerne entstehen, die nahe dem $^{56}\text{Eisen}$ Peak der höchsten Bindungsenergie liegen, z.B. $^{54}\text{Eisen}$, $^{56}\text{Eisen}$ oder $^{56}\text{Nickel}$. Man sagt ein Eisenkern entsteht. Alle weiteren Reaktionen, die noch schwerere Kerne entstehen lassen, sind endotherm. Mit jedem Schritt, also nach jedem einzelnen Brennvorgang wird der Sternkern durch Kontraktion heißer und dichter. Die verschiedenen Brennvorgänge laufen auch von mal zu mal schneller ab, da der Stern immer weniger Energie aus den Elementsynthesen gewinnen kann. Das Wasserstoffbrennen dauert für einen Stern mit circa 22 Sonnenmassen ungefähr 7 Millionen Jahre, während das Silizium an nur noch einem Tag verbrannt wird! Diese Zahlen variieren sehr stark für unterschiedliche Sternmassen. Die Lebensdauer τ eines Sterns ist proportional zu $M^{-2,5}$. Das bedeutet, dass massereichere Sterne diesen Zyklus schneller durchlaufen und eine deutlich kürzere Lebensdauer aufweisen.

Schematischer Aufbau des Sterns:

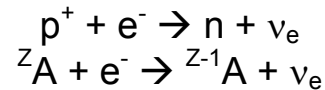


2.2. Kerninstabilität und Kollaps

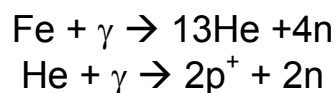
Der stellare Eisenkern, der durch Siliziumschalenbrennen an seiner Oberfläche kontinuierlich weiter wächst, wird zunächst noch durch den steigenden quantenmechanischen Entartungsdruck der Elektronen und den thermischen Druck von Atomkernen im hydrostatischen Gleichgewicht gehalten.

Inzwischen herrschen aber extremste Bedingungen im stellaren Kern. Er besitzt nur noch einen Durchmesser von 3000 km, bei einer Dichte von 10^{10} g/cm^3 und einer Temperatur von fast 10^{10} Kelvin! (Dabei entspricht die mittlere kinetische Energie der Kerne von 1 eV einer Temperatur von etwa 10^4 Kelvin). Bei solch hohen Temperaturen und Dichten setzen endotherme Kernprozesse ein, die den Core des Sterns destabilisieren.

Zum einen ist das der Elektroneneinfang. Elektronen werden von Atomkernen und Protonen absorbiert, wobei Neutronen und Neutrinos entstehen. Da die Neutrinos den Stern anfangs ungehindert verlassen, geht dem Core fortwährend Energie verloren.



Hinzu kommen weitere Energieverluste durch Photodesintegration, bei der energiereiche Photonen einen kleinen Teil der Eisenkerne zerstören, was zur Bildung von Heliumkernen führt. Diese Heliumkerne können ebenfalls von den Photonen aufgebrochen werden und einzelne Protonen und Neutronen sind das Resultat. Auch dieser Vorgang ist, wie oben bereits erwähnt, extrem endotherm.



Beide Prozesse, der Elektroneneinfang und die Photodesintegration, schwächen den Anstieg des Drucks mit zunehmender Dichte im Sterninneren deutlich ab. Bis jetzt war es hauptsächlich der Entartungsdruck der Elektronen, der dem gewaltigen Gravitationsdruck entgegen gehalten hat. Durch den Elektroneneinfang aber ist die Zahl der freien Elektronen so stark gesunken, dass damit auch der Entartungsdruck den Kollaps nicht mehr aufhalten kann. Die Folge ist eine dramatische Implosion.

Innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde stürzt der Sternkern unter seiner eigenen Schwerkraft in sich zusammen. Das Innere des Kerns kollabiert homolog, d.h. die Einfallgeschwindigkeit ist proportional zum Radius. Ab dem Radius aber, wo die lokale Schallgeschwindigkeit überschritten wird, kann der Kollaps nicht mehr homolog ablaufen, was dazu führt, dass sich der innere Kern von dem mit Überschallgeschwindigkeit einfallenden äußeren Kern löst und dieser im freien Fall zurückgelassen wird. Im äußeren Kern können Geschwindigkeiten von $1/4c$ auftreten.

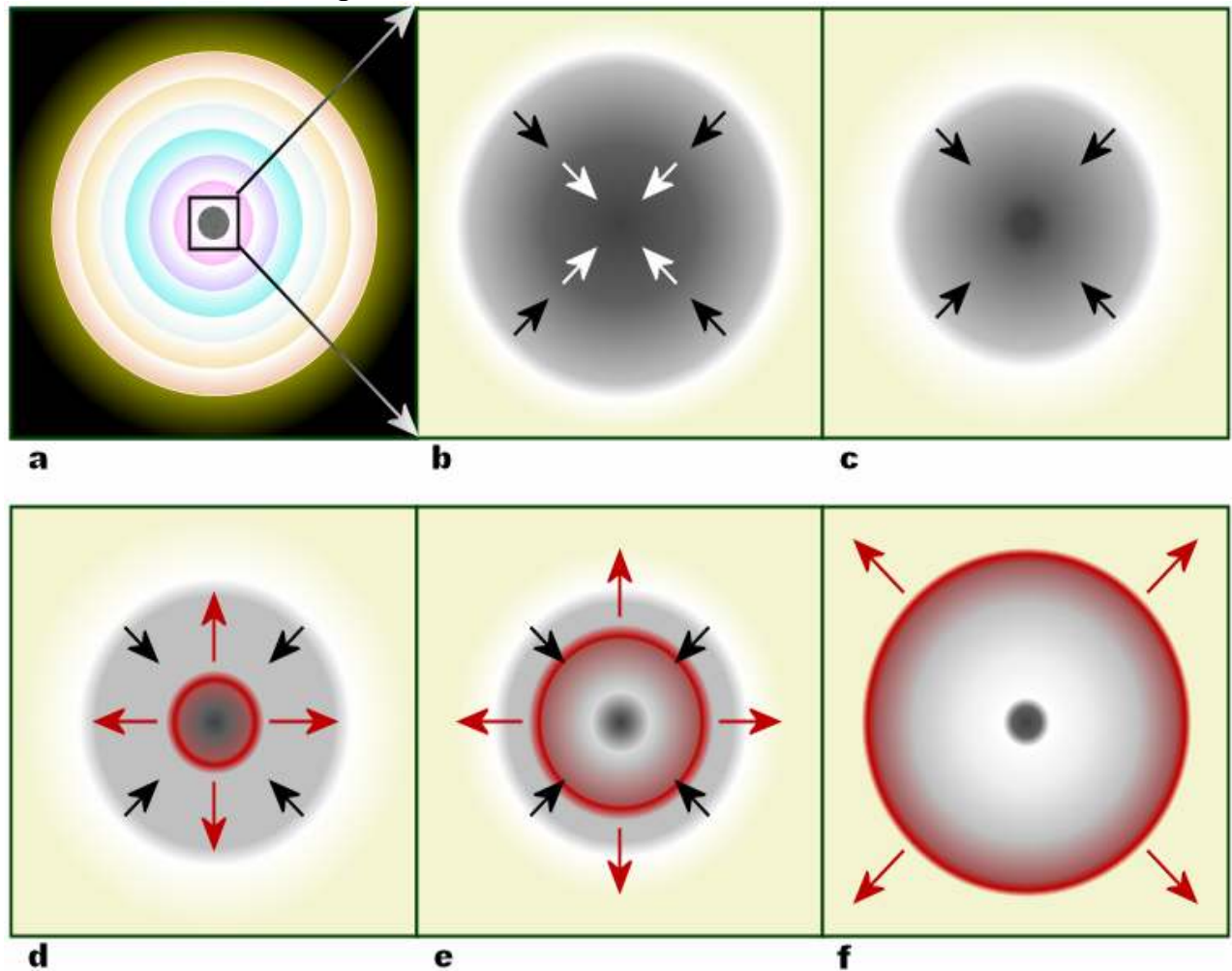
Da sich mechanische Information aber nur mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzt, wissen die äußeren Schalen erst viel später was im Inneren Fatales abläuft!

2.3. Schockwelle und Rolle der Neutrinos bei der Explosion

Der homologe Kollaps des inneren Kerns erfolgt so lange bis Dichten erreicht werden, die annähernd so groß wie das Dreifache von Atomkerndichten sind. An diesem Punkt wird die normalerweise

anziehende starke Kernkraft auf einmal abstoßend, was eine Konsequenz des Pauli-Prinzips angewendet auf Neutronen ist. Die Materie wird somit inkompressibel und zurück nach außen geschleudert. Sie stößt dabei mit der weiterhin einfallenden Materie zusammen und es kommt zur Bildung einer Druckwelle, die durch den Eisenkern nach außen wandert.

Grafik zur Entstehung der Druckwelle:



Auf diese Weise verwandelt sich die anfängliche Implosion in eine Explosion.

Lange Zeit glaubten Astrophysiker, dass diese Stoßfront genügend Schwung hätte um nach außen zu rasen und den Stern in einer Supernovaexplosion zu zerreißen.

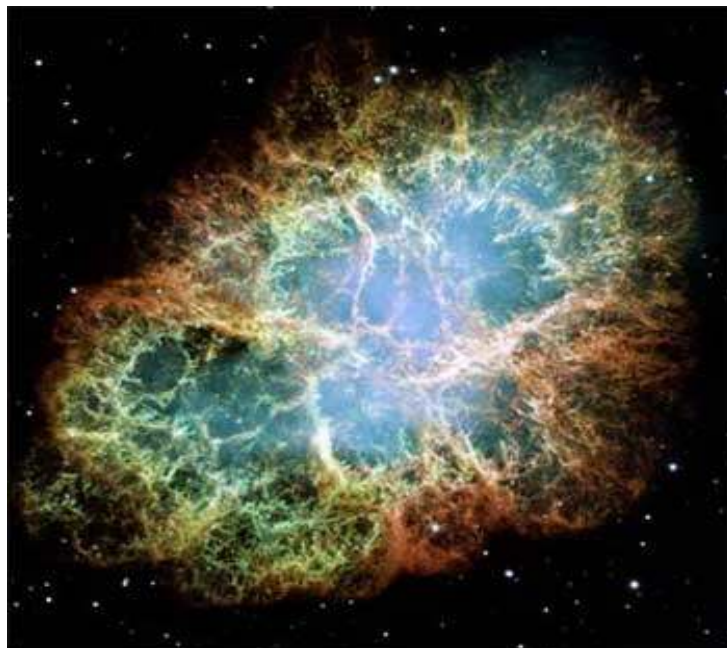
Neue Computersimulationen haben aber gezeigt, dass der Stoß durch Energieverluste so stark geschwächt wird, dass er nicht einmal den Rand des Eisenkerns erreicht. Wieder sind es die Neutrinoverluste und die Photodesintegration, die der Druckwelle die nötige Energie entziehen und somit würde der Stoß bereits nach 100km stehen bleiben. Was

danach genau abläuft und wie es letztlich zur Explosion des Sterns kommt ist noch nicht endgültig verstanden. Viele Astrophysiker sind der Meinung, dass die Neutrinos der Grund für die Explosion sind. Bei den gewaltigen Dichten und Temperaturen werden die Neutrinos in riesiger Zahl gebildet. Rund 10^{58} Neutrinos werden abgestrahlt und tragen so die gravitative Bindungsenergie fort, die beim Kollaps des stellaren Kerns freigesetzt wird. Diese Energie ist 100 mal größer als die Supernovaexplosion, oder anders betrachtet, würde nur 1% der in Neutrinos abgegebenen gesamten Energie im sterbenden Stern noch einmal absorbiert, könnte dies die beobachtete Explosion erklären und die stehen gebliebene Schockwelle wiederbeleben. Diese Theorie ist inzwischen gut durch Simulationen gestützt.

2.4. Supernovaüberreste

Eine SN Explosion kann zwei unterschiedliche, exotische Objekte im Weltall hinterlassen.

Bei Sternen mit einer Anfangsmasse kleiner als 25 Sonnenmassen stabilisiert sich nach der Explosion ein Neutronenstern im Zentrum. Falls aber die Sternenmasse zu groß war, kann auch der Druck der Neutronenentartung dem Gravitationsdruck nicht entgegenhalten und es entsteht ein Schwarzes Loch. Zudem hinterlässt eine SN ein nebelartiges Gebilde mit Elementrückständen aus dem Kern und den Schalen des toten Sterns. Ein Beispiel dafür ist der Krebsnebel (Foto), in dessen Mitte sich der Krebspulsar befindet.



3. s-, r- und p-Prozess

Der s-Prozess ist ein langsamer Neutroneneinfang, bei dem das entstandene Element zuerst radioaktiv zerfällt, bevor es weitere Neutronen einfängt. Die typische Zeitskala für diesen Vorgang sind 10^4 Jahre und der Prozess läuft während dem Heliumschalenbrennen im Lebenszyklus eines Sternes ab.

Der r-Prozess ist ein schneller Neutroneneinfang, bei dem ein Atom im Gegensatz zum s-Prozess mehrere Neutronen einfängt, bevor es zerfällt. Die Zeitspanne beträgt hier nur 10^4 Sekunden. Man vermutet, dass diese Form der Elementsynthese in Supernovaexplosionen ablaufen kann, da man extrem hohe Neutronendichten von etwa 10^{20} cm^{-3} benötigt.

Der p-Prozess dagegen ist ein Protoneneinfang. Es müssen hierfür Temperaturen um 1 Milliarde Kelvin herrschen, weshalb man davon ausgeht, dass er während Typ II SN Explosionen in der Sauerstoff-Neonschicht eines Sternes ablaufen könnte.

Dies zeigt die Wichtigkeit der SNe an der Elemententstehung im Universum.

4. Die Supernova 1987A

Die Supernova von 1987 war die hellste SN seit Keplers SN im Jahre 1604 und brachte eine Unmenge an neuen Daten und Erkenntnissen. Es war zum ersten Mal möglich eine Supernova von der Explosion bis in die Spätphasen der Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium zu untersuchen.

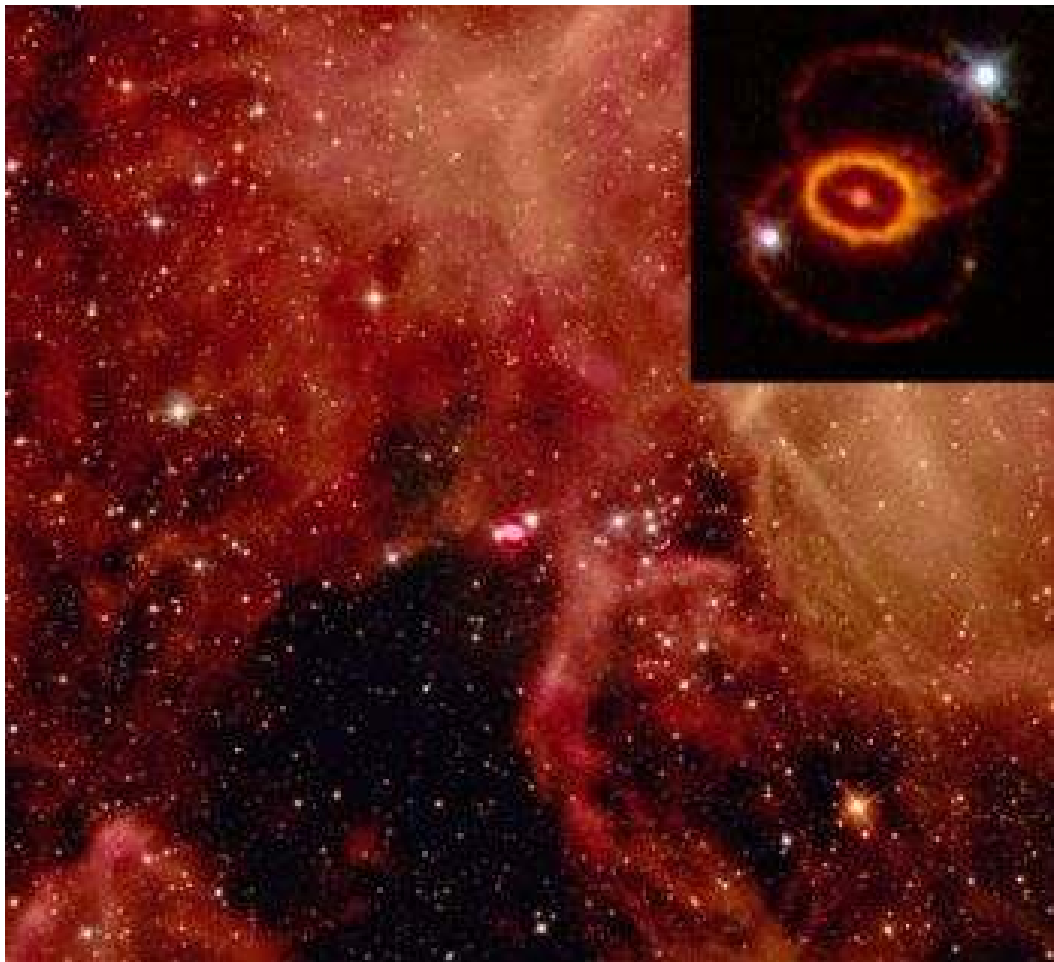
Die SN 1987A (A weil sie die erste SN in diesem Jahr war) wurde am 23. Februar in der etwa 150.000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke beobachtet. Sie war eine äußerst ungewöhnliche SN, deren Lichtkurve sich deutlich von bisher beobachteten unterscheidet. Da sie Wasserstofflinien im Spektrum aufweist, wurde sie als Typ II klassifiziert. Der Progenitorstern Sanduleak sorgte ebenfalls für Verwunderung unter den Astrophysikern, da es sich um einen Blauen Überriesen mit 20 Sonnenmassen handelt. Davor ging man davon aus, dass nur Rote Riesen explodieren können.

Das Hubble Space Telescope konnte 3 Ringe um SN 1987A aufnehmen. (siehe Foto unten)

Der innerste Ring hat einen Durchmesser von 0,42pc und liegt in der Explosionsebene. Er leuchtet mit sichtbarem Licht und bezüglich seines Ursprungs vermutet man, dass das Material bereits vor der Explosion von einem stellaren Wind ausgestoßen wurde.

Über die Entstehung der zwei äußeren Ringe, die vor und hinter dem Supernovazentrum liegen, ist außer Spekulationen noch nichts Genaues bekannt.

In der Mitte wird als Überrest der SN ein Pulsar vermutet, dessen Fund eine großartige Entdeckung wäre, da es noch nie zuvor möglich war, Pulsar und SN des gleichen Ereignisses direkt zu beobachten.



Vier Detektoren weltweit behaupten Neutrinos dieser SN gemessen zu haben, allerdings wird eines dieser Experimente als statistische Schwankung gedeutet, da es zeitlich nicht zu den anderen passt. Aus den Neutrinomessungen kann man abschätzen, dass insgesamt $8 \cdot 10^{52}$ erg Energie an Neutrinos freigesetzt wurde. Es konnte damit erstmals bewiesen werden, dass in der Tat mehr als 90% der gesamten freiwerdenden Energie von Neutrinos davongetragen wird und die optische Erscheinung nur einen winzigen Bruchteil des Phänomens ausmacht.

5. Literatur

[1] Dale A. Ostlie, Bradley W. Carroll: Modern Stellar Astrophysics. 1996

[2] Stan Woosley, Thomas Lanka: The Physics Of Core-Collapse Supernovae

[3] Sterne und Weltraum, Ausgabe 1/2007

[4] H.V. Klapdor-Kleingrothaus/K. Zuber: Teilchenastrophysik, Teubner Verl. 1997