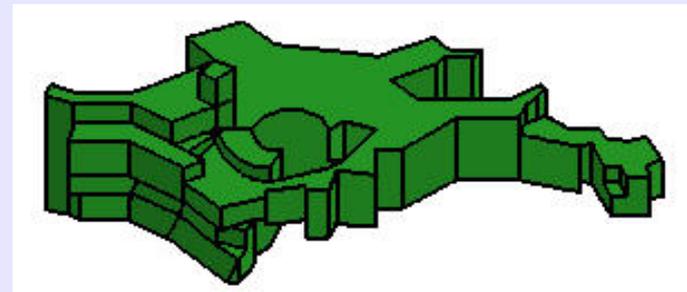


Computersimulationen in der Astrophysik

*Ewald Müller
Max-Planck-Institut
für Astrophysik*



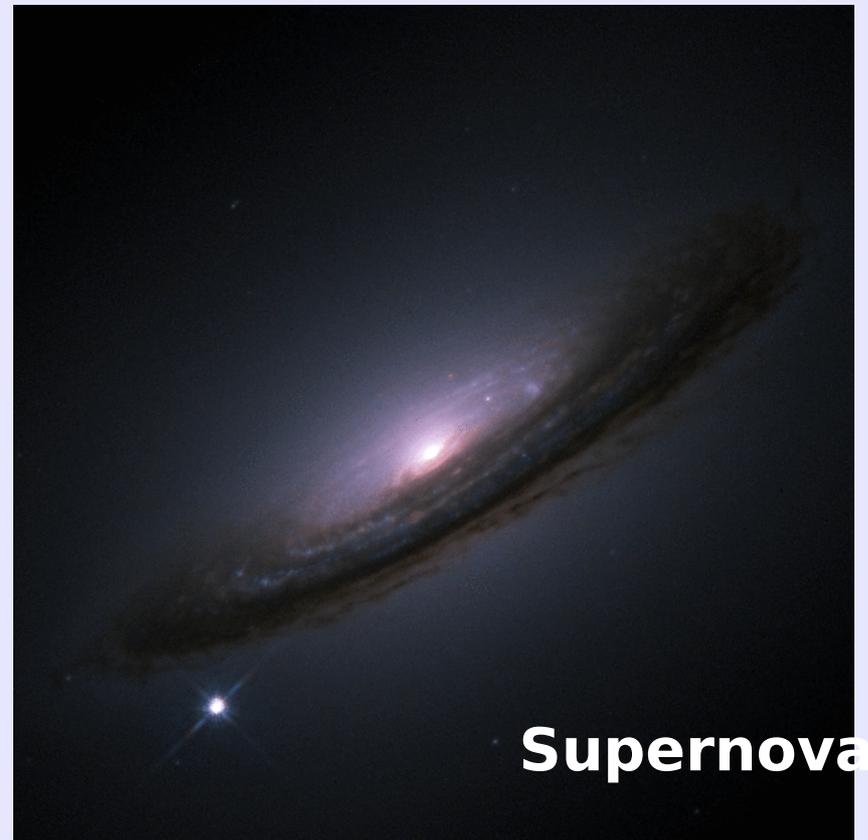
Simulationen notwendig, denn
Astrophysik ist

Naturwissenschaft in spezieller Situation:

Kosmische Objekte und Vorgänge sind
nicht manipulierbar!

--->

Keine Experimente
möglich!



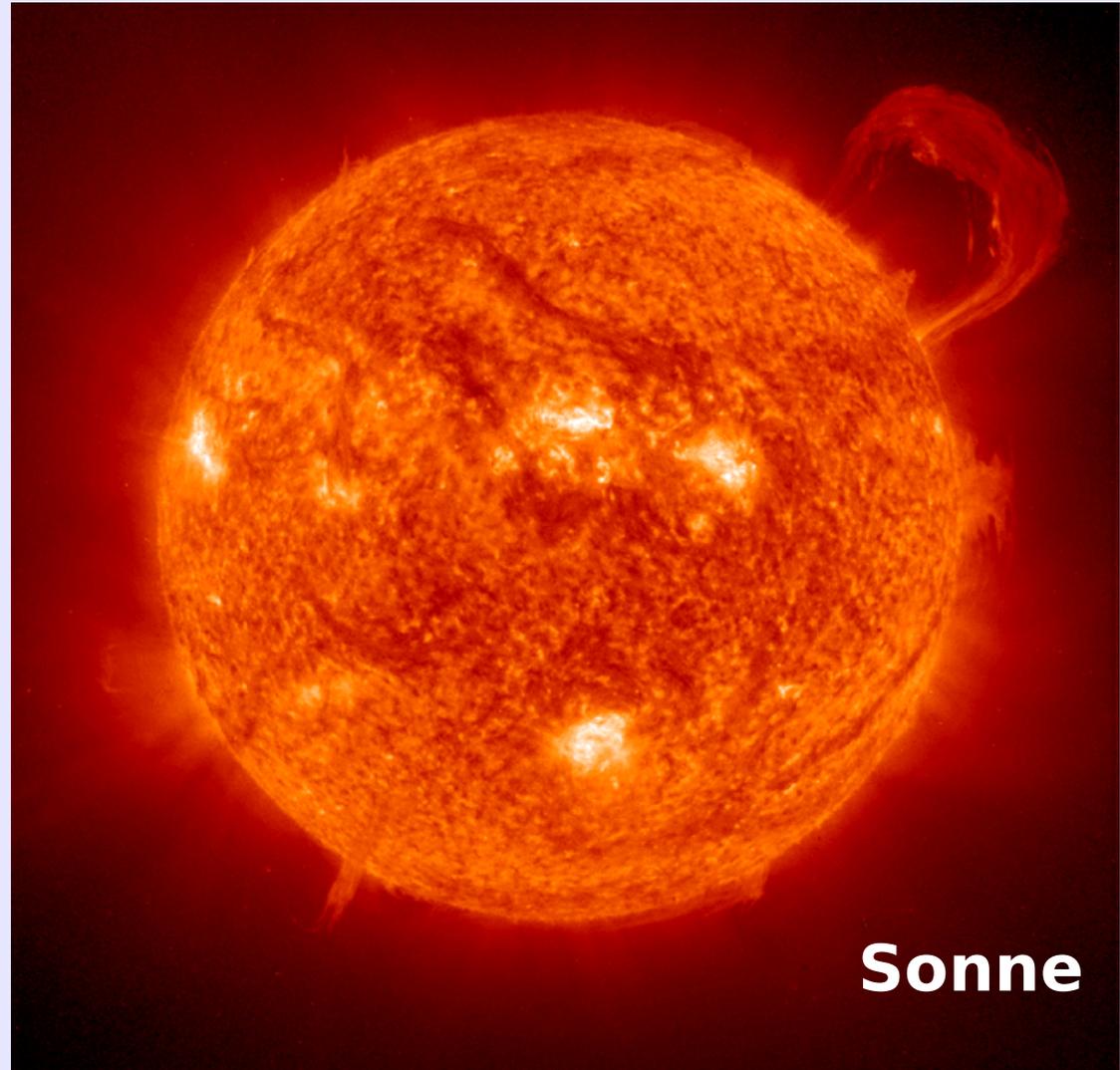
Menschenleben kurz im Vergleich zu den Entwicklungszeiten vieler kosmischer Objekte

--->

Wir sehen oft nur
Momentaufnahmen

--->

**Entstehung und
Entwicklung unklar**



Sonne

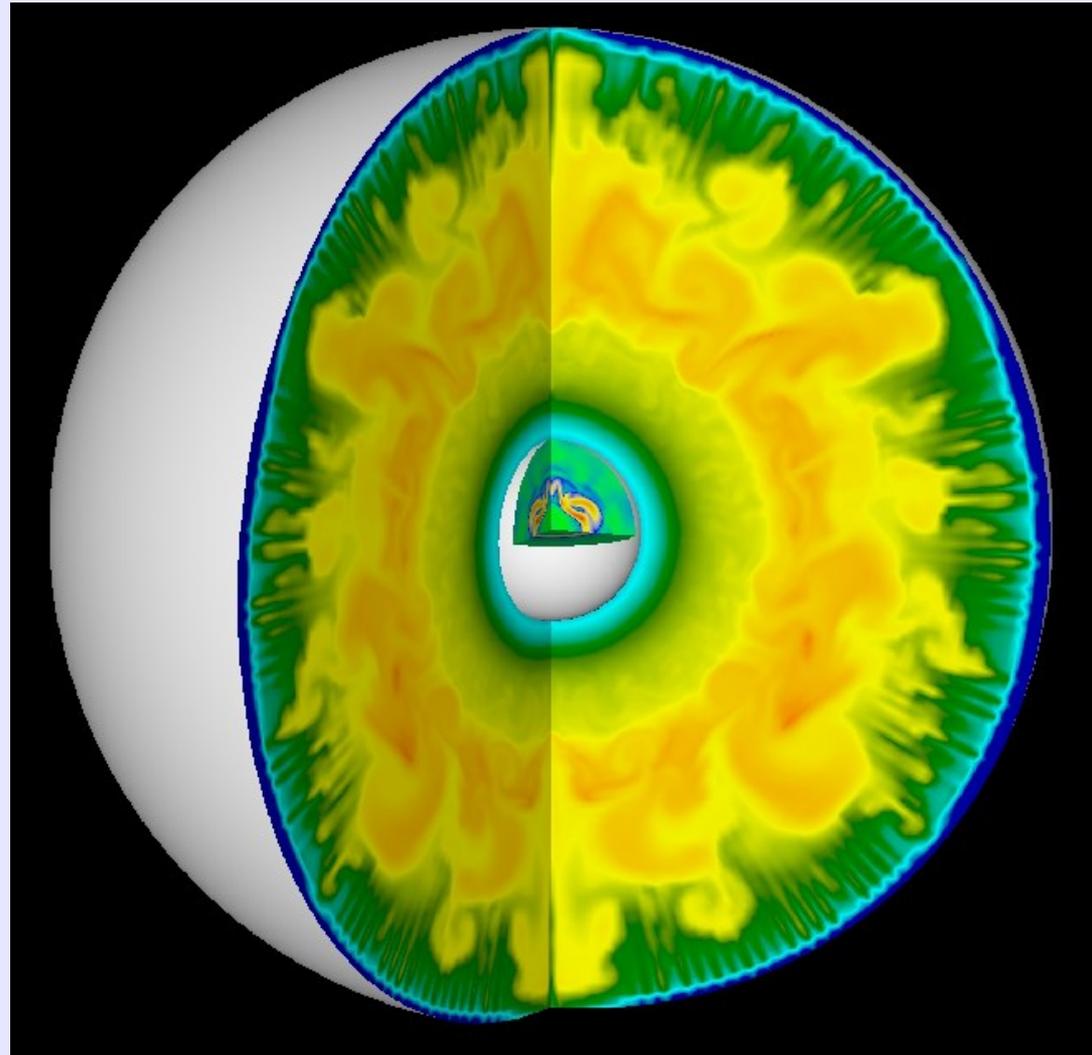
Astrophysikalische Vorgänge oft nur indirekt
beobachtbar; Bedingungen im Labor nicht zugänglich

Beispiel:

Explosion eines
Riesensterns

($R \sim 100$ Millionen km)

als Supernova



Computer-Simulationen gestatten es
Phänomene „sichtbar“ zu machen,
die auf andere Weise der menschlichen
Beobachtung nicht zugänglich sind

(Anwendung in Wissenschaft & Technik)

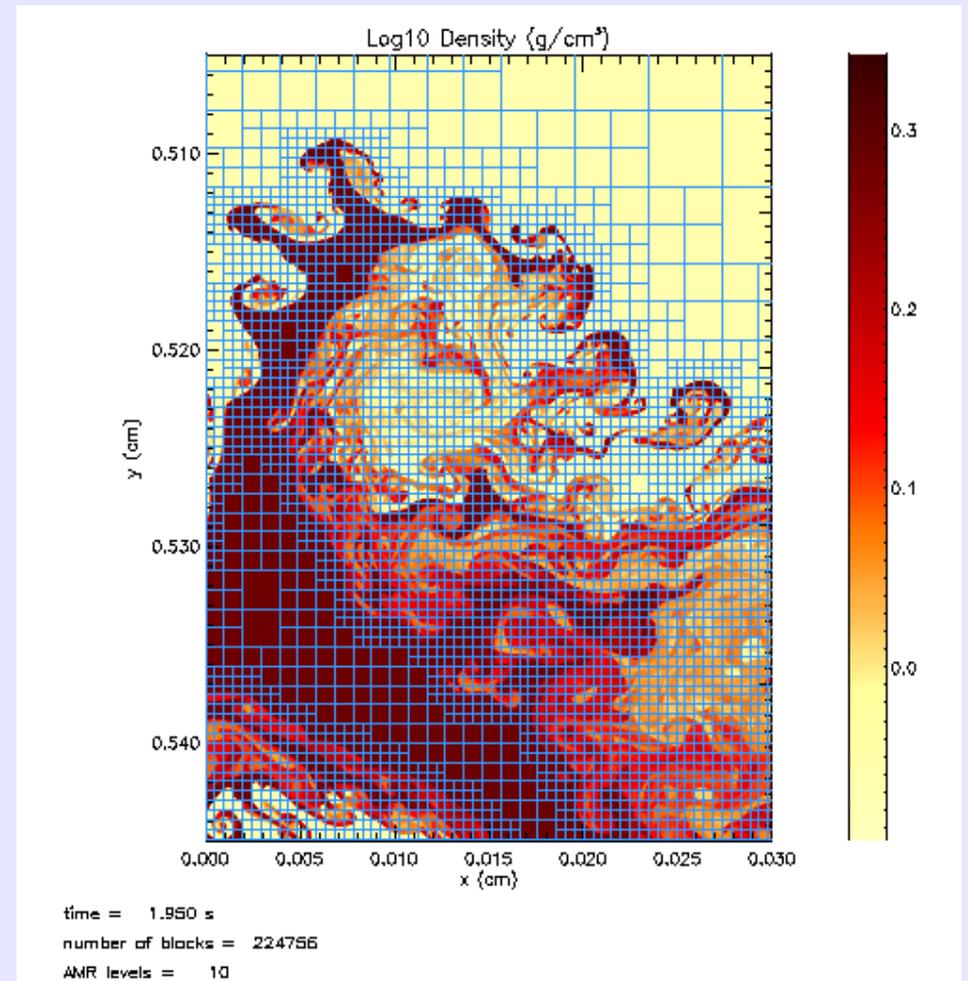
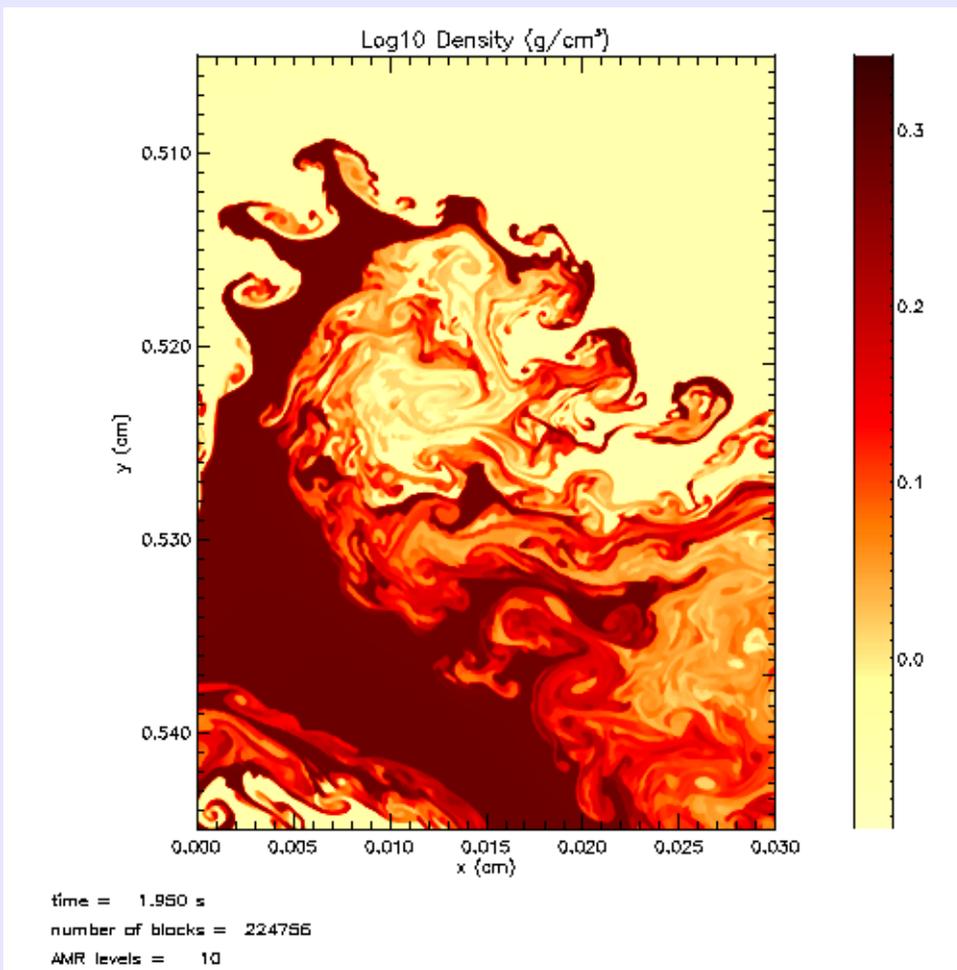
**Dritter Weg zur Erkenntnis neben
Theorie und Experiment !**

Vorgehensweise?

Astrophysikalische Objekte bzw. die Materie in diesen Objekten lassen sich in ihren dynamischen und thermodynamischen Eigenschaften oft als **Gas** oder **Flüssigkeit** beschreiben

---> **Hydrodynamische Beschreibung**
ist gute Näherung !

(Erhaltungsgleichungen für Masse,
Impuls und Energie)



Erhaltungsgleichungen beschreiben zeitliches
 und räumliches Verhalten kontinuierlicher Größen
 ---> Computersimulation: Diskretisierung notwendig!

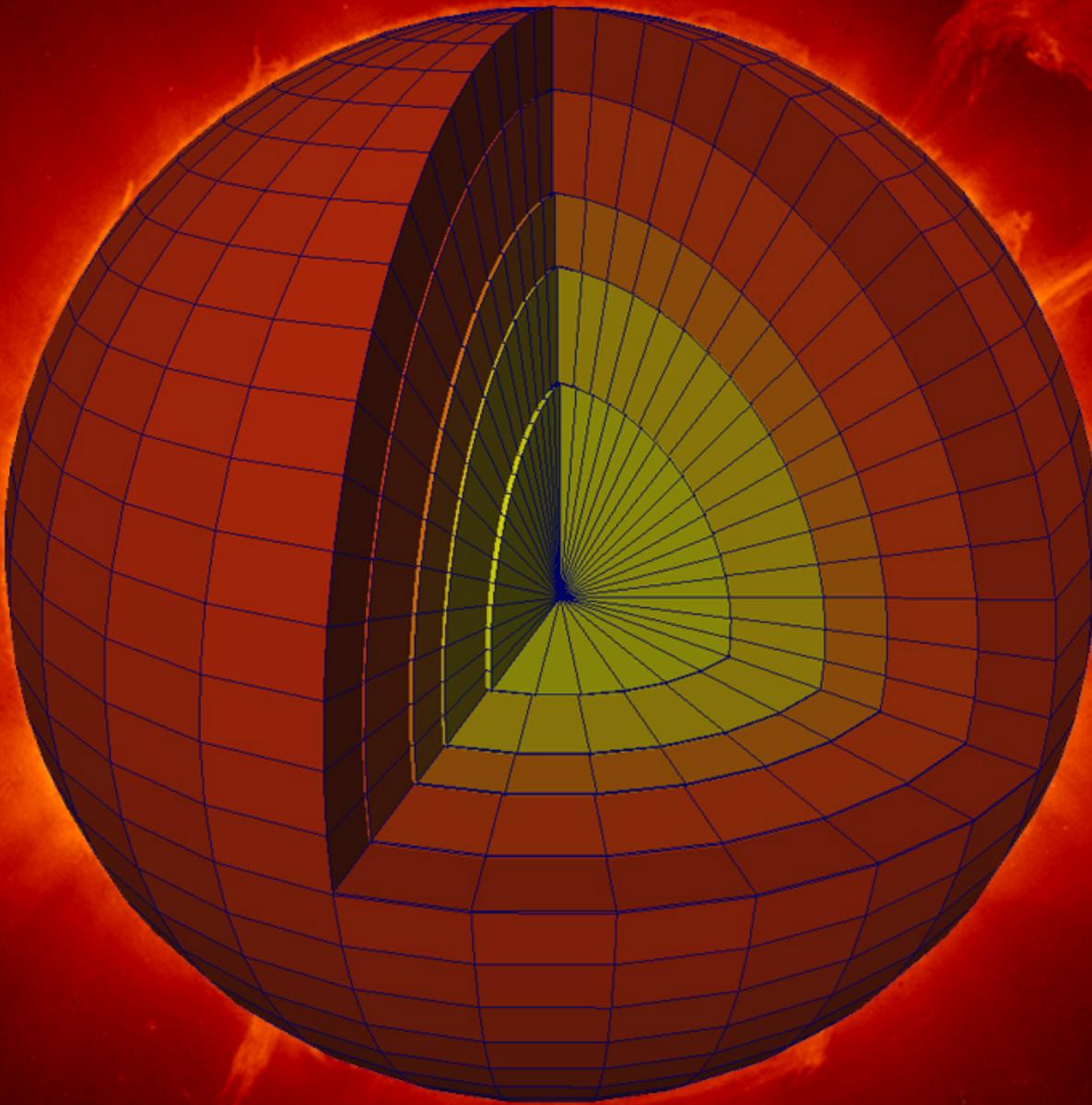
Diskretisierung

Zerlegung eines Objekts in endliche Anzahl von Zonen/Zellen

und

Approximation kontinuierlicher Variablen durch endliche Anzahl von diskreten Werten

1D, 2D & 3D Simulationen



Benötigte Rechnerressourcen?

- Rechenzeiten:

3 -- 20 diskrete Variablen

10^3 -- 10^9 diskrete Zellen (z.Zt. Rekord: 2048^3)

10^3 -- 10^6 diskrete Zeitschritte

10^2 -- 10^3 Operationen/Zelle/Variable/Zeitschritt

---> 10^{11} -- 10^{21} Rechenoperationen/Simulation
und ~10 Terabyte Hauptspeicherplatz

>>> Viele Simulationen sind notwendig! <<<

Benötigte Rechnerressourcen?

- Rechenleistung heutiger Rechner:

10 Gigaflops (PC/Notebook)

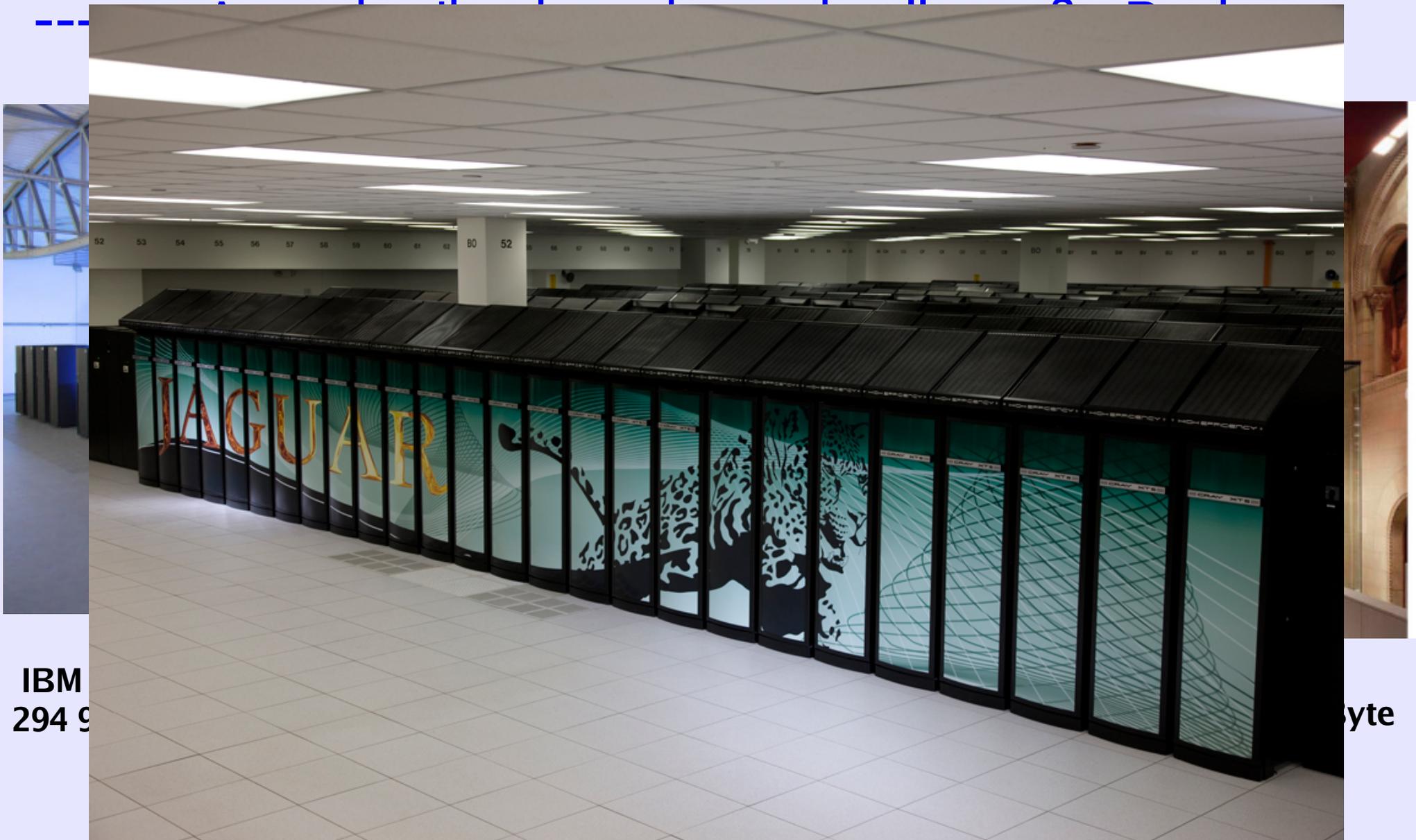
10 Petaflops (Supercomputer; z.Zt. Rekord: 16 Pflops)

---> 1D Simulation: ~ Minuten auf PC

3D Simulation: ~ Wochen auf Supercomputer

+ Erzeugung großer Datenmengen (Tbytes/Simulation)

>>> Datenauswertung ist nicht trivial! <<<



IBM
294 9

yte

CRAY XT5 Jaguar (Opteron Quad Core), 180 000 Prozessoren, 1.6 PFlops, 362 TByte

TOP500 List - June 2012 (1-100)

R_{max} and R_{peak} values are in TFlops. For more details about other fields, check the [TOP500 description](#).

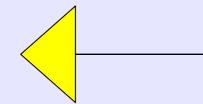
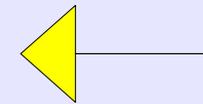
Power data in KW for entire system

next

Rank	Site	Computer/Year Vendor	Cores	R_{max}	R_{peak}	Power
1	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom / 2011 IBM	1572864	16324.75	20132.66	7890.0
2	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 VIIIx 2.0GHz, Tofu interconnect / 2011 Fujitsu	705024	10510.00	11280.38	12659.9
3	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom / 2012 IBM	786432	8162.38	10066.33	3945.0
4	<u>Leibniz Rechenzentrum</u> Germany	SuperMUC - iDataPlex DX360M4, Xeon E5-2680 8C 2.70GHz, Infiniband FDR / 2012 IBM	147456	2897.00	3185.05	3422.7
5	National Supercomputing Center in Tianjin China	Tianhe-1A - NUDT YH MPP, Xeon X5670 6C 2.93 GHz, NVIDIA 2050 / 2010 NUDT	186368	2566.00	4701.00	4040.0
6	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Jaguar - Cray XK6, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA 2090 / 2009 Cray Inc.	298592	1941.00	2627.61	5142.0
7	CINECA Italy	Fermi - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom / 2012 IBM	163840	1725.49	2097.15	821.9
8	<u>Forschungszentrum Juelich (FZJ)</u> Germany	JuQUEEN - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom / 2012 IBM	131072	1380.39	1677.72	657.5
9	CEA/TGCC-GENCI France	Curie thin nodes - Bullx B510, Xeon E5-2680 8C 2.700GHz, Infiniband QDR / 2012 Bull	77184	1359.00	1667.17	2251.0
10	National Supercomputing Centre in Shenzhen (NSCS) China	Nebulae - Dawning TC3600 Blade System, Xeon X5650 6C 2.66GHz, Infiniband QDR, NVIDIA 2050 / 2010 Dawning	120640	1271.00	2984.30	2580.0

1 Petaflop (10^{15})
= 1 000 Teraflops
= 1 000 000 Gflops

16 Petaflops
1,6 Millionen Prozessoren
7,9 MW



Sternexplosionen:

Supernovae

Supernovae sind gigantische Sternexplosionen

max. Helligkeit: **~10 Milliarden mal so hell wie die Sonne**

d.h. für einige Wochen mit bloßem Auge sichtbar bis zu einer Entfernung von **~200 000 Lichtjahren**

Häufigkeit: **2-3 Supernovae pro Jahrhundert pro Galaxie**

(~20 Supernovae pro Sekunde im Universum)

Nur **wenige Supernovae** wurden **im letzten Jahrtausend** in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, **beobachtet**:

1006, 1054 (Crab), 1181, 1571 (Tycho), 1604 (Kepler), ~1680 (CasA)

SN 1604A (Kepler's Supernova)

Magnitude: **-1.90**

RA/DE (J2000): 17h30m36.0s/-21°29'00.0"

RA/DE (of date): 17h06m59s/-21°05'27"

Hour angle/DE: 2h28m31s/-21°05'27" (geometric)

Hour angle/DE: 2h28m22s/-20°59'59" (apparent)

Az/Alt: +214°45'30"/+8°56'08" (geometric)

Az/Alt: +214°45'30"/+9°02'00" (apparent)

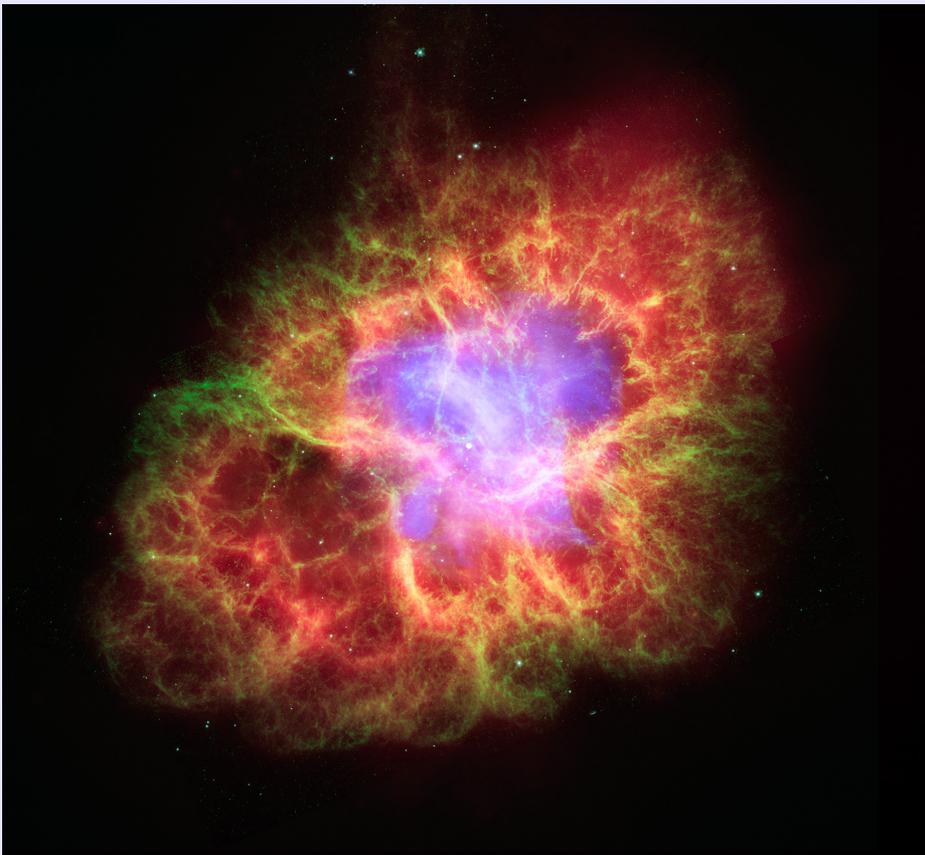
Type: I

Distance: 14000 Light Years



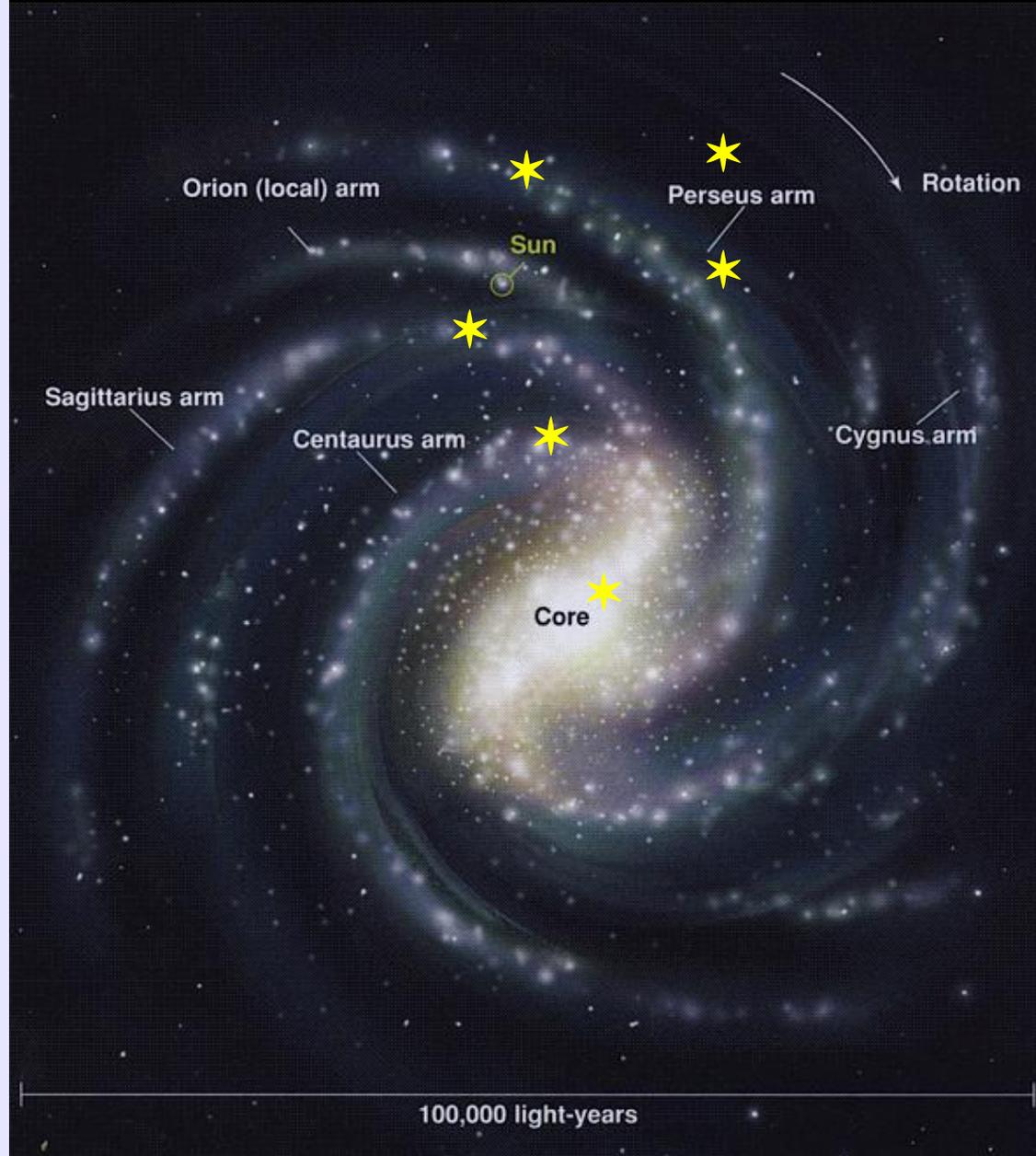
Erste astronom.
Beobachtung
mit einem
Teleskop: 1608
(Galilei Galileo)

Manchmal ist am Himmel
die Hölle los!



Krabben-Nebel im Sternbild Stier
(AD 1054 ; d: ~6500 Lj)

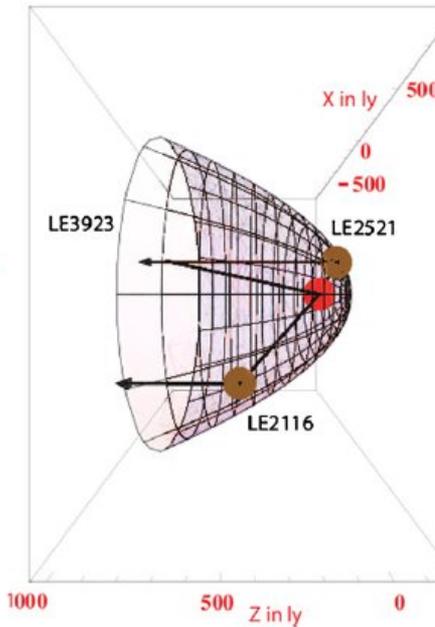
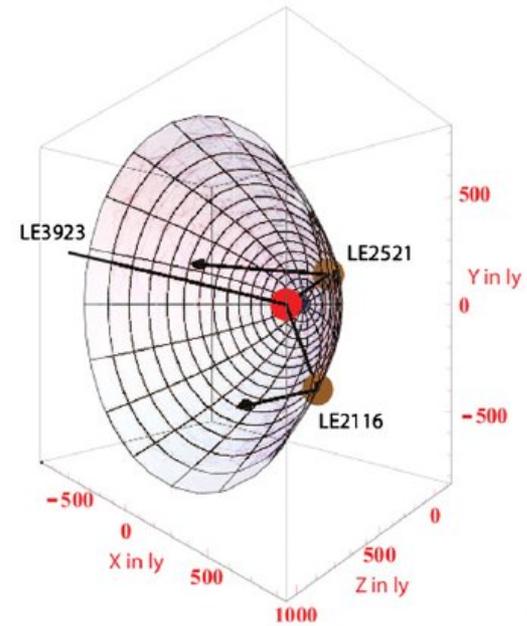
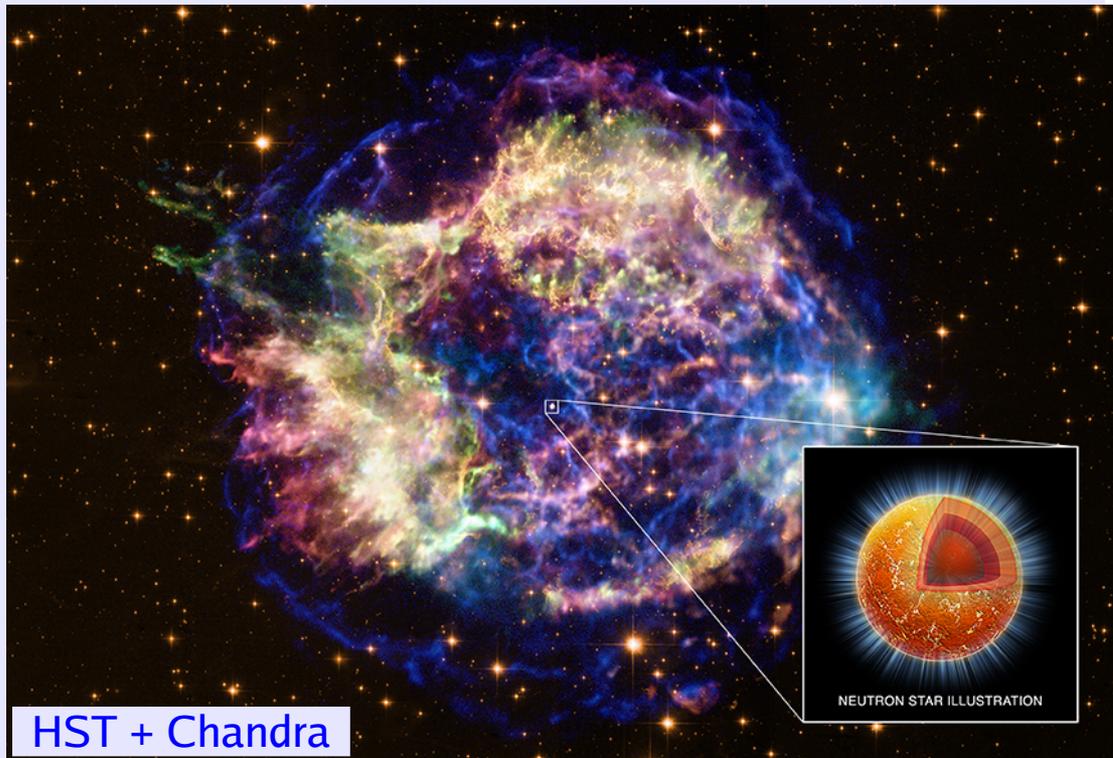
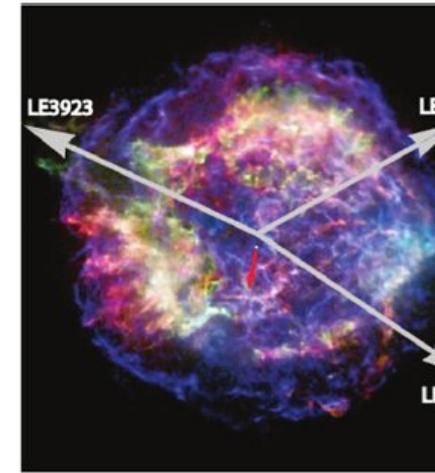
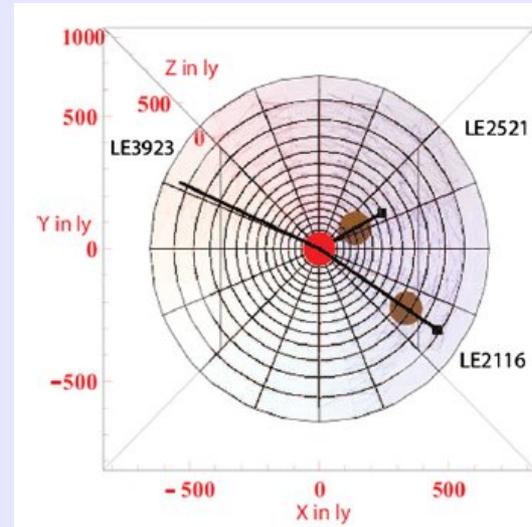
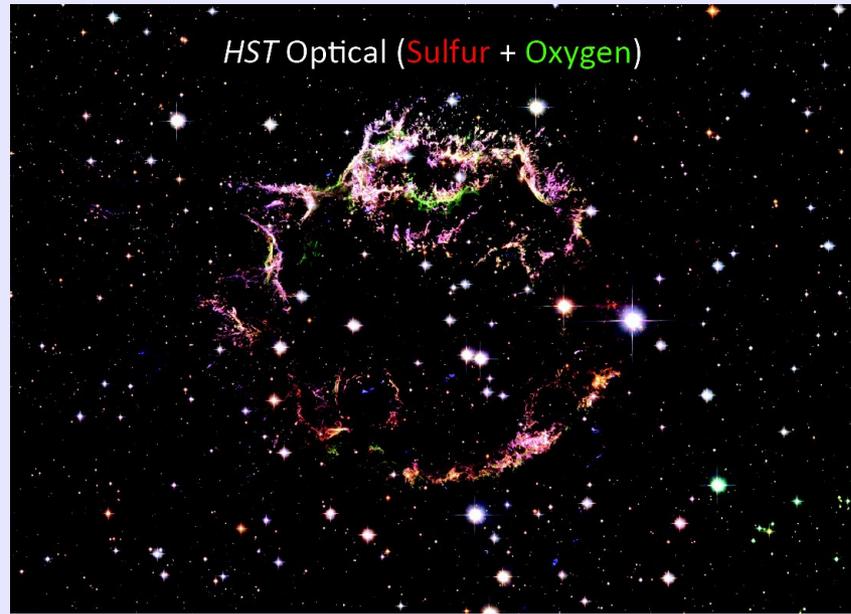
Unsere Heimatgalaxie von oben "gesehen"



Sonne <----> Zentrum : ~ 30 000 Lichtjahre

Verpasste Supernova?

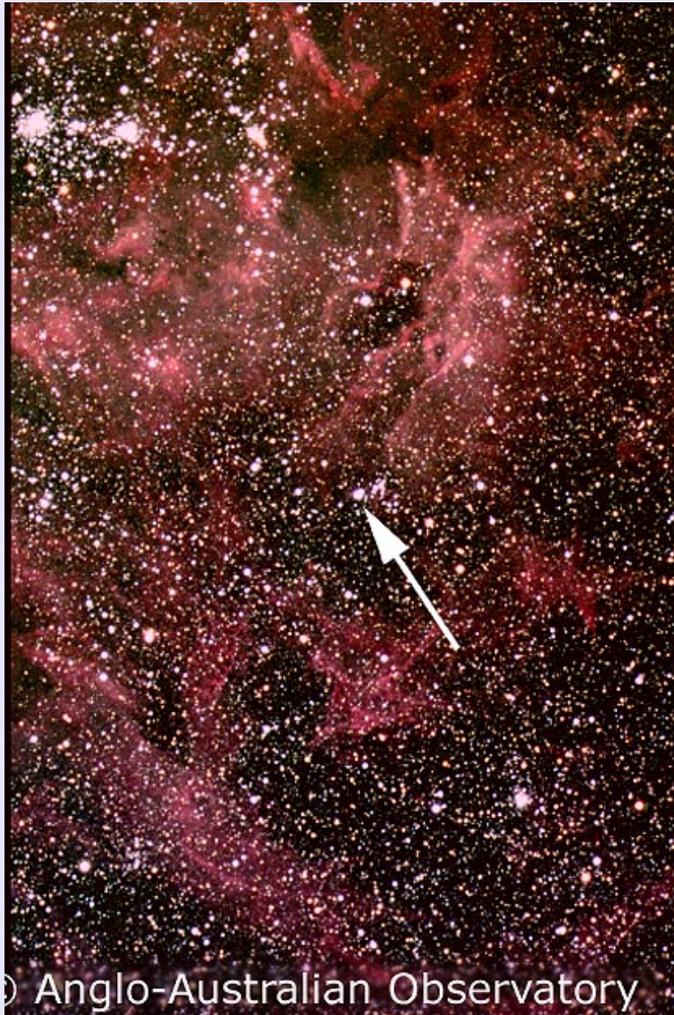
Cassiopeia A (AD ~ 1680)



„Nachbeobachtung“ mittels
Lichtecho



30 Doradus Region:
Große Magellansche Wolke
($d \sim 160\,000$ Lichtjahre)



Blauer Überriese
Sandulek 69.202



Supernova 1987A
7:35 UT 23.2.1987

Extragalaktische Supernova

SN 2004dk

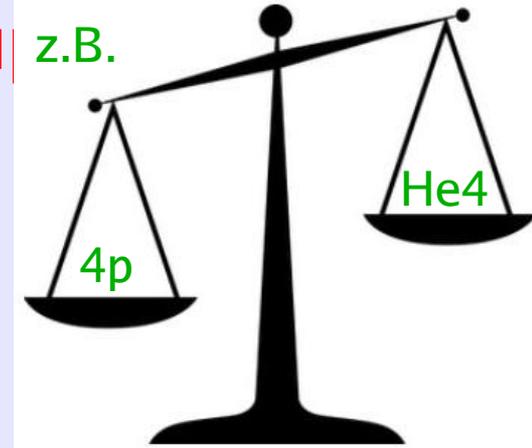
ESO-VLT: NGC 6118 & SN2004dk
(d ~ 25 Mpc , Ib/c)

N
↑



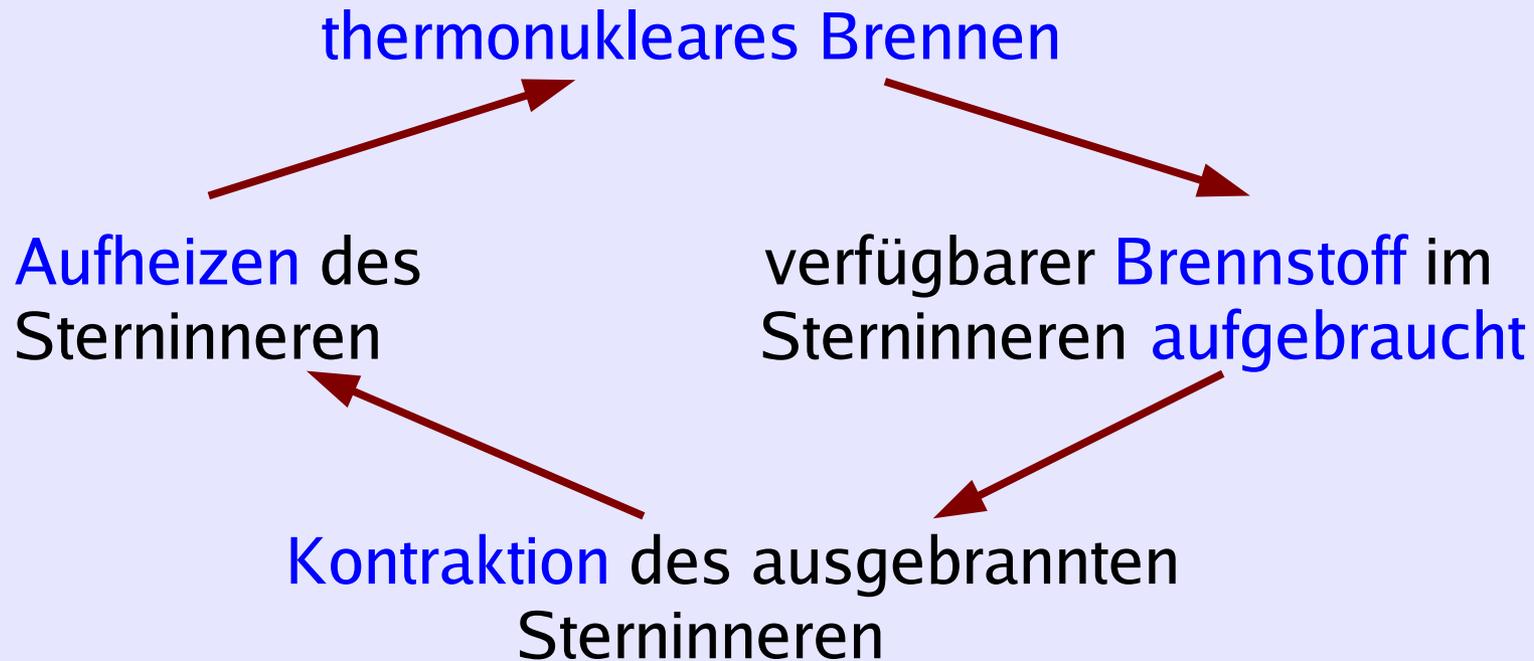
Wie wird ein Stern zu einer Sonne

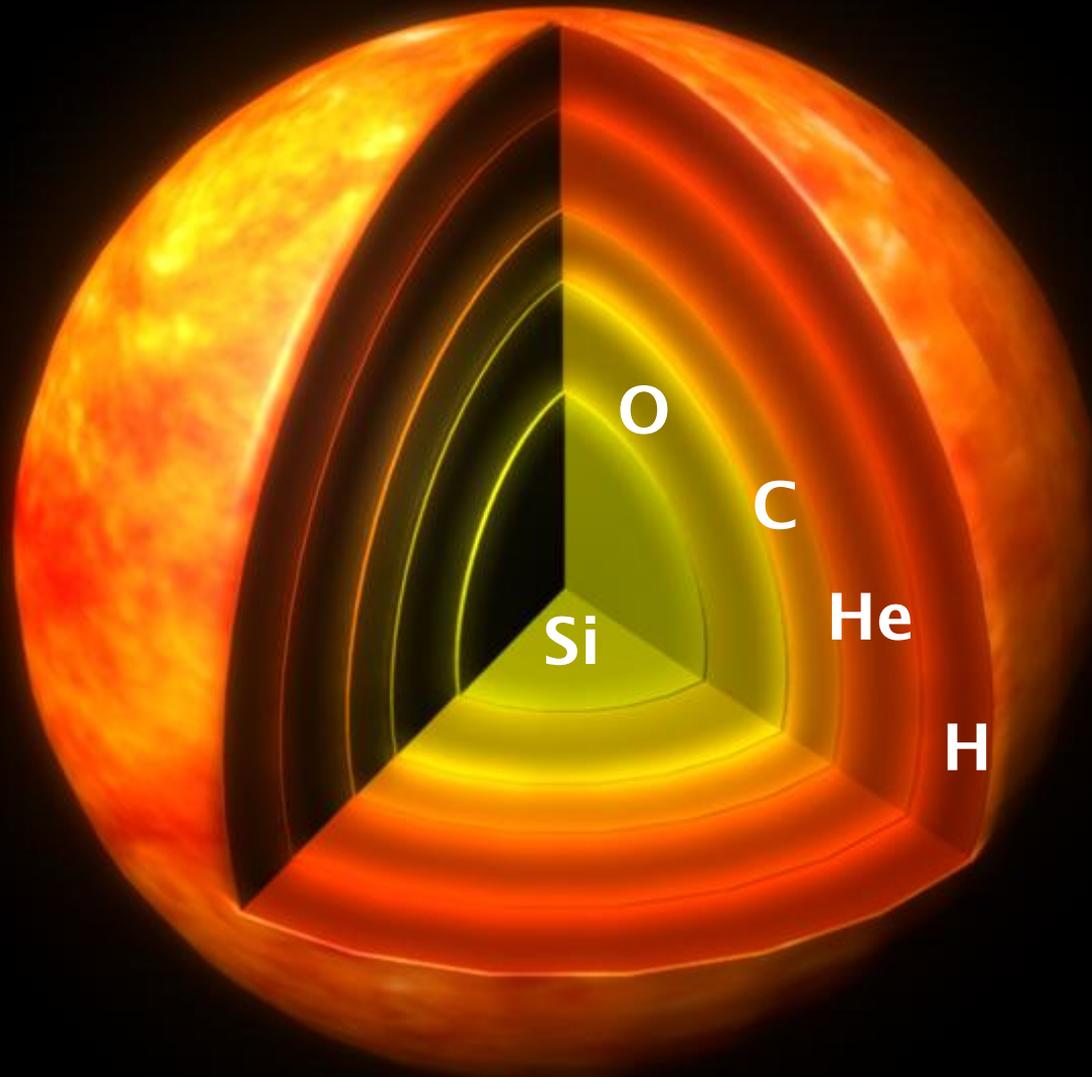
z.B.



Sterne beziehen ihre Energie aus Fusionsreaktionen

(Masse wird gemäß $E=mc^2$ in Energie umgewandelt;
~4 Millionen Tonnen pro Sekunde in der Sonne)





Zwiebelschalen-
Struktur eines
massereichen Sterns
einige Millionen Jahre
nach seiner Geburt:

Masse: 10 ... 100
Sonnenmassen

Radius: 50 ... 1000
Sonnenradien

ACHTUNG: nicht maßstabsgetreu!

Todeskampf eines massereichen Sterns

nuklearer Brennstoff im Zentrum des Sterns vollständig aufgebraucht

(da Verschmelzung von Fe/Ni-Atomkernen keine Energie liefert!)

Sternzentrum implodiert

riesige Menge an (Gravitations-) Energie wird in Sekundenbruchteilen freigesetzt

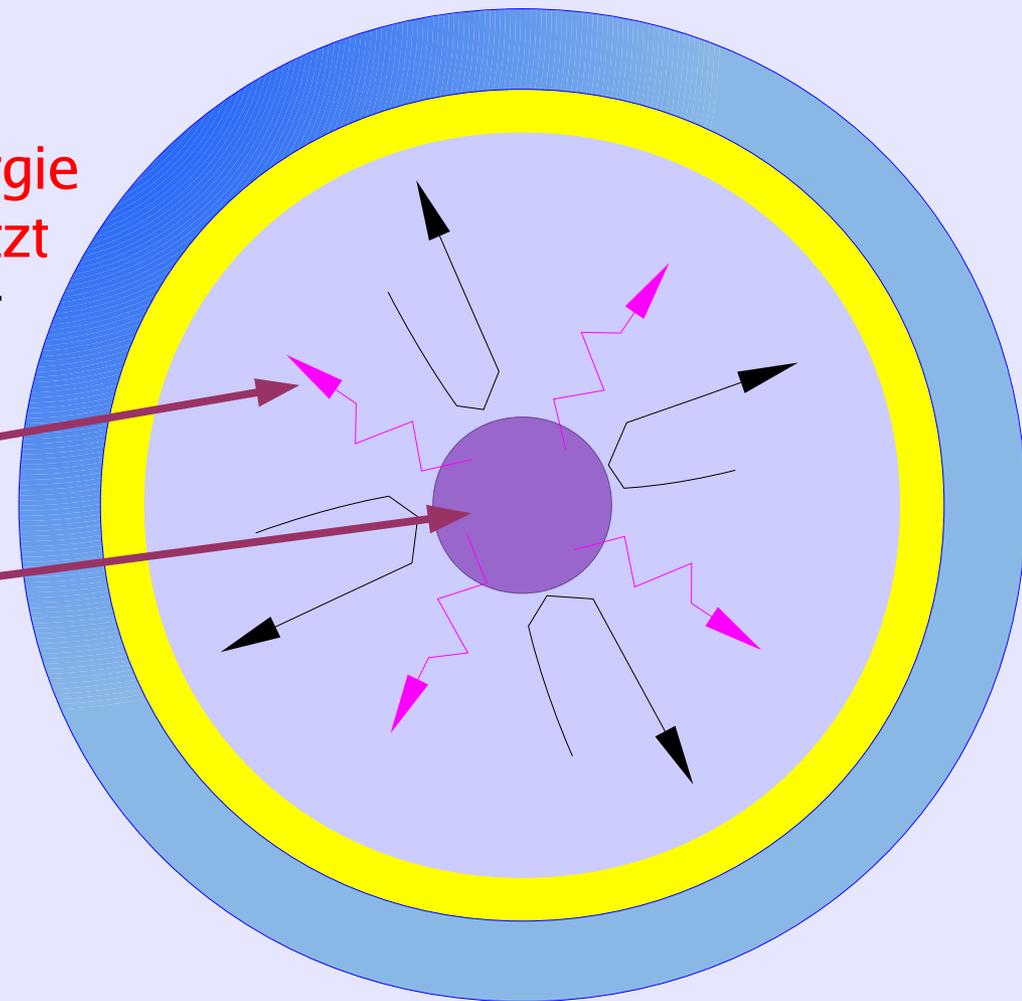
(soviel wie alle 100 Milliarden Sterne der Milchstraße in 100 Jahren abstrahlen)

99% davon in Form von Neutrinos

Neutronenstern entsteht

(~20 km Durchmesser)

Sternhülle wird abgesprengt



Supernova 1987A

einige Stunden später:

Explosionswelle erreicht Oberfläche des blauen Riesensterns

Der Stern explodiert (er wird in 3 Stunden 400-mal heller)



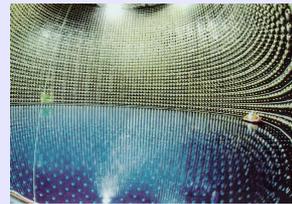
~170 000 Jahre später:

Am 23. Februar 1987 um 7:35 Uhr (UT) erreichen die Neutrinos von der Supernova 1987A die Erde

(~ 3 Milliarden pro Quadratzentimeter)

19 davon werden in großen Neutrindetektoren nachgewiesen

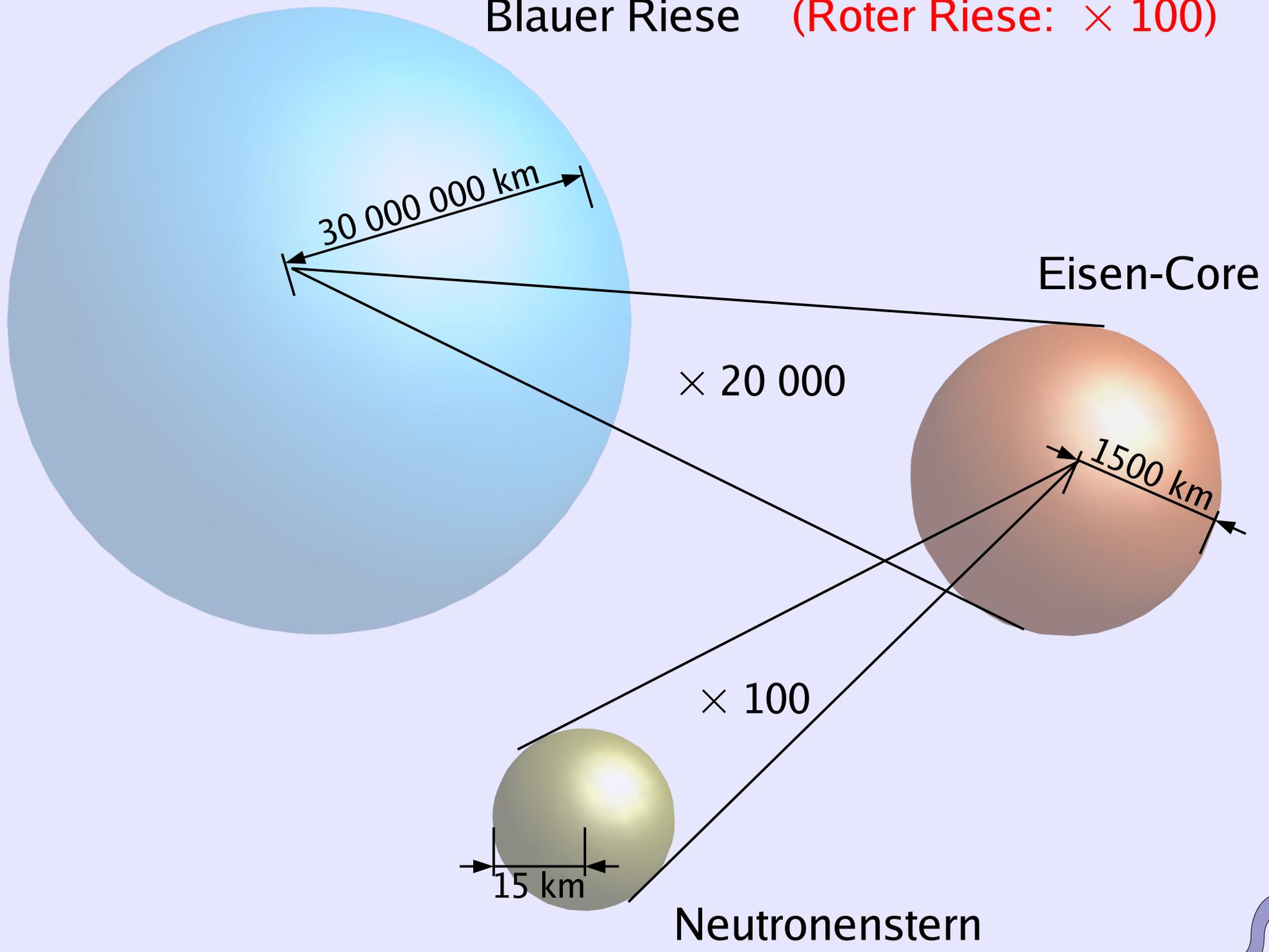
von insgesamt: ~ 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{57}

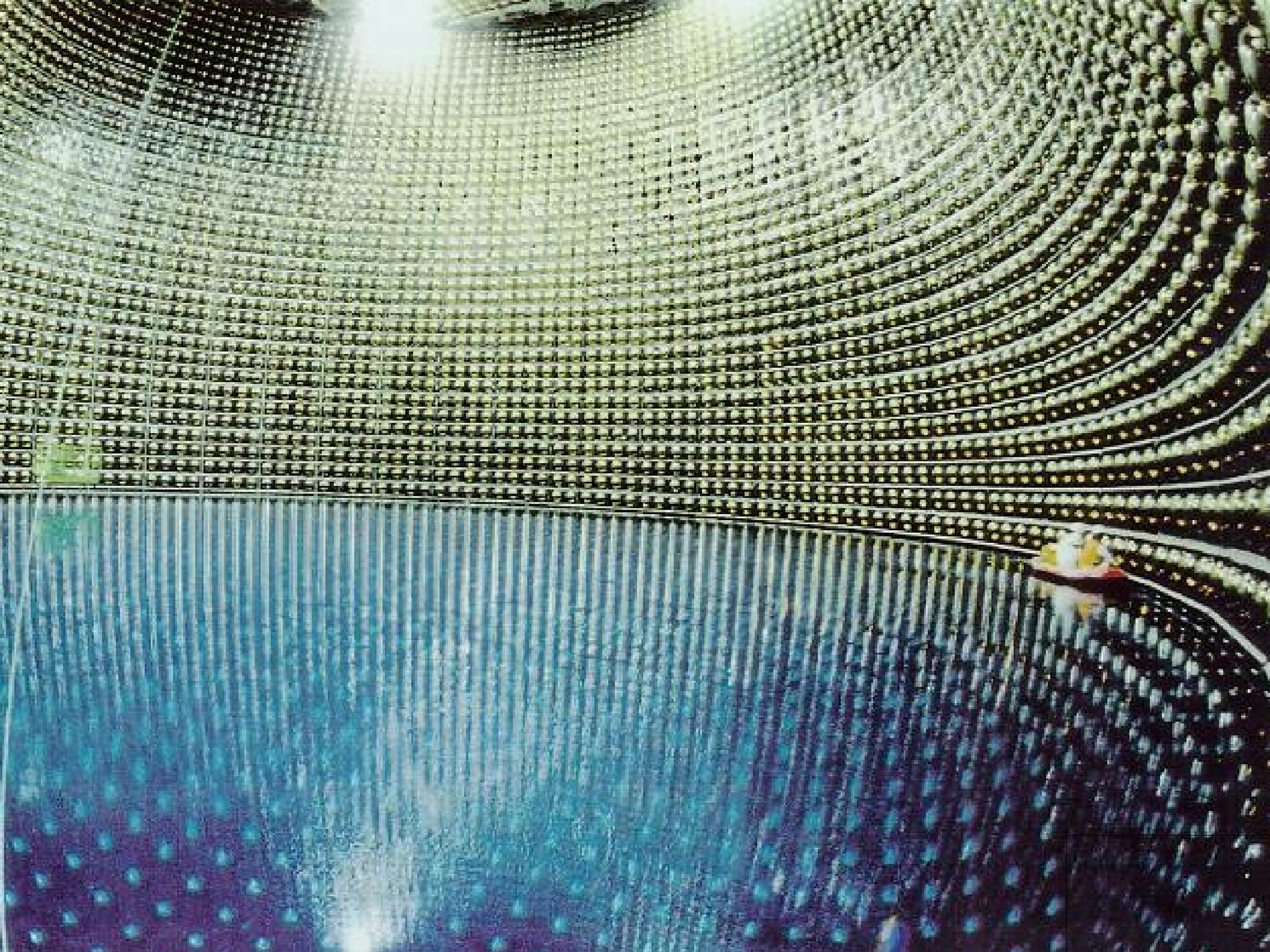


bei ~ 100 Menschen: **kleiner „Blitz“ im Auge!**

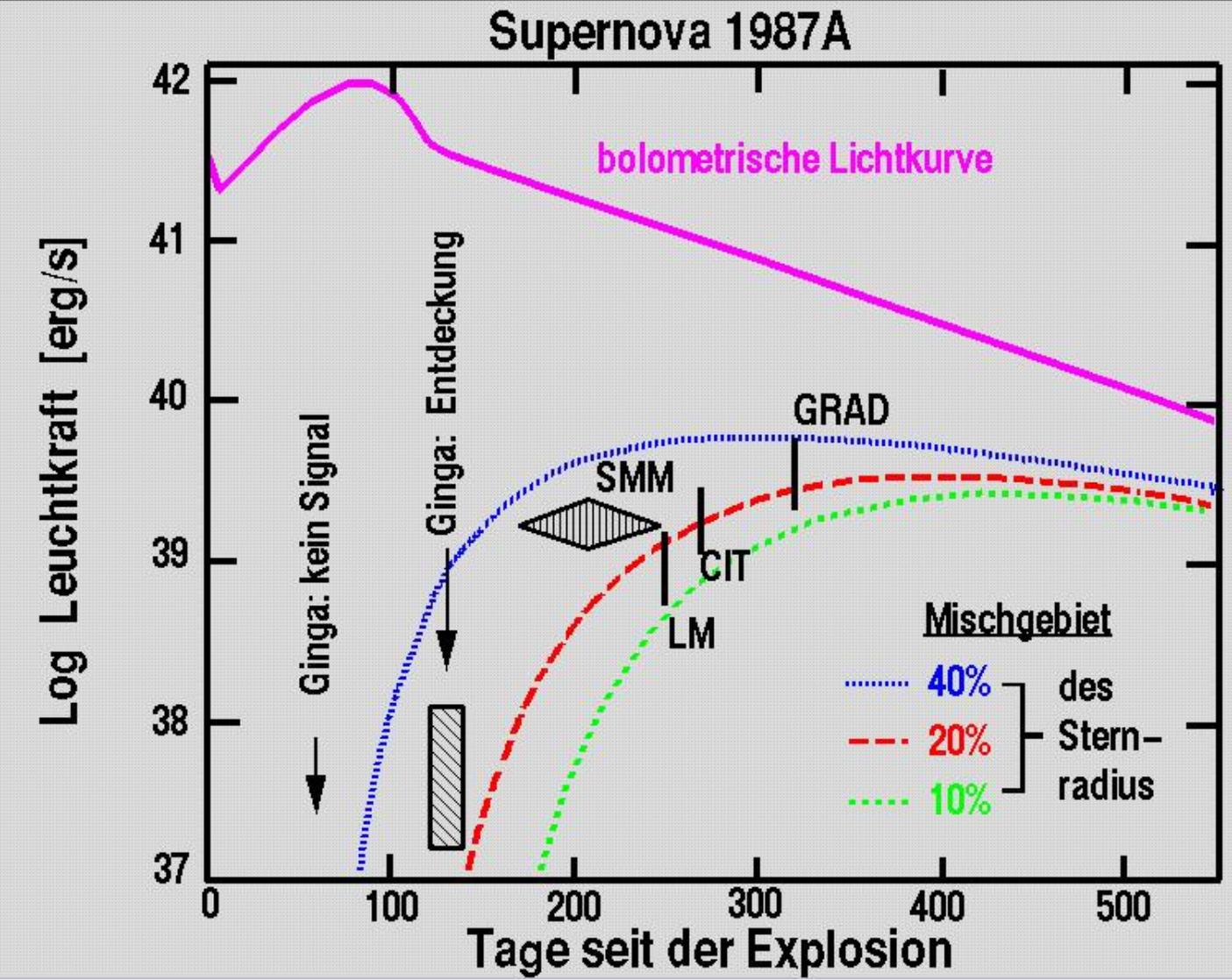
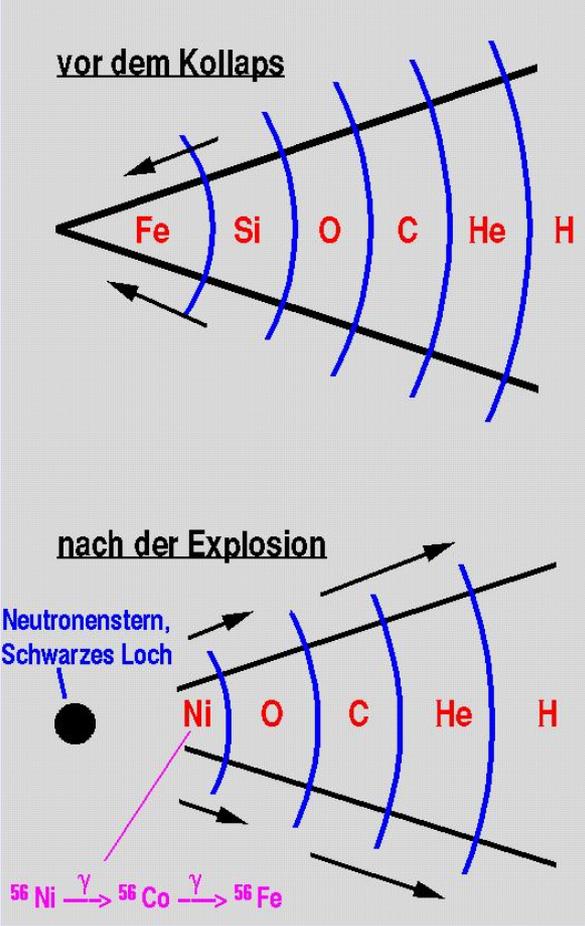


Blauer Riese (Roter Riese: $\times 100$)

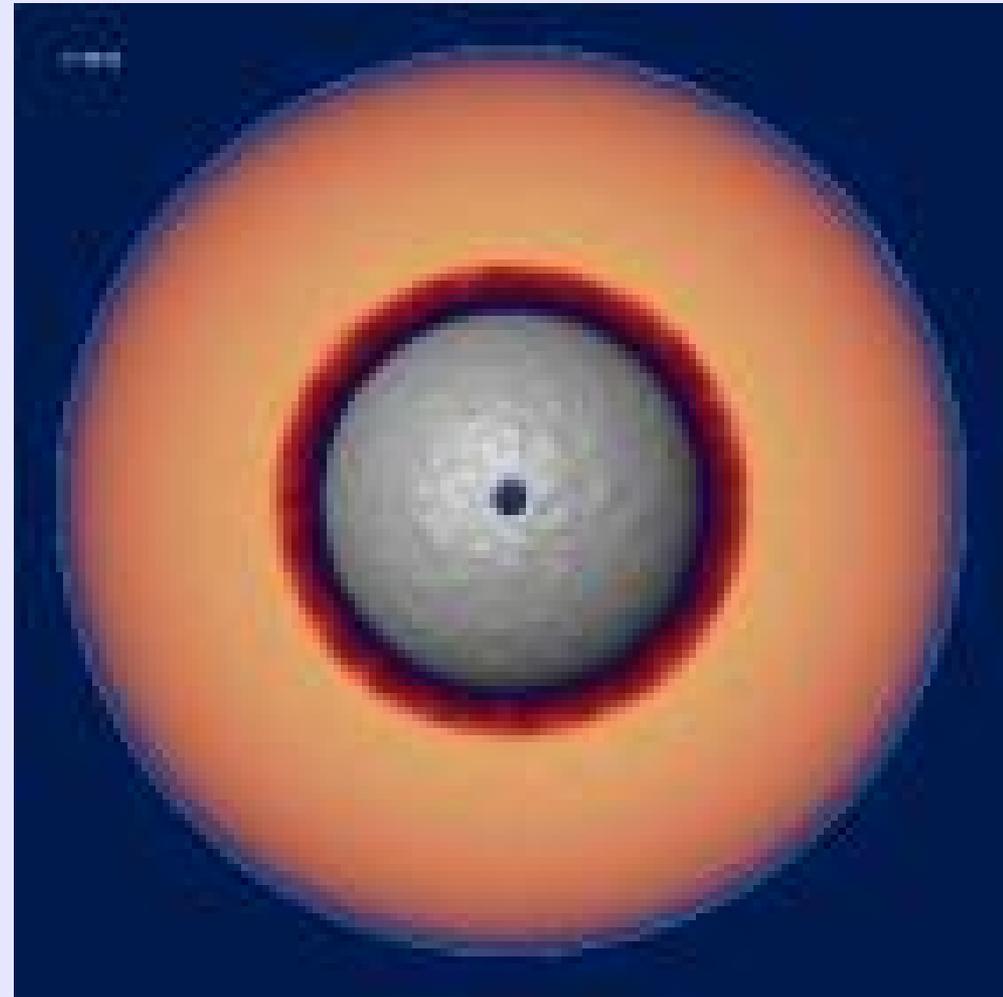




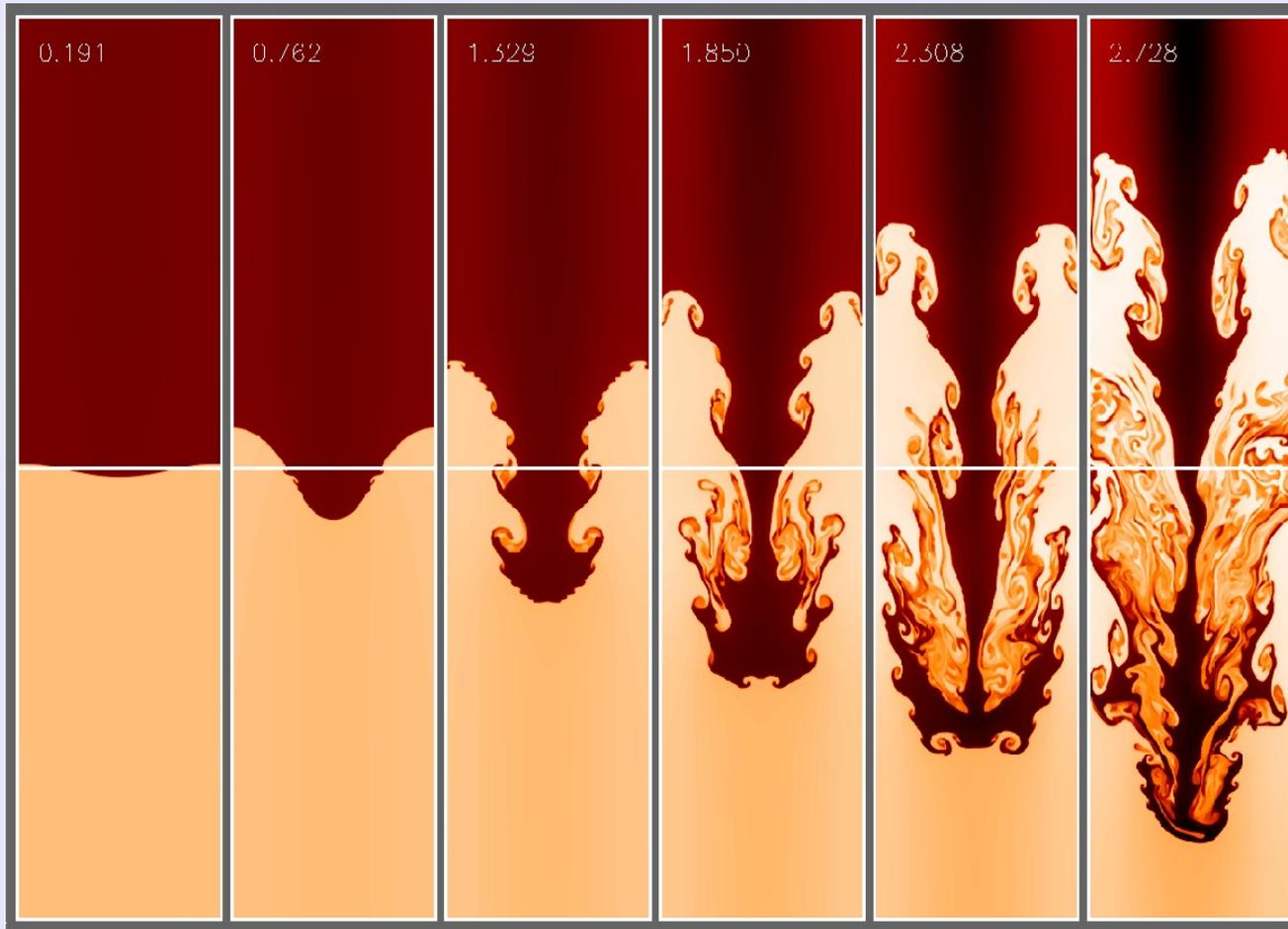
Hinweise auf großräumiges Mischen in SN 1987A



Supernova-Explosionen sind nicht „kugelrund“, sondern sehr „turbulent“
und unsymmetrisch



Rayleigh-Taylor-Instabilität

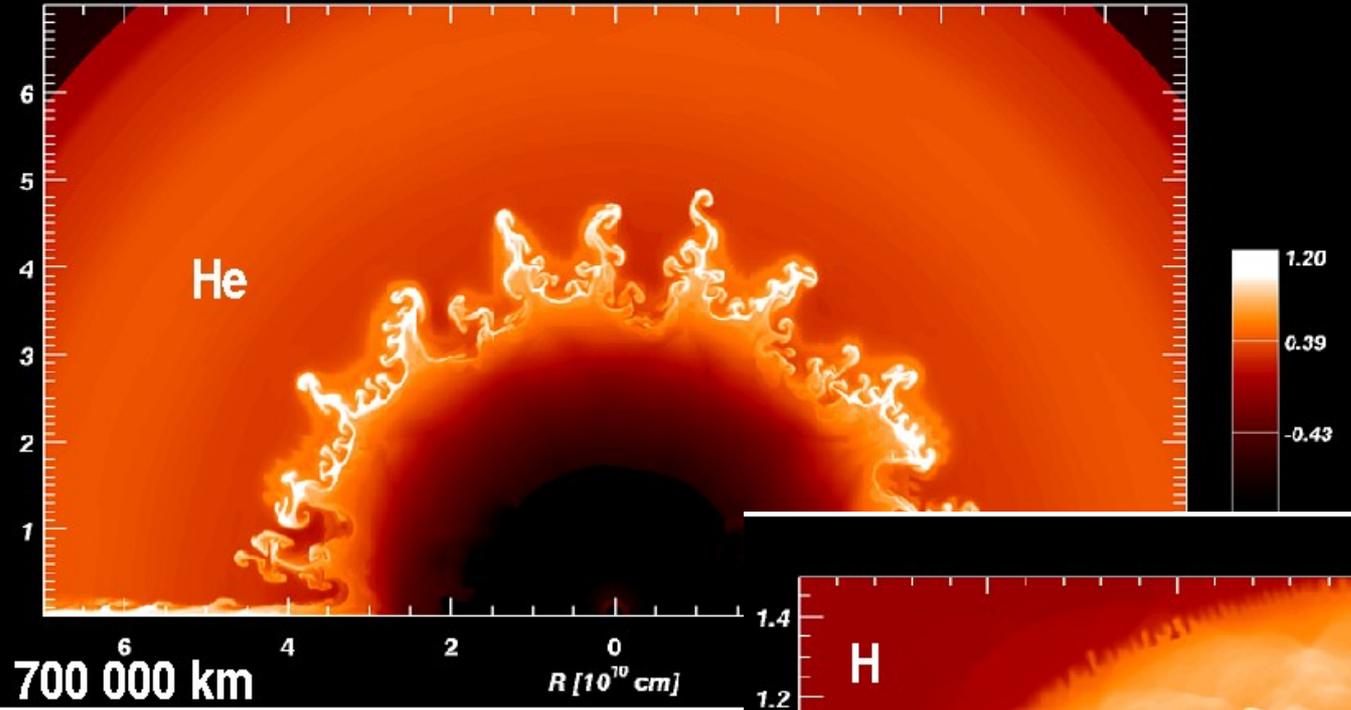


Computorexperiment zur RTI:

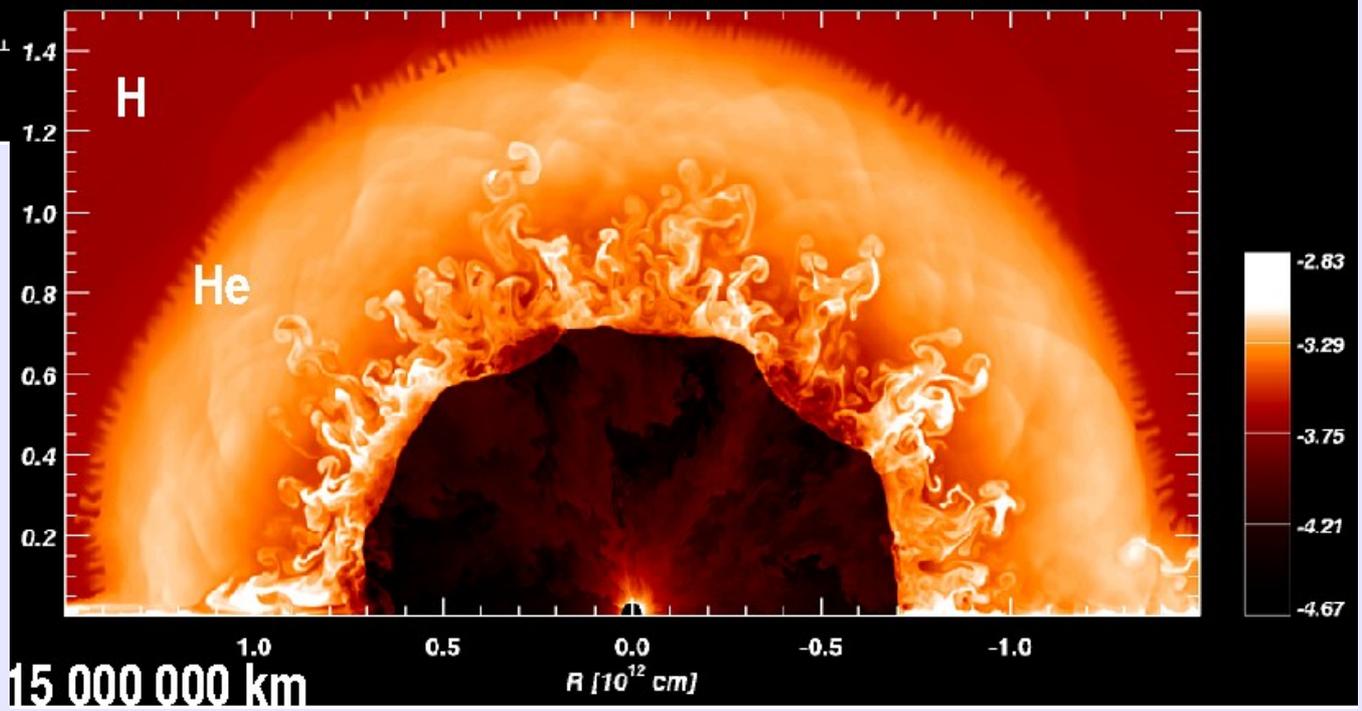
Dichtere (oben) und leichtere (unten) Flüssigkeit im Schwerefeld

Beobachtungen von **Supernovae** nur erklärbar, wenn zusätzlich **großräumiges Mischen** in der **Hülle des explodierenden Sterns** stattfindet, wie es auch

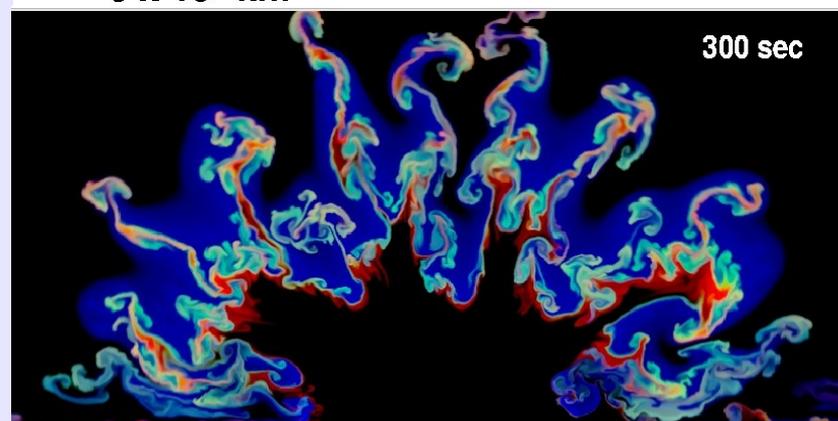
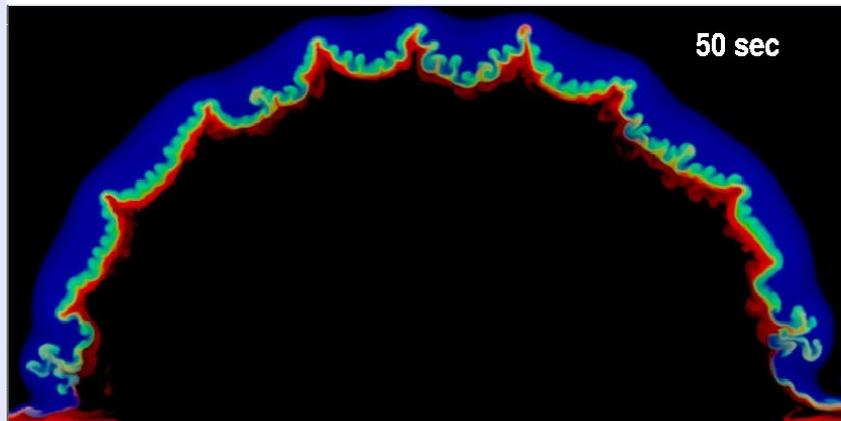
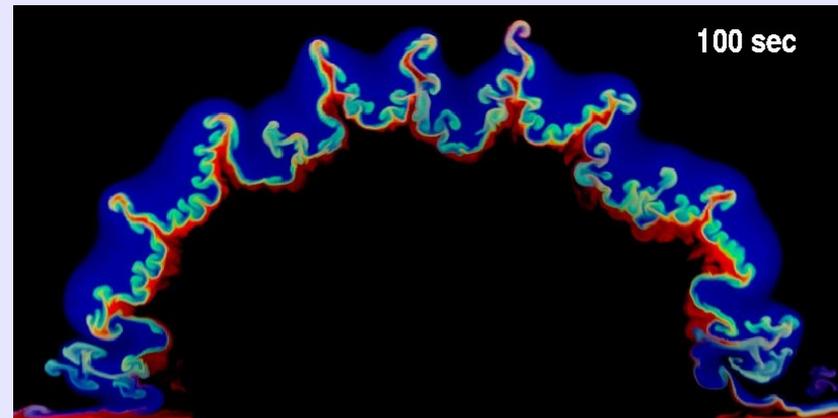
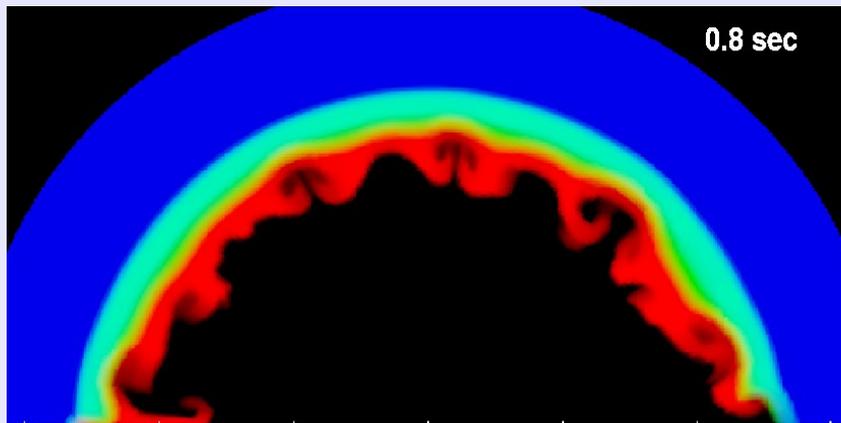
100 sec



10000 sec



Computersimulationen der Mischprozesse, die während der Explosion stattfinden (Kifonidis et al. 2003)



16 O



28 Si

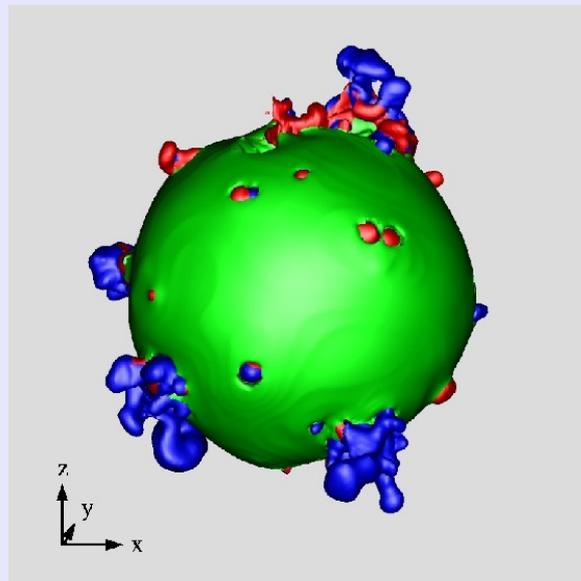


56 Ni

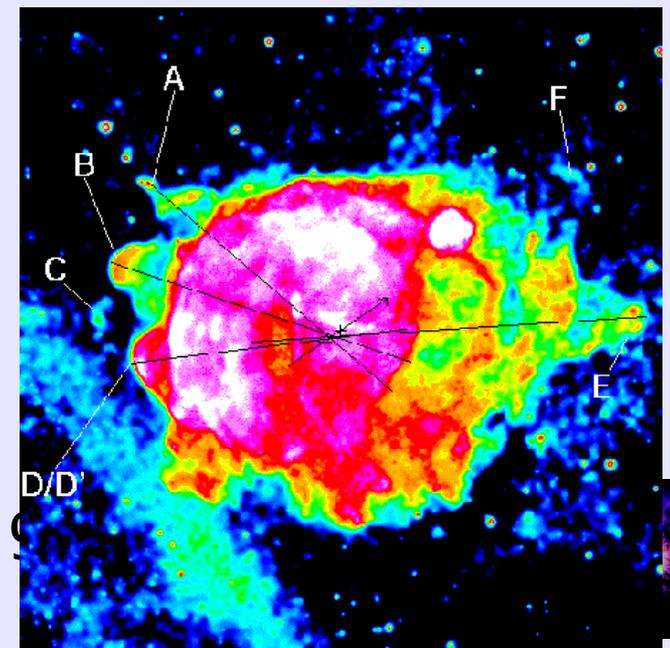
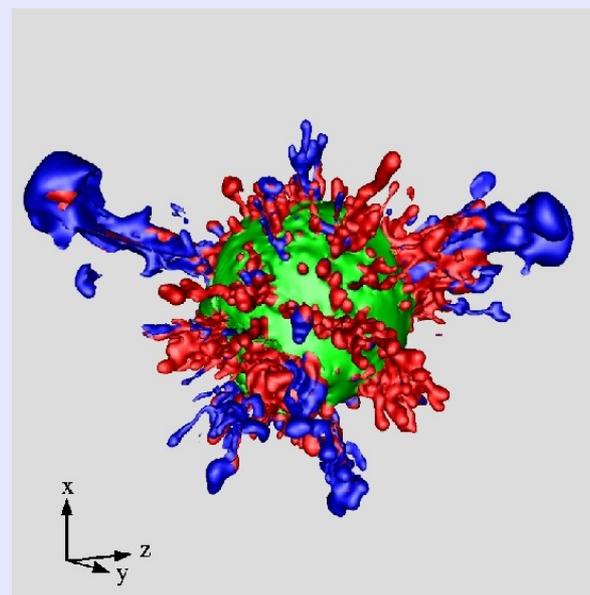
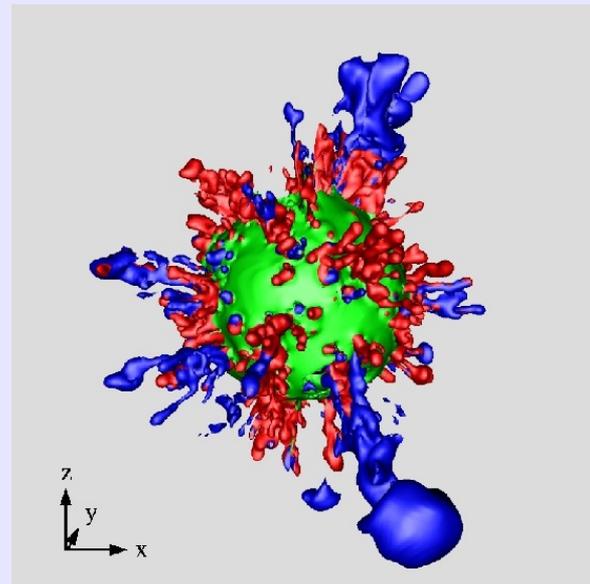
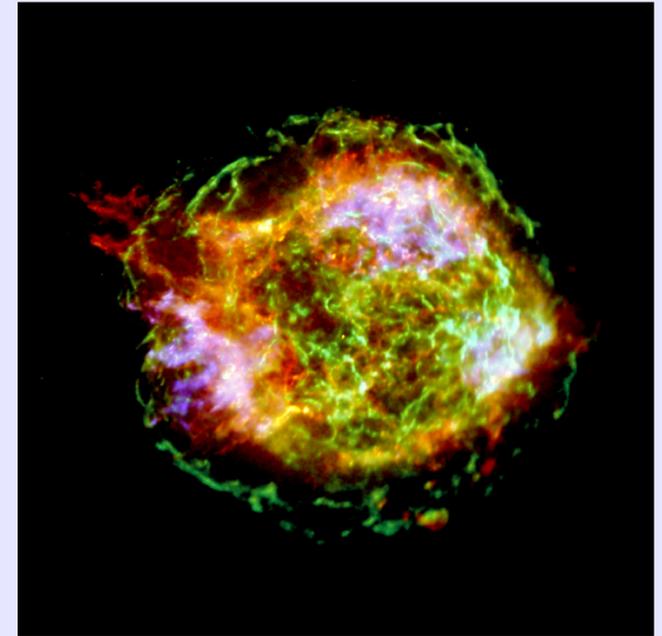
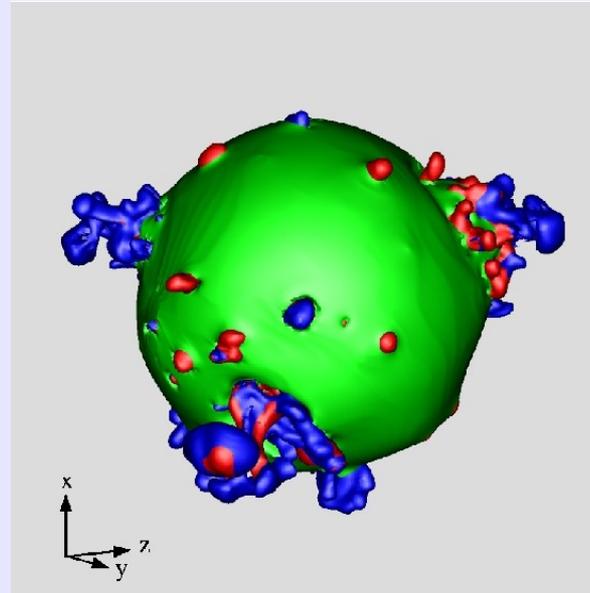


3D Simulation der Ausbreitung der Explosionswelle durch die Hülle eines explodierenden Sterns von 15 Sonnenmassen

Hammer, Janka & Müller (2010)



^{12}C
 ^{16}O
 ^{56}Ni



Zusammenfassung:

**Simulationen sind dritter Weg zur Erkenntnis
mittels komplexer „theoretischer Experimente“**



- „Erklärung“ der Beobachtung durch Simulationen und theoretische Vorhersagen
- Überprüfung der Vorhersage durch neue Beobachtungen --> „Verbesserung“ des Modells

Strukturbildung im Universum und die Entstehung von Galaxien

Urknall-Theorie

Vor etwa 14 Milliarden Jahren hatte der Kosmos eine extrem kleine Ausdehnung ($R < 10^{-33}\text{cm}$) und war nahezu homogen (Quantenfluktuationen!)

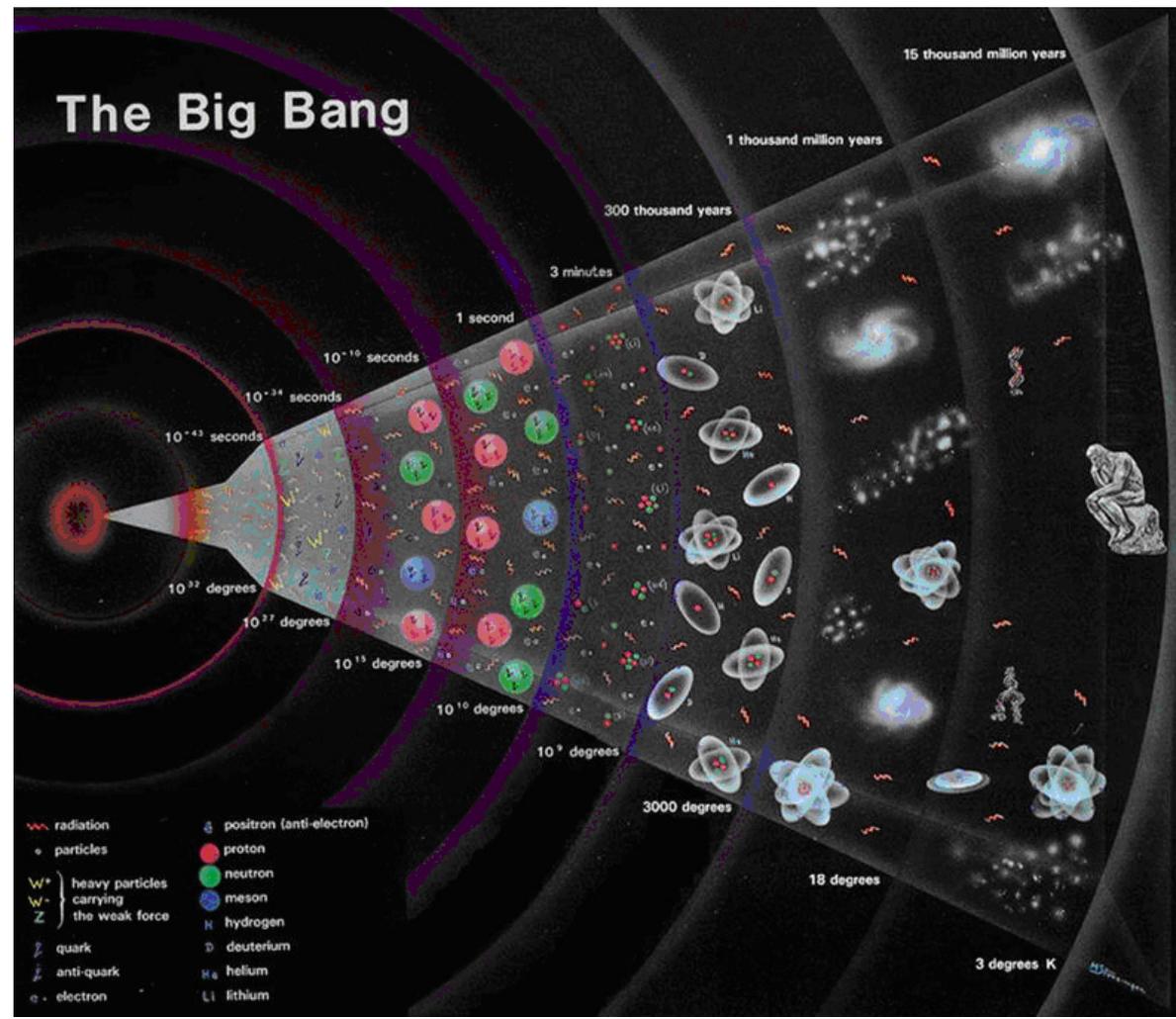
Die **Materie/Energie-Dichte** im Universum war **extrem groß!**



Universum began extrem schnell zu expandieren

Die Dichte sank rapide und das Universum kühlte ab.

Urknall-Theorie durch eine Vielzahl von Beobachtungen bestätigt.



Die Zusammensetzung des Kosmos

Masse der leuchtenden Sterne (sichtbare Materie) reicht nicht aus, um die Bewegungen von Galaxien in Haufen, oder die Drehgeschwindigkeit von Spiralgalaxien zu verstehen.

Es muss weiteres nicht-leuchtendes, aber gravitierendes Material geben!

---> **Existenz von „Dunkler Materie“** (nicht-baryonisch!)

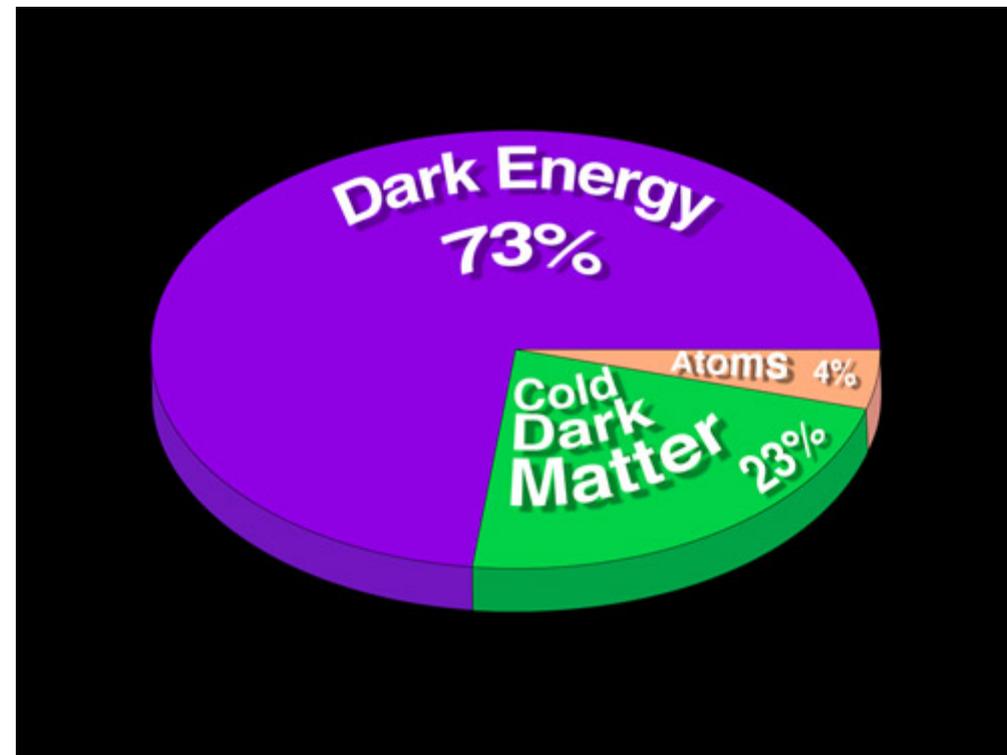
physikalische Natur eines der großen Rätsel der Kosmologie
(unbekannte Elementarteilchen?)

Beobachtungen entfernter Supernovae:

---> **Existenz von „Dunkler Energie“**

beschleunigt die Expansion des Universum („Anti-Gravitation“)

Größtes Rätsel der Kosmologie!

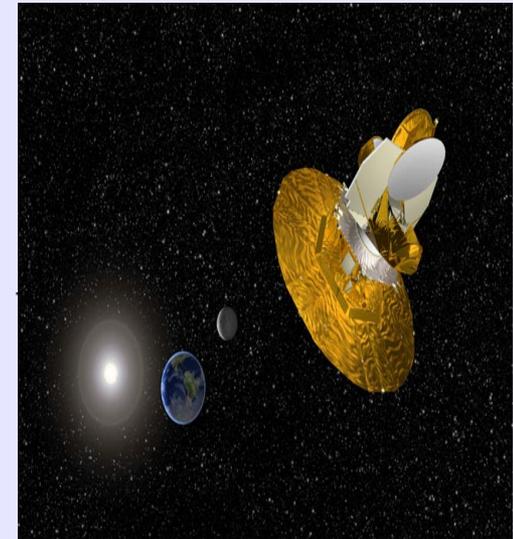
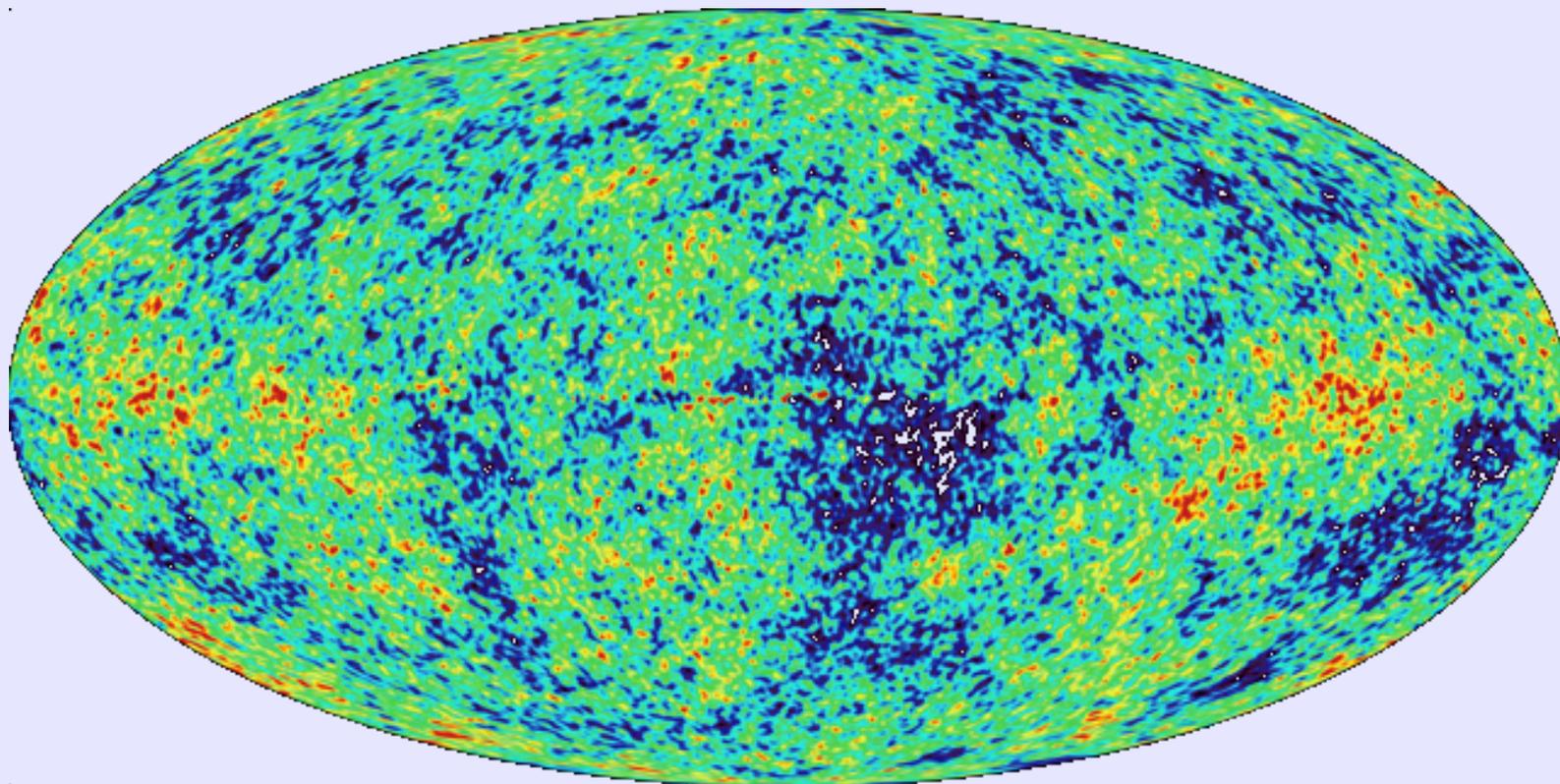


Entstehung der kosmischen Struktur I

Temperatur der **kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung** („Echo des Urknalls“) in jeder Himmelsrichtung sehr genau vermessen

---> sehr kleine Schwankungen um **mittlere Temperatur von 2,73 K**
($\Delta T/T \sim 10^{-5}$)

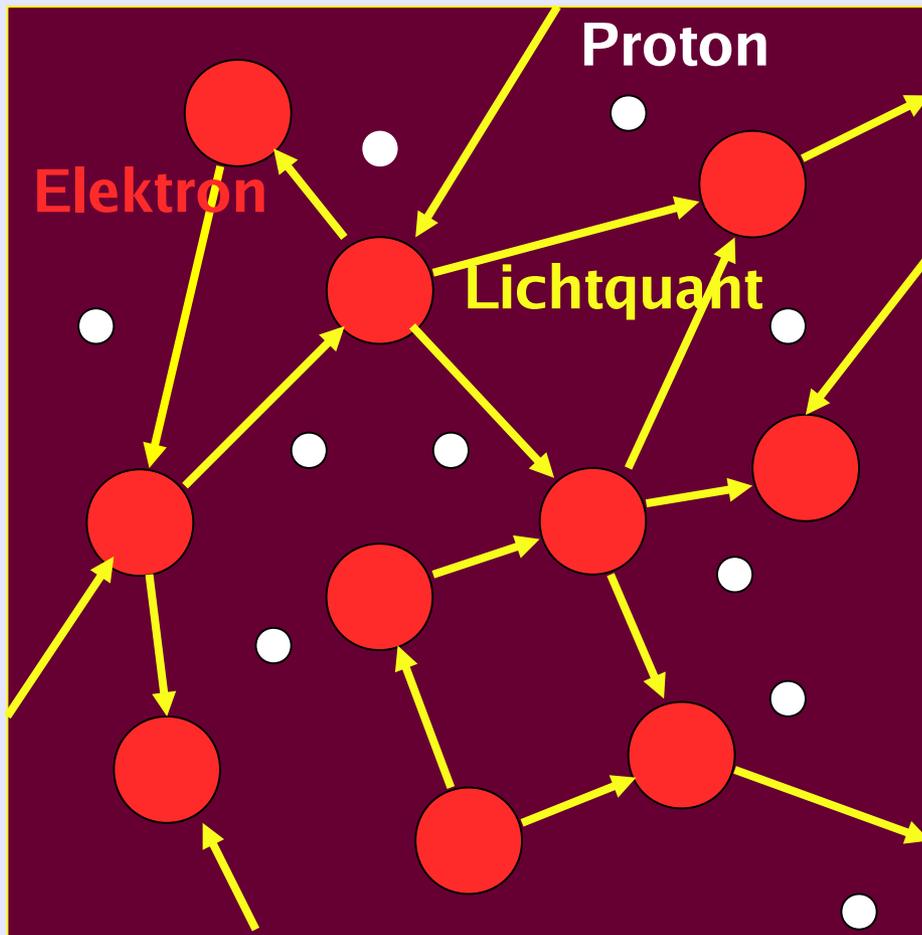
„Bild“ des Kosmos nach 380000 J



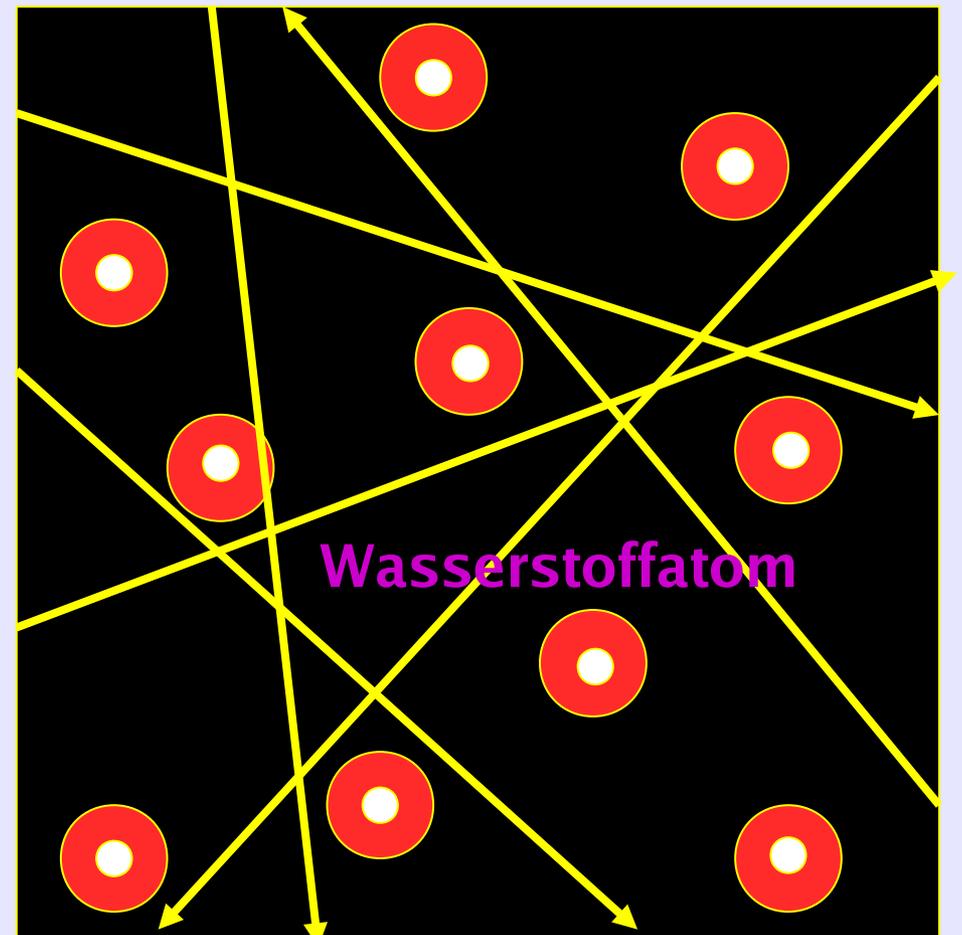
NASA
Satellit
WMAP

380.000 Jahre nach dem Urknall: Das Zeitalter der Entkopplung

Vorher



Nachher

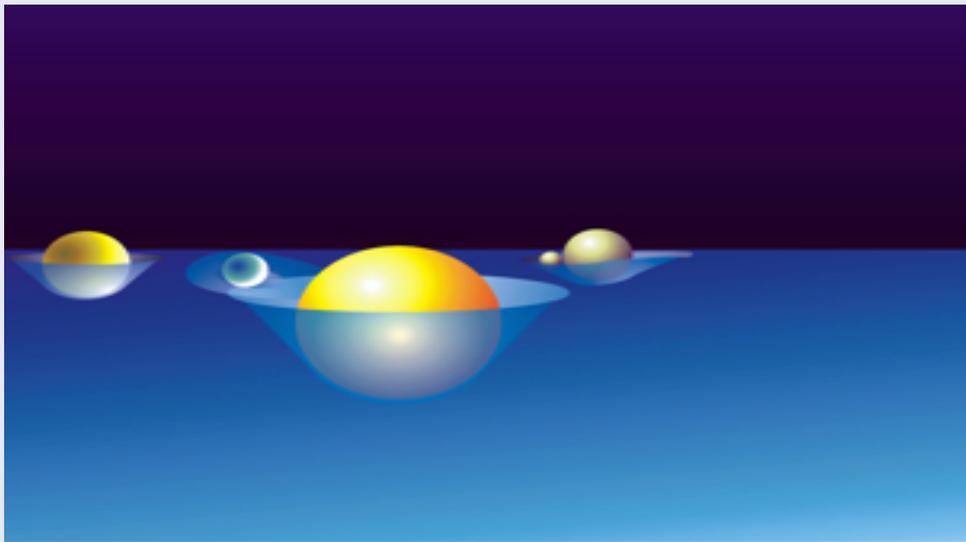


Das Universum wird durchsichtig

Entstehung der kosmischen Struktur II

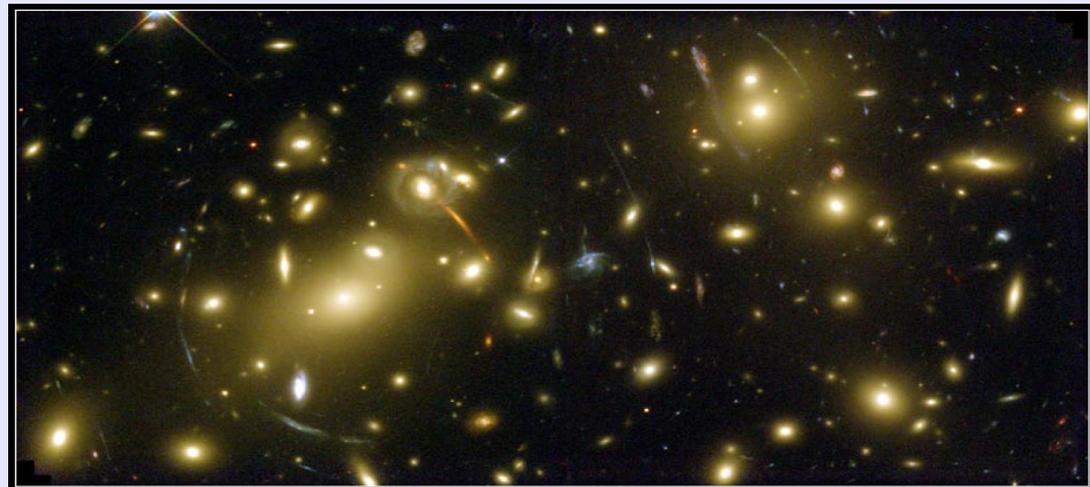
Temperaturschwankungen geben Aufschluss über Dichteschwankungen im sehr jungen Universum

- > **Gravitationskräfte verstärken Dichteschwankungen** in der kalten Dunklen Materie
heiße „gewöhnliche“ (baryonische) Materie fällt später in die Potentialwannen der Dunklen Materie
- > heute beobachtbare Strukturen (Galaxien & Galaxienhaufen)



Potentialwannen der „Dunklen Materie“ sind mit heißem (baryonischem) Gas gefüllt

Lichtablenkung (**Gravitationslinseneffekt**) verrät Dunkle Materie



Galaxy Cluster Abell 2218

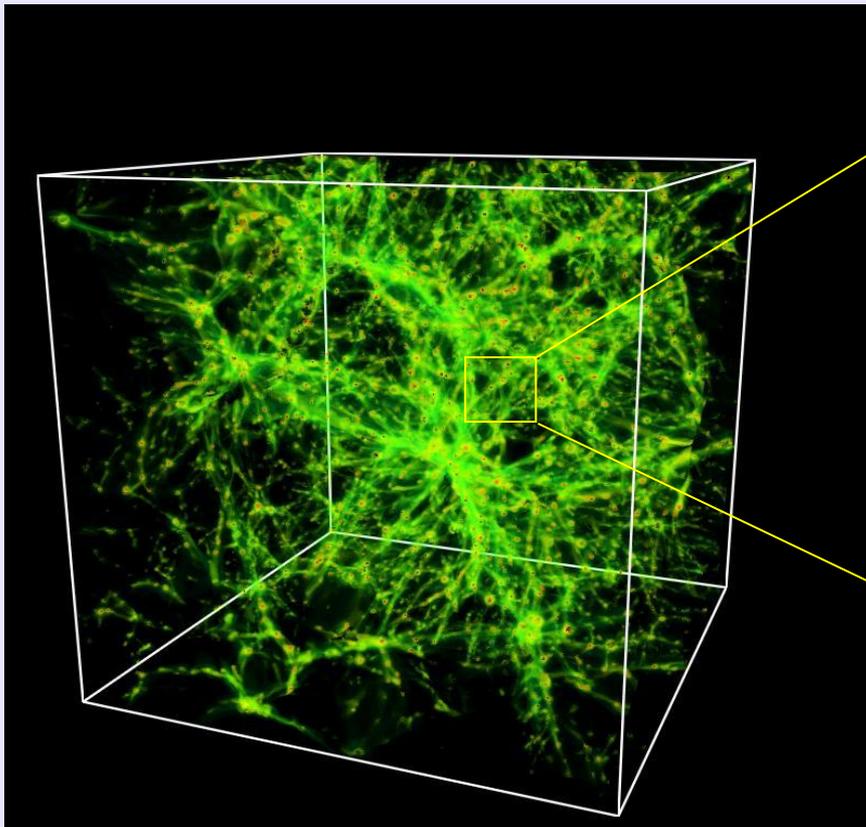
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2

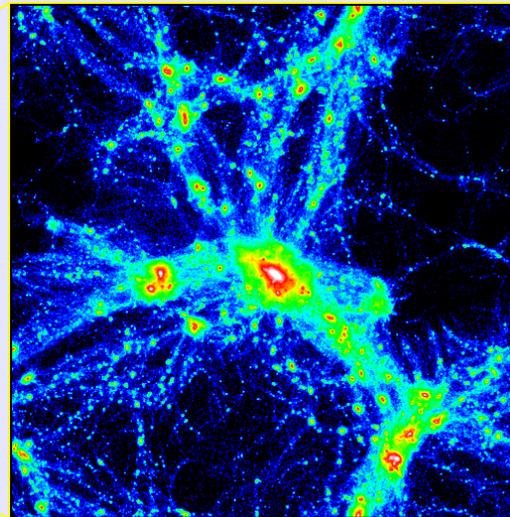
Entstehung der kosmischen Struktur III

Galaxienhaufen & Galaxien

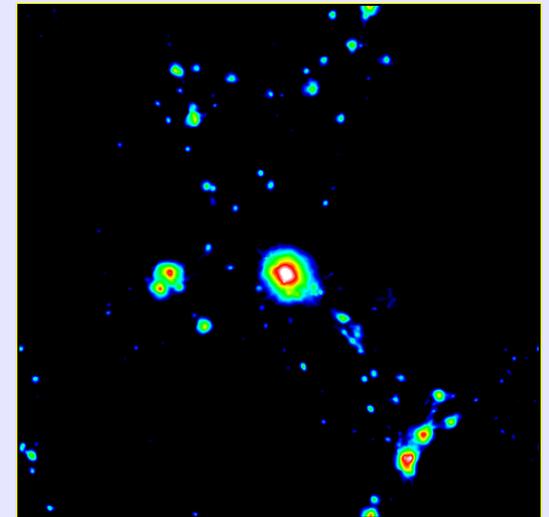
... entstehen an den 3D-Schnittpunkten von Filamenten



Dunkle Materie



Heiße Baryonen



Millennium Simulation

Springel et al. (2005), MPA

größte bis dahin durchgeführte
N-Teilchen-Simulation in der Welt

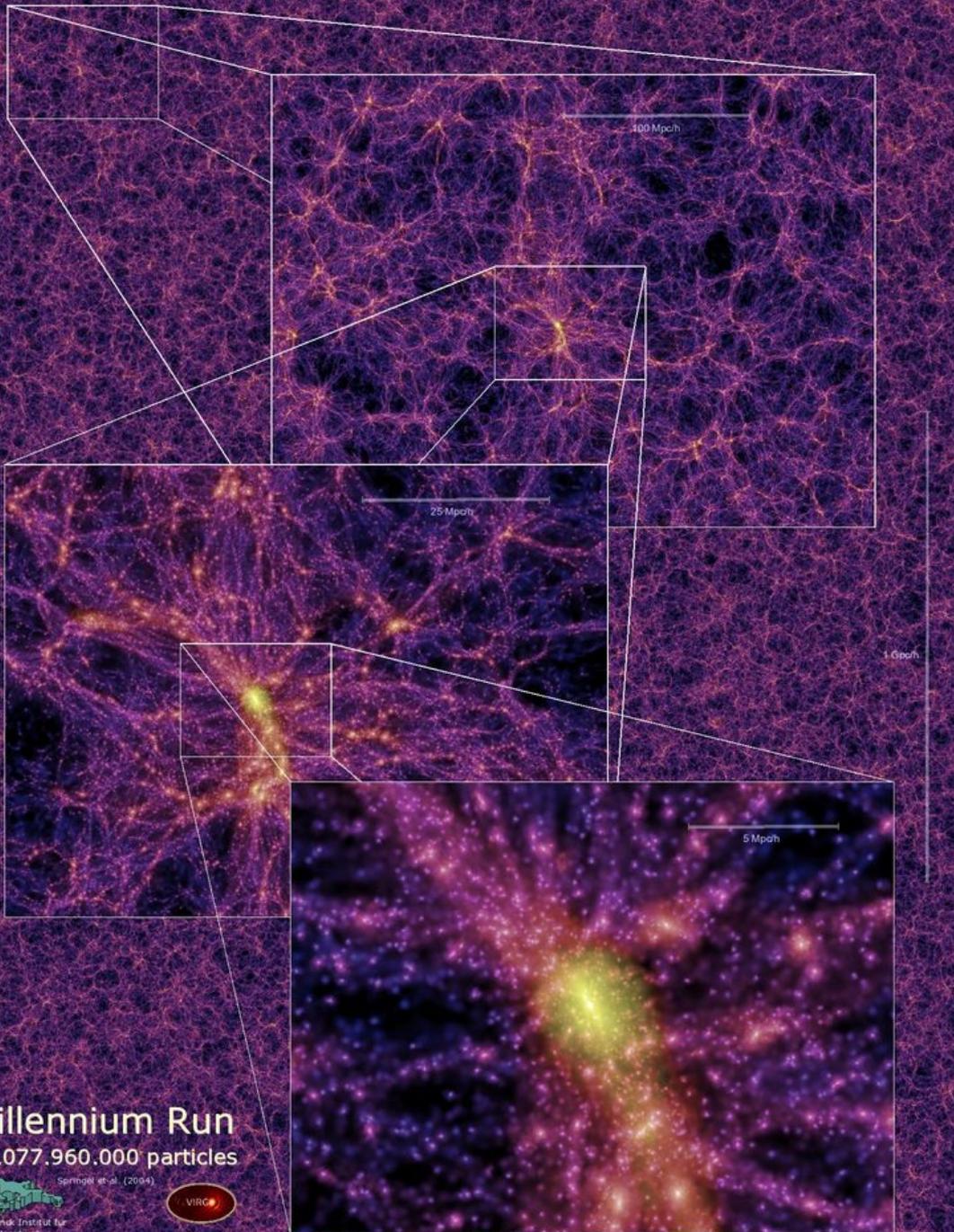
(~10 Milliarden Teilchen)

Würfel mit einer Kantenlänge von
etwa **2 Milliarden Lichtjahre**, in
dem etwa **20 Millionen Galaxien**
entstehen

Simulation:

512 IBM Power4 Prozessoren für
etwa 6 Wochen

25 Tbyte abgespeicherte Daten



Millennium Run
10,077,960,000 particles

Springel et al. (2004)



Max-Planck Institut für
Astrophysik



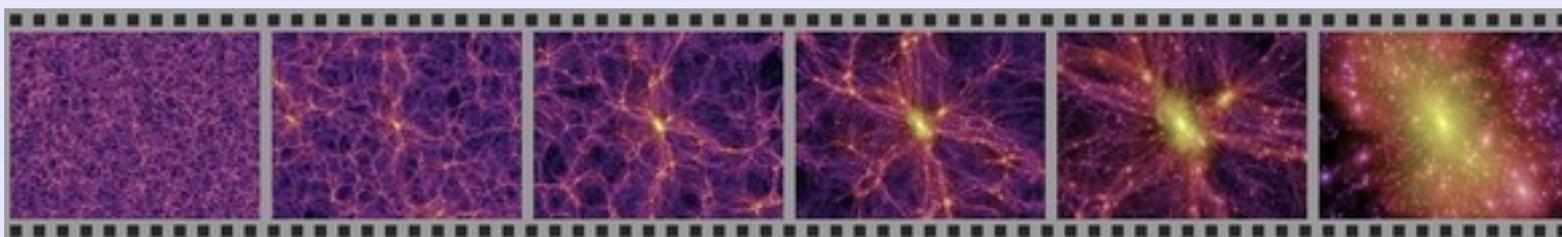
3-D Visualisierung der Millennium Simulation

(Springel et al. (2005), MPI für Astrophysik)

Der Film zeigt eine **Reise durch das simulierte Universum**. Wir treffen dabei auf einen großen Galaxienhaufen, den wir umfliegen. In der zweiminütigen Filmreise legen wir eine Strecke zurück, für die das Licht 2,4 Milliarden Jahre brauchen würde.



Der Film zeigt die **Verteilung der Dunklen Materie des heutigen Universums**



Verschmelzungsprozess zweier Spiralgalaxien zu einer elliptischen Galaxie

di Matteo et al. (2005), MPA

Nach ihrer Annäherung entfernen sich die Galaxien, die jeweils ein **zentrales extrem massereiches Schwarzes Loch** besitzen, wieder voneinander, um danach ein **zweites Mal zusammenzustoßen**, bevor sie schließlich **verschmelzen**.

Die Gravitation zieht Gas in die Galaxienzentren und dort in die Schwarzen Löcher. Es entstehen **ausgedehnte Gezeitenarme**

Endprodukt: **Elliptische Galaxie**, die fast **kein Gas** mehr besitzt, mit dem verschmolzenen Paar extrem massereicher Schwarze Löcher in ihrem Zentrum

**Nur Gaskomponente
ist dargestellt**

Helligkeit / Farbe =
Gasdichte / Gastemperatur



Zusammenfassung:

**Simulationen sind dritter Weg zur Erkenntnis
mittels komplexer „theoretischer Experimente“**



- „Erklärung“ der Beobachtung durch Simulationen und theoretische Vorhersagen
- Überprüfung der Vorhersage durch neue Beobachtungen --> „Verbesserung“ des Modells