

# Gravitationswellen

*Sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitende  
periodische Verformungen der raumzeitlichen Struktur*

VORTRAG AN DER STERNWARTE HOFHEIM

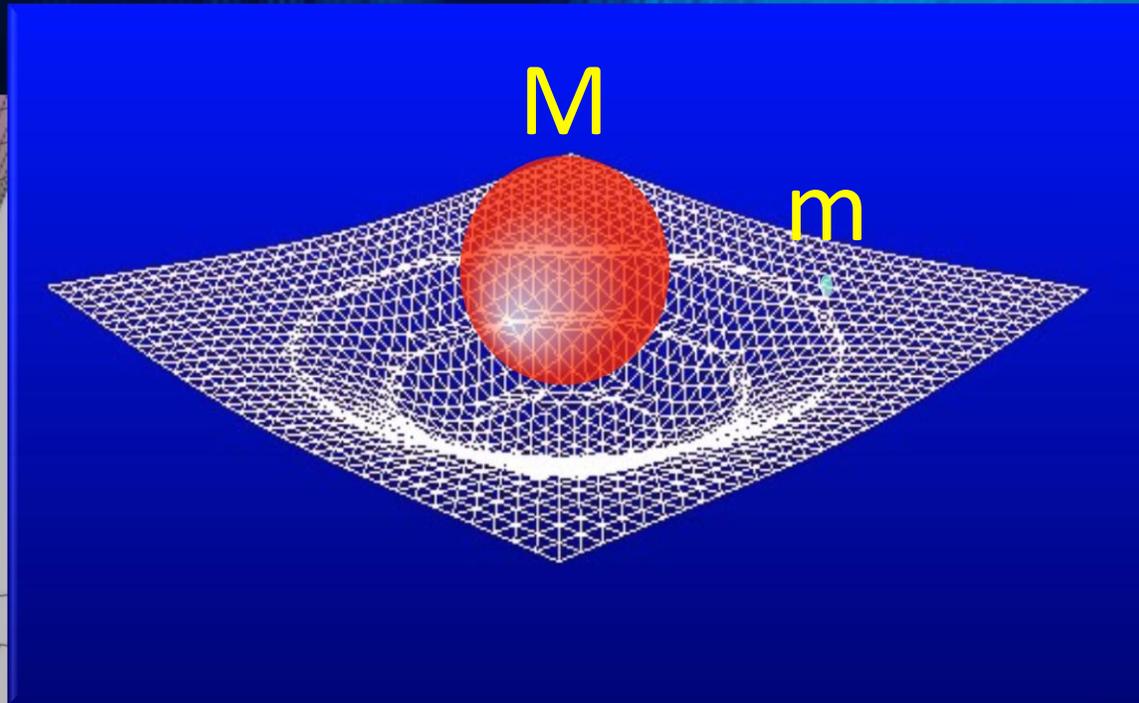
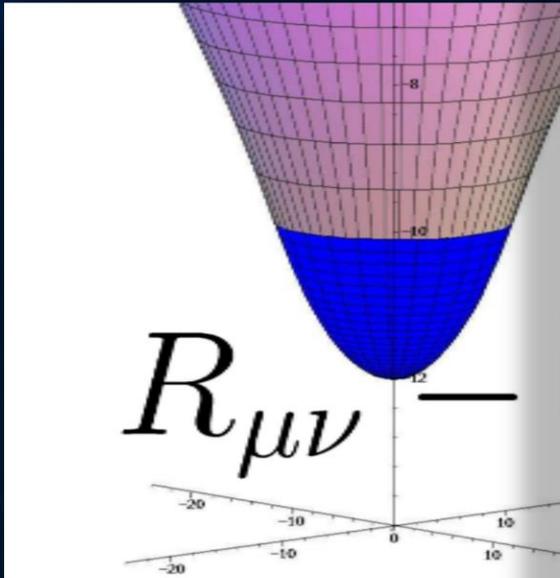
STERNWARTE HOFHEIM ( [HTTP://WWW.STERNWARTE-HOFHEIM.DE/](http://www.sternwarte-hofheim.de/) )  
EPPSTEINER STRAÙE, 65719 HOFHEIM AM TAUNUS , 07. FEBRUAR 2019

*MATTHIAS HANAUSKE*

FRANKFURT INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES  
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT  
INSTITUT FÜR THEORETISCHE PHYSIK  
ARBEITSGRUPPE RELATIVISTISCHE ASTROPHYSIK  
D-60438 FRANKFURT AM MAIN

# Allgemeinen Relativitätstheorie

## Die Einsteingleichung



ellte Albert Einstein  
orie" (ART) der

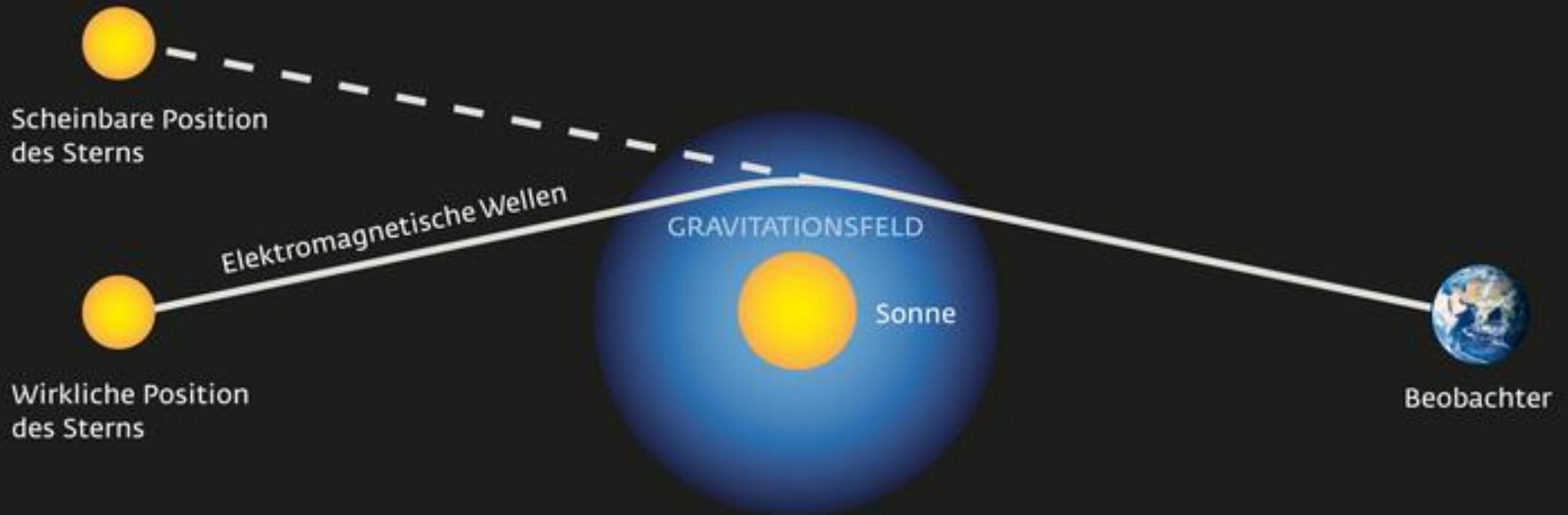
$$T_{\mu\nu}$$

Raumzeit-Krümmung = Energie

Die ART ist eine sehr revolutionäre Theorie. Sie besagt, dass jegliche Energieformen (z.B. Masse der Erde) die „Raumzeit“ verbiegen und durch diese Krümmung des Raumes und der Zeit resultiert die Gravitationskraft (Schwerkraft).

# Erste Bestätigung der ART: Sonnenfinsternis 1919

Aufgrund des extrem revolutionären Charakters der ART glaubten viele Physiker zunächst nicht an Einsteins Theorie. Das änderte sich schlagartig im Jahre 1919:



# Der Einstein-Ring



LRG 3-757: im Jahre 2007 mit dem Hubble Space Teleskop aufgenommen

# Gravitative Zeitdilatation

Den Effekt der Zeitverbiegung kann man heutzutage sogar auf der Erde nachweisen -> Uhren ticken in den Bergen ein wenig schneller als im Tal.

News  
12.02.2018  
[Drucken](#)  
[Teilen](#)

RELATIVITÄTSTHEORIE

## Warum die Zeit im Gebirge schneller vergeht

Mit einem surrealen Effekt der Gravitationsphysik haben Wissenschaftler die Höhe eines Tunnels in den französischen Alpen bestimmt.

von Robert Gast



© ISTOCK / SKOUATROULIO (AUSSCHNITT)

2018 auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de)

# Frankfurter Allgemeine

Physik & Mehr

WISSEN GIZIN GENE KLIMA WELTRAUM GARTEN NETZRÄTSEL

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

## Hurra, wir hier unten leben länger!

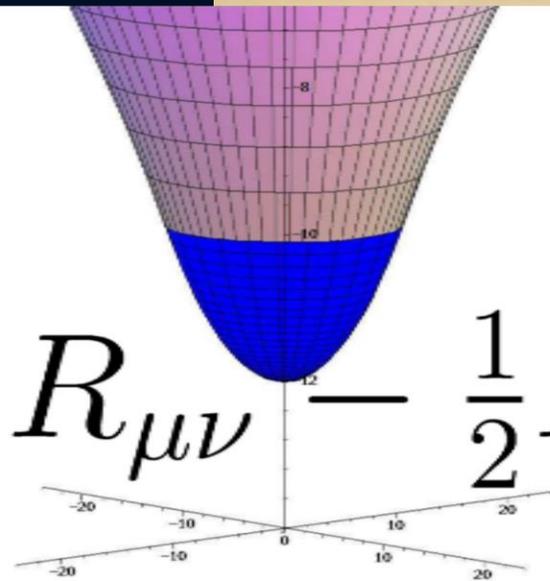
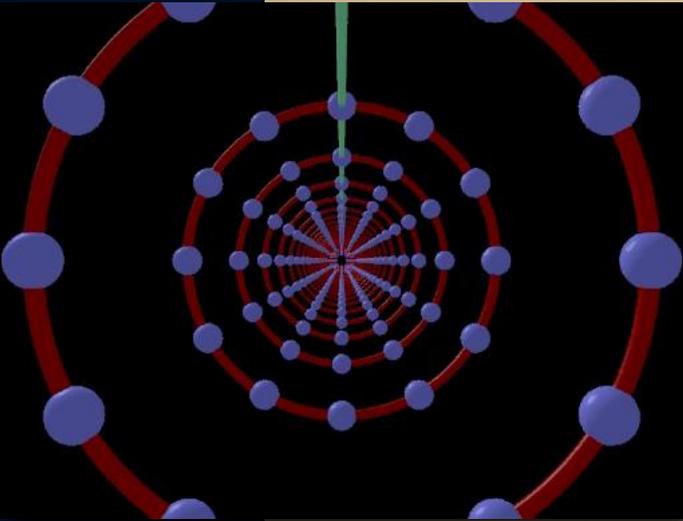
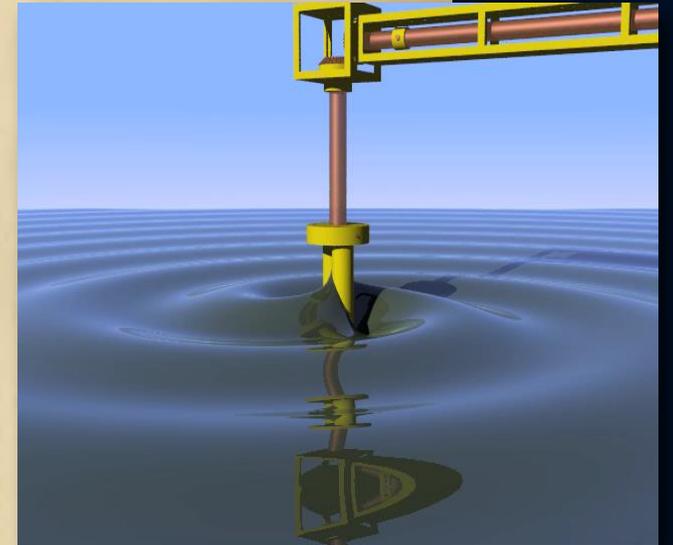
VON ANNE HARDY - AKTUALISIERT AM 19.10.2010 - 06:00



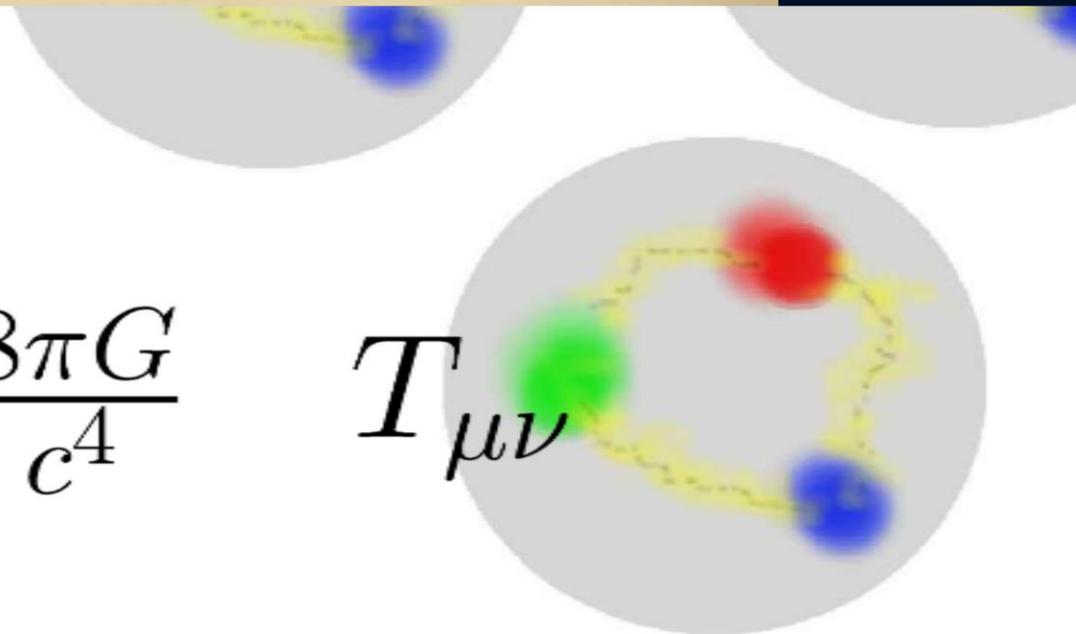
# Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

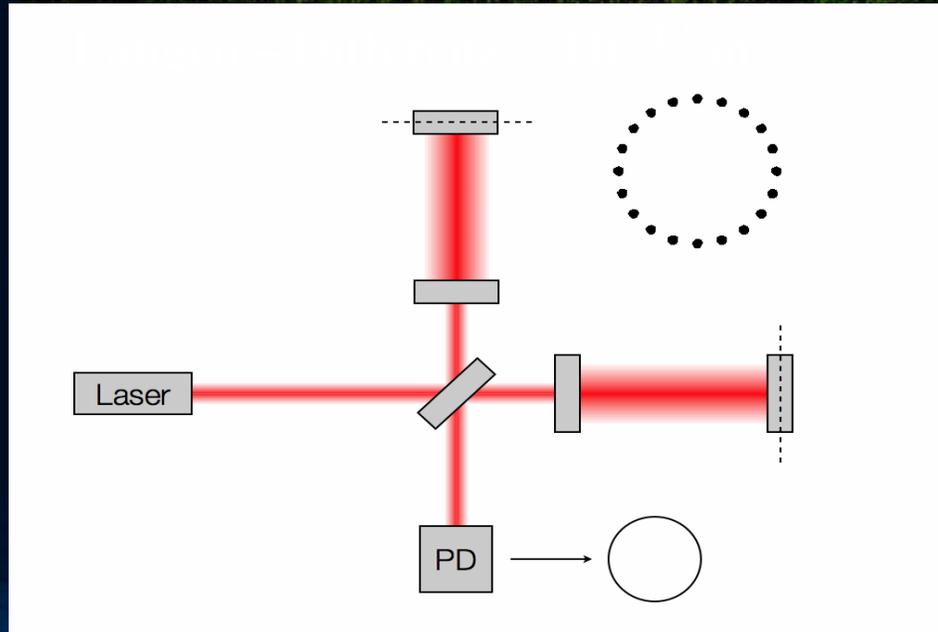
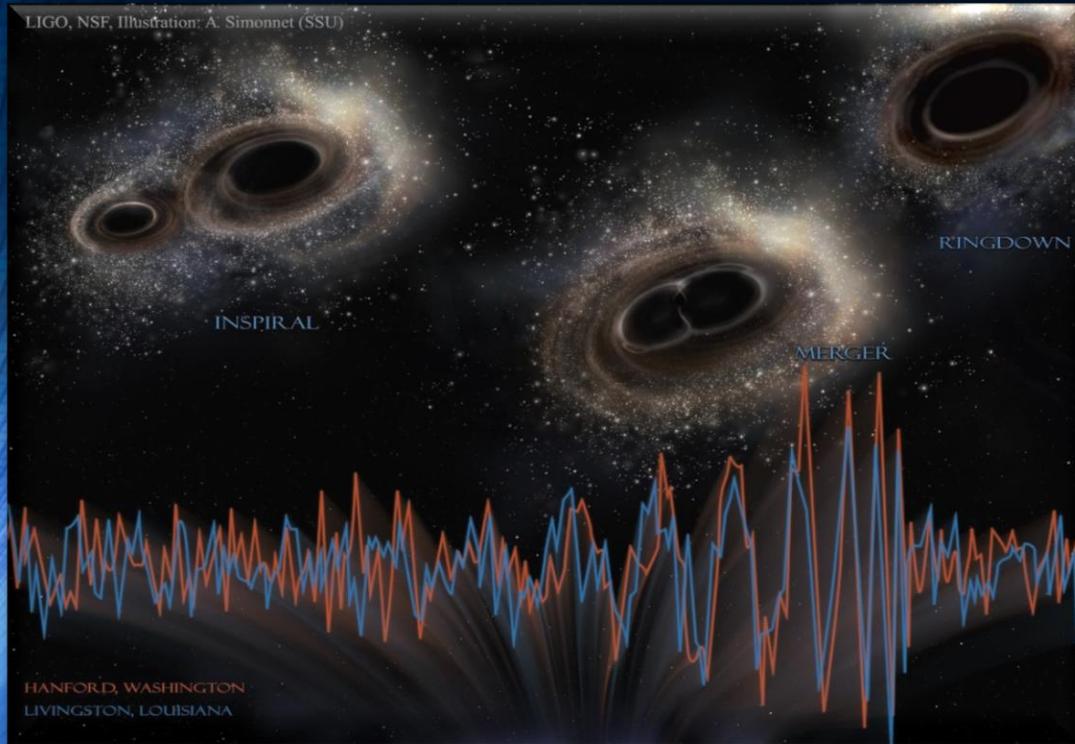


# Erste Gravitationswelle im Jahr 2015 gefunden!!

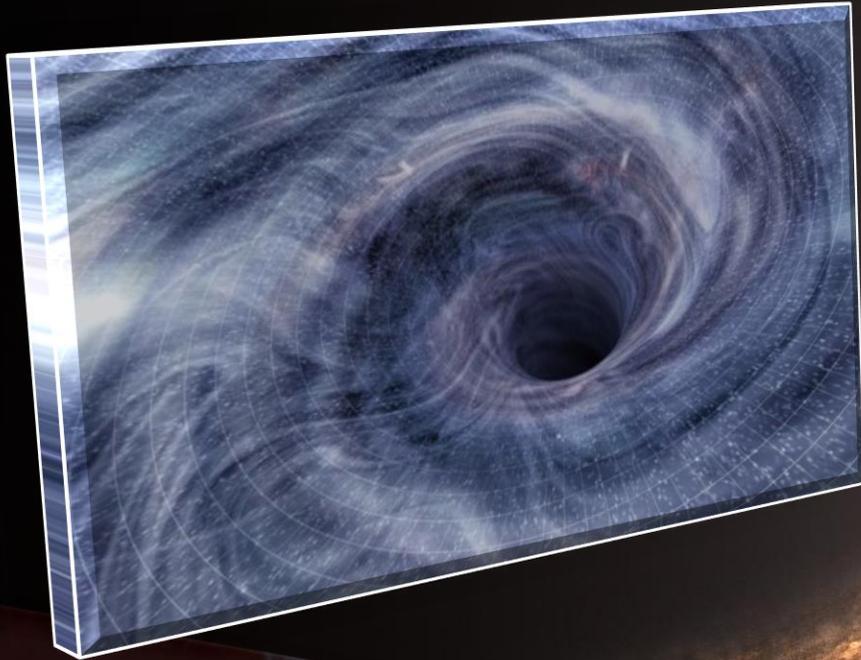
## Kollision zweier Schwarzer Löcher GW150914

**Massen: 36 & 29 Sonnenmassen**

**Abstand zur Erde 410 Mpc  
(1.34 Milliarden Lichtjahre)**



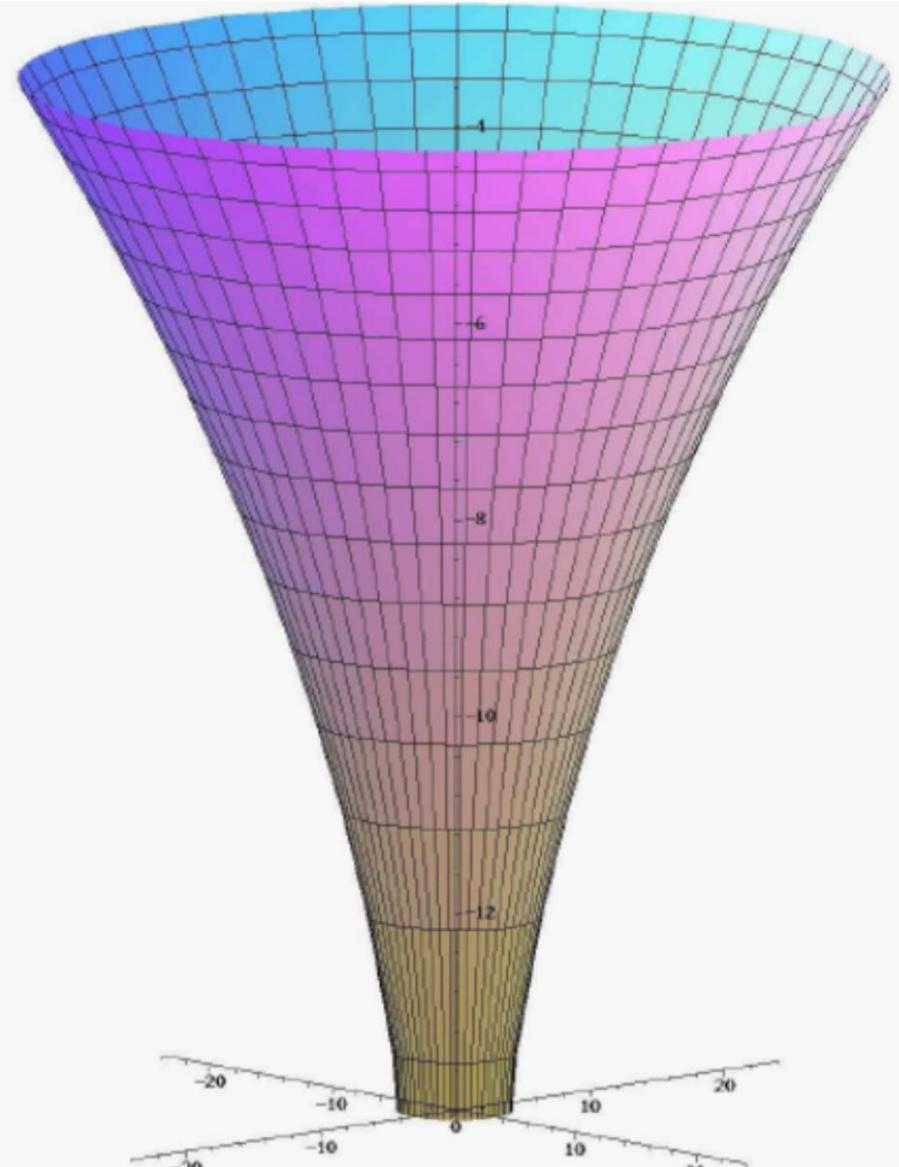
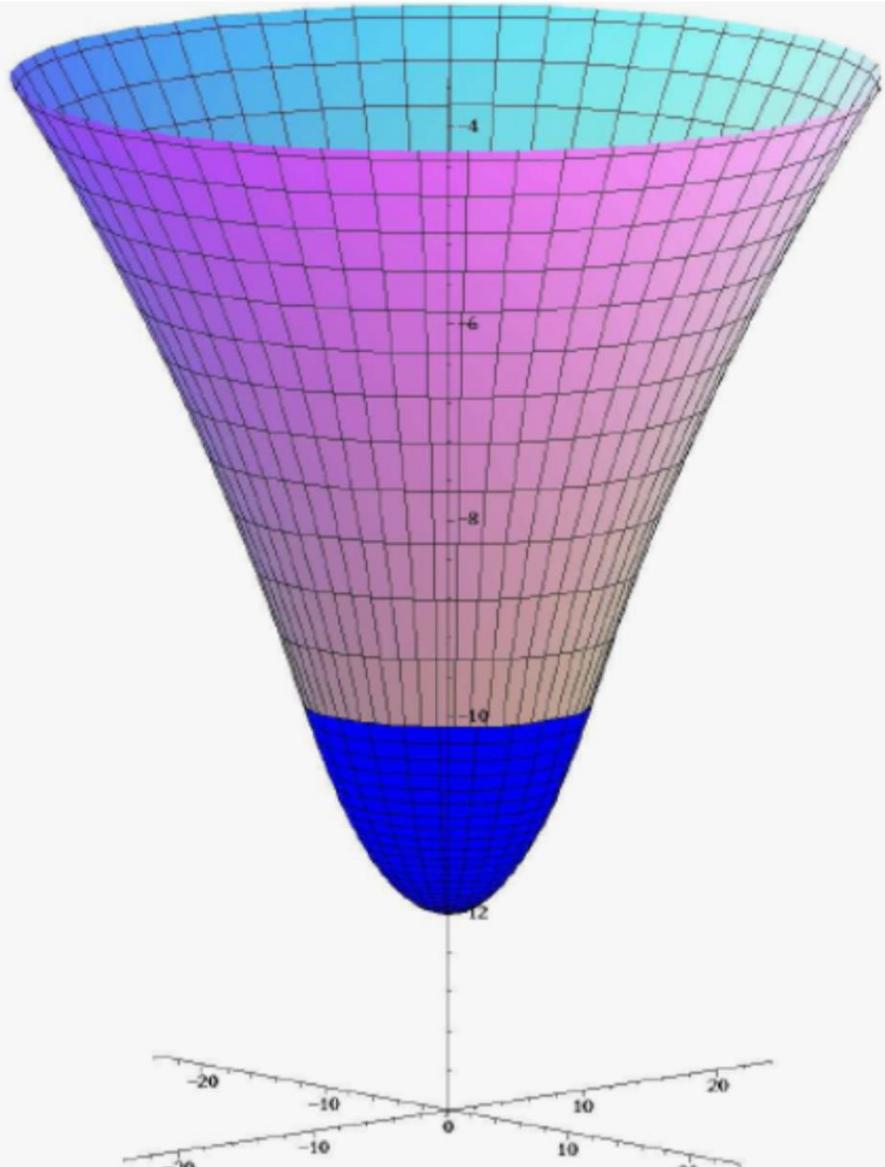
# Was sind schwarze Löcher?



# Raumzeit - Krümmung

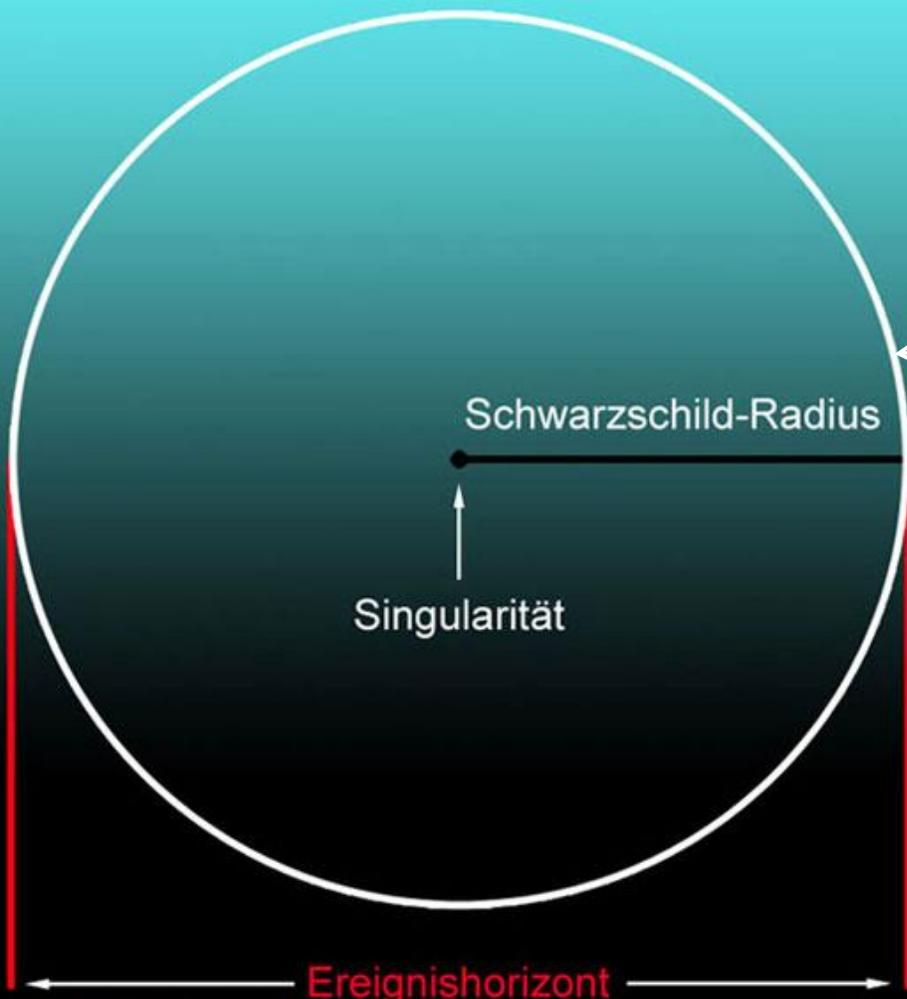
Neutronenstern

Schwarzes Loch



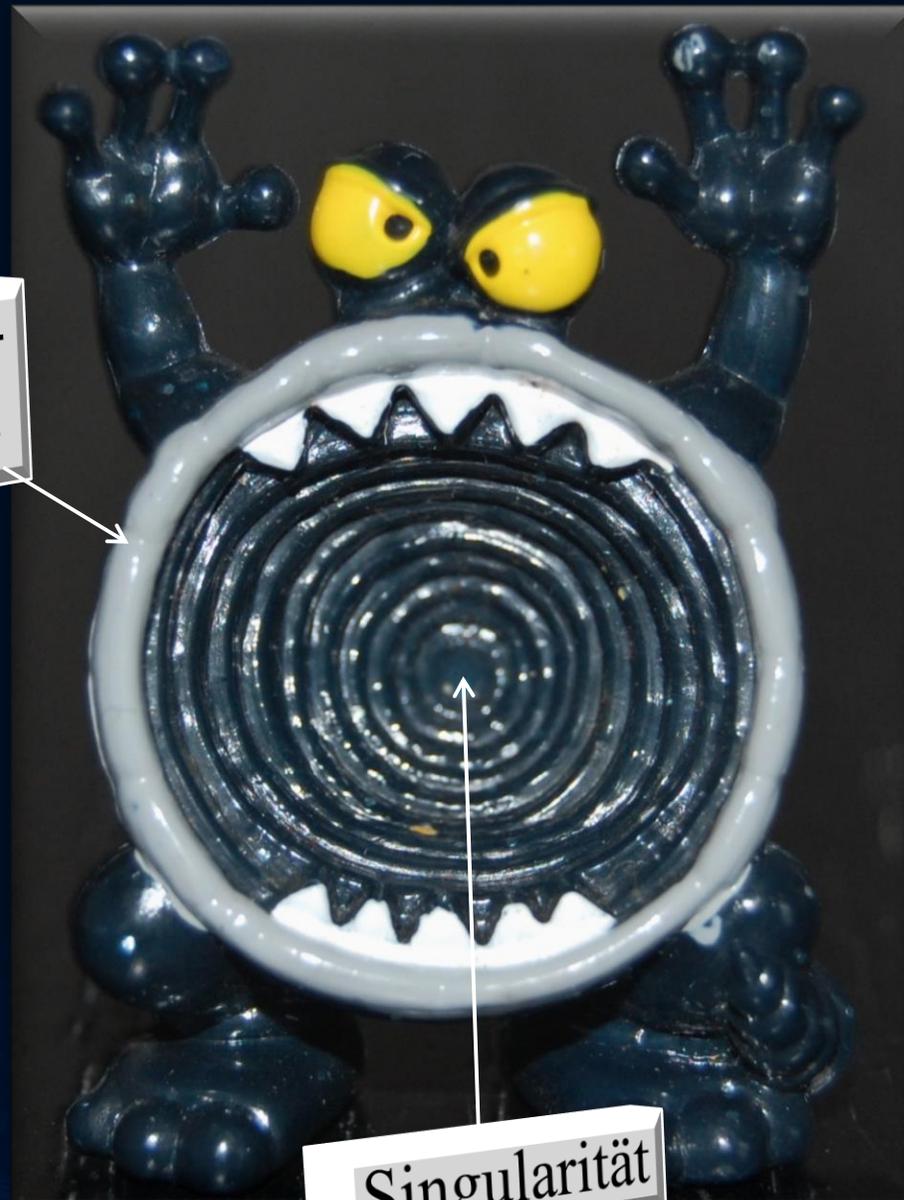
# Der Ereignishorizont eines Schwarzen Loches

## Grundstruktur eines Schwarzen Lochs



copyright blog.planet-br.com

Ereignis-  
horizont

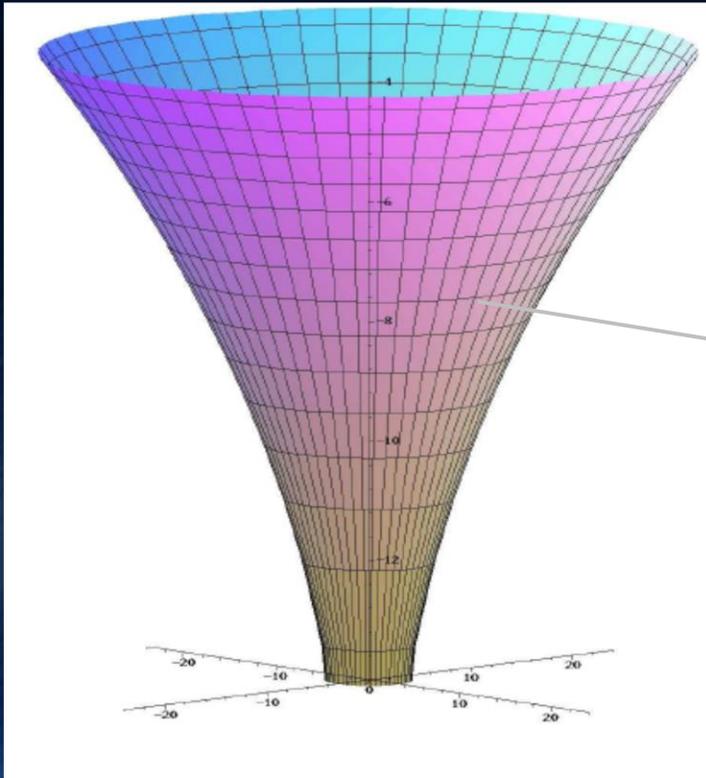


Singularität

# Der deutsche Bundestag in Berlin

## Die wohl beste Veranschaulichung eines schwarzen Loches

Der Raumzeit-Trichter  
im Reichstagsgebäude



Der deutsche Bundestag in Berlin  
Die wohl beste Veranschaulichung  
eines schwarzen Loches



# Schwarze Löcher und der deutsche Reichstag



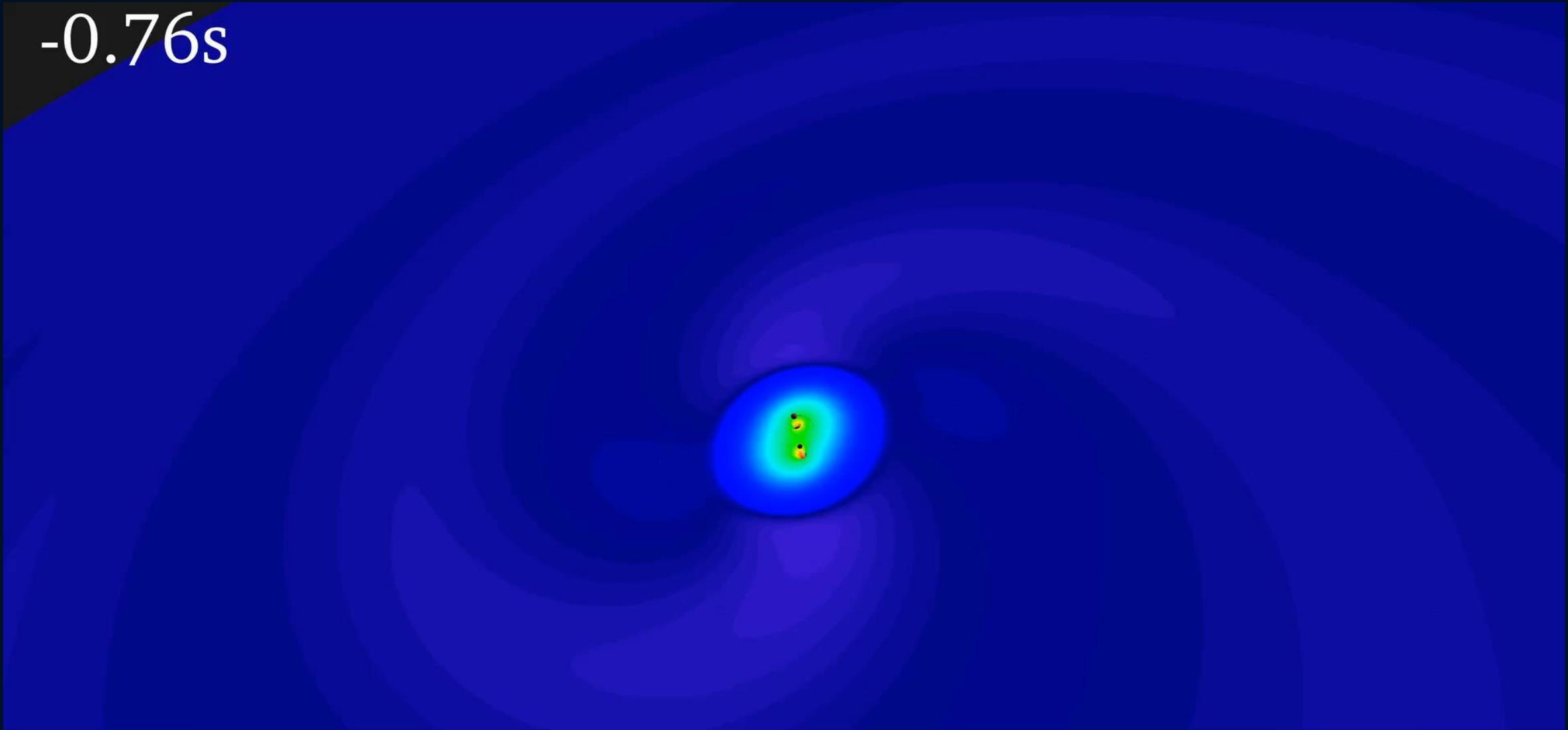
Ereignis-  
horizont

Ereignishorizont

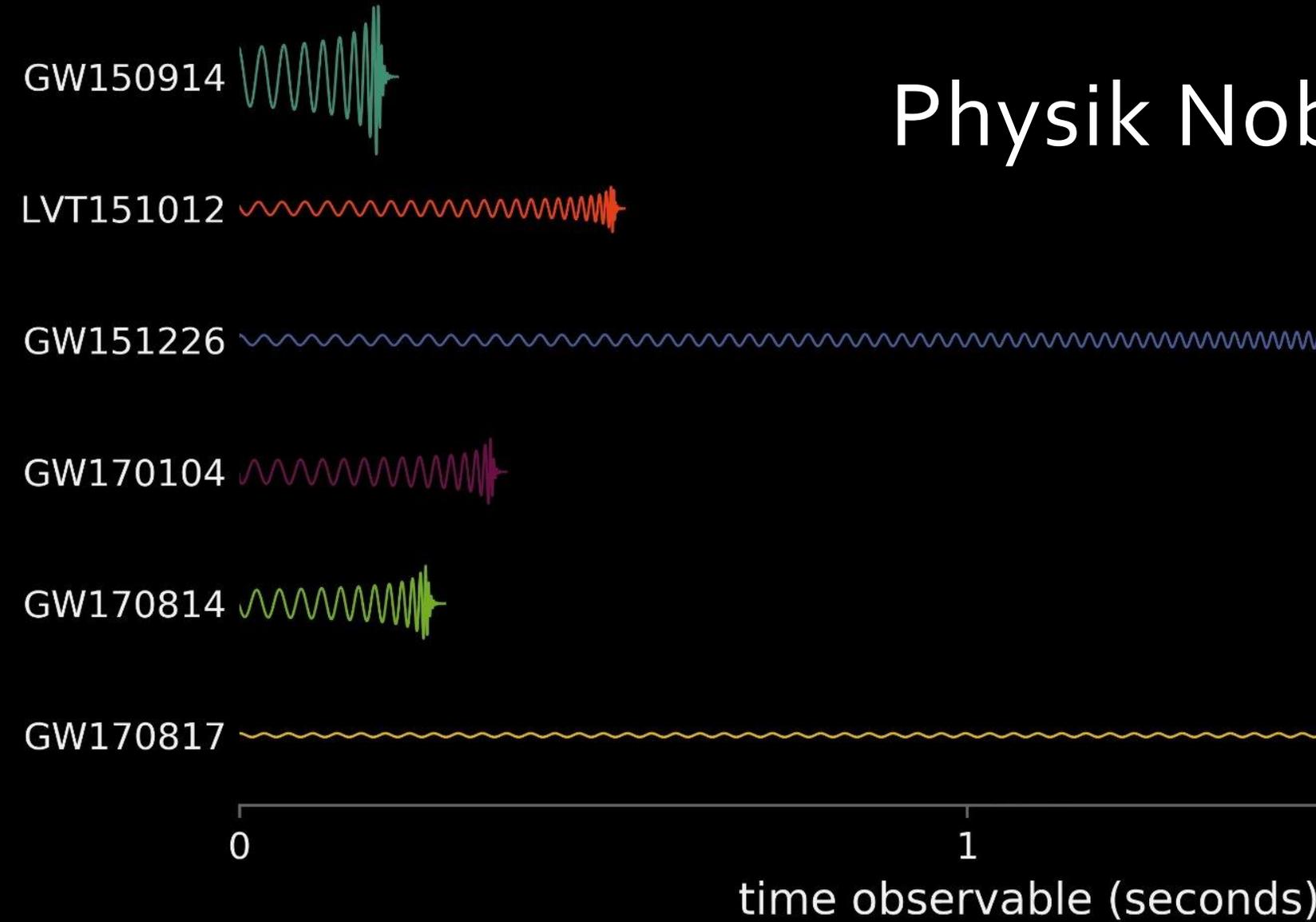
Echte Singularität

# Computer Simulation: Kollidierende Schwarze Löcher

-0.76s



# Physik Nobel Preis 2017

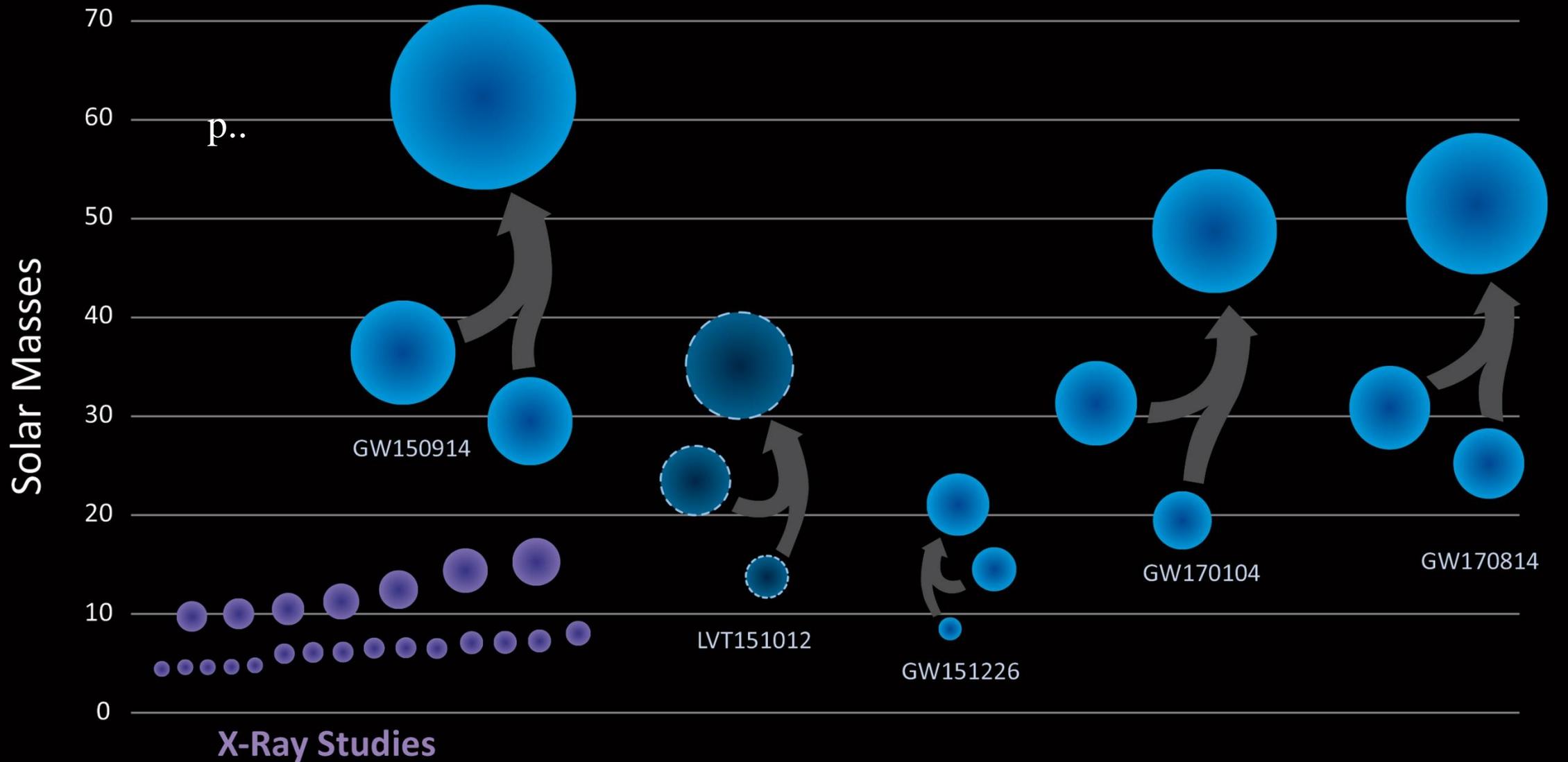


2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



Rainer Weiss  
Barry C. Barish  
Kip S. Thorne

# Beobachtete Verschmelzungen von schwarzen Löchern



# Das lang ersehnte Ereignis GW170817

	Low-spin priors ( $ \chi  \leq 0.05$ )	High-spin priors ( $ \chi  \leq 0.89$ )
Primary mass $m_1$	$1.36-1.60 M_\odot$	$1.36-2.26 M_\odot$
Secondary mass $m_2$	$1.17-1.36 M_\odot$	$0.86-1.36 M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio $m_2/m_1$	$0.7-1.0$	$0.4-1.0$
Total mass $m_{\text{tot}}$	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy $E_{\text{rad}}$	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance $D_L$	$40^{+8}_{-14}$ Mpc	$40^{+8}_{-14}$ Mpc
Viewing angle $\Theta$	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	$\leq 700$	$\leq 700$
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	$\leq 800$	$\leq 1400$

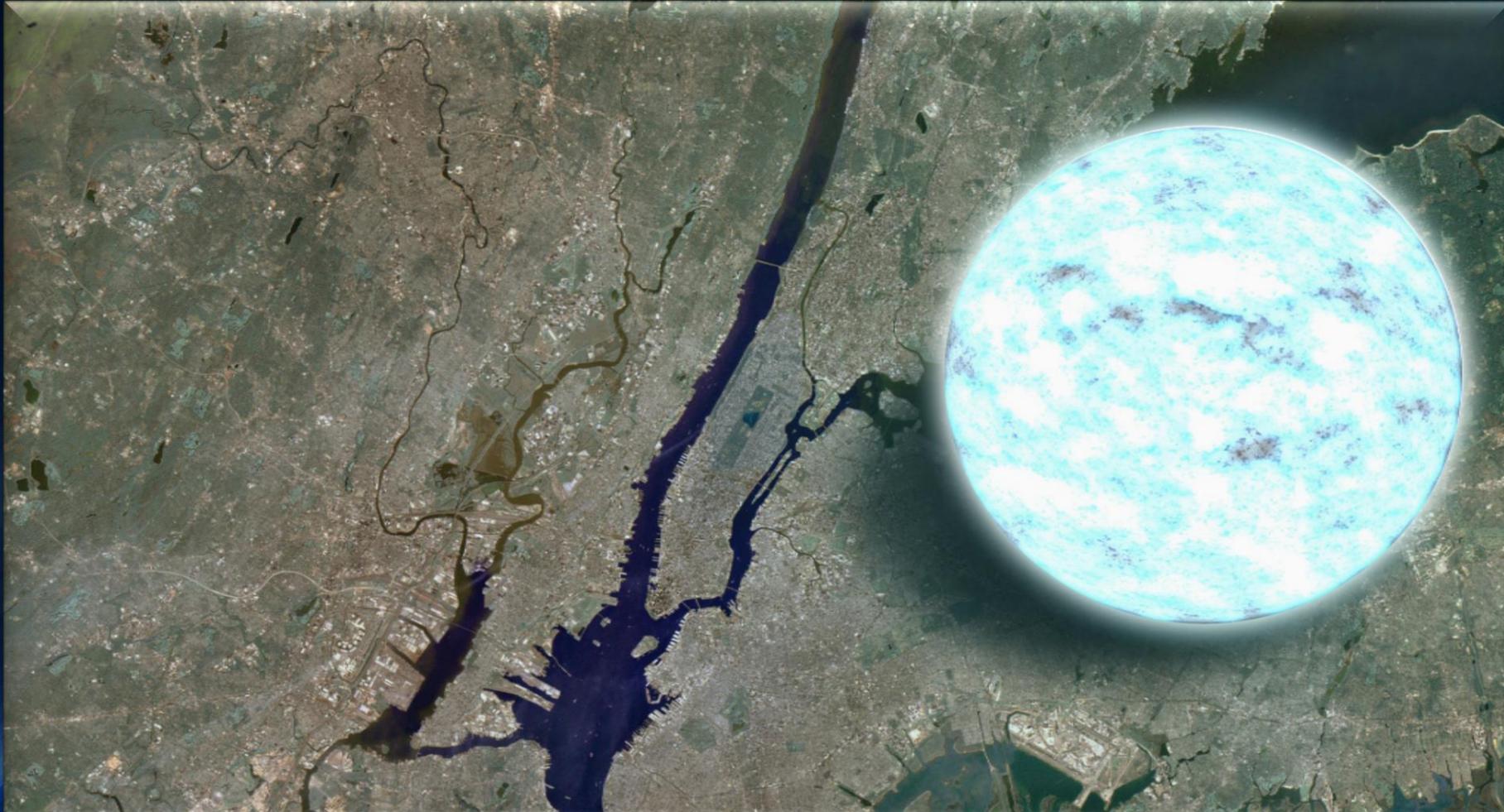
17. August 2017

Gravitationswelle einer  
Neutronenstern Kollision gemessen!

# Neutronensterne: Sehr klein und sehr schwer

Radius  $\sim 10$  km, Masse  $\sim 1$ -2 Sonnenmassen

Riesige Magnetfelder  $\sim 10^{11}$  Tesla, schnell rotierend (bis zu 716 Hz)

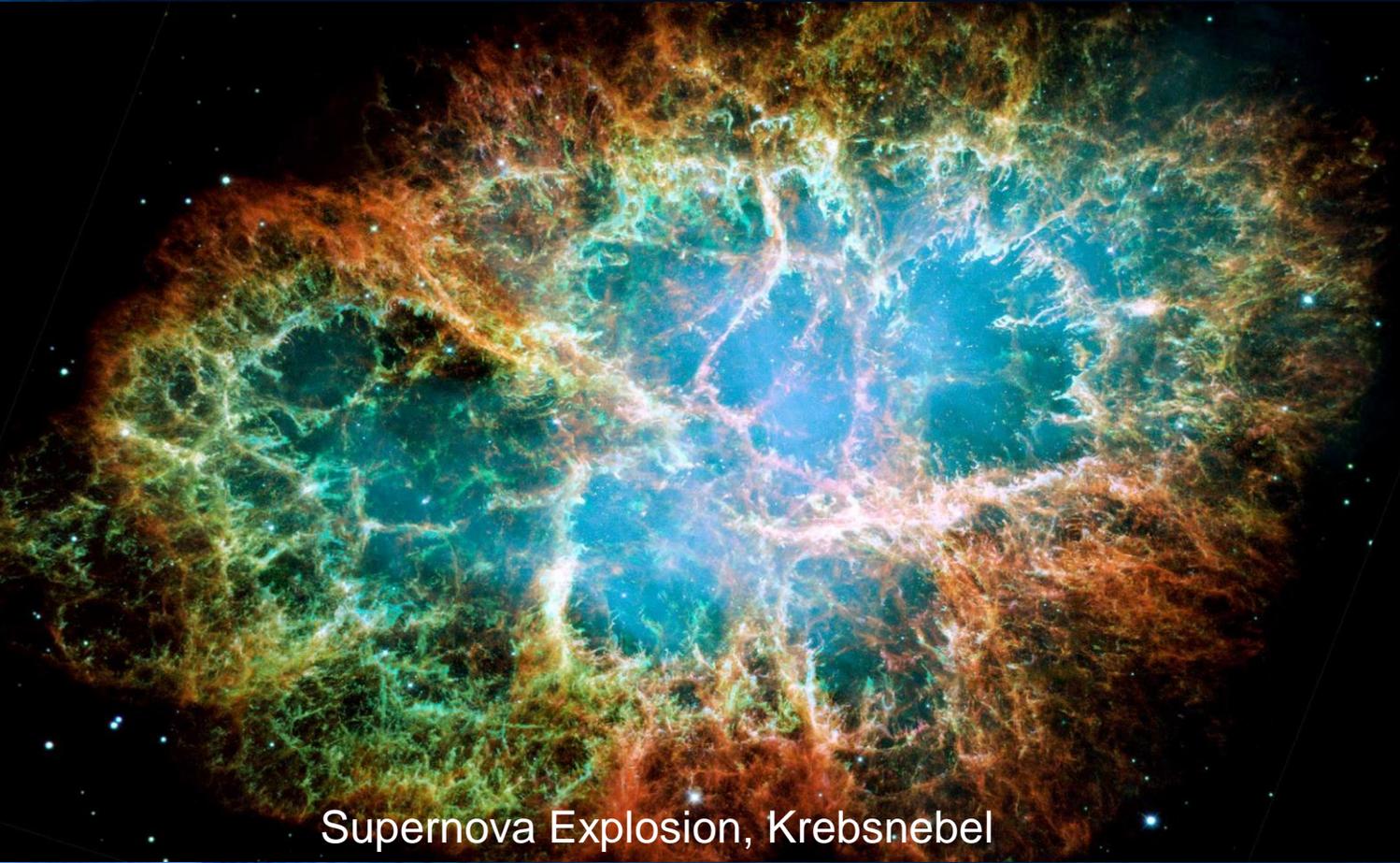


# Wie entstehen Neutronensterne?

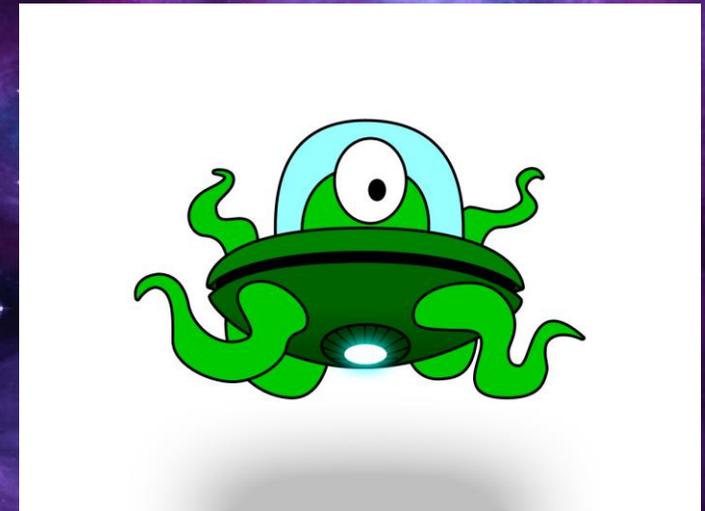
Neutronensterne entstehen in einer Supernova Explosion. Sonnen, die mindestens 8-mal schwerer als unsere Sonne sind explodieren am Ende ihrer Lebenszeit in einer Supernova Explosion – im Zentrum bleibt ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch zurück.



Im Zentrum des Nebels  
ist ein Neutronenstern

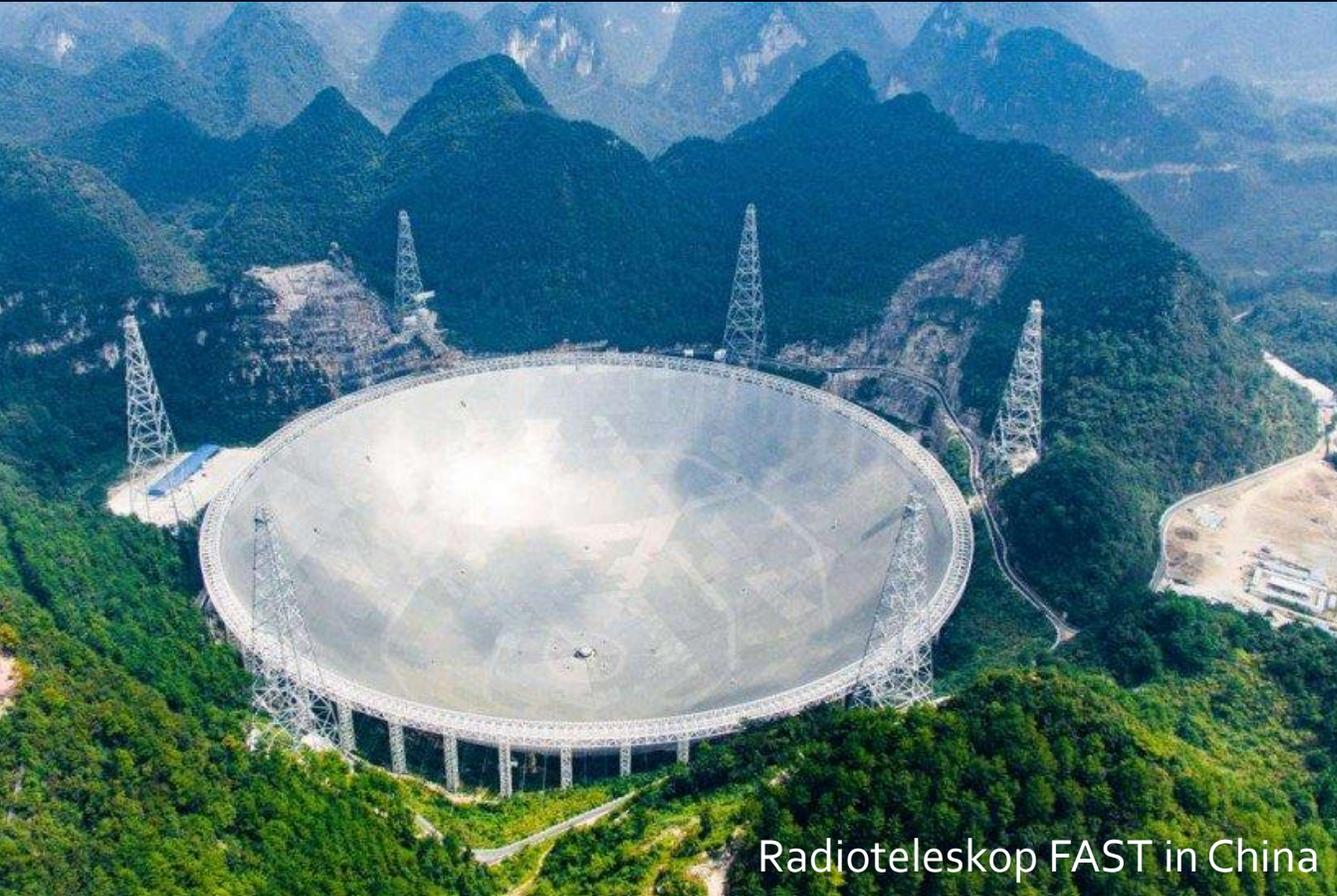


Supernova Explosion, Krebsnebel



Krebsnebel (Röntgenteleskop Chandra )

# Pulsare sind Rotierende Neutronensterne mit starkem Magnetfeld



Radioteleskop FAST in China



Radioteleskop in Effelsberg

Der erste Pulsar wurde im Jahre 1967 entdeckt (PSR 1919+21, Jocelyn Bell) und wurde zunächst LGM-1 genannt

In den letzten 50 Jahren konnten mittels Radioteleskopen ca. 3000 rotierende Neutronensterne (Pulsare) gefunden werden.

Man unterscheidet  
Sekundenpulsare  
und  
Millisekunden-Pulsare



PSR B0329+54 (0.715 s)



PSR B0531+21 (33.5 ms)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

# Binäre Neutronenstern Systeme

Zurzeit kennt man ca. 25  
binäre Neutronenstern Systeme

Beispiel:

**Der Double Pulsar**

(PSR J0737-3039A/B):

Entdeckt im Jahre 2003

Eccentricity: 0.088

Pulsar A:  $P=23$  ms,  $M=1.3381(7)$

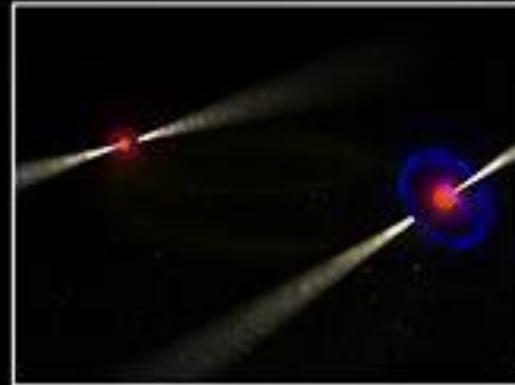
Pulsar B:  $P=2.7$  s,  $M=1.2489(7)$

Abstand zwischen den Sternen nur  
800,000 km

Orbitale Periode: 147 Minuten

Abstand verkleinert sich langsam  
aufgrund der Abstrahlung von  
Gravitationswellen

Die beiden Neutronensterne  
werden erst in 85 Millionen  
Jahren kollidieren

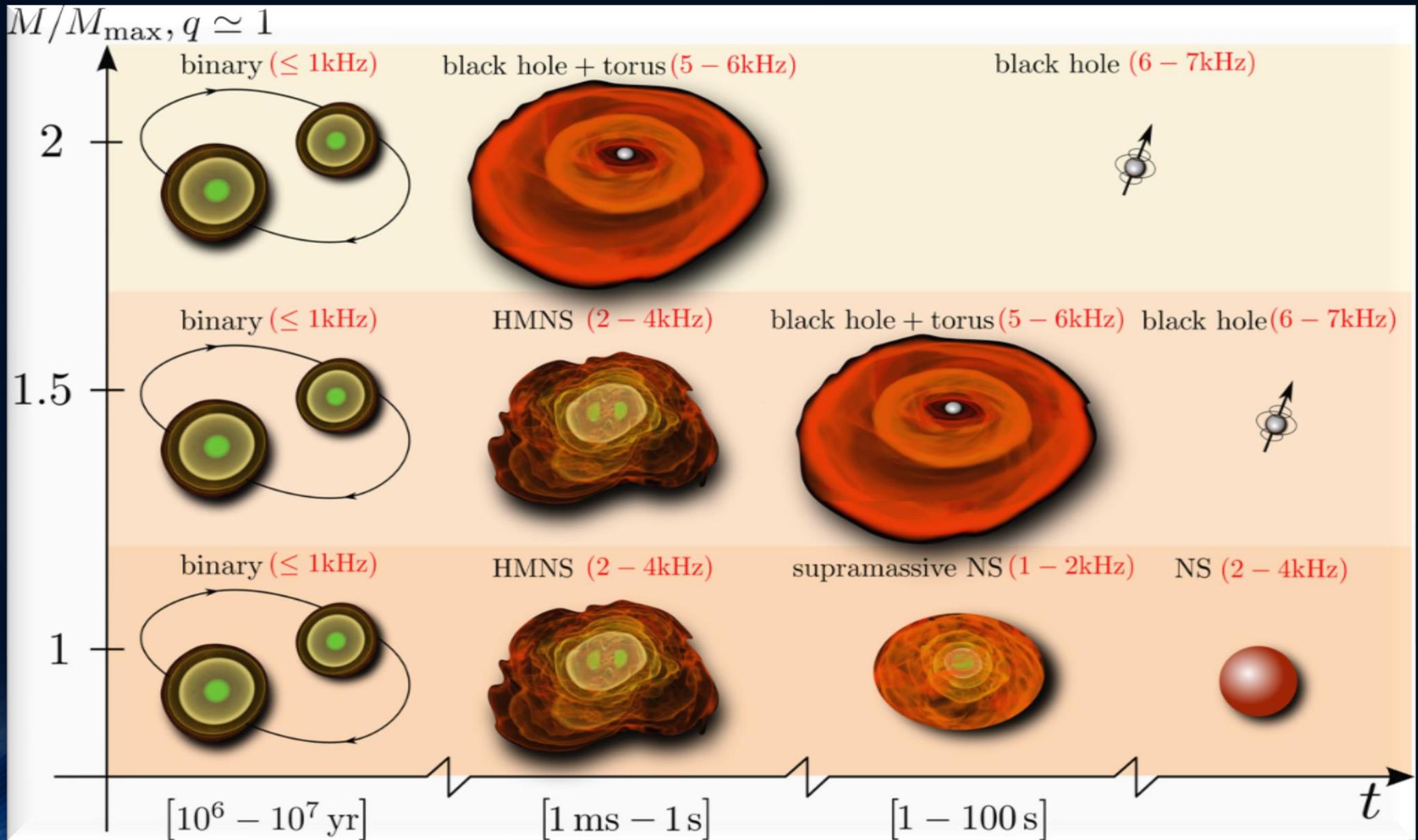


# Was geschieht wenn zwei Neutronensterne miteinander kollidieren?

Zwei sehr massive Neutronensterne

Zwei mittelschwere Neutronensterne

Zwei leichte Neutronensterne



# Computer Simulation einer Neutronenstern Kollision

Credits: Cosima Breu, David Radice und Luciano Rezzolla



**Dichte der  
Neutronenstern Materie**

8.5 14



$\lg(\rho)$  [g/cm<sup>3</sup>]

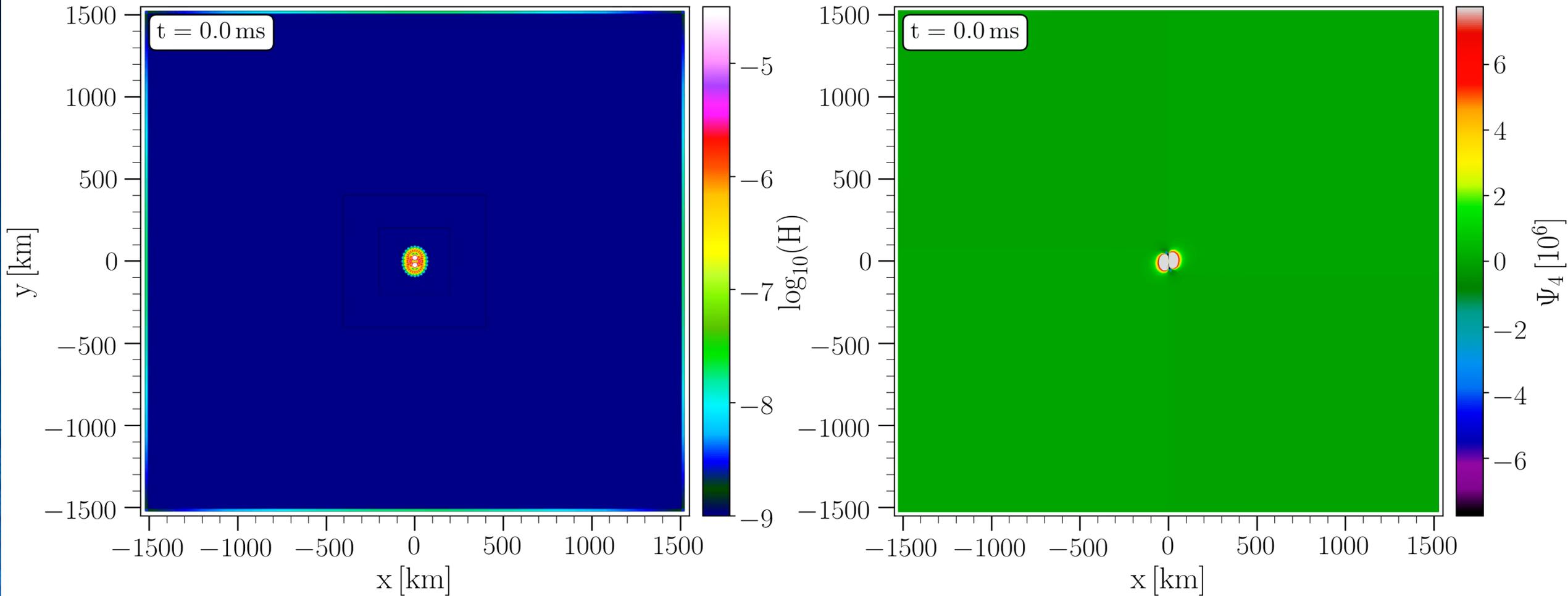
**Temperatur der  
Neutronenstern Materie**

0 50



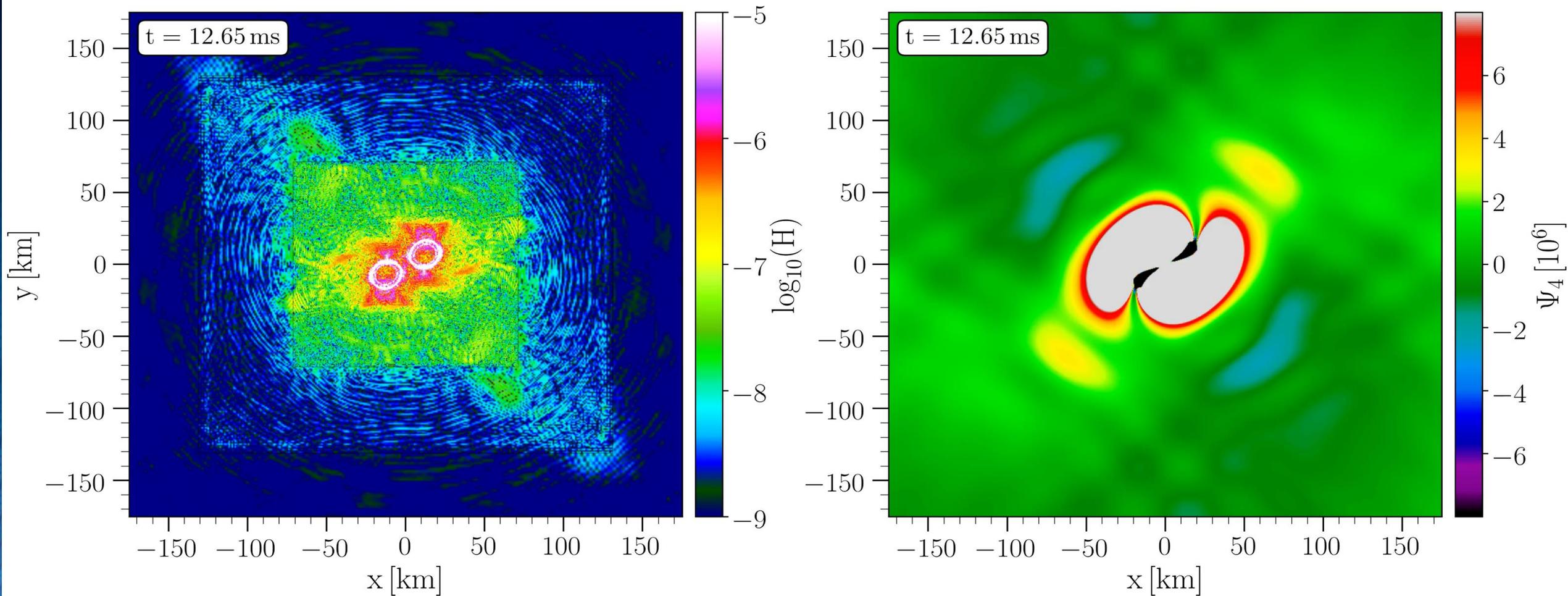
T [MeV]

# Computer Simulation einer Kollision zweier Neutronensterne



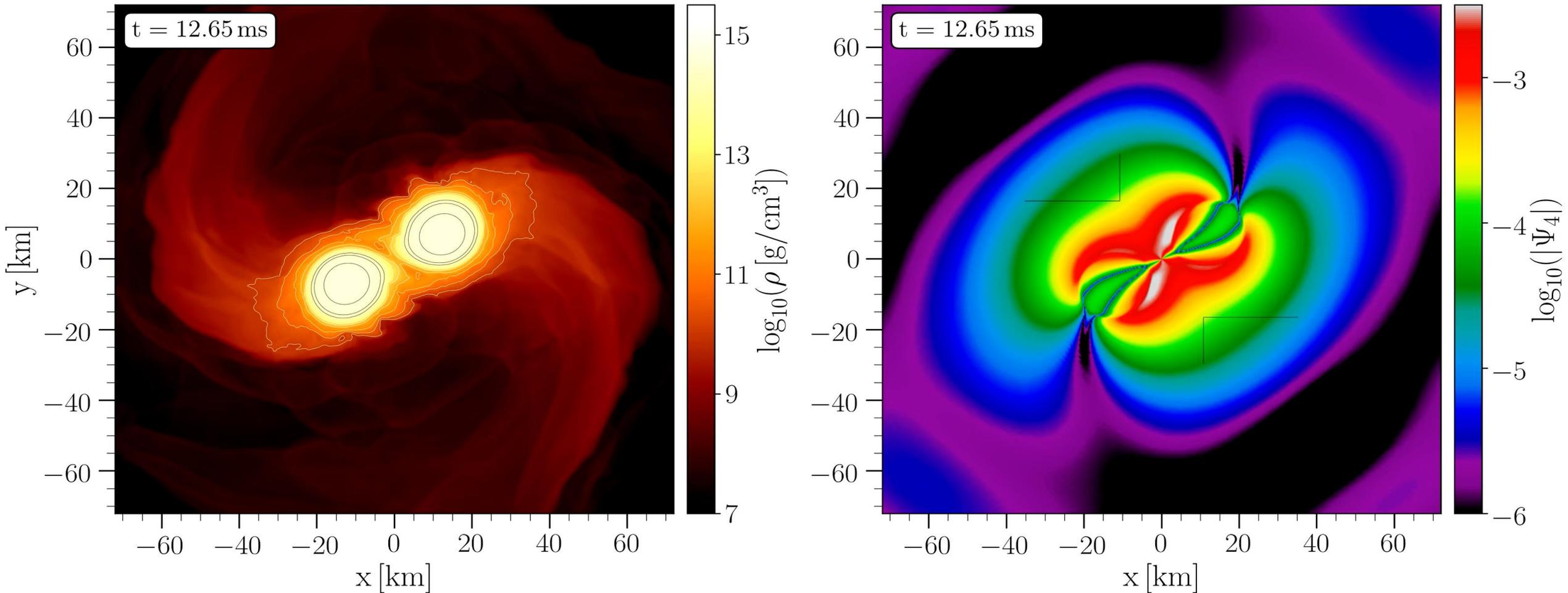
Die Gleichungen der ART werden numerisch auf einem Gitter mittels Hochleistungscomputern simuliert. Durch den Diskretisierungsprozess im Computerprogramm, sind die Nebenbedingungen (Hamilton Constraints) nicht mehr exakt erhalten. Die linke Abbildung zeigt diese Unsicherheiten des Programms. Die rechte Seite zeigt die Simulationsergebnisse der vom binären Neutronenstern System emittierten Gravitationswellen.

# Computer Simulation einer Kollision zweier Neutronensterne



Die Gleichungen der ART werden numerisch auf einem Gitter mittels Hochleistungscomputern simuliert. Durch den Diskretisierungsprozess im Computerprogramm, sind die Nebenbedingungen (Hamilton Constraints) nicht mehr exakt erhalten. Die linke Abbildung zeigt diese Unsicherheiten des Programms. Die rechte Seite zeigt die Simulationsergebnisse der vom binären Neutronenstern System emittierten Gravitationswellen.

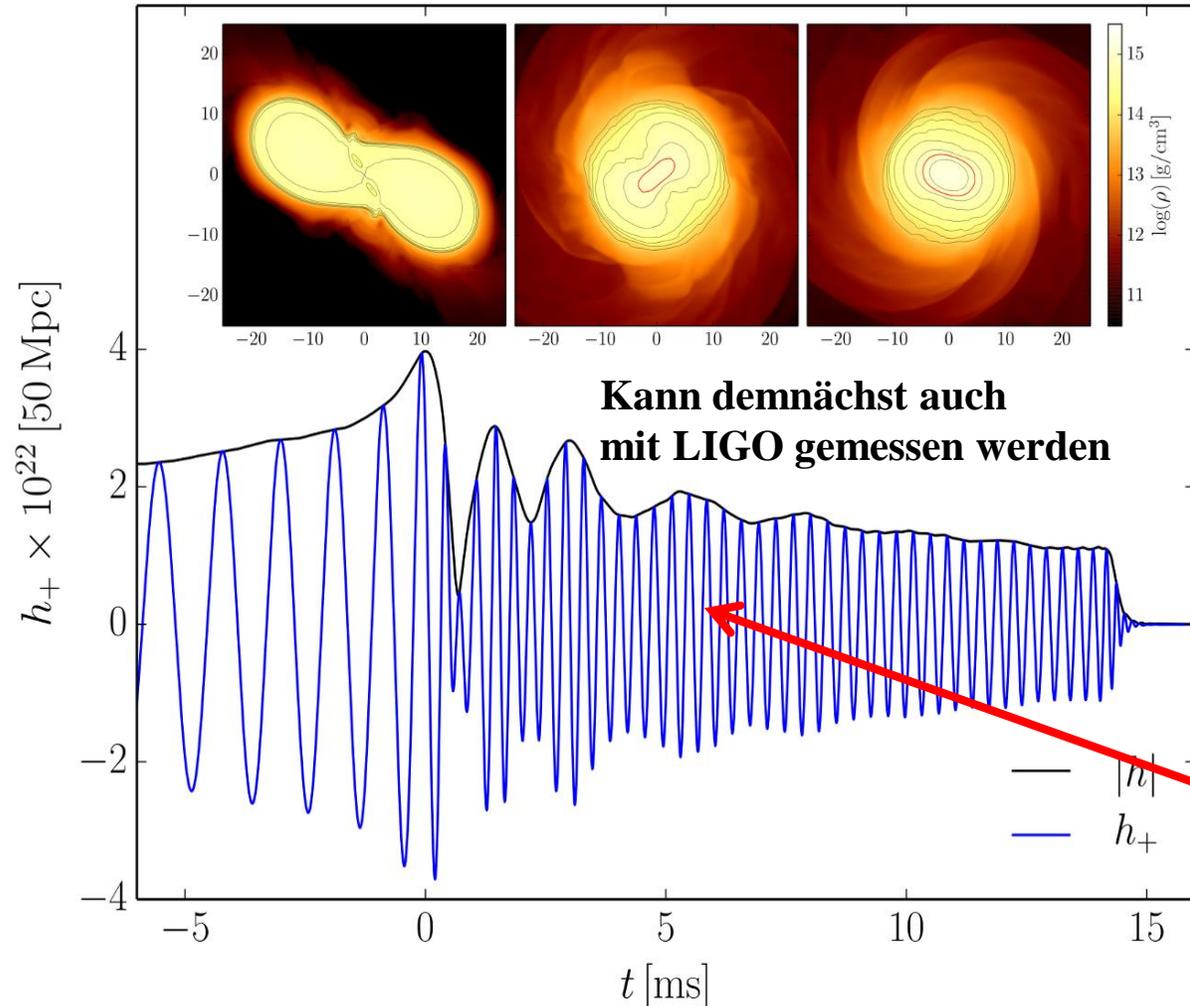
# Computer Simulation einer Kollision zweier Neutronensterne



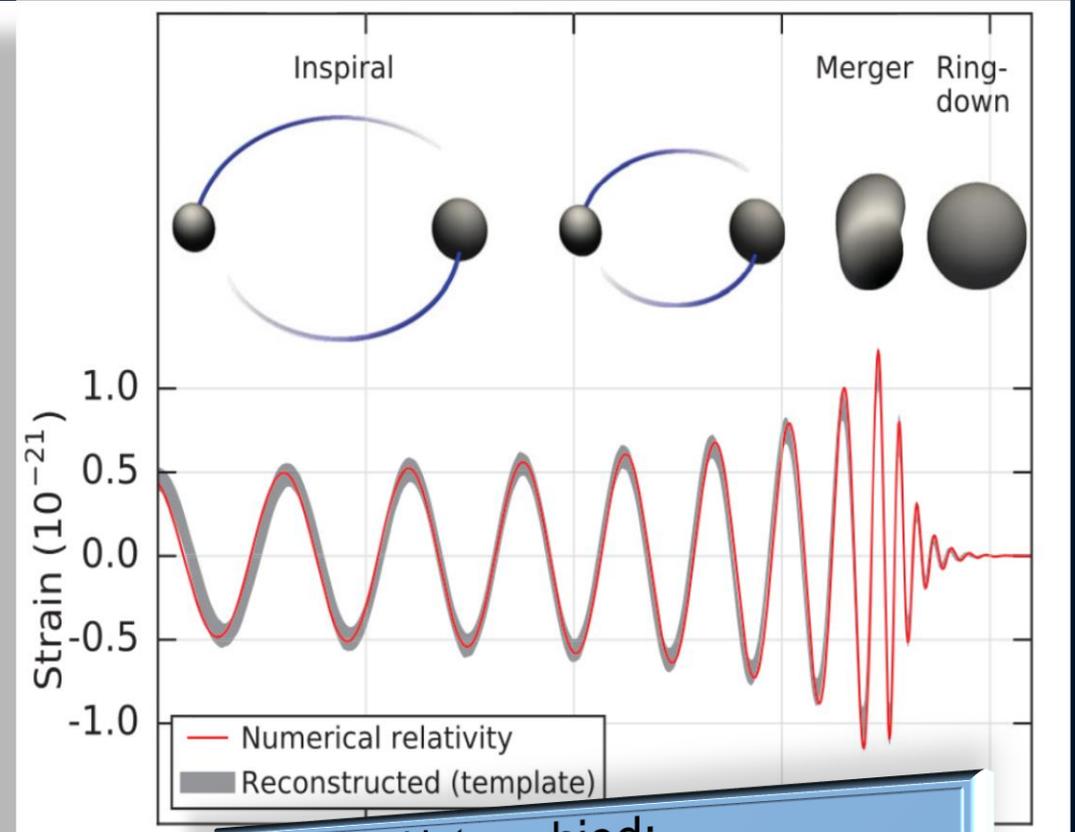
Die Gleichungen der ART werden numerisch auf einem Gitter mittels Hochleistungscomputern simuliert. Durch den Diskretisierungsprozess im Computerprogramm, sind die Nebenbedingungen (Hamilton Constraints) nicht mehr exakt erhalten. Die linke Abbildung zeigt diese Unsicherheiten des Programms. Die rechte Seite zeigt die Simulationsergebnisse der vom binären Neutronenstern System emittierten Gravitationswellen.

# Gravitationswelle einer Neutronenstern Kollision

## Neutronenstern Kollision (Simulation)



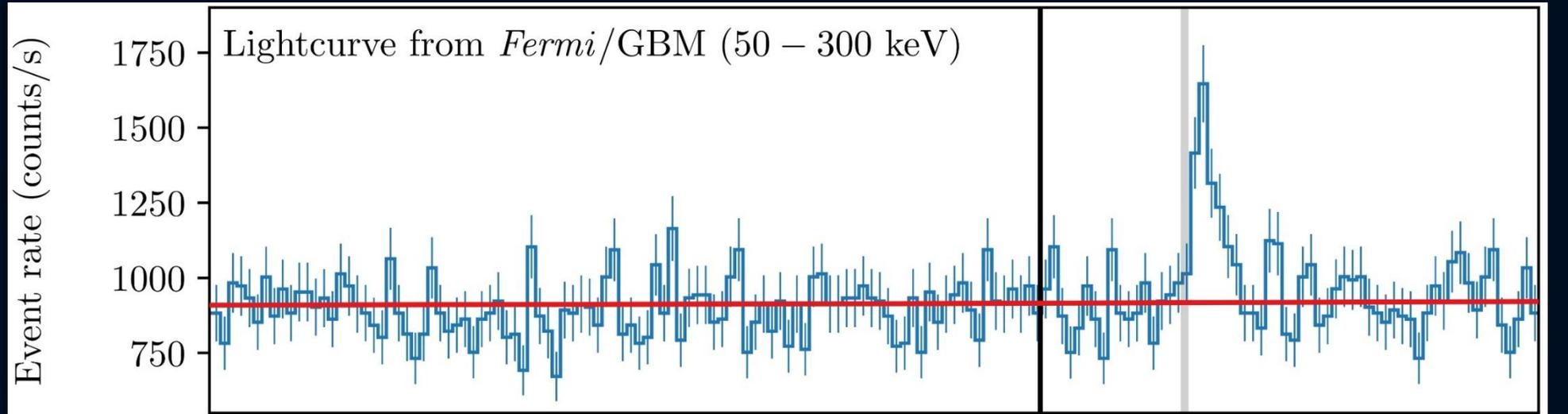
## Kollision zweier schwarzer Löcher



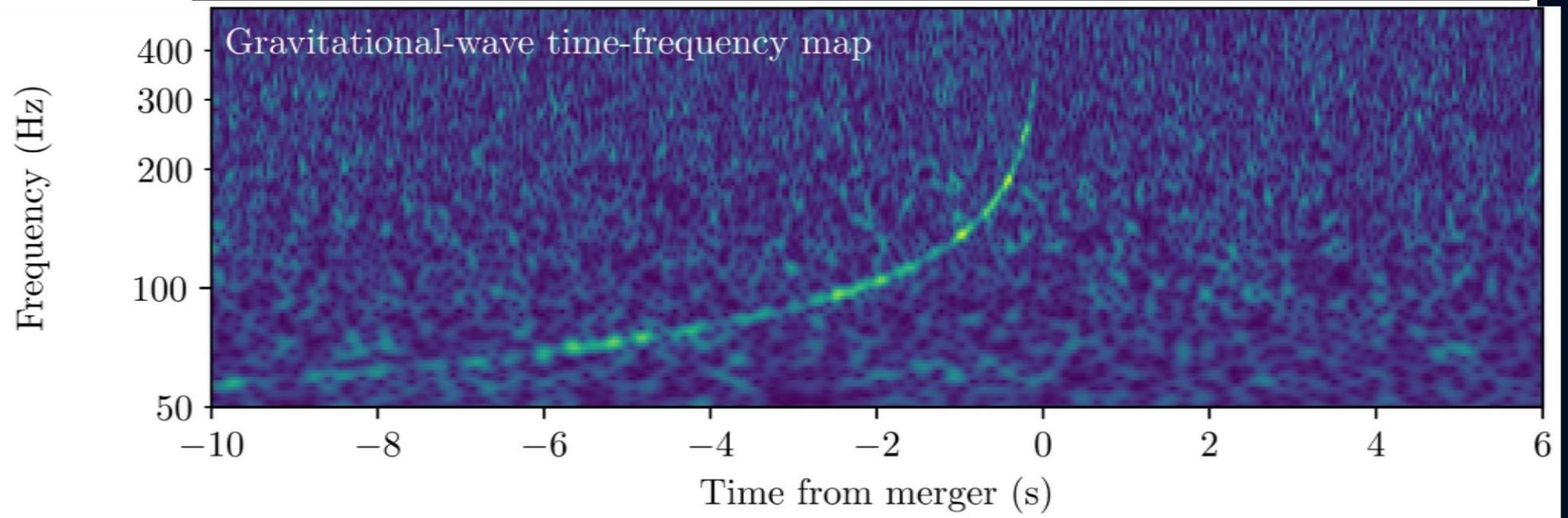
Unterschied:  
Bei Neutronenstern Kollisionen  
gibt es meistens eine  
**Post-Kollisionsphase**

# Die gemessene Gravitationswelle und der darauf folgende hochenergetische Lichtblitz

Der von dem  
Gammastrahlen  
Detektor FERMI  
gemessene  
Gammastrahlen  
Ausbruch  
(1.7 Sekunden später)



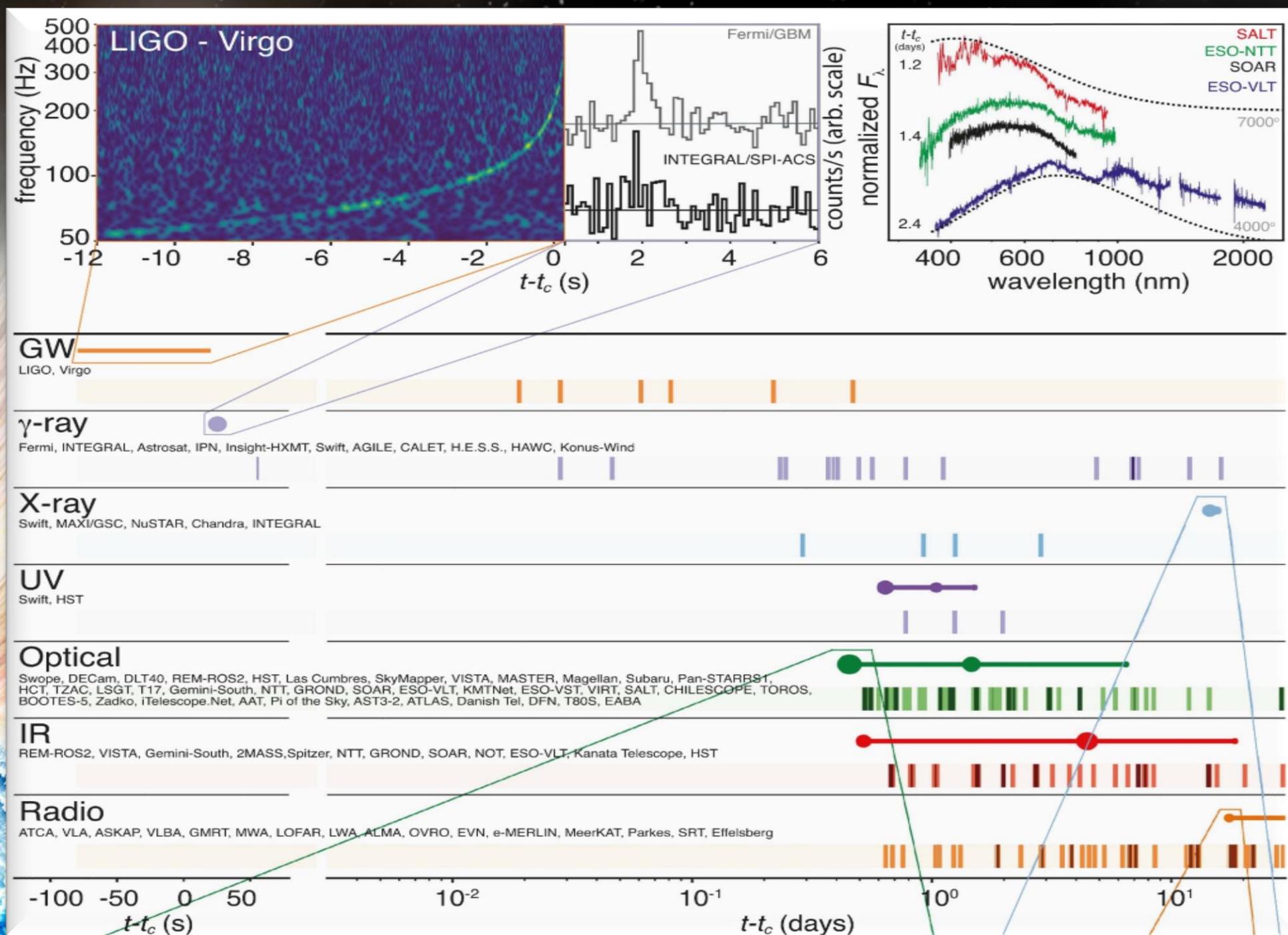
Die von dem  
Gravitationswellen  
Detektor LIGO  
detektierte  
Frequenz der  
Gravitationswelle



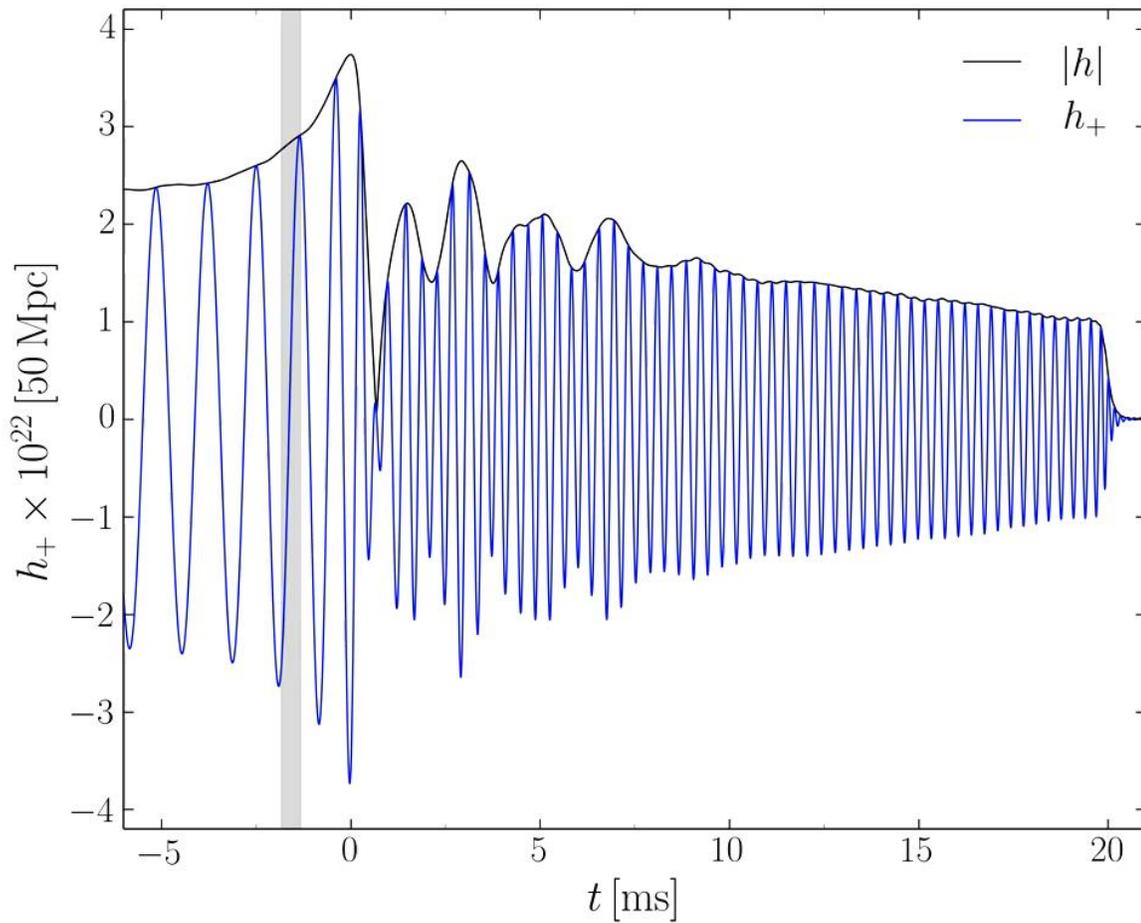
# GW170817

Tage, Wochen und Monate später detektierten weltweit unterschiedliche Teleskope (radio, infrarot, optische,...) eine Nachstrahlung dieser Neutronenstern Kollision

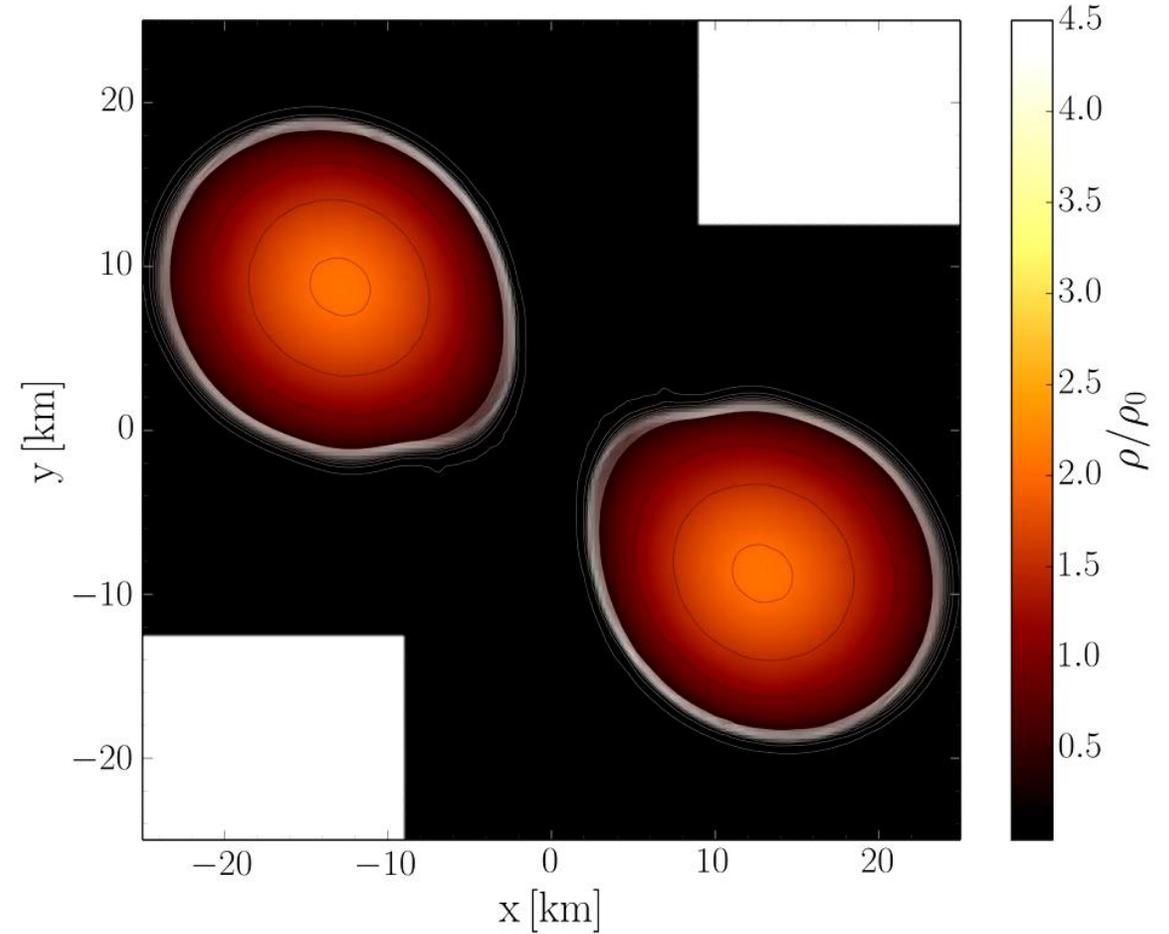
Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, LIGO and Virgo Collaborations together with 50 teams of electromagnetic and neutrino astronomers, *Astrophys. J. Lett.* 848, L12 (2017)



# Was geschieht zwischen der Kollision und dem Kollaps zum schwarzen Loch?



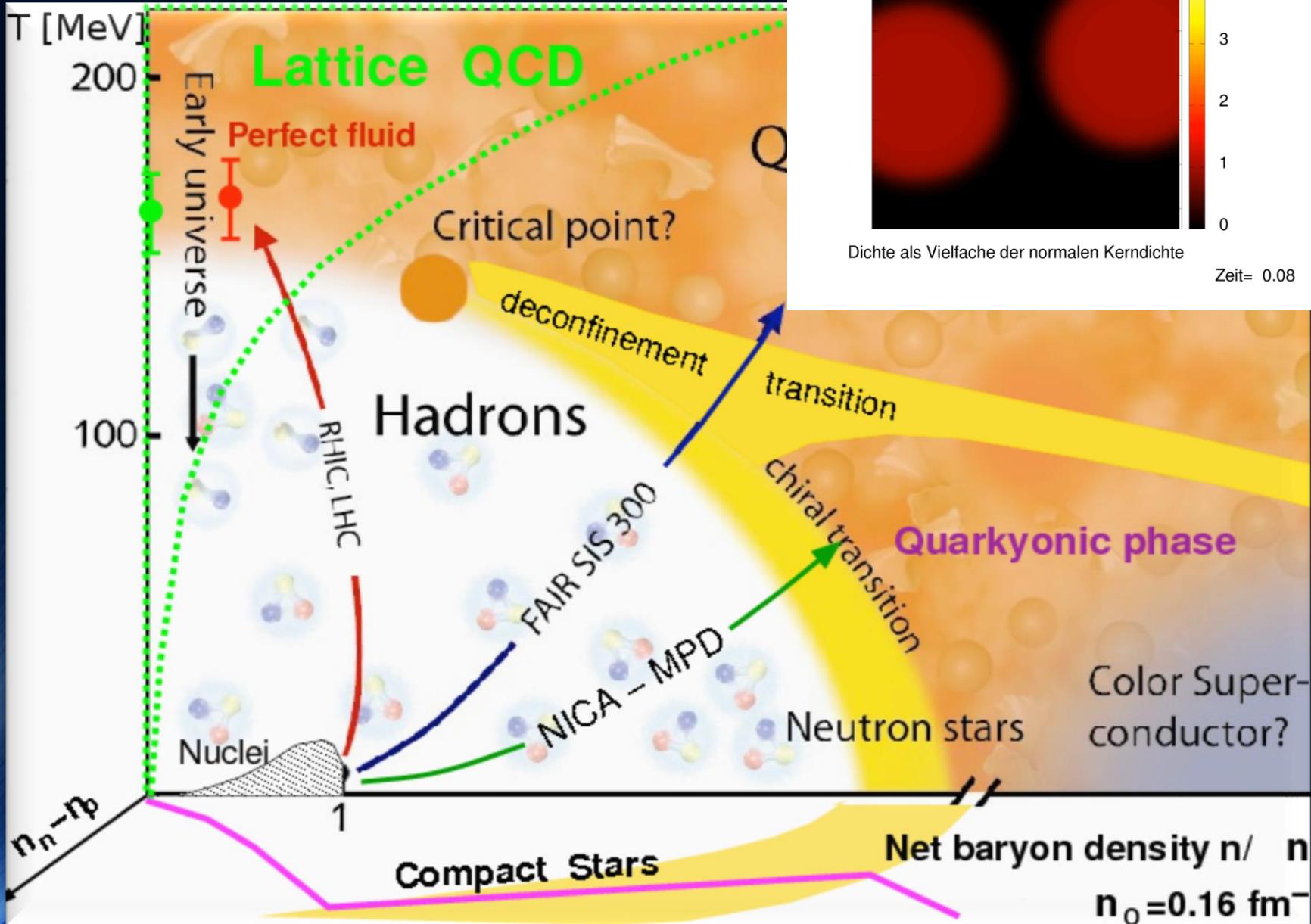
Amplitude der emittierten Gravitationswelle



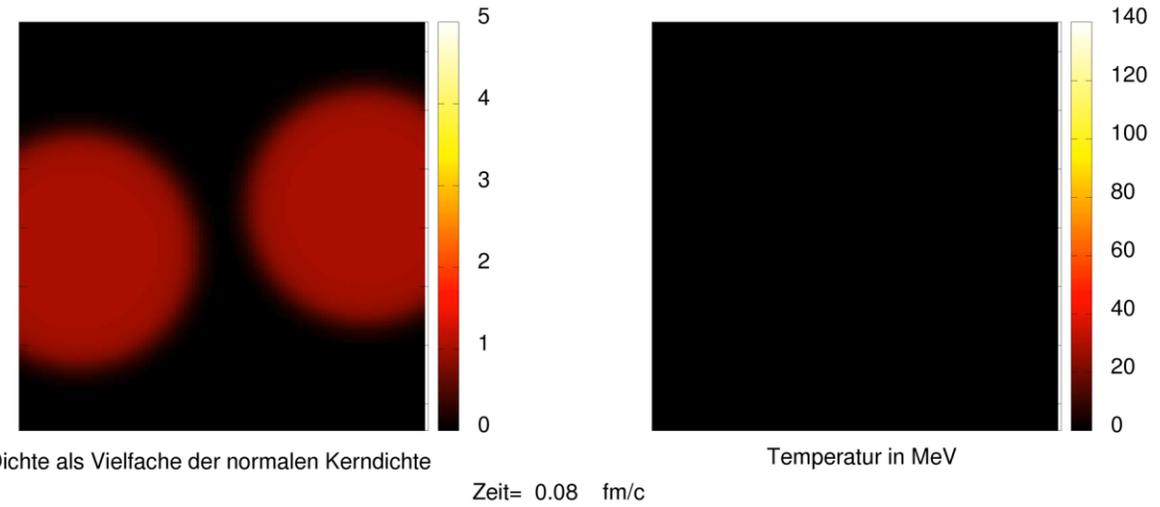
Dichteprofil in der äquatorialen Ebene

# The Hadron-Quark Phase Transition

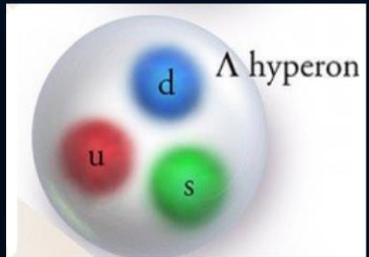
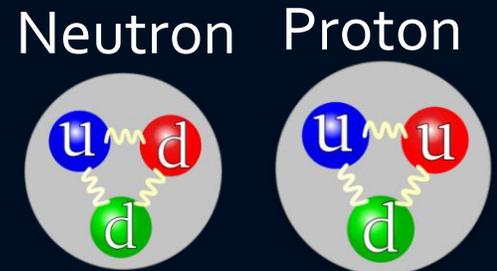
The QCD Phase Diagram



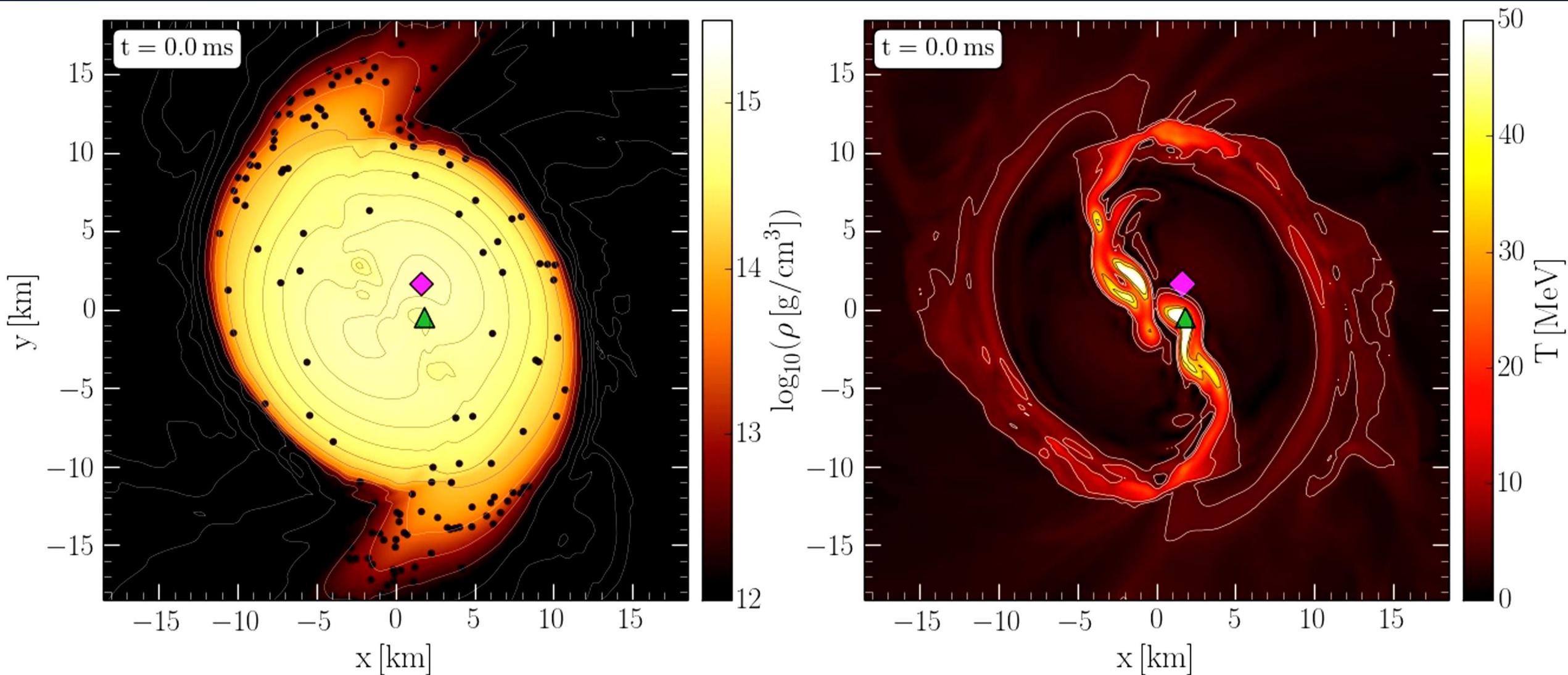
Gold+Gold Kollision am GSI: Helmholtz Zentrum für Schwerionenforschung / HADES Experiment  
Am FAIR Beschleuniger: noch hoehere Strahlintensitaet



Credits:  
Jan Steinheimer



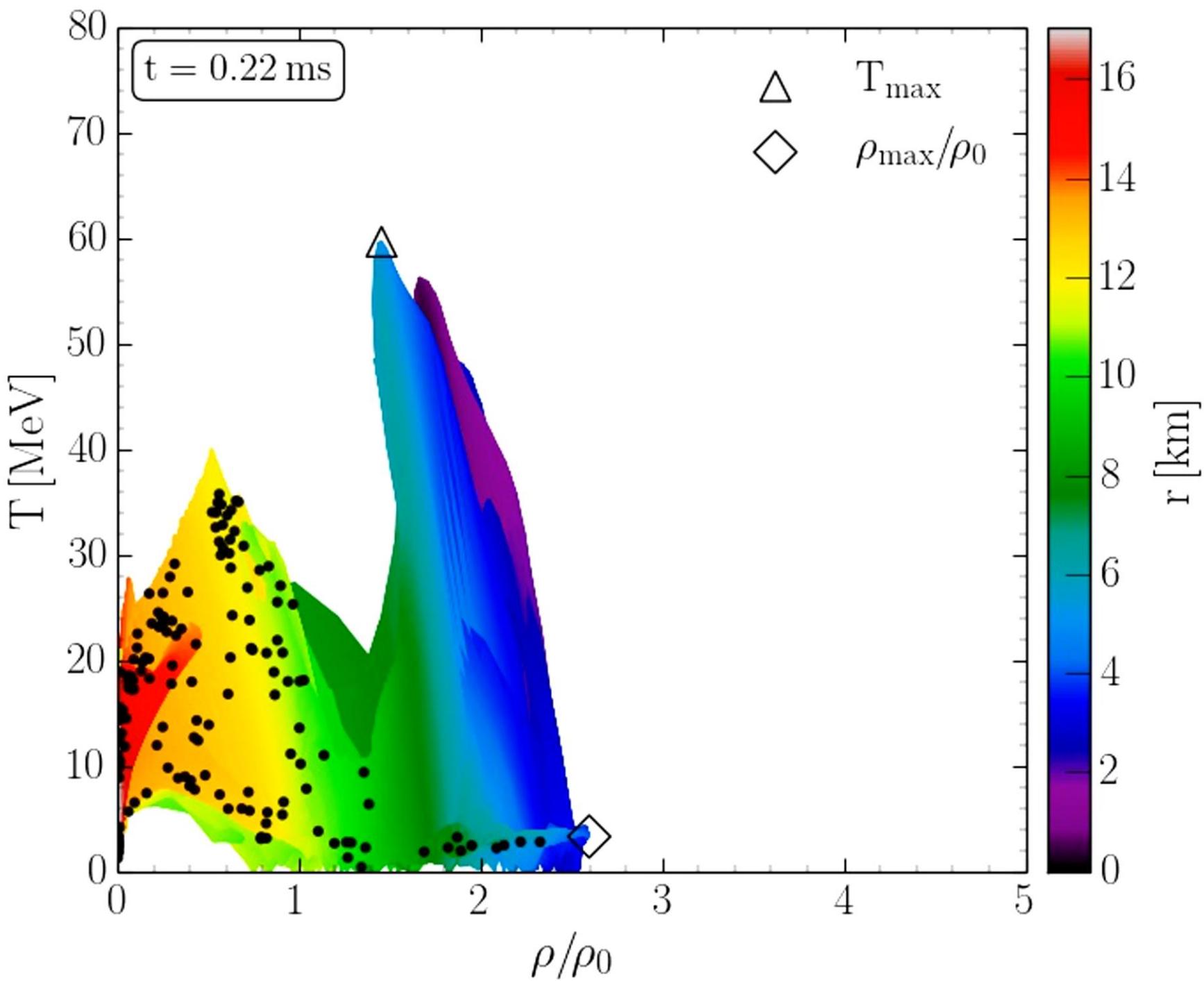
# Density and Temperature Evolution inside the HMNS



Rest mass density on the equatorial plane

Temperature on the equatorial plane

# Binary Neutron Star Mergers in the QCD Phase Diagram

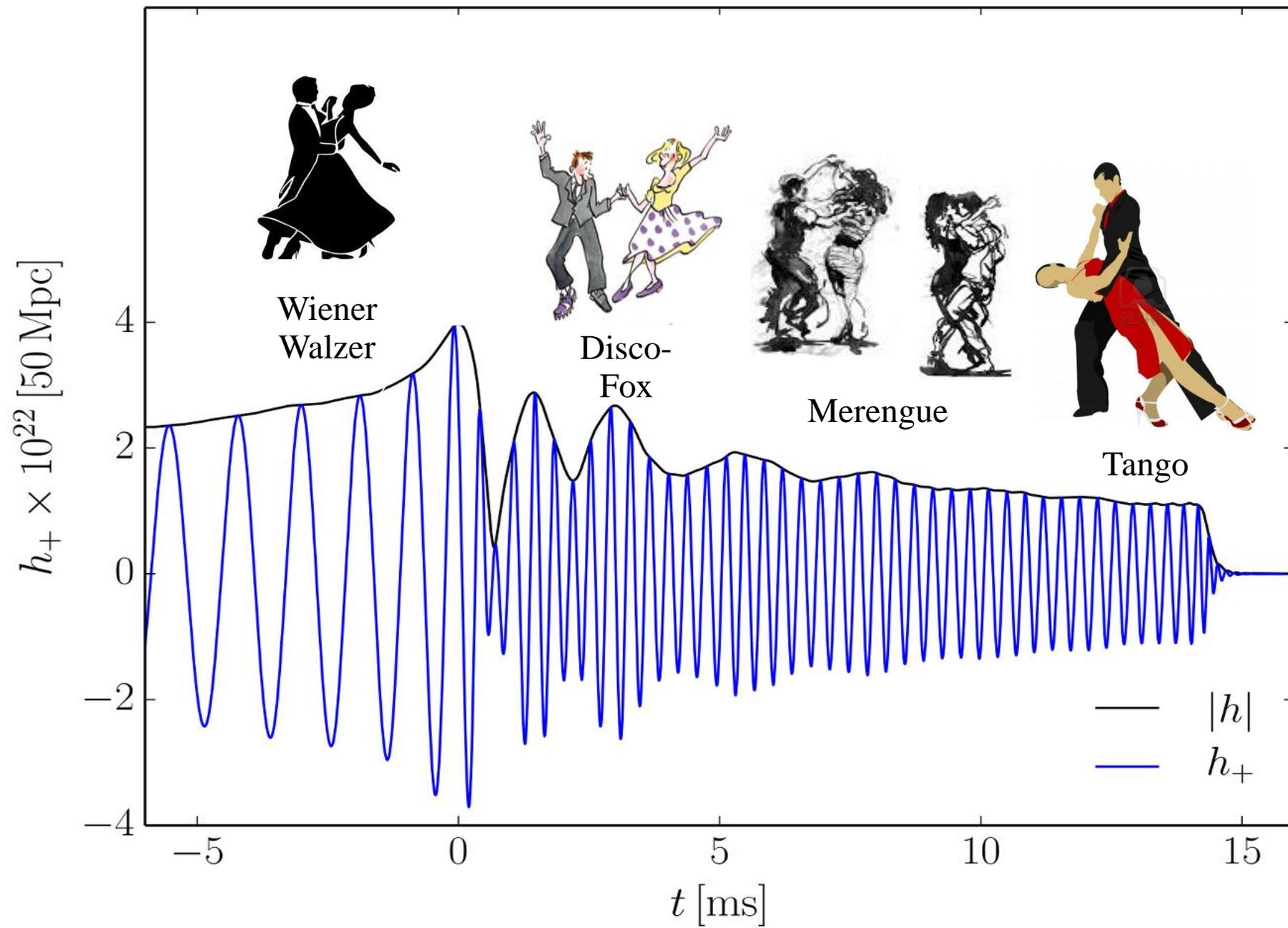


Evolution of hot and dense matter inside the inner area of a hypermassive neutron star simulated within the LS220 EOS with a total mass of  $M_{\text{total}}=2.7 M_{\text{solar}}$  in the style of a  $(T-\rho)$  QCD phase diagram plot

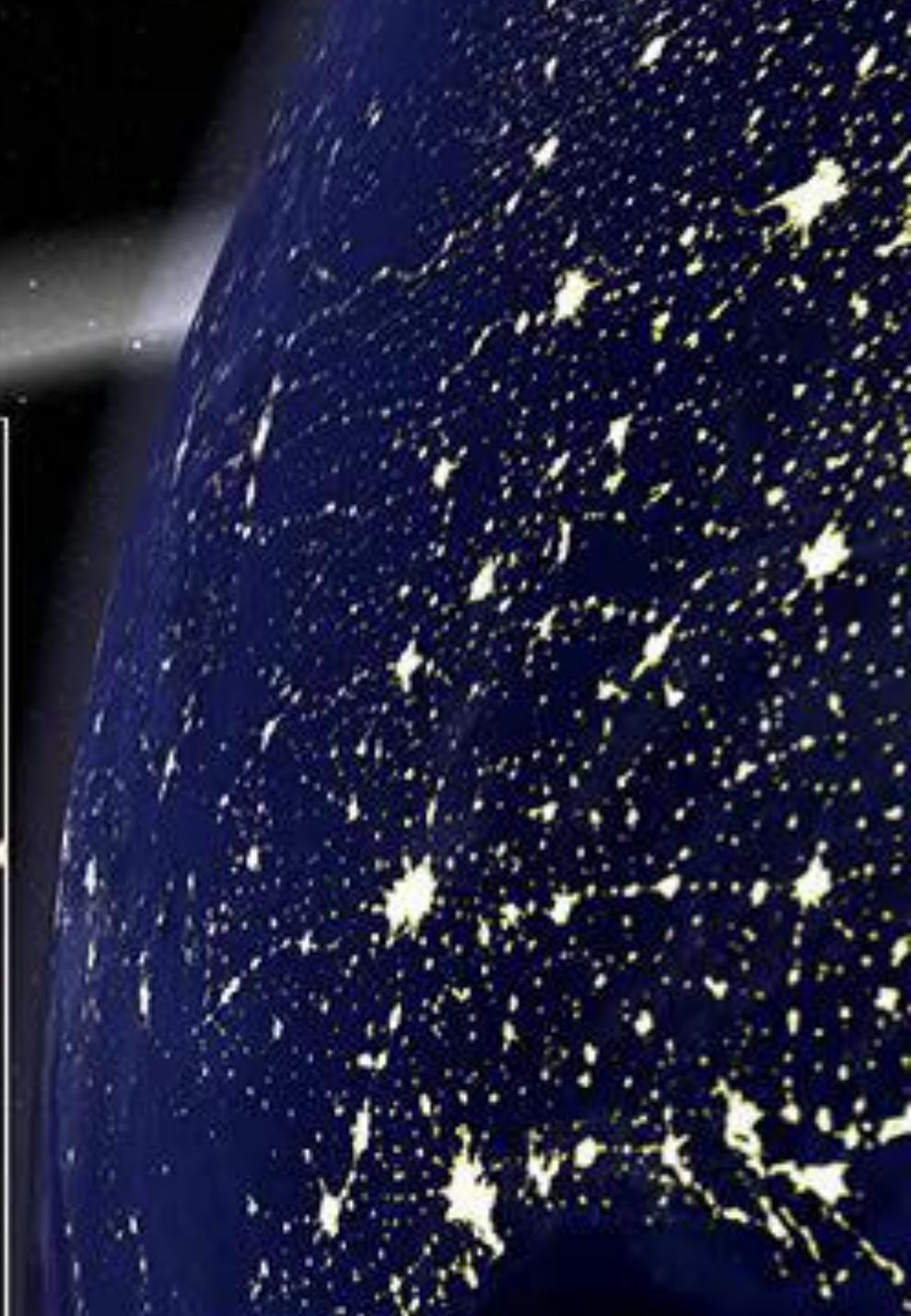
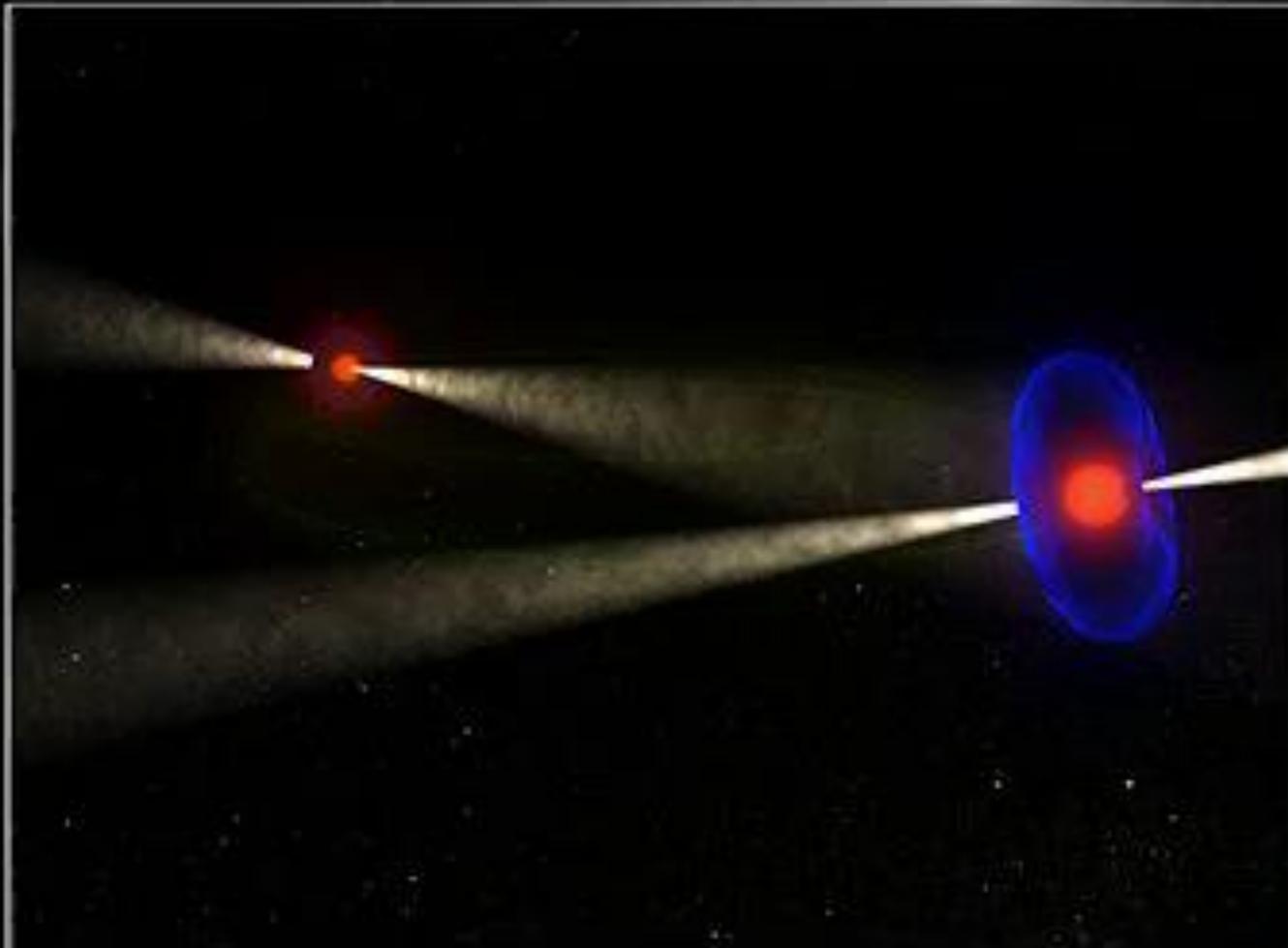
The color-coding indicates the radial position  $r$  of the corresponding  $(T-\rho)$  fluid element measured from the origin of the simulation  $(x, y) = (0, 0)$  on the equatorial plane at  $z = 0$ .

The open triangle marks the maximum value of the temperature while the open diamond indicates the maximum of the density.

# Tanz der Neutronensterne

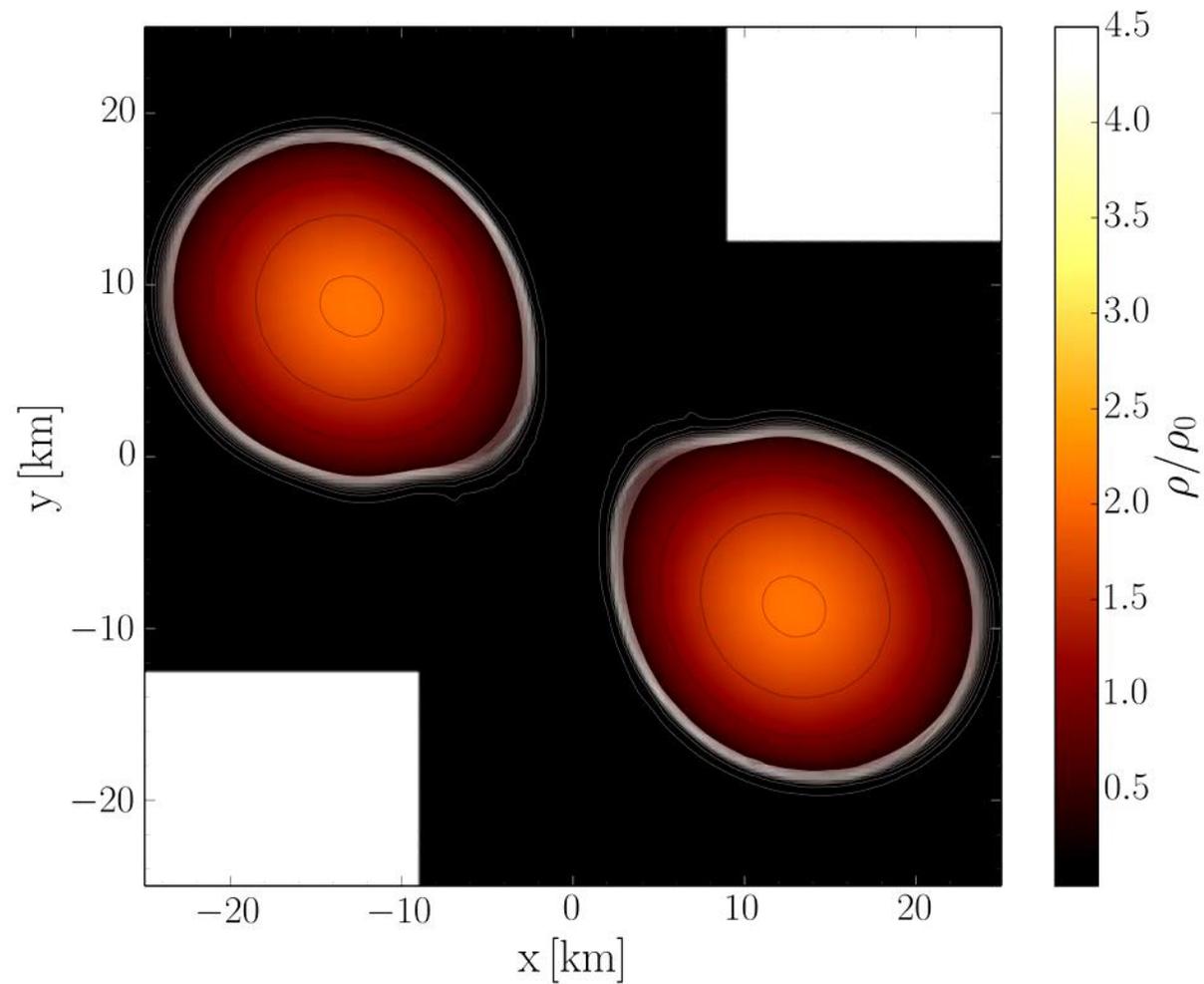
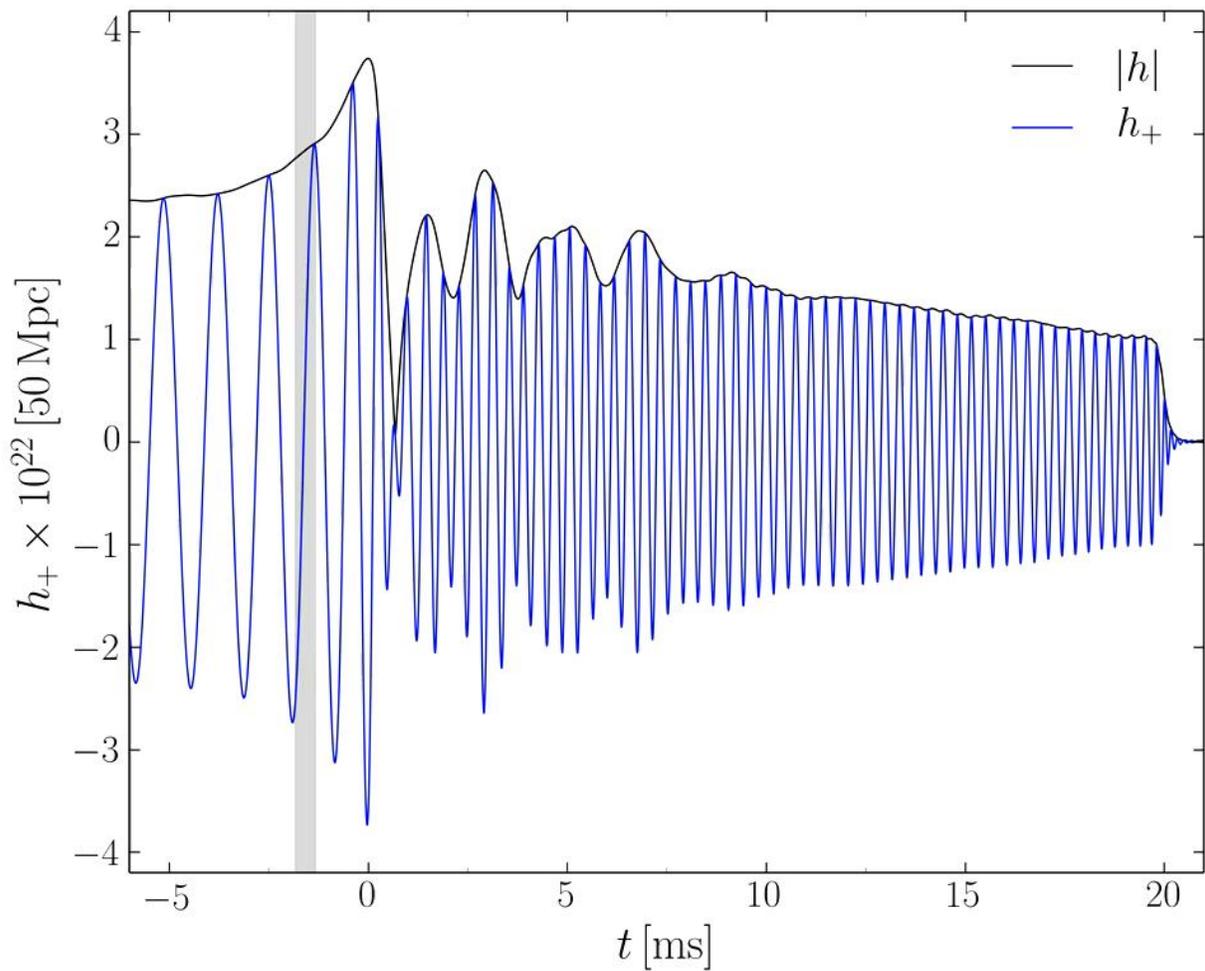


# Wiener Walzer Phase





# Disco-Fox, Merengue und Tango Phase



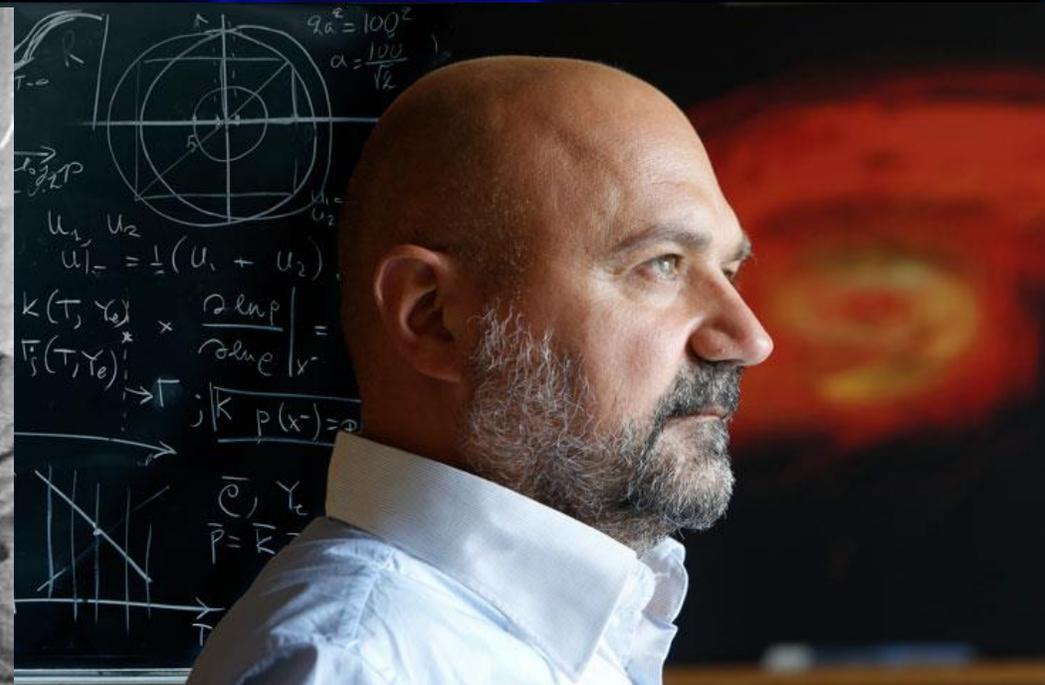
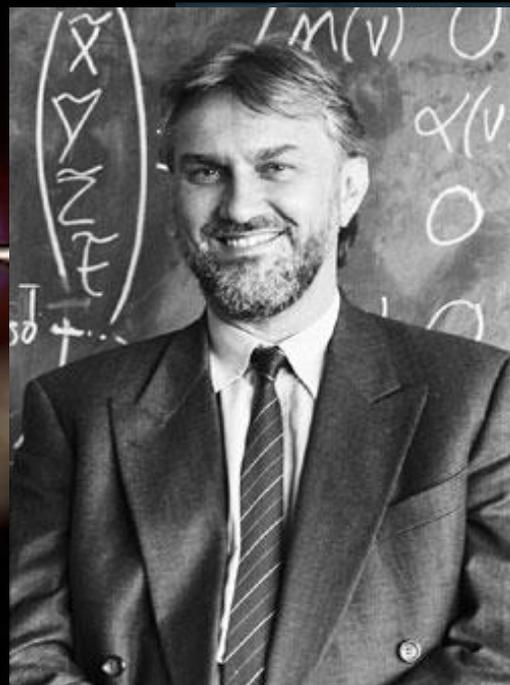
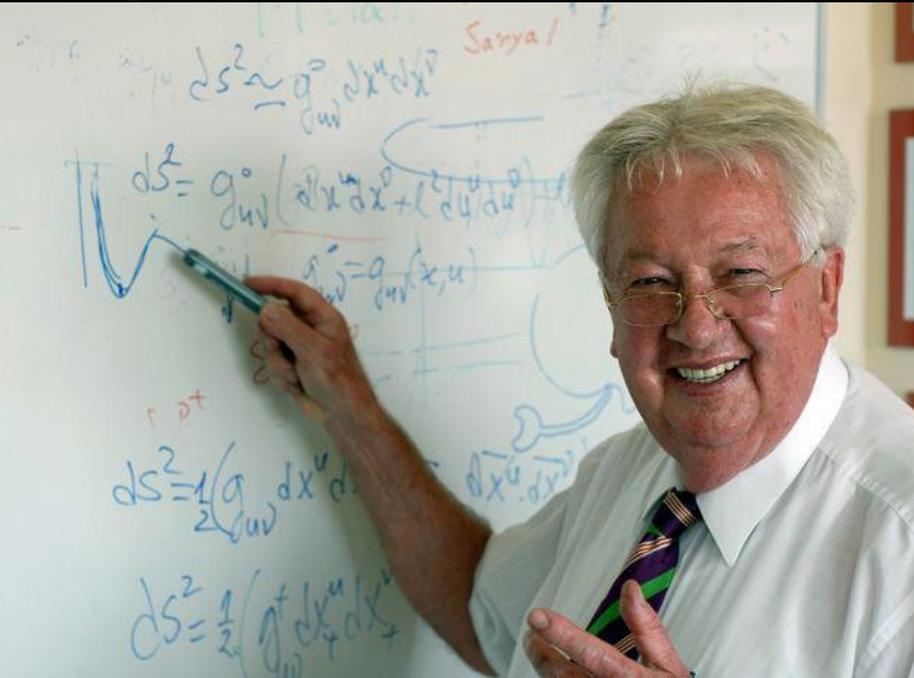
# Credits to ...

*Kentaro Takami, Luke Bovard, Jose Font, Filippo Galeazzi, Jens Papenfort, Lukas Weih, Elias Most, Cosima Breu, Federico Guercilena, Natascha Wechselberger, Zekiye Simay Yilmaz, Christina Mitropoulos, Jan Steinheimer, Stefan Schramm, David Blaschke, Mark Alford, Kai Schwenzer, Antonios Nathanail, Roman Gold, Alejandro Cruz Osorio, Andreas Zacchi, Jürgen Schaffner-Bielich, Laura Tolos, Sven Köppel, Gloria Montaña, Michael Rattay, Debades Bandopadhyay,*

*Walter Greiner*

*Horst Stöcker*

*Luciano Rezzolla*



Riedberg TV, Hessisches Kompetenzzentrum für Hochleistungsrechnen und Tanzschule Wernecke

Kamera: *Pablo Rengel Lorena* Schnitt: *Luise Schulte*

Der Tanz der Neutronensterne