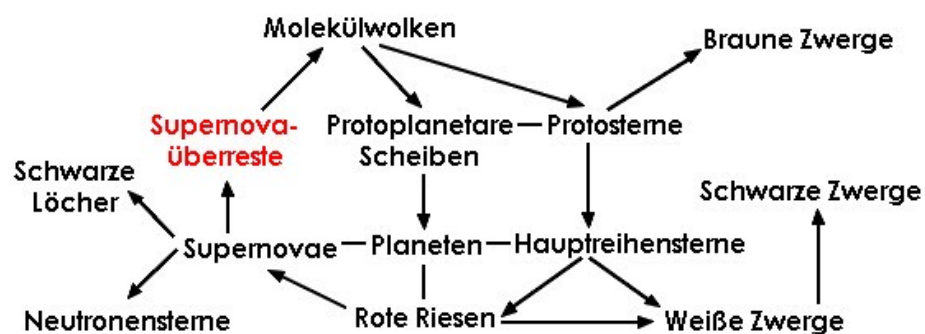


# Materiekreislauf

## Supernovaüberreste

Grundlagen aus dem ersten Semester:

08-Sternarten und Sternentwicklung (Seite 14 - 15)



Als Supernovaüberrest bezeichnet man jene Teile der Supernova, die sich nicht zu einem Endstadium (Weißer Zwerg, Neutronenstern, Schwarzes Loch) verdichten, sondern durch die Energie der Supernova ins umliegende Universum geschleudert werden.

## 1 Entwicklung

Ein Supernovaüberrest entsteht bei einer Supernova vom Typ II. Diese Supernova kommt dadurch zustande, dass der rote Riese sein gesamtes Material zu Eisen fusioniert hat und die Kraft der Kernfusion, die den Stern aufgebläht hat, wegfällt. In weiterer Folge lässt die Gravitation den roten Riesen in sich zusammenfallen.

Dabei werden enorme Mengen an Energie frei: Allein die Energie der Neutronos beträgt  $10^{46}$  J. Die gesamte kinetische Energie beträgt  $10^{44}$  J, die gesamte Gravitationsenergie sogar  $10^{47}$  J.

Diese Implosion beginnt in der Mitte des Sterns, man spricht dabei auch von „Kernkollaps“. Dabei stoßen natürlich auch viele Atomkerne zusammen. Durch den Rückprall dieser Elektronen kommt es zu einer Stoßwelle nach außen, die weitere Atome mitzieht. Diese Atome können der Gravitation der Supernova entkommen, man spricht dabei von Supernovaüberresten.

Auf dem Weg nach draußen kann es zu chemischen Reaktionen mit der Hülle des Roten Riesen („Photodisintegration“) oder mit dem thermischen Gas („delayed ex-

plosions“) kommen.

Die Supernovaüberreste werden mit einer Geschwindigkeit von 1.000km/s aus der Supernova geschleudert, das ist die 3000-fache Schallgeschwindigkeit. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit, wird viel interstellares Medium mitgerissen, in ein Gebiet in dem sich weiteres interstellares Medium befindet, das ebenfalls mitgerissen wird. So bildet sich ein Ring aus immer stärker verdichteten interstellarem Medium. Man bezeichnet diesen Ring als „Schockwelle“ oder (weil gerade die Neutrinos am optisch dicksten sind) als „Neutrinosphäre“

Die Teilchen werden von Magnetfeldern, die an interstellaren Wolken entstehen, abgelenkt. Dabei entsteht Bremsstrahlung, durch die man den Supernovaüberrest beobachten kann.

In den Schockwellen setzt bei ionisiertem Gas eine Rekombination ein, weil durch die Verdichtung ein Zusammentreffen zwischen den Ionen und freien Elektronen wahrscheinlicher wird. Die Energie, mit der das passiert, ist annähernd konstant.

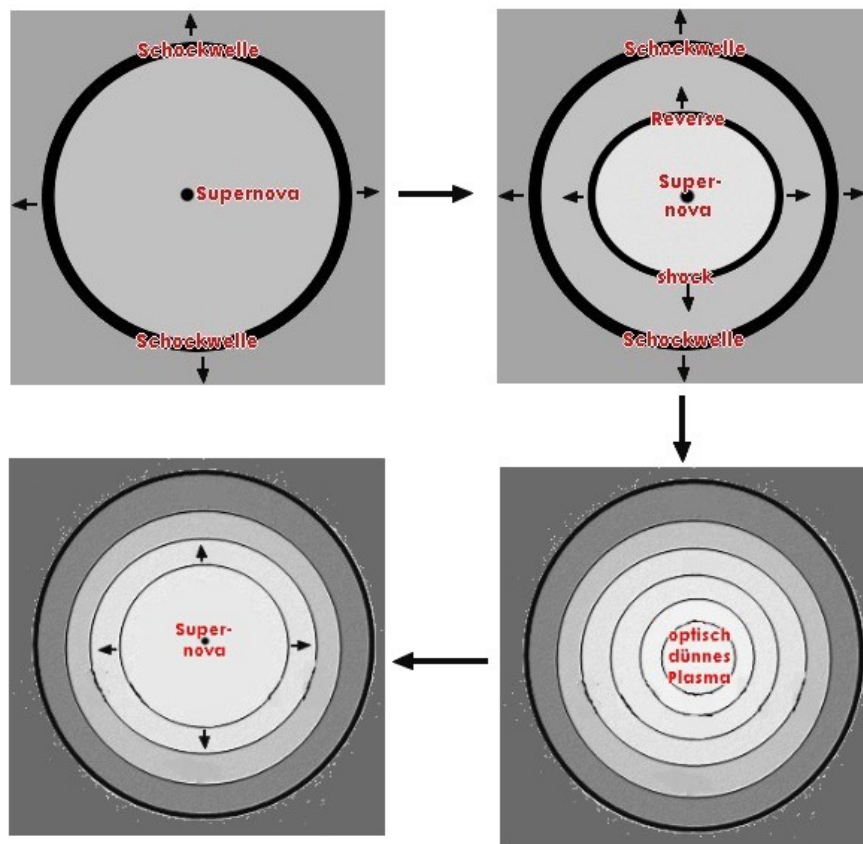
Wenn das Gas neutral ist, lässt es sich nicht mehr so stark zusammendrücken. Infolgedessen wird ein Teil der Schockwelle langsamer. Man bezeichnet diesen Teil als „Reverse Shock“ (Auf deutsch würde man das mit rückwärtsgerandter Stoßwelle übersetzen), weil sie im Bezugssystem der Stoßwelle rückwärts läuft. Insgesamt entfernt sich aber auch der Reverse Shock von der Supernova.

Durch die Reibung beim Abbremsen des Reverse Shock erwärmen sich die Teilchen auf 10-Millionen Kelvin. Da sich das Gebiet jedoch ausdehnt und keine weitere Wärme erzeugt wird, verteilt sich die Wärme so lange, bis sie weniger als 5-Millionen Kelvin beträgt. Ab dieser Temperatur wird Energie abgestrahlt und der Druck geht zurück. Dadurch werden viele Gebiete noch kälter.

Auch der Reverse Shock verdichtet übriggebliebenes interstellares Medium und es bildet sich ein weiterer Reverse Shock, der wiederum ISM verdichtet. Durch mehrmalige Wiederholung dieses Vorganges entsteht eine Schalenstruktur im Supernovaüberrest: Es gibt Ringe mit stark verdichtetem interstellarem Medium und dazwischen Gebiete mit stark ausgedünntem interstellarem Medium (weil dort die meisten Teilchen von einer Schockwelle mitgerissen wurden).

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften, befinden sich unterschiedliche Materialien eher in langsameren oder eher in schnelleren Schockwellen. Dadurch dominieren in den unterschiedlichen Schalen unterschiedliche Elemente.

Im Inneren des Supernovaüberrests bleibt hauptsächlich optisch dünnes Plasma über. In den Molekülen dieses Plasmas finden viele frei-gebunden- und gebunden-gebunden-Übergänge statt. Mit der Zeit formt sich aus manchen Molekülen eine Schale, die vom dünneren Gas nach außen getrieben wird und dabei die durch die Schockwellen entstandenen Schalen zerstört. Wenn auch die äußerste Schale zerfällt, verteilen sich die Überreste im interstellaren Medium.



In dieser Grafik ist die Entwicklung eines Supernovaüberrests graphisch dargestellt. Dabei sind die dichteren Gebiete dunkler und die weniger dichten Gebiete heller eingezeichnet.

## Zeitskalen

Bei einer Supernovaexplosion gibt es zwei wichtige Zeitskalen:

Die Sweep-up-Zeit gibt an, wie lange sich der Supernovaüberrest ausdehnt. Diese dauert bei einer typischen Supernovaexplosion 200 Jahre.

$$t_{sw}[\text{Jahre}] = \frac{210 M_e}{M_\odot^{5/6} n_0^{1/3} E_{SN}^{1/2}}$$

Die Kühlzeit gibt an, wie lange die radiative Kühlung dauert. Bei einer typischen Supernova sind das 10.000 Jahre

$$t_{cool}[\text{Jahre}] = \frac{14000 E_{SN}^{2/11}}{n_0^{7/11}}$$

## 2 Fermibeschleunigung

Enrico Fermi hat es 1949 geschafft, das Verhalten der Teilchen in einem Supernovaüberrest zu beschreiben.

### Fermibeschleunigung 1. Ordnung

Die Fermibeschleunigung erster Ordnung beschreibt die Beschleunigung des interstellaren Mediums durch die Schockwellen. Diese führen dazu, dass die meisten Teilchen im Supernovaüberrest nach außen gerissen werden. Durch Ablenkung einzelner Teilchen kommt es innerhalb der Schockwelle zu einigen Zusammenstößen, die jedoch nichts an der Bewegung der gesamten Schockwelle ändern.

Die Energie der einzelnen Teilchen nimmt mit jedem Zusammenstoß zu, weil die Schockwelle jedes Mal einen Teil seiner Energie an das Teilchen überträgt. Es gilt

$$E = E_0 \beta^k \quad (2.1)$$

wobei  $E_0$  die Energie des Teilchens vor dem ersten Zusammenprall mit der Schockwelle ist. Die Konstante  $\beta$  hängt von der Energie der Schockwelle ab.  $k$  gibt die Anzahl der Zusammenstöße an. Diese nimmt mit zunehmender Dichte zu

$$k = \frac{3r}{r-1} \quad (2.2)$$

In dieser Formel ist  $r$  das Kompressionsverhältnis. Dieses gibt an, wie stark die Teilchen zusammengedrückt werden. Diese Größe ist auch innerhalb der Stoßwelle nicht konstant.

Im Durchschnitt besitzt die schnellste Schockwelle eines Supernovaüberrests eine Geschwindigkeit von 1.000km/s.

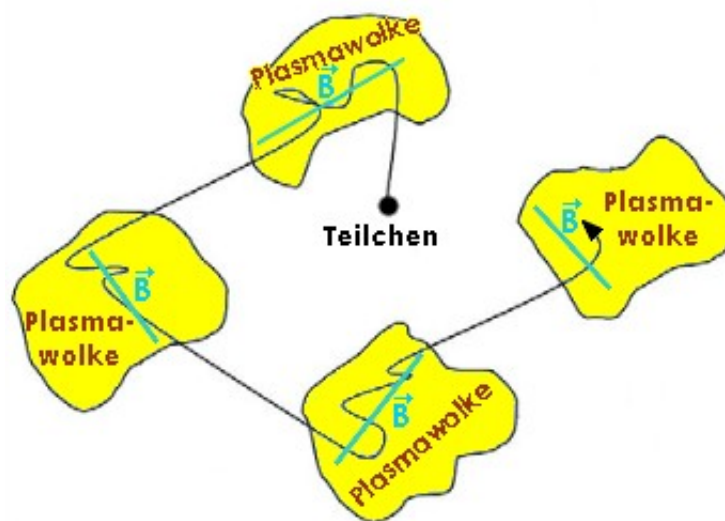
### Fermibeschleunigung 2. Ordnung

Nicht alle Teilchen werden durch die Schockwellen nach außen transportiert, weil manche Teilchen zufälligerweise die Schockwelle durchqueren, ohne mit einem der Teilchen zu kollidieren. Der Fermibeschleunigung zweiter Ordnung beschreibt, wie diese Teilchen durch die Magnetfelder in den Plasmawolken abgelenkt werden. Dabei verkleinert sich der Pitchwinkel, das ist der Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung der Teilchen und der Magnetfeldlinien. Deshalb bezeichnet man diese Ablenkung auch als „Pitchwinkelstreuung“.

Die Teilchen werden vom Magnetfeld angezogen, was dazu führt, dass sie sich der Magnetfeldlinie nähern. Direkt auf die Magnetfeldlinie kommen sie dabei nicht, weil die Teilchen zu träge sind, um den Richtungsänderungen sofort zu folgen. Das ist so ähnlich wie bei den Planeten, die zwar gravitativ von der Sonne angezogen werden, aber zu träge sind um auf sie zu fallen.

Die Teilchen kreisen um die Magnetfeldlinie. Den Abstand, den sie dabei einnehmen, nennt man Gyrationradius. Er ist stets ungefähr so groß wie die Wellenlänge der Magnetfeldlinie. Gleichzeitig führt die Trägheit dazu, dass sich das Teilchen weiterhin vorwärts bewegt. Insgesamt entsteht so eine Spiralbewegung entlang der Magnetfeldlinie.

Nachdem das Teilchen das Magnetfeld verlassen hat, kommt es in den Einflussbereich des nächsten Magnetfeldes und die Bahn des Teilchens wird erneut abgelenkt. Auf diese Art und Weise vollführt das Teilchen eine Vielzahl von Richtungsänderungen.



In dieser Grafik ist die typische Bewegung eines Teilchens laut dem Fermiprozess 2. Ordnung dargestellt. Auf der Bahn befinden sich magnetische Plasmawolken (in der Grafik gelb dargestellt) mit Magnetfeldlinien (in der Grafik türkis dargestellt). Man erkennt die Richtungsänderungen die durch die Plasmawolken ausgelöst werden und das Kreisen des Teilchens um die Magnetfeldlinien der einzelnen Wolken.

### 3 Adiabatenindex

Die Beschleunigung der Teilchen im Supernovaüberrest führt dazu, dass sich dieser aufheizt. Der Adiabatenindex gibt die Stärke dieses Vorgangs an. Um zu verstehen, was der Adiabatenindex aussagt, muss man den Begriff der Wärmekapazität verstehen.

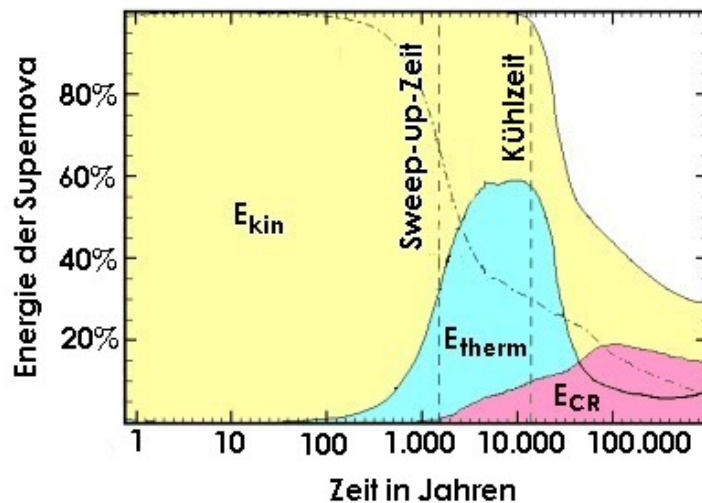
Die Wärmekapazität ist das Verhältnis zwischen der Temperaturerhöhung und der zugeführten Wärme. Beispielsweise hat Eisen eine höhere Wärmekapazität als Holz. Das merkt man zum Beispiel an heißen Sommertagen, an denen man einen Gegenstand aus Eisen nicht angreifen kann ohne sich die Finger zu verbrennen, während das bei einem Gegenstand aus Holz problemlos möglich ist. Neben dem Material ist die Wärmekapazität auch vom Druck und vom Volumen abhängig.

Um die Wärmekapazität von unterschiedlichen Gasen zu vergleichen, führt man den sogenannten „Adiabatenindex“ ein: Das ist die Wärmekapazität bei einem konstanten Druck und einem konstanten Volumen.

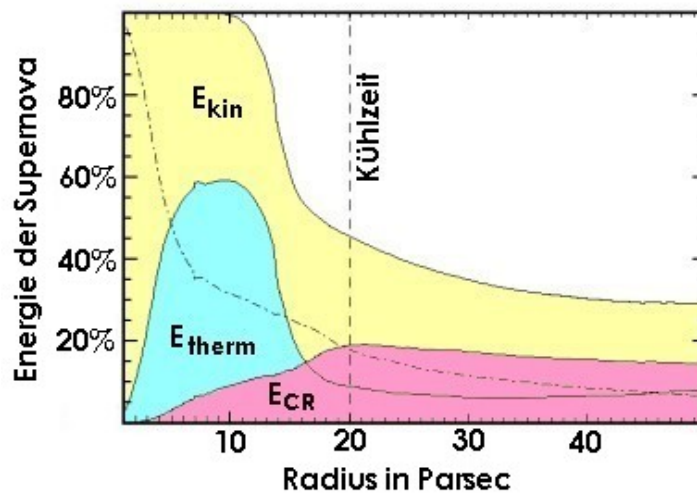
Wenn man den Adiabatenindex eines Supernovaüberrests berechnet, erhält man einen Wert zwischen  $\frac{4}{3}$  und  $\frac{5}{3}$ . Daraus kann man auf eine Temperaturzunahme zwischen 1 Million und 10 Millionen Grad schließen. Das bedeutet, dass die Stoßwellen so heiß sind, dass sie auch kosmische Strahlung erzeugen.

## Energie

Bei einer Supernovaexplosion wird eine Energie von durchschnittlich  $10^{51} \text{ erg}$  bei einer Anfangsdichte von einem Teilchen pro Kubikzentimeter frei. Diese setzt sich aus kinetischer Energie, thermischer Energie und Energie der kosmischen Strahlen zusammen.



In dieser Grafik ist die Energieverteilung eines durchschnittlichen Supernovaüberrests eingezeichnet. Auf der x-Achse ist die Zeit aufgetragen, wobei der Ursprung so gewählt wurde, dass die Supernova im Jahr 0 explodiert. Auf der y-Achse ist der Anteil der Energie an der Supernova eingezeichnet. In der Grafik ist die kinetische Energie gelb, die thermische Energie blau und die Energie der kosmischen Strahlung rot eingezeichnet. Am rechten Ende der Graphik ist nicht mehr das gesamte Diagramm eingefärbt, weil dort durch die radiative Kühlung Energie verloren geht und deshalb nicht mehr die gesamte Energie der Supernova vorhanden ist.



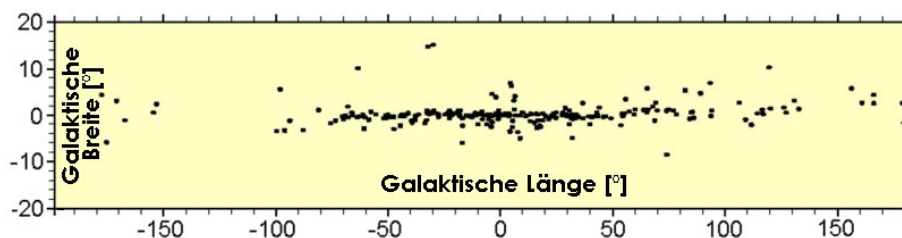
In dieser Grafik ist die Energieverteilung des Supernovaüberrests im Vergleich zur Entfernung von der Supernova aufgetragen. Da die Geschwindigkeit des Supernovaüberrests konstant ist, entspricht das der Zeitauftragung. Im Unterschied zur anderen Grafik ist die Zeit jedoch nicht logarithmisch aufgetragen. Bei der gestrichelten Linie beginnt die Kühlzeit, also die Zeit, bei der die Schockwelle durch Rekombination auskühlt.

## 4 Staub

Beim Auswurf des Materials aus der Supernova bilden viele Moleküle Staubeilchen. Durch Kollision mit kleineren Staubeilchen, Ionen und schnellen Elektronen werden die Staubeilchen wieder zerkleinert, bis sie schließlich überhaupt nicht mehr vorhanden sind. Den durch die Stoßwellen aufgeheizten Staub kann man daran erkennen, dass er im infraroten Bereich strahlt. Die Staubmasse in einer Stoßwelle beträgt im Schnitt 0,03 Sonnenmassen.

## 5 Beispiele

Es gibt zahlreiche Beispiele für Supernovaüberreste, 217 sind allein in unserer Milchstraße bekannt. Dort sammeln sie sich vor allem im Zentrum der galaktischen Ebene an.



In dieser Grafik ist die Lage der 47 Supernovaüberreste unserer Galaxie eingezeichnet, bei denen man die Entfernung festgestellt hat. Supernovaüberreste mit kleinen Radien oder hoher Hintergrundhelligkeit (zum Beispiel im galaktischen Zentrum) sind nicht messbar. Deshalb vermutet man, dass sich gerade dort noch mehr Supernovaüberreste befinden, als man entdeckt hat.

Auch unser Sonnensystem liegt in einem Supernovaüberrest, der sogenannten „Lokalen Blase“. Diese ist jedoch so dünn, dass wir kaum etwas davon mitbekommen: Auf einen Kubikzentimeter kommen lediglich 0,05 - 0,07 Teilchen.

Bei den Supernovaüberresten, deren Entfernung man kennt, kann man aus dem scheinbaren Radius und der Entfernung auf den absoluten Radius schließen. Bei diesen Supernovaüberresten wurde eine leichte Korrelation zwischen Ausdehnung und Flächenhelligkeit gemessen, die aber viel zu schwach ist, um daraus auf die Ausdehnung oder Entfernung anderer Supernovaüberreste zu schließen.

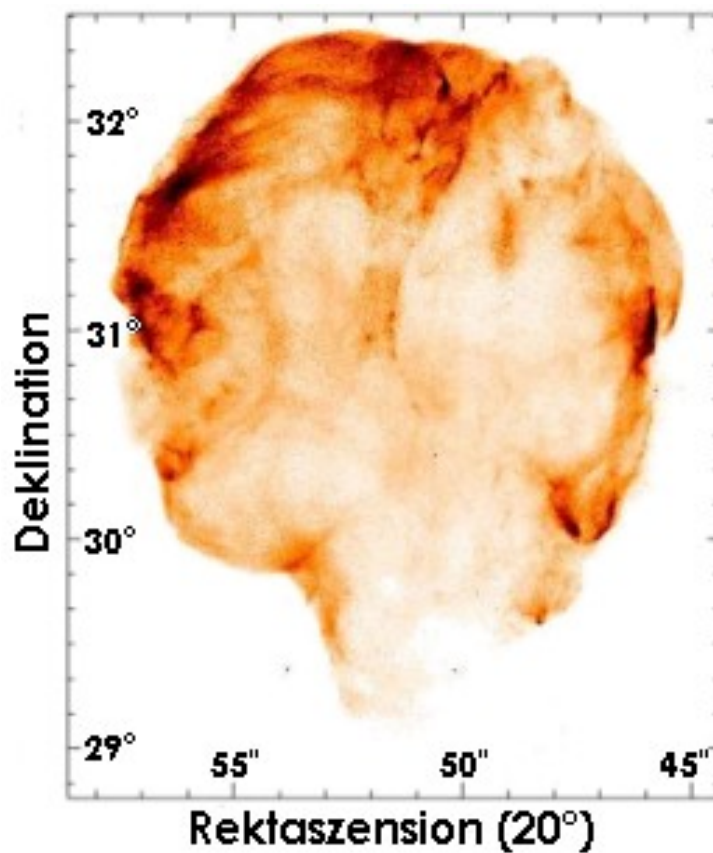
### **Cygnus Loop**

Cygnus Loop ist ein Supernovaüberrest, der von uns ungefähr 440pc entfernt ist. Die zugehörige Supernova ist vor 2000 Jahren ausgebrochen. Mit Hilfe des Hubble-Space-Teleskops und des Teleskops POSS-I wurde über einen Beobachtungszeitraum von 44 Jahren eine Expansionsgeschwindigkeit von durchschnittlich 170km/s gemessen. Inzwischen findet am Rand bereits die Kühlphase statt.

Das besondere an diesem Supernovaüberrest ist, dass er sich nicht ins homogene interstellare Medium ausbreitet, sondern in einen Wind, der von einem Vorläuferstern erzeugt wurde. Dadurch ist die Ausbreitung nicht in alle Richtungen gleich stark und gleich schnell, sondern der Supernovaüberrest dehnt sich besonders stark in die Richtung aus, in der sich das wenigste interstellare Medium befindet.

Da sich an unterschiedlichen Stellen unterschiedliche ISM-Wolken befinden, die auf unterschiedliche Art mit dem Supernovaüberrest wechselwirken und diesen unterschiedlich schnell und stark kühlen, besitzt der Supernovaüberrest eine komplexe Expansionsdynamik mit vielen fadenförmigen Strukturen.



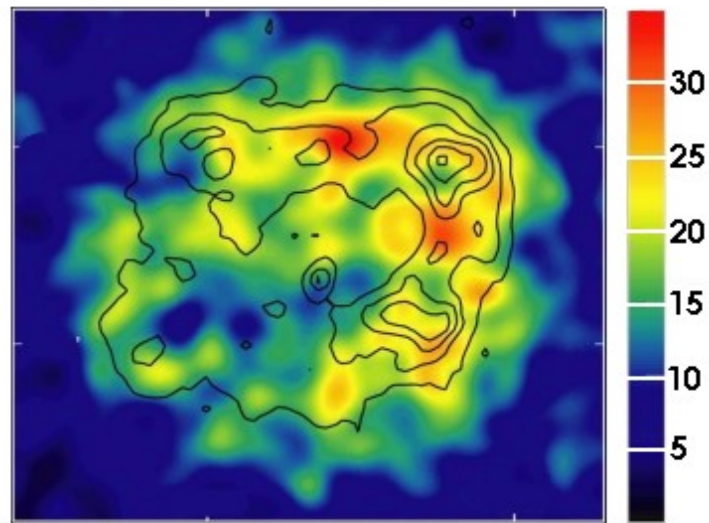


In dieser Grafik ist der Aufbau des Cygnus Loop dargestellt, wobei die dunkelsten Gebiete besonders dichte und die hellsten besonders dünne Gebiete sind. Man erkennt, dass der Supernovaüberrest am südlichen Ende besonders dünn ist. Das liegt daran, dass dort besonders viel Material war und sich der Supernovaüberrest daher nicht so schnell in diese Richtung ausbreiten konnte.

Da das interstellare Medium in diesem Bereich dichter als der Supernovaüberrest ist, hat dieses auch eine höhere Gravitation und das - meist heiße - Gas wird aus dem Supernovaüberrest ins umliegende interstellare Medium gesaugt.

### G347,3 - 0,5

Dieser Supernovaüberrest ist 1kpc von uns entfernt und hat eine Dichte von ungefähr 100 Teilchen pro  $\text{cm}^3$ . Er wurde durch die Gammastrahlung, die zu uns gekommen ist, gemessen.



In dieser Grafik ist aufgetragen, wie viele Teilchen uns von welchem Gebiet innerhalb von  $G347,3 - 0,5$  erreichen (siehe Legende rechts neben der Grafik). Das entspricht nicht genau den Regionen, in denen die Gammastrahlung entsteht, weil die Gammastrahlen durch Wechselwirkung mit interstellaren Wolken abgelenkt wird.

### DEM L71

DEM L71 ist ein Supernovaüberrest in der großen Magellanschen Wolke in einer Entfernung von 50kpc. Die zugehörige Supernova ist vor 4400 Jahren ausgebrochen. Die Staubteilchen in diesem Supernovaüberrest werden jedes Jahr um 3 - 4nm kleiner, sodass sich besonders kleine Staubteilchen ganz auflösen.

### G78,2 + 2,1

Dieser Supernovaüberrest ist in einer Entfernung von 1,8kpc und hat einen Durchmesser von 300pc. Am Himmel nimmt er dadurch  $1^\circ$  ein.