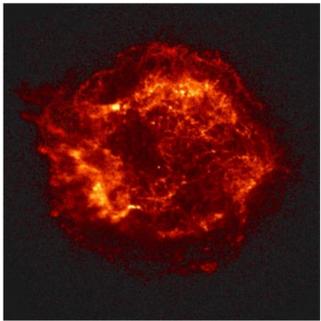


# WIE FUNKTIONIEREN "CORE-COLLAPSE"-SUPERNOVAE ?

## Späte Entwicklungsphasen

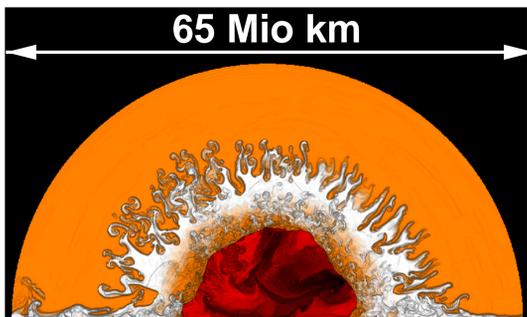
Beobachtungen zeigen, dass die neugebildeten Elemente den Ort der Explosion vorwiegend in Form von Klumpen verlassen. Verantwortlich hierfür sind starke Mischprozesse in den späten Entwicklungsphasen (ab einigen Stunden nach Beginn der Explosion).



Röntgenbild von Cassiopeia A, der Überrest einer Supernova, die um 1680 AD explodiert ist.

Auf der Aufnahme des Satellitenteleskops "CHANDRA" ist heisses Gas mit Temperaturen von ca. 50 Mio Grad sichtbar.

Im Zentrum erkennt man eine punktförmige Quelle, die den entstandenen Neutronenstern zeigt.



65 Mio km

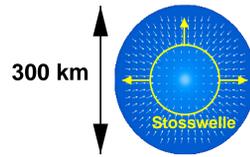
Nach etwa 3 Stunden hat die Stosswelle den Stern längst verlassen. Im dargestellten Gebiet, dessen Ausdehnung etwa der halben Merkurbahn entspricht, werden die neugebildeten Elemente in die äusseren Schichten des Sterns gemischt.

Den hierfür verantwortlichen Mechanismus kann man auch im Labor an der Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlich dichten Flüssigkeiten (z.B. Wasser und Öl) studieren.

## Kollaps des Eisencores und Rückprall

Wenn der innere Kern eines massereichen Sterns, der aus Elementen der Eisengruppe besteht ("Eisencore") den kritischen Wert von ca. 1.4 Sonnenmassen überschreitet, wird dieser instabil und beginnt zu kollabieren. Nach ca. 0.2s werden im Zentrum Dichten erreicht, wie sie in Atomkernen herrschen. Die Eisenkerne lösen sich dabei in ihre Grundbausteine, Protonen und Neutronen auf. Deren stark repulsive Wechselwirkung bewirkt ein plötzliches Abstoppen eines inneren, etwa eine Sonnenmasse umfassenden Bereichs.

An diesem inneren Core prallt die mit bis zu 60000 km/s einfallende Materie ab, eine Stosswelle (eine Art Überschallknall) entsteht und die Implosion wird zur Explosion.



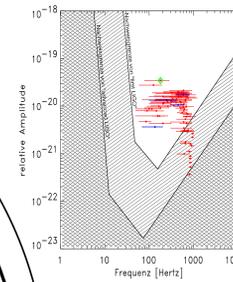
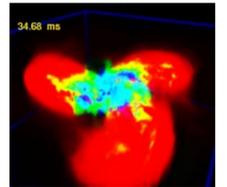
Sekundenbruchteile nach dem Rückprall erkennt man die Stosswelle, die den zur Ruhe gekommenen inneren Core von dem immer noch nachfallenden äusseren Bereich abgrenzt

## Gravitationswellen von rotierenden Eisencores

Gravitationswellen sind periodische Veränderungen in der Raumzeit der Einsteinschen allgemeinen Relativitätstheorie.

Nichtstatische, insbesondere massereiche und kompakte Objekte strahlen Gravitationswellen ab, und zwar umso mehr, je asphärischer sie sind.

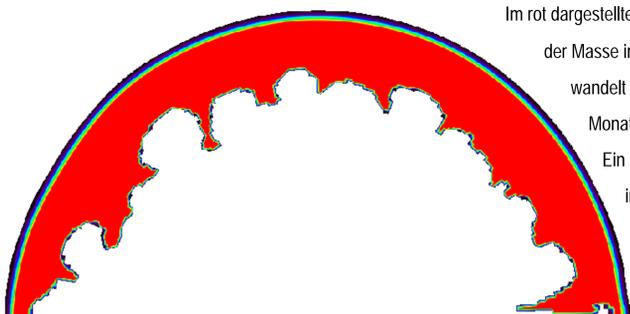
Starke Signale erwartet man von schnell rotierenden Eisencores, die beim Kollaps zunehmend abgeplattete Form annehmen, und sogar in einzelne Klumpen fragmentieren können.



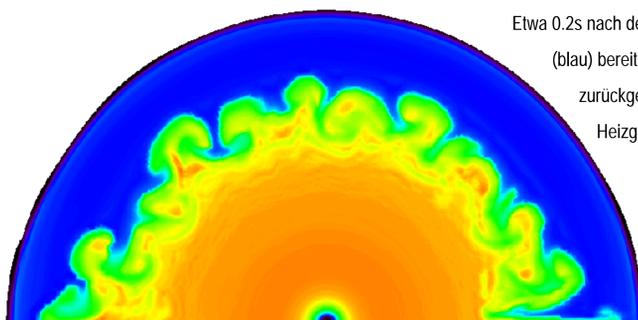
Nachweisgrenzen des Gravitationswellenexperiments "LIGO" mit Signalamplituden aus Computersimulationen von rotierenden Supernovae in unserer Milchstrasse. Von detaillierten Analysen der gemessenen Signale erwartet man sich u.a. Aufschlüsse über die extremen Bedingungen, die im kollabierenden Eisencore herrschen.

## Elementsynthese hinter der Stosswelle

Material, das von der Stosswelle überlaufen wird, erreicht Temperaturen von mehr als 5 Mrd. Grad. Unter diesen Bedingungen werden leichte Elemente wie Sauerstoff und Silizium zu Elementen der Eisengruppe fusioniert. Noch schwerere Elemente wie Blei oder Uran entstehen vermutlich weiter innen, nahe der Oberfläche des jungen Neutronensterns.



Im rot dargestellten Gebiet sind bereits 90% der Masse in radioaktives Nickel umgewandelt worden, das innerhalb einiger Monate in stabiles Eisen zerfällt. Ein Grossteil des Eisenvorkommens in unserem Sonnensystem ist auf diese Weise entstanden.

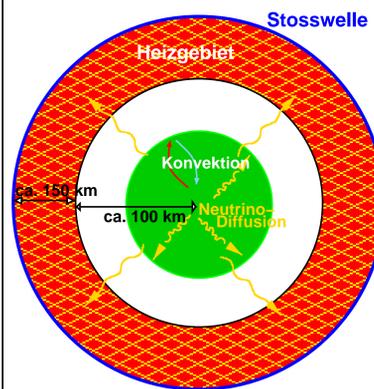


Etwa 0.2s nach dem Rückprall hat die Stosswelle (blau) bereits einen halben Erddurchmesser zurückgelegt. Das darunterliegende Heizgebiet zeigt starke Turbulenz.

6000 km

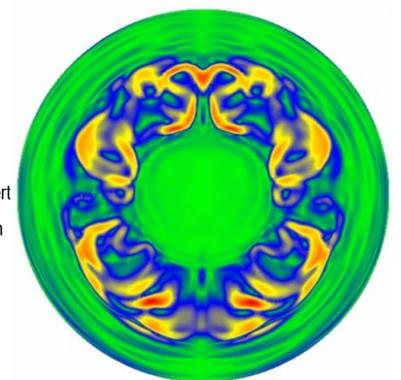
## Stosspropagation und Neutronensternkühlung

Die Stosswelle verliert auf ihrem Weg durch den äusseren Eisenkern so viel Energie, dass sie nur wenige 100 km vom Zentrum entfernt stehen bleibt. Bei ihrer "Wiederbelebung" spielen Neutrinos eine zentrale Rolle.



Im heissen und dichten inneren Core werden Protonen in Neutronen umgewandelt. Dabei entstehen Neutrinos, die den jungen Neutronenstern kühlen. Weiter aussen können die Neutrinos der "stecken-gebliebenen" Stosswelle so viel Energie verleihen, dass diese den gesamten Stern durchlaufen, und die äussere Hülle absprenge kann.

Konvektionsströmungen, wie hier im Bild gezeigt, verstärken die Kühlung, indem sie heisses Material tief aus dem für Neutrinos undurchlässigen Inneren an die Oberfläche des Neutronensterns transportieren, von wo aus die Neutrinos nahezu ungehindert entweichen können. Ein kleiner Bruchteil der Neutrinos tritt im Heizgebiet mit der Sternmaterie in Wechselwirkung und deponiert dort Energie. Von erhöhter Neutrinoleistung aufgrund Konvektion erwartet man folglich verstärktes Heizen unterhalb der Stosswelle.



20 km