

Tanz der Neutronensterne

VORTRAG AN DER STERNWARTE DARMSTADT

VOLKSSTERNWARTE DARMSTADT ([HTTP://WWW.VSDA.DE/](http://www.vstda.de/))
AUF DER LUDWIGSHÖHE 196, 64285 DARMSTADT , 16. FEBRUAR 2019

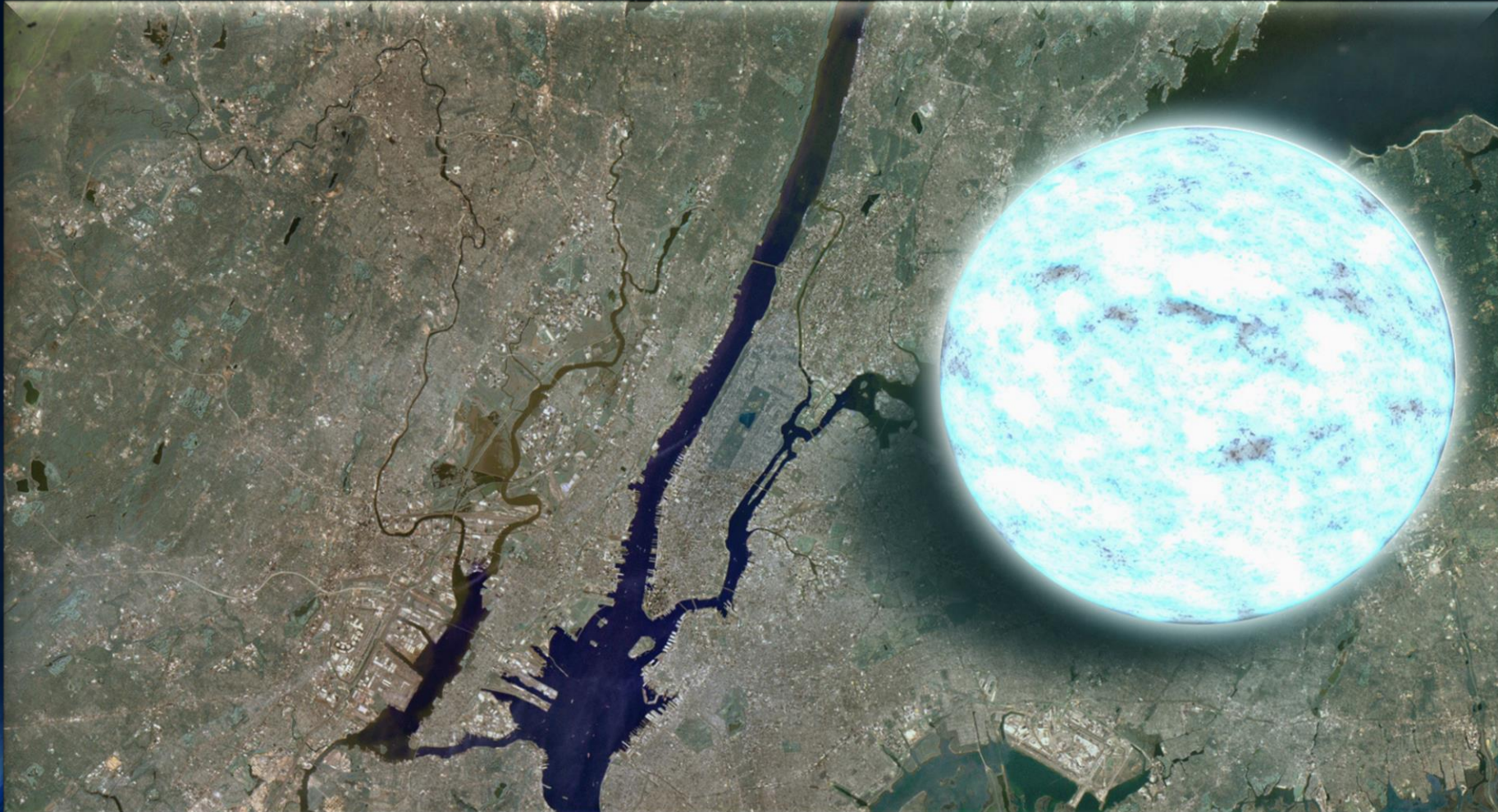
MATTHIAS HANAUSKE

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

Neutronensterne: Sehr klein und sehr schwer

Radius ~ 10 km, Masse ~ 1 -2 Sonnenmassen

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

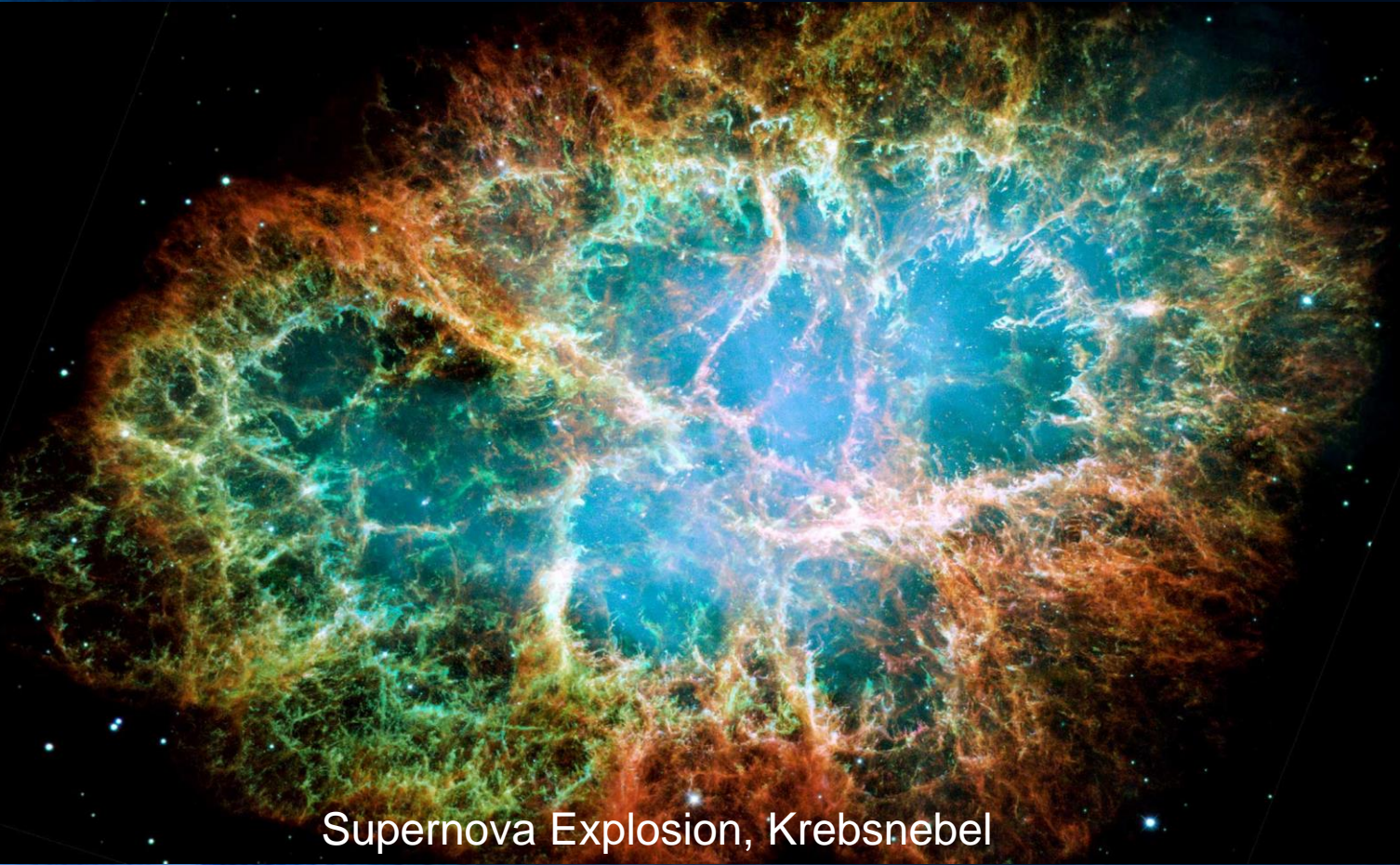


Wie entstehen Neutronensterne?

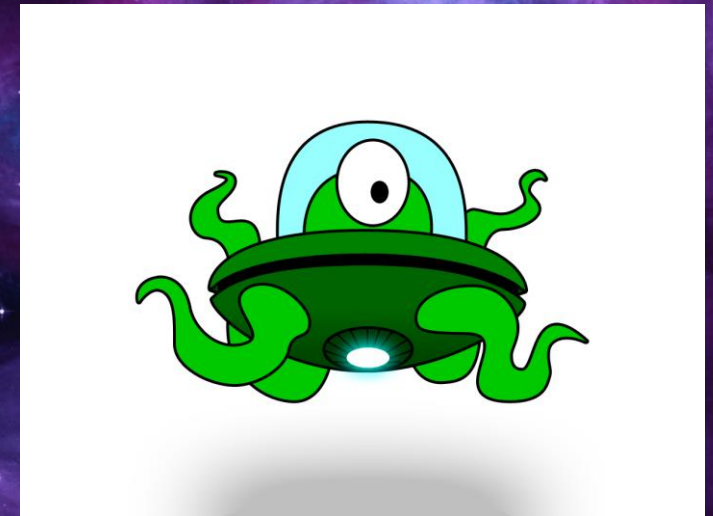
Neutronensterne entstehen in einer Supernova Explosion. Sonnen, die mindestens 8-mal schwerer als unsere Sonne sind explodieren am Ende ihrer Lebenszeit in einer Supernova Explosion – im Zentrum bleibt ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch zurück.



Im Zentrum des Nebels
ist ein Neutronenstern

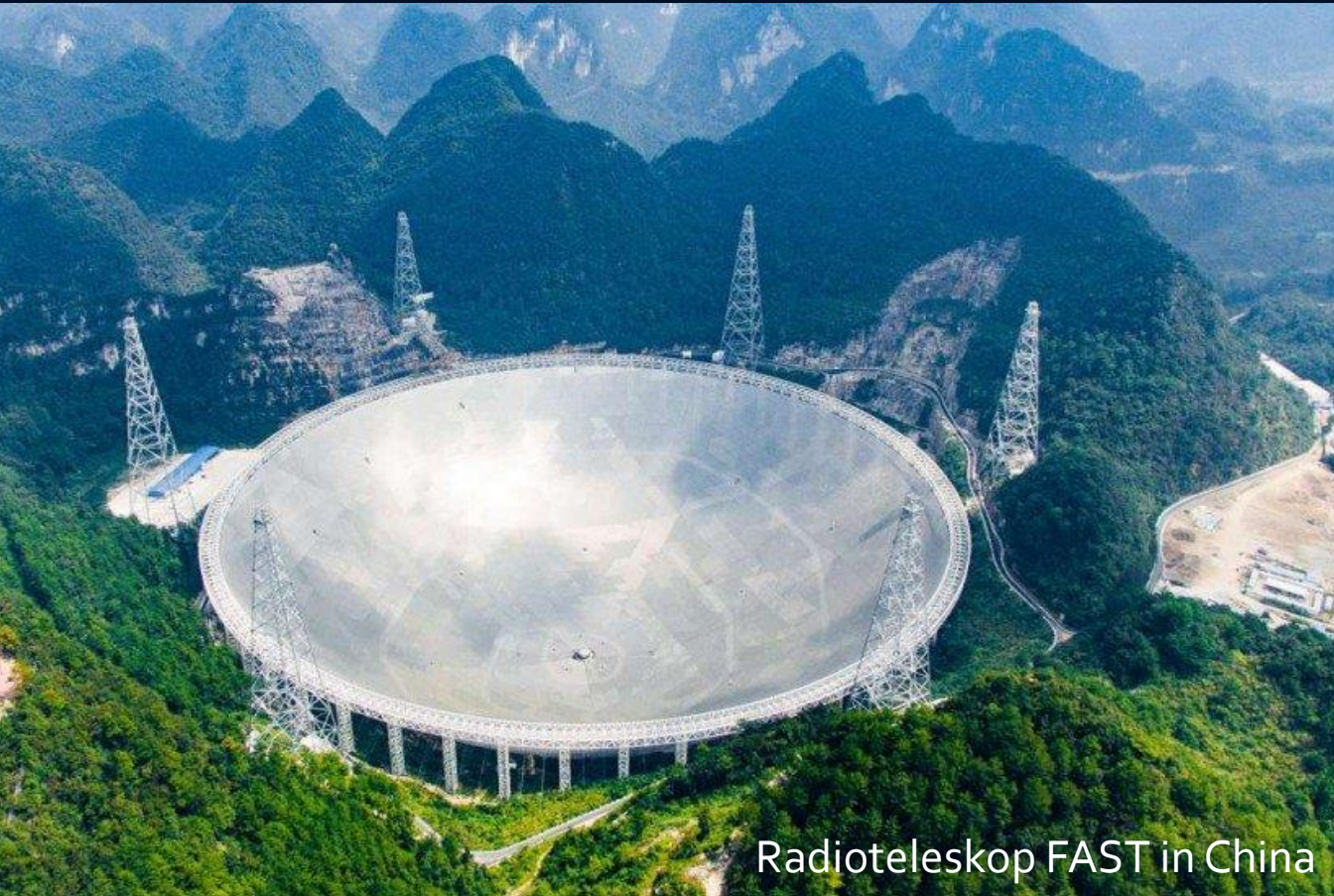


Supernova Explosion, Krebsnebel



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, $M=1.3381(7)$

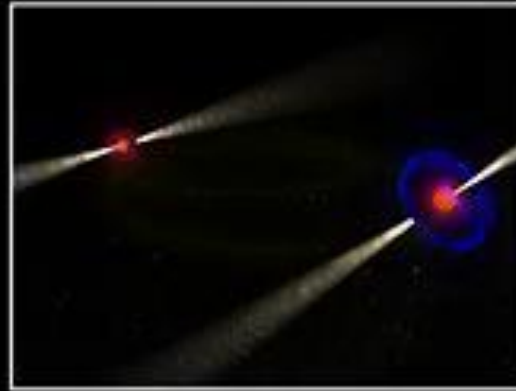
Pulsar B: $P=2.7$ s, $M=1.2489(7)$

Abstand zwischen den Sternen nur
800,000 km

Orbitale Periode: 147 Minuten

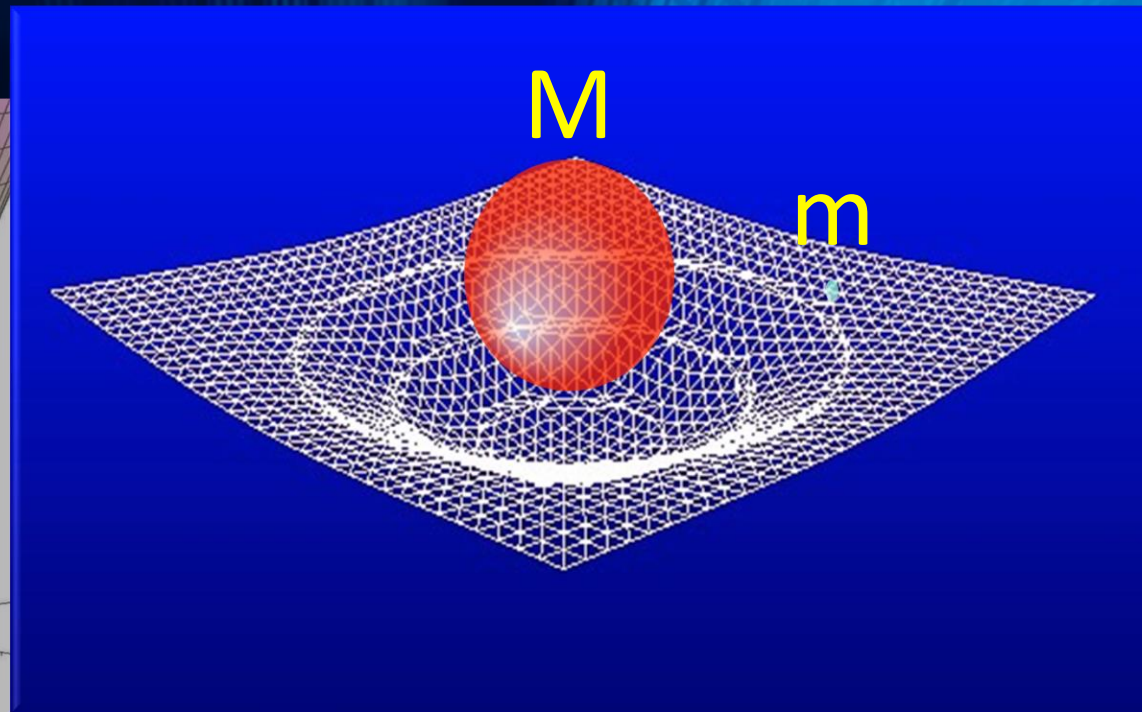
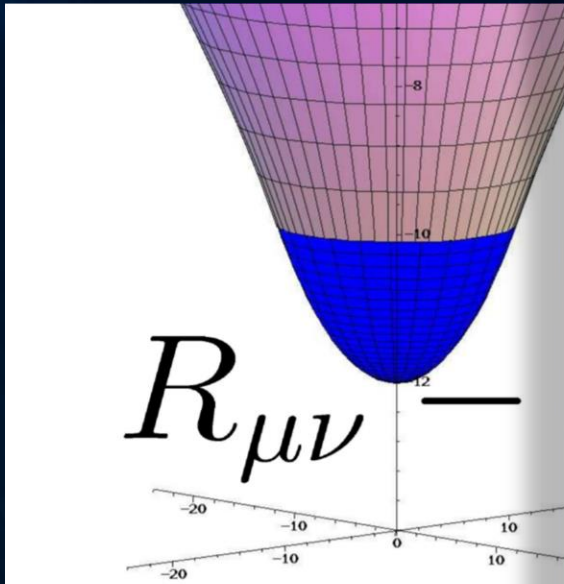
Abstand verkleinert sich langsam
aufgrund der Abstrahlung von
Gravitationswellen

Die beiden Neutronensterne
werden erst in 85 Millionen
Jahren kollidieren



Allgemeinen Relativitätstheorie

Die Einsteingleichung



„Allgemeine Relativitätstheorie“ (ART) der

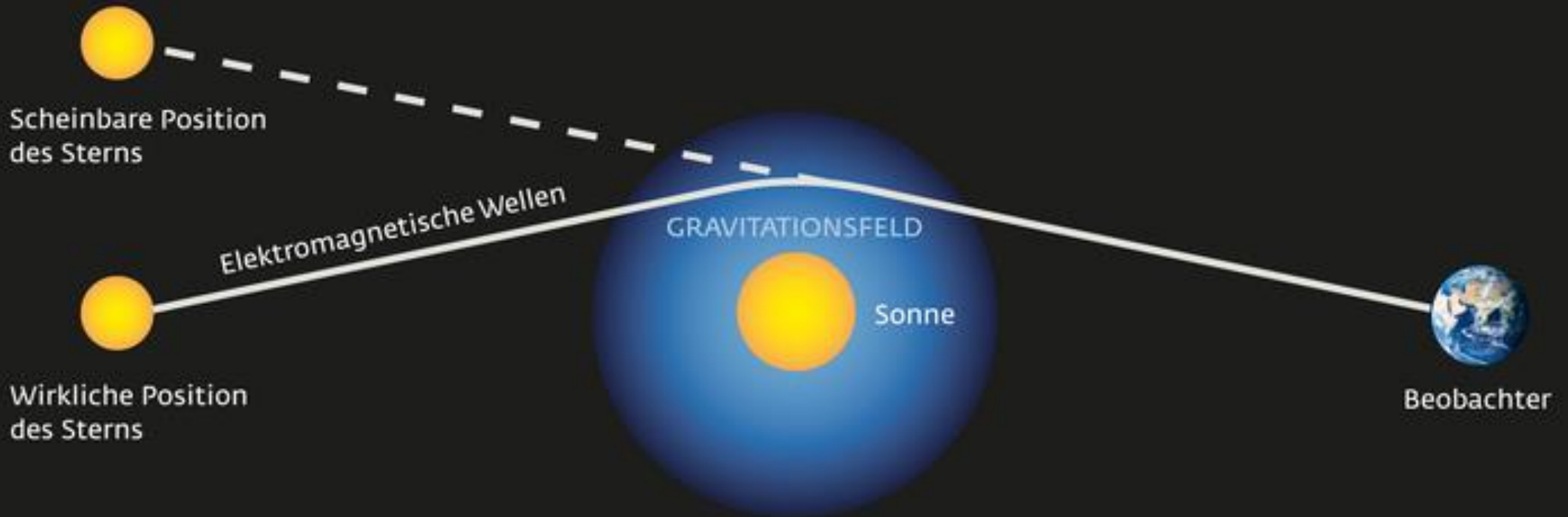
$T_{\mu\nu}$

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 Gravitationkraft (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

Frankfurter Allgemeine

Physik & Mehr

WISSENSCHAFT GIZIN GENE KLIMA WELTRAUM GARTEN NETZRÄTSEL

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

Hurra, wir hier unten leben länger!

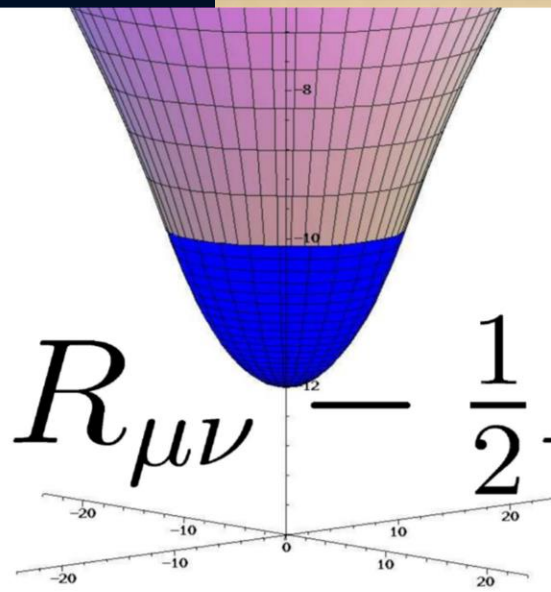
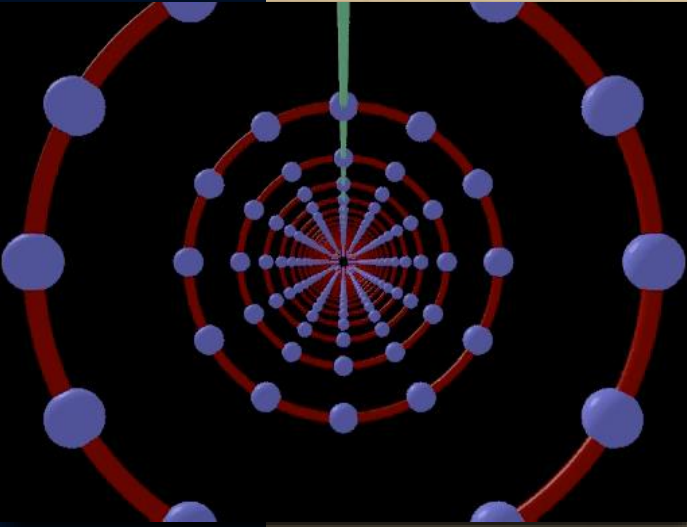
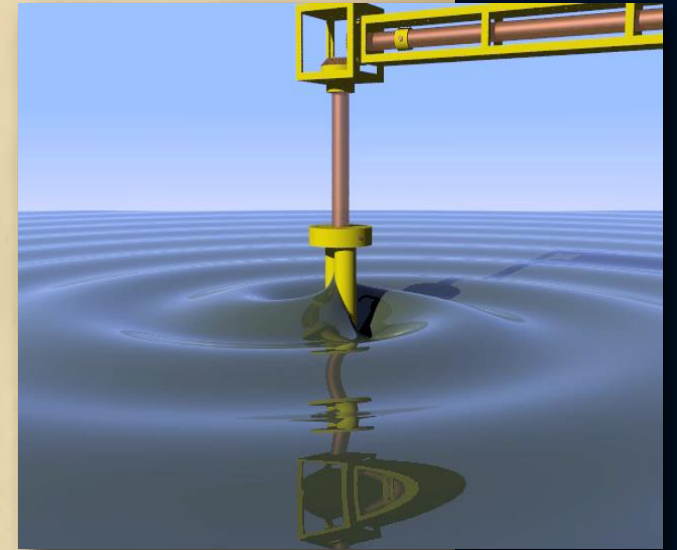
VON ANNE HARDY AKTUALISIERT AM 19.10.2010 06:00



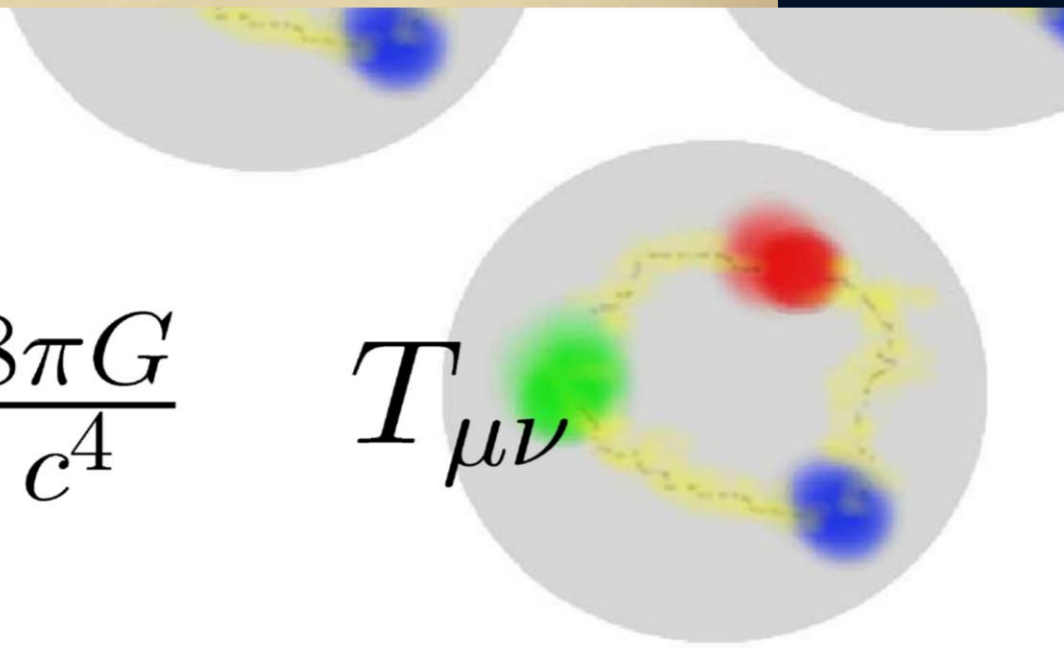
Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

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



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

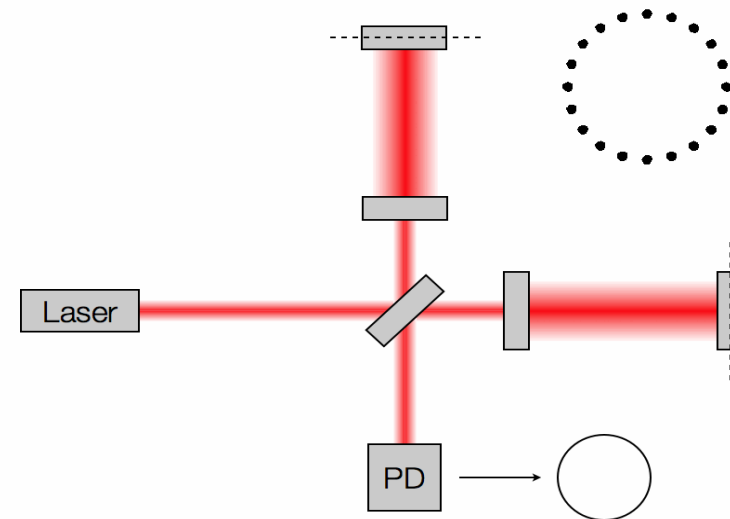
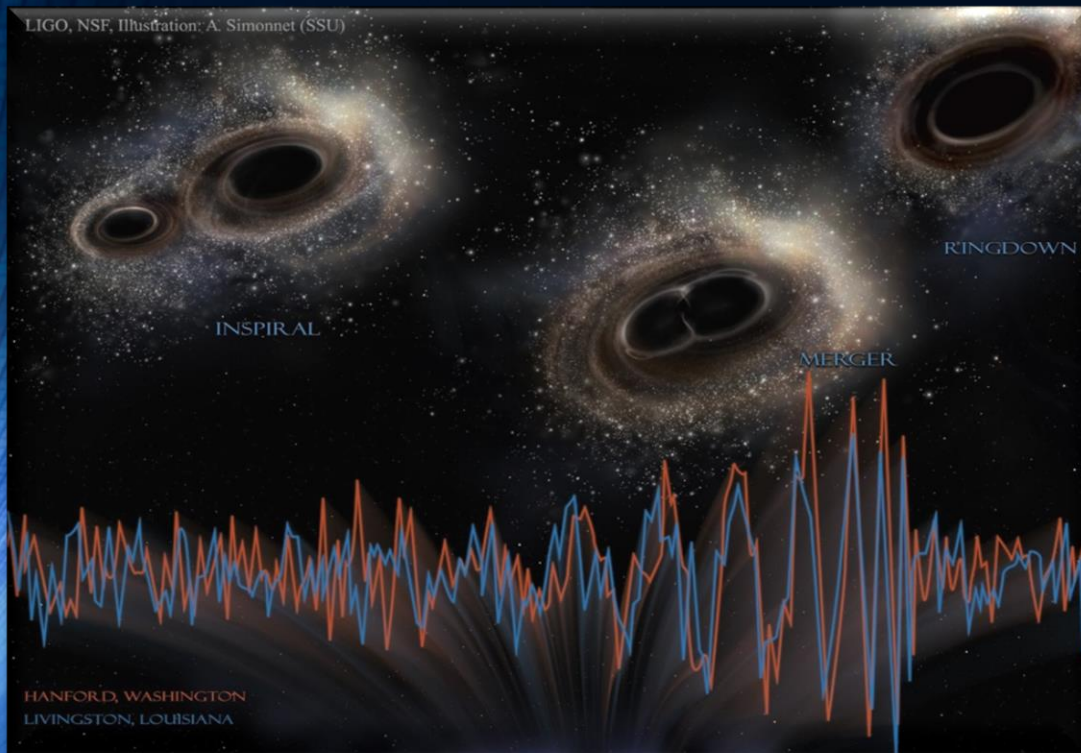


Erste Gravitationswelle im Jahr 2015 gefunden!!

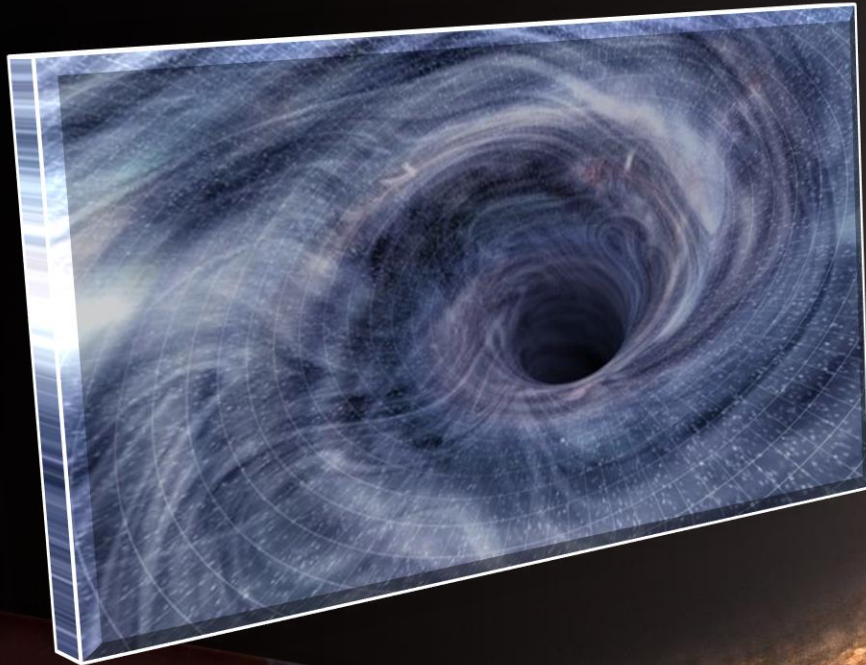
Kollision zweier Schwarzer Löcher GW150914

Massen: 36 & 31 Sonnenmassen

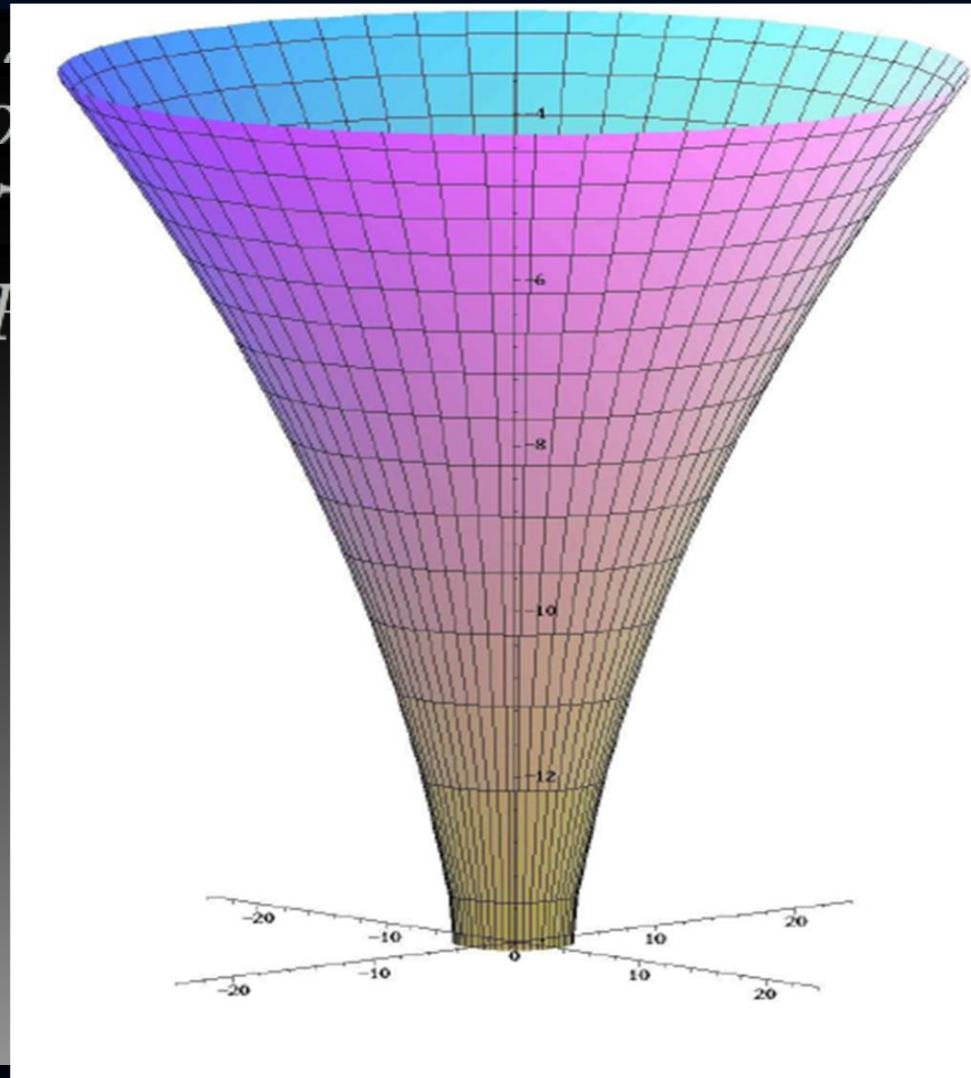
Abstand zur Erde
1.2 Milliarden Lichtjahre



Was sind schwarze Löcher?



Schwarze Löcher und der Raumzeit-Trichter



M: Masse des Objektes
R: Radius des Objektes
 g_{tt} : Metrik der Raumzeit

$$\sqrt{-g_{tt}}$$

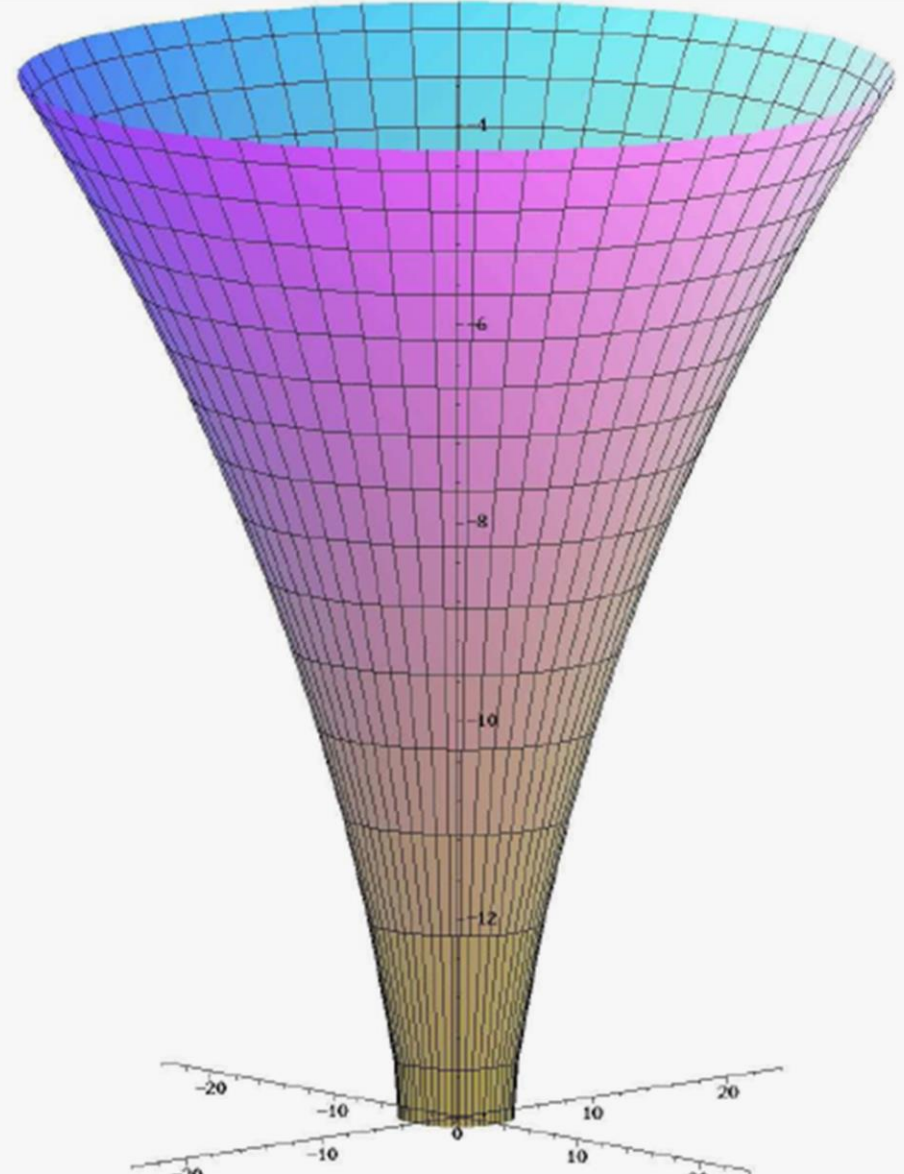
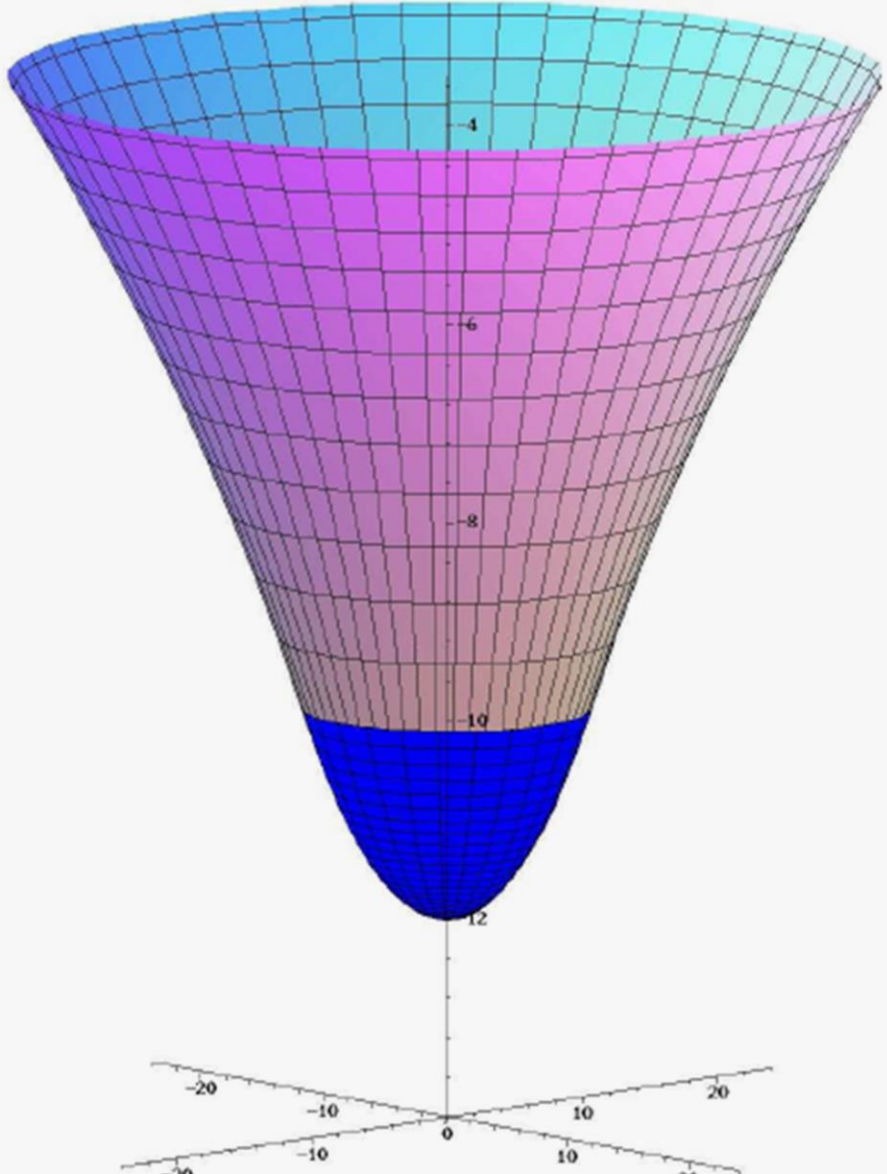
Wir sind über den
Grenzwert
gekommen und
haben ein schwarzes
Loch erzeugt!

Grenzwert der Krümmung: Stabile Objekte (Neutronensterne) sind nicht mehr möglich

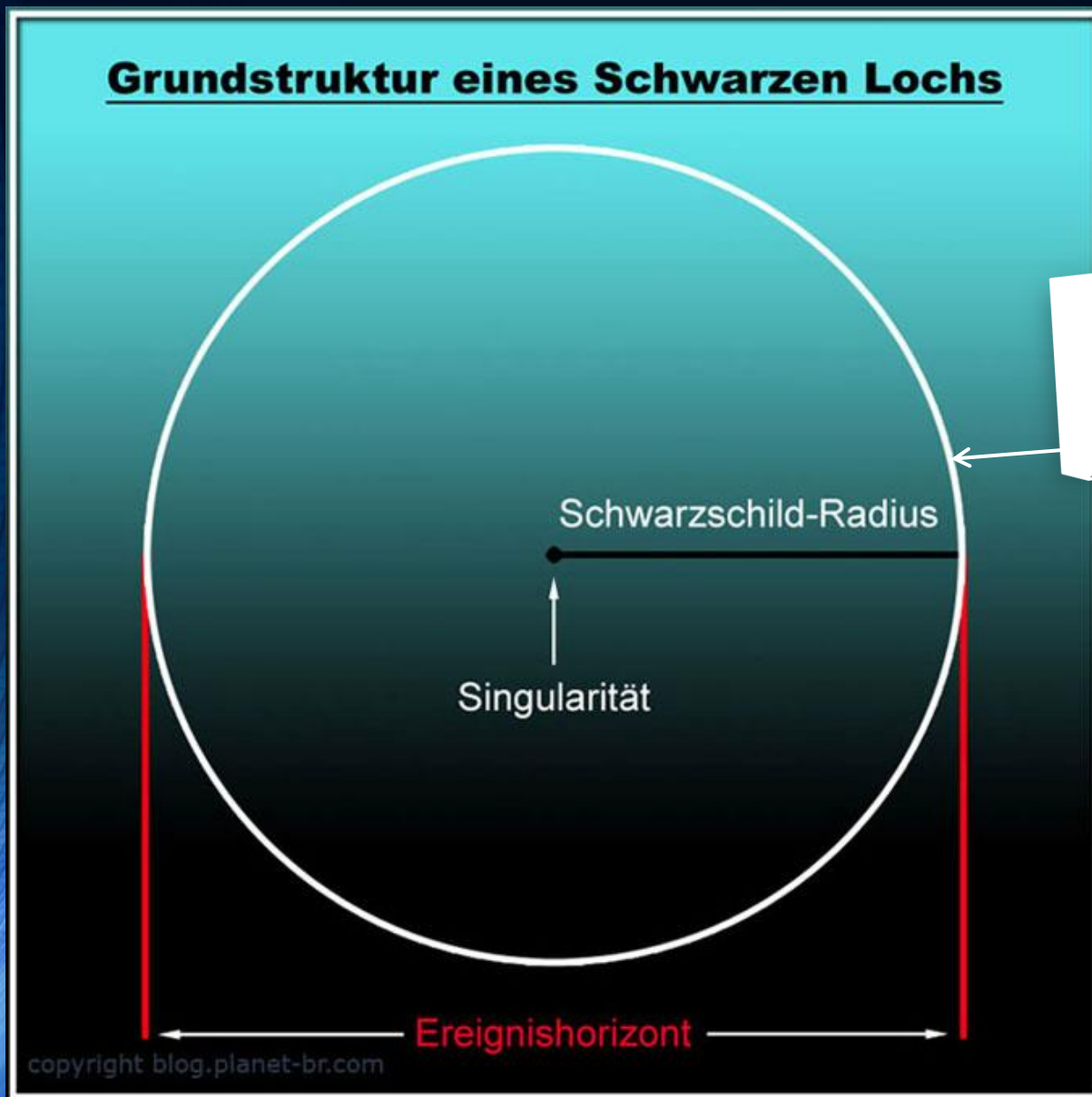
Raumzeit - Krümmung

Neutronenstern

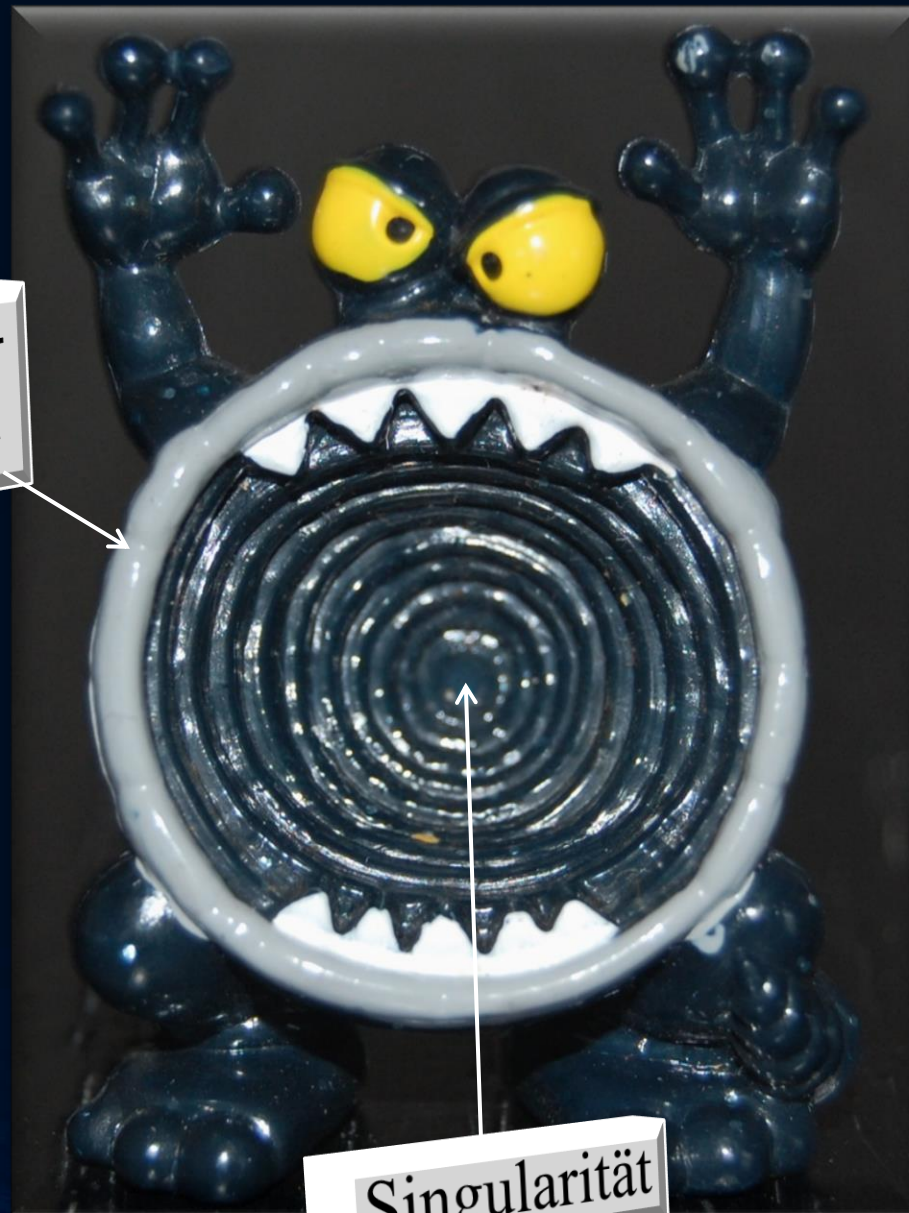
Schwarzes Loch



Der Ereignishorizont eines Schwarzen Loches



Ereignis-
horizont

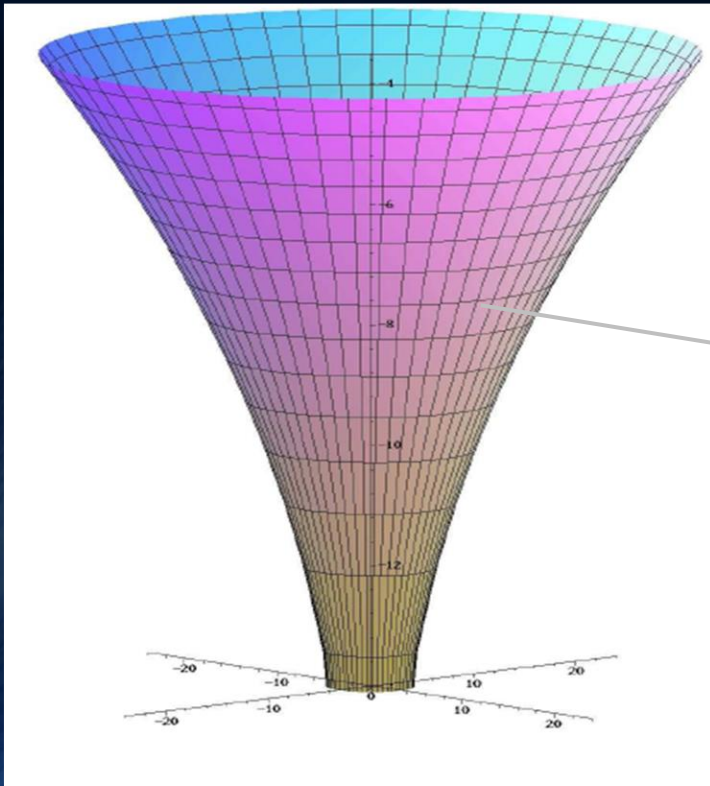


Singularität

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



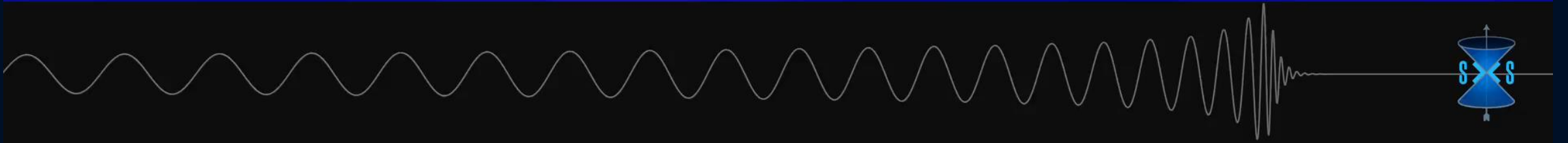
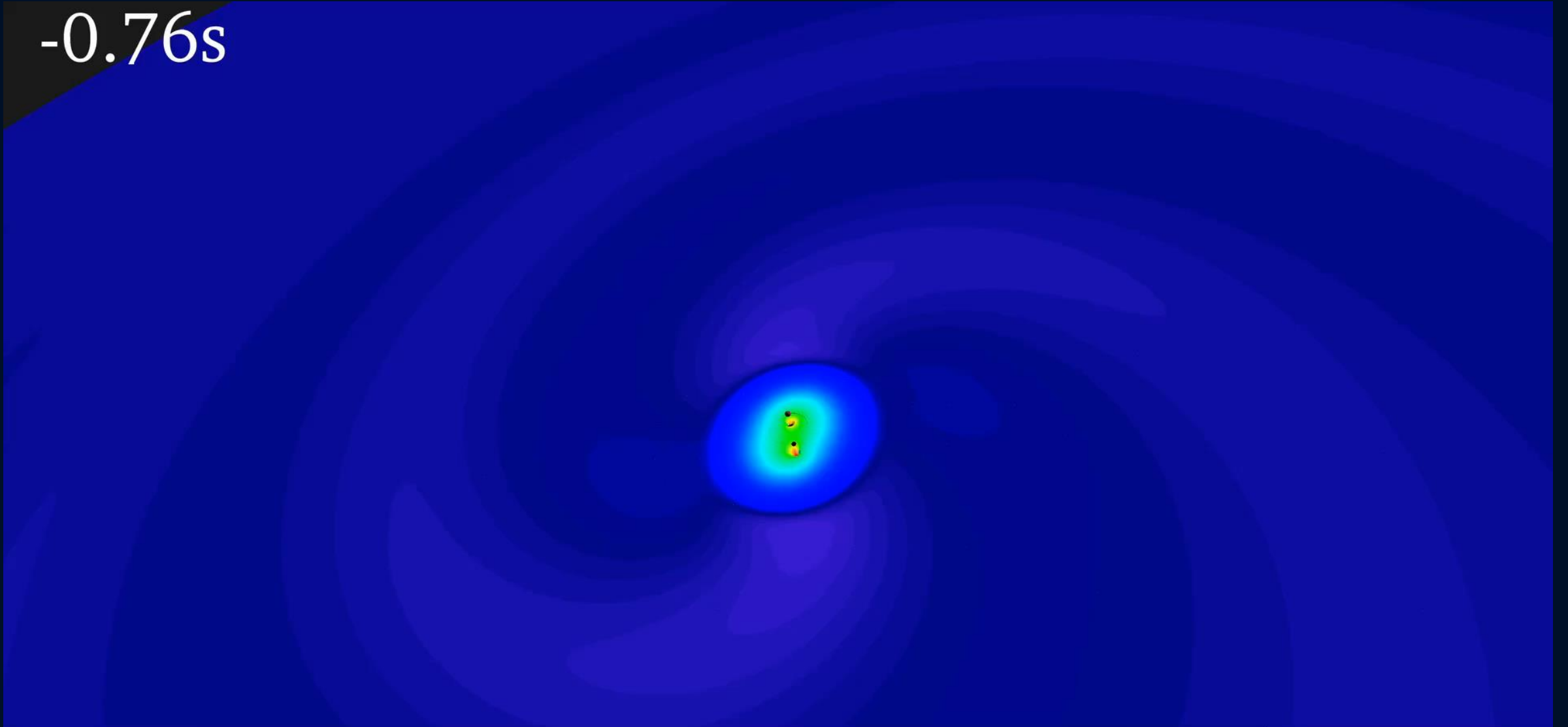
Ereignishorizont

Echte Singularität

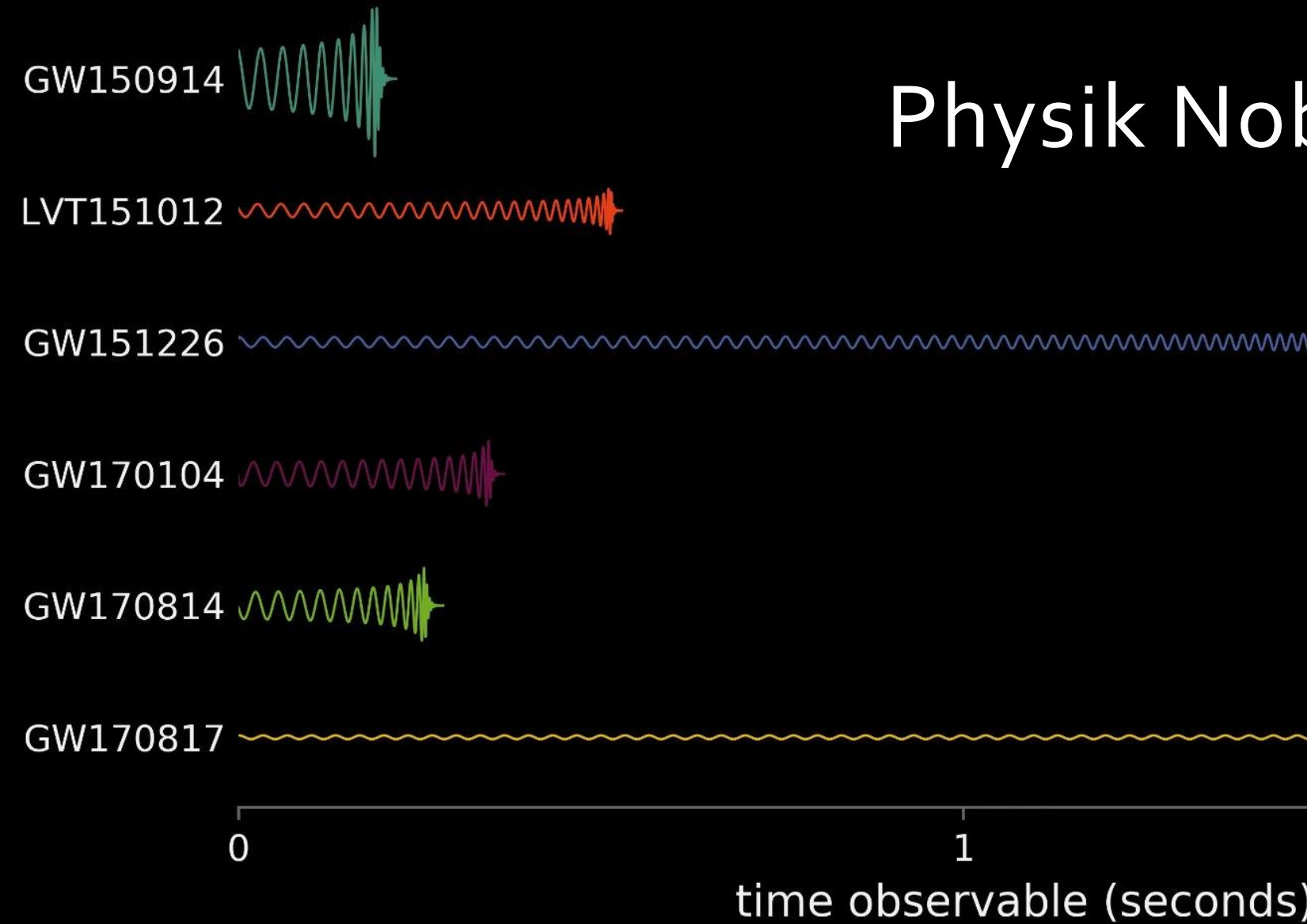
Ereignishorizont

Computer Simulation: Kollidierende Schwarze Löcher

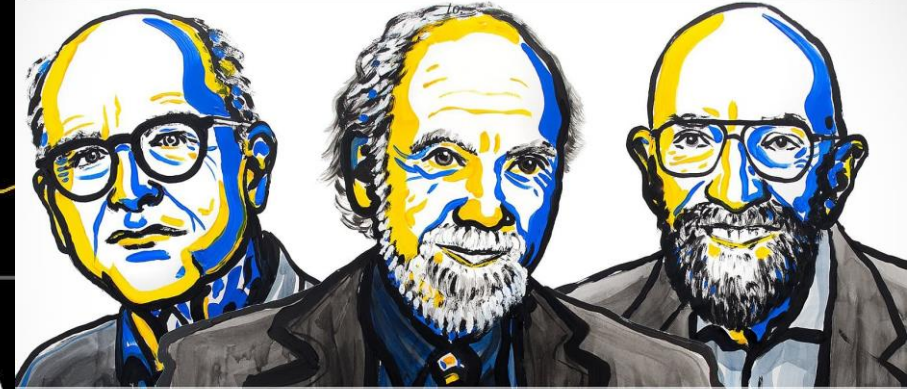
-0.76s



Physik Nobel Preis 2017

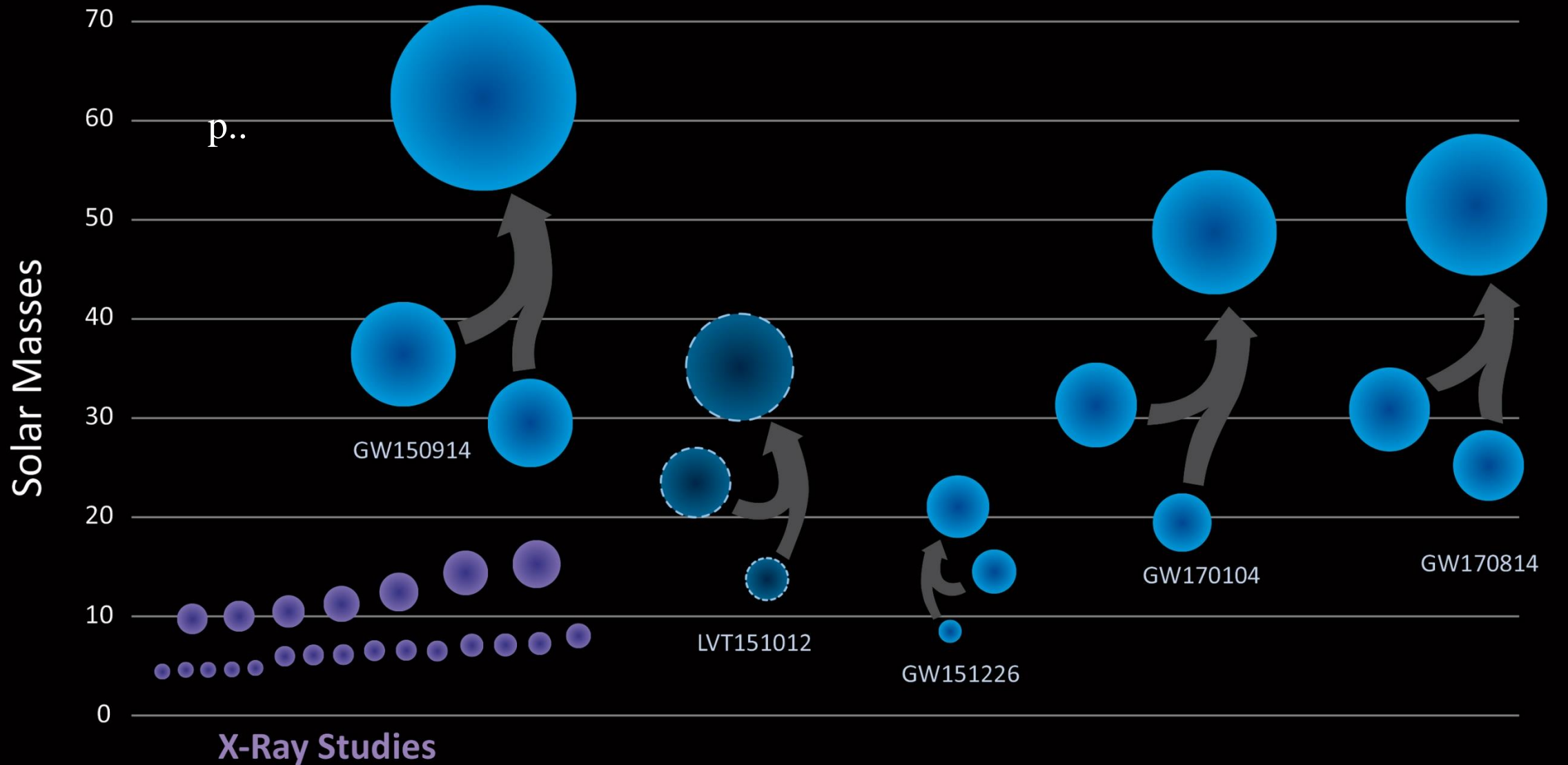


2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



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_{tot}	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy E_{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 Θ	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 700	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4 M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400

17. August 2017

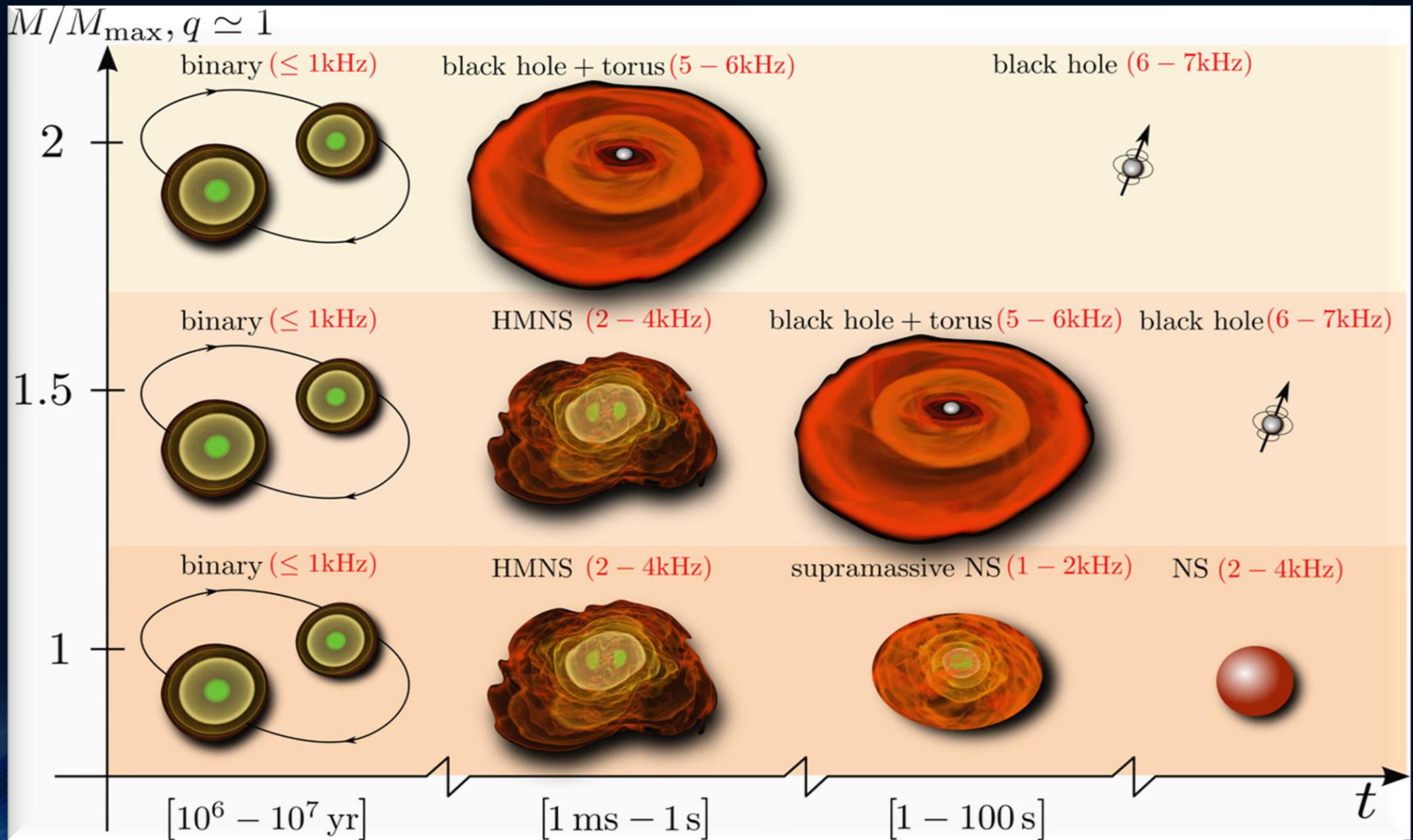
Gravitationswelle einer
Neutronenstern Kollision gemessen!

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/cm³]

**Temperatur der
Neutronenstern Materie**

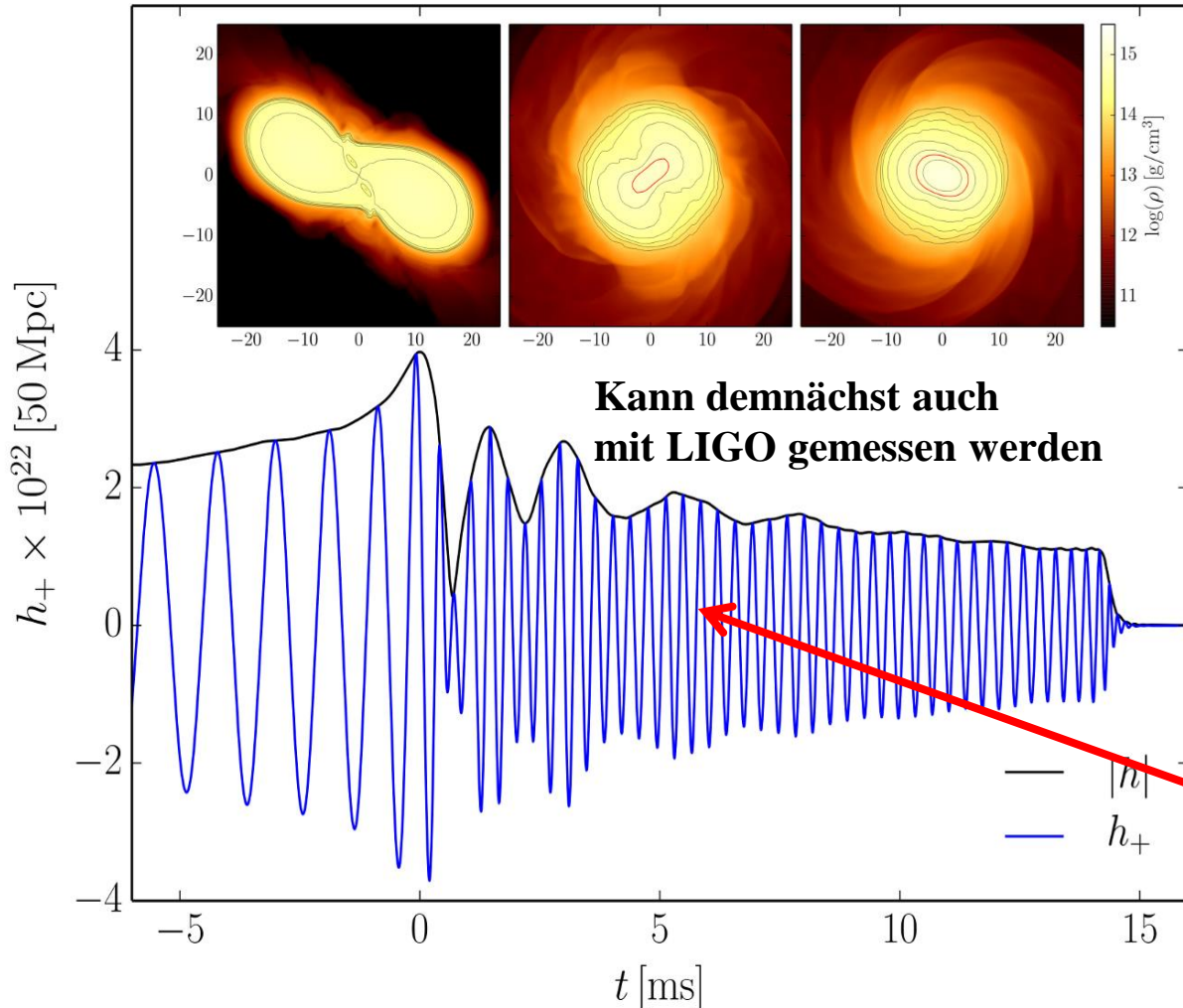
0 50



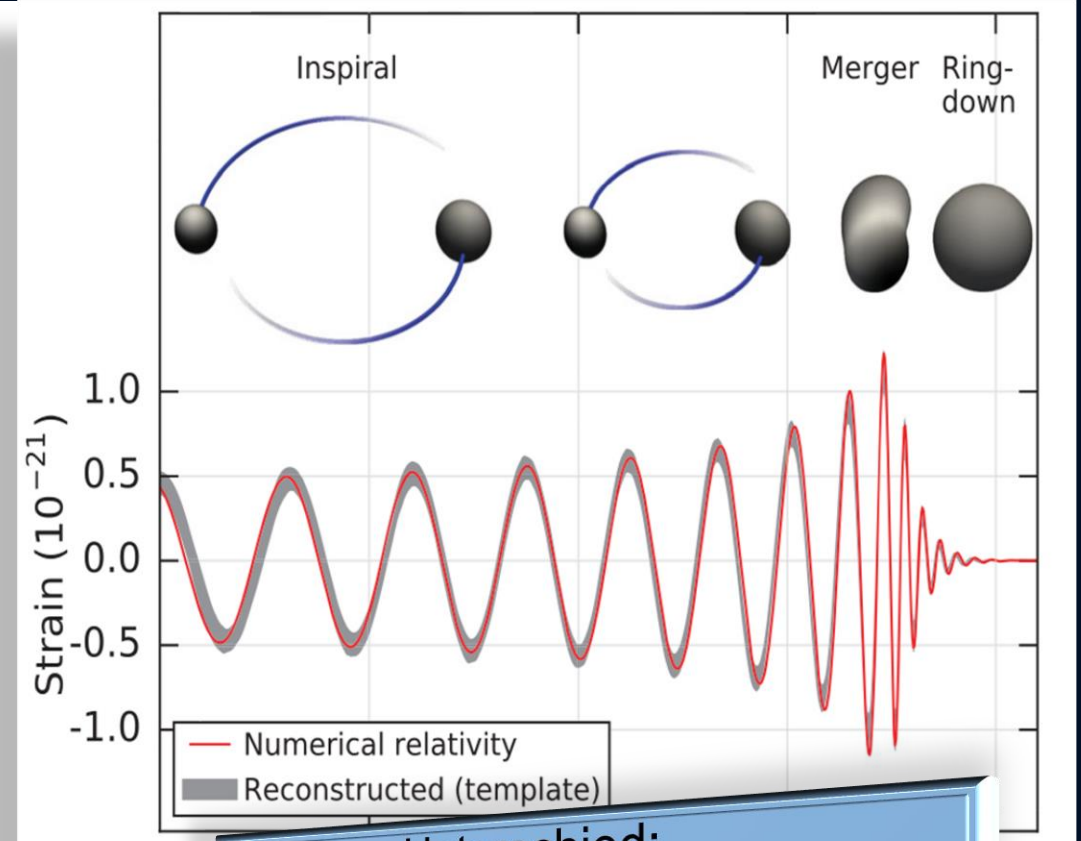
T [MeV]

Gravitationswelle einer Neutronenstern Kollision

Neutronenstern Kollision (Simulation)



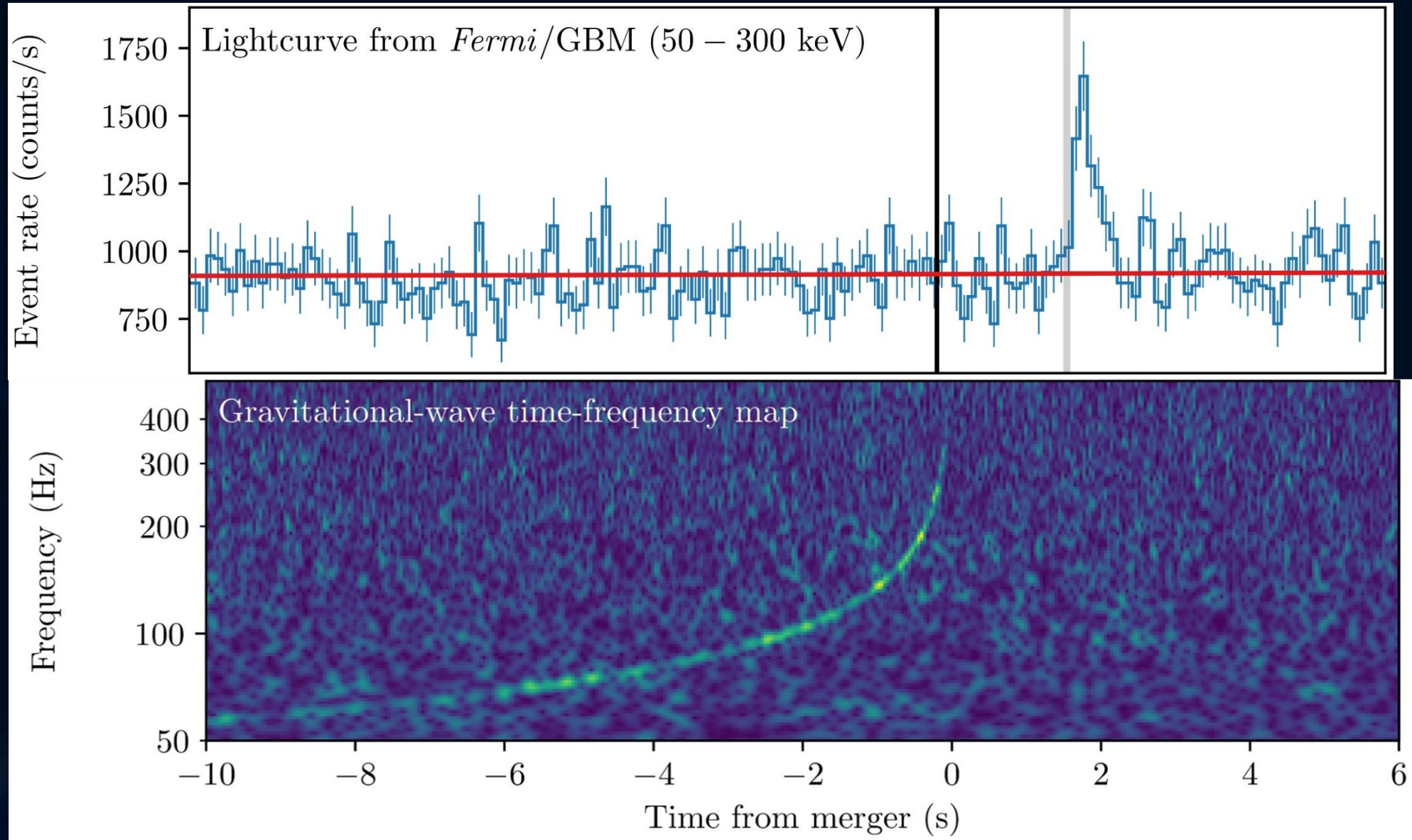
Kollision zweier schwarzer Löcher



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)



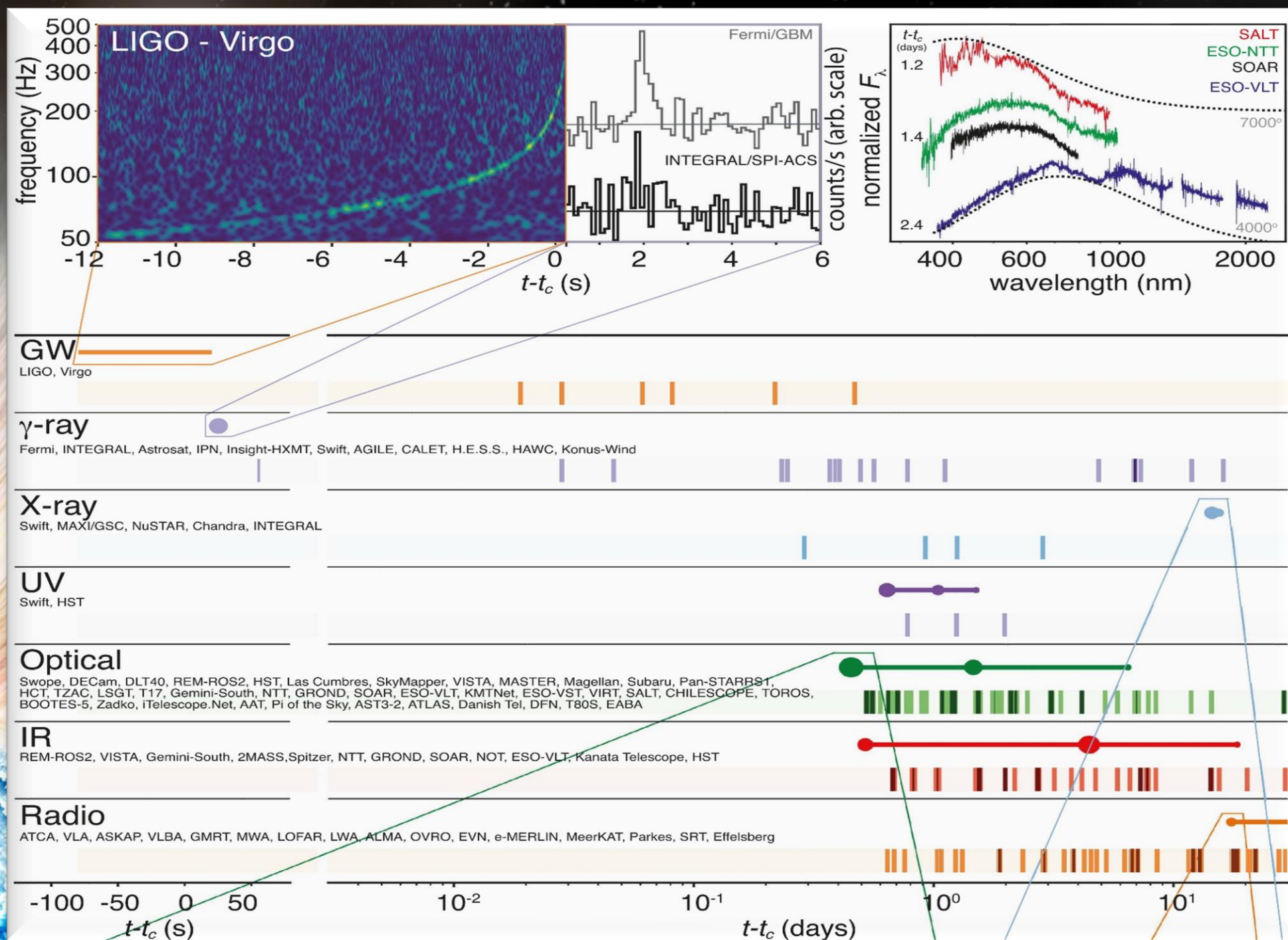
Die von dem
Gravitationswellen
Detektor LIGO
detektierte
Frequenz der
Gravitationswelle



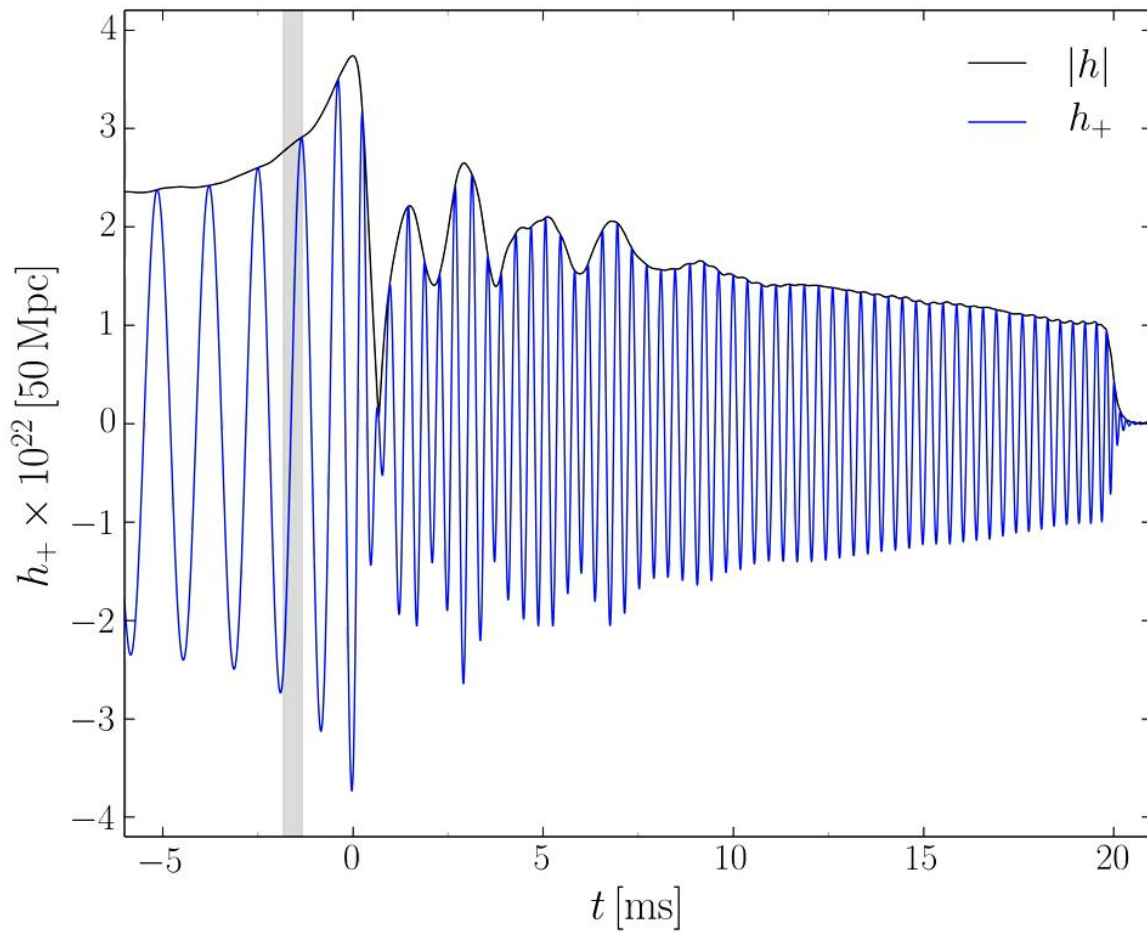
GW170817

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

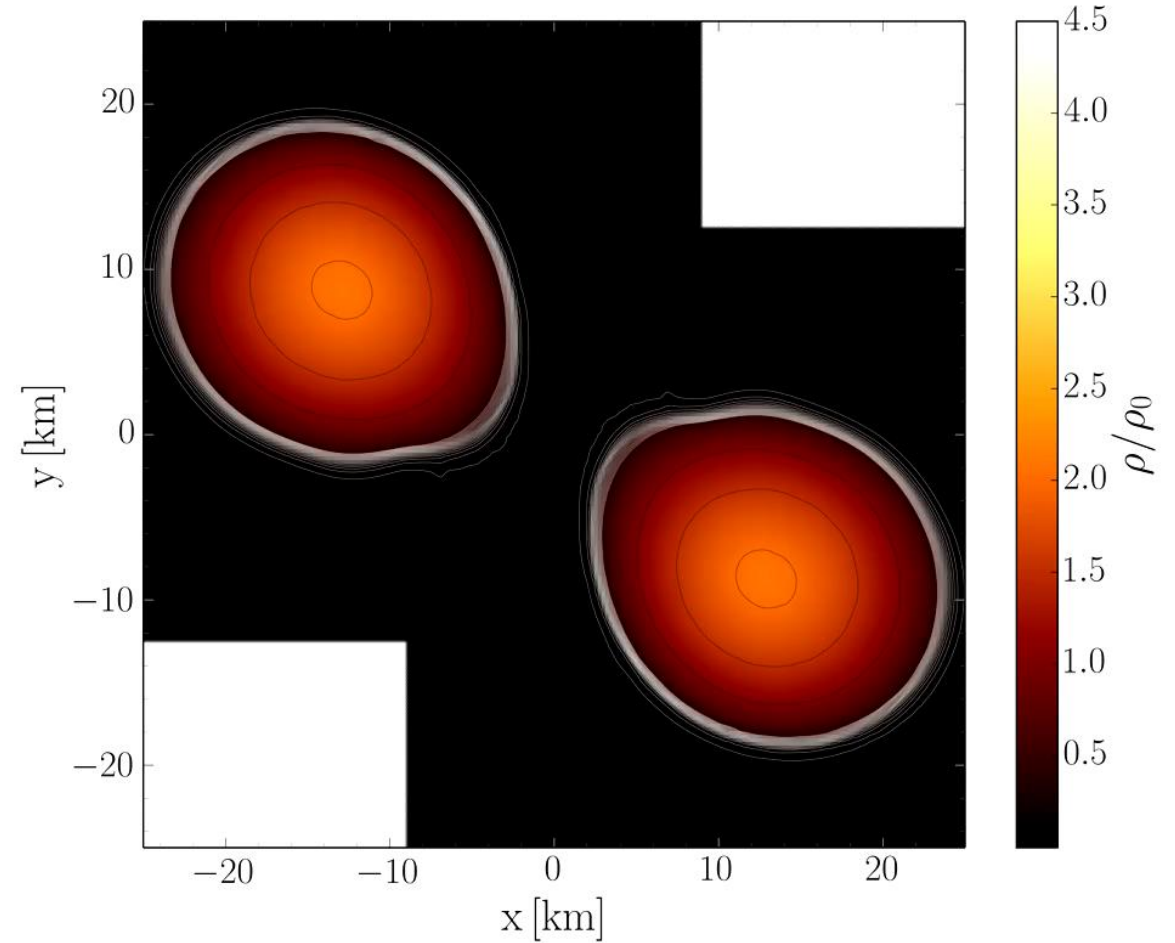
Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, LIGO and Virgo Collaborations together with 50 teams of electromagnetic and neutrino astronomers, *Astrophys. J. Lett.* 848, L12 (2017)



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



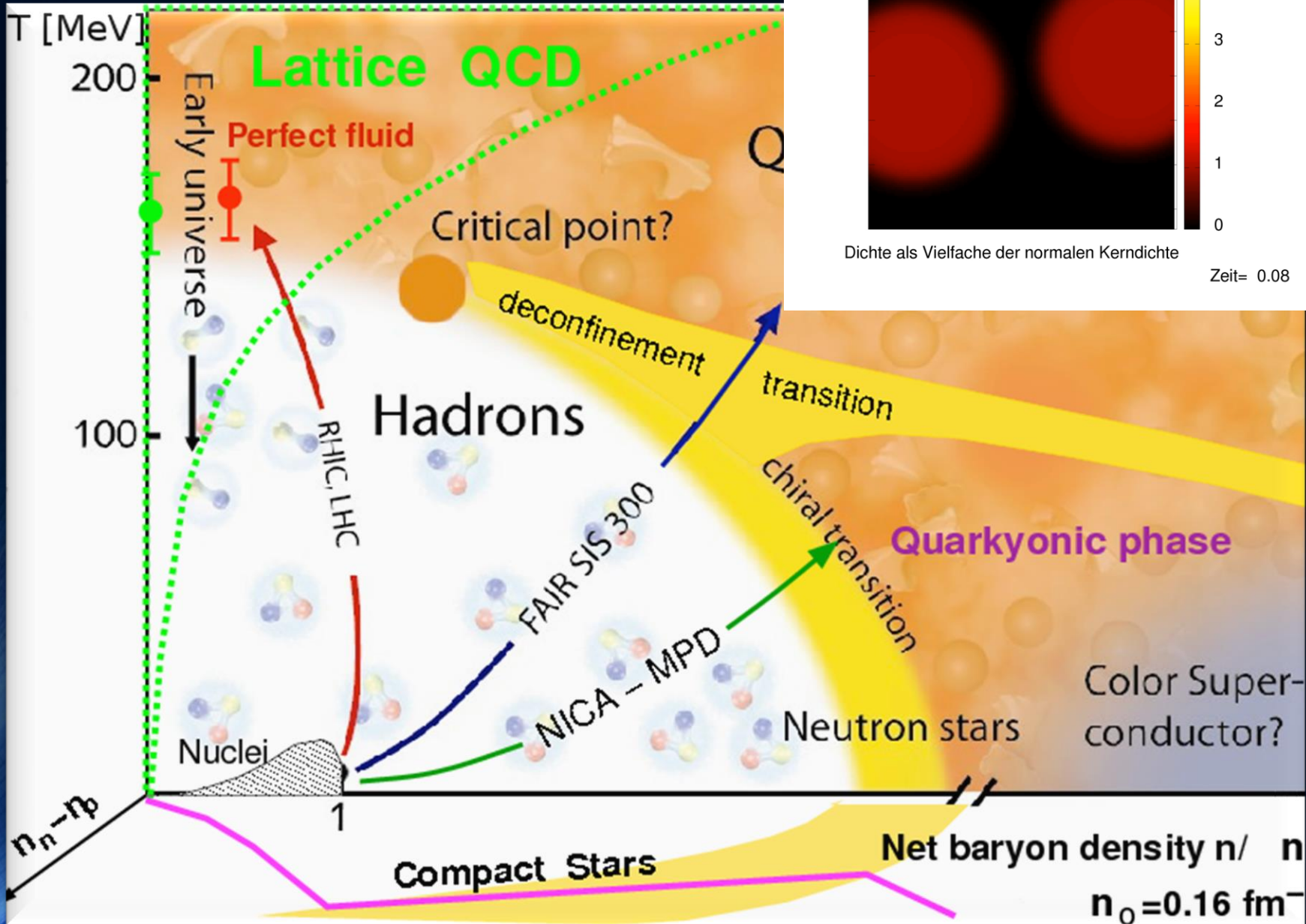
Amplitude der emittierten Gravitationswelle



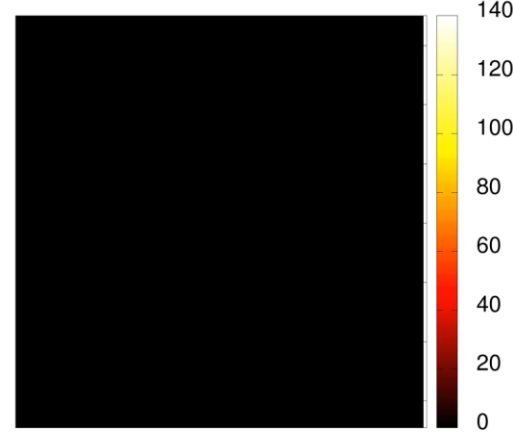
Dichteprofil in der äquatorialen Ebene

The Hadron-Quark Phase Transition

The QCD Phase Diagram

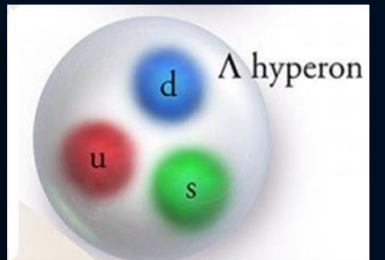
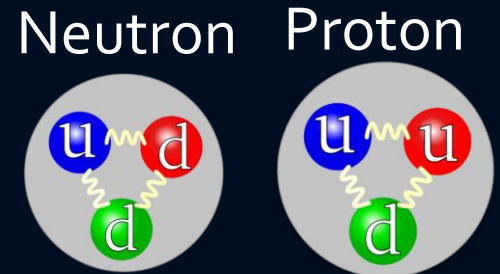


Gold+Gold Kollision am GSI: Helmholtz Zentrum für Schwerionenforschung / HADES Experiment
Am FAIR Beschleuniger: noch hoehere Strahlintensitaet

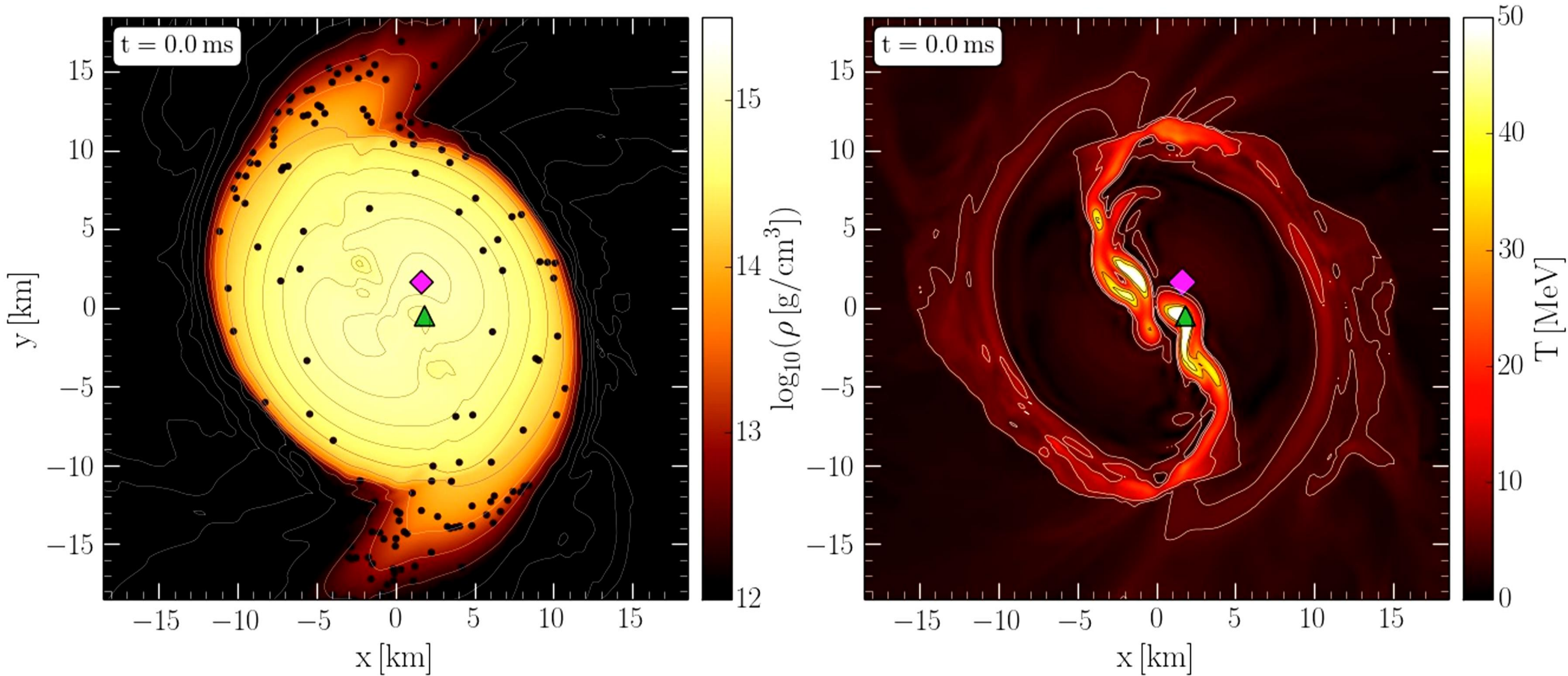


Zeit= 0.08 fm/c

Credits:
Jan Steinheimer



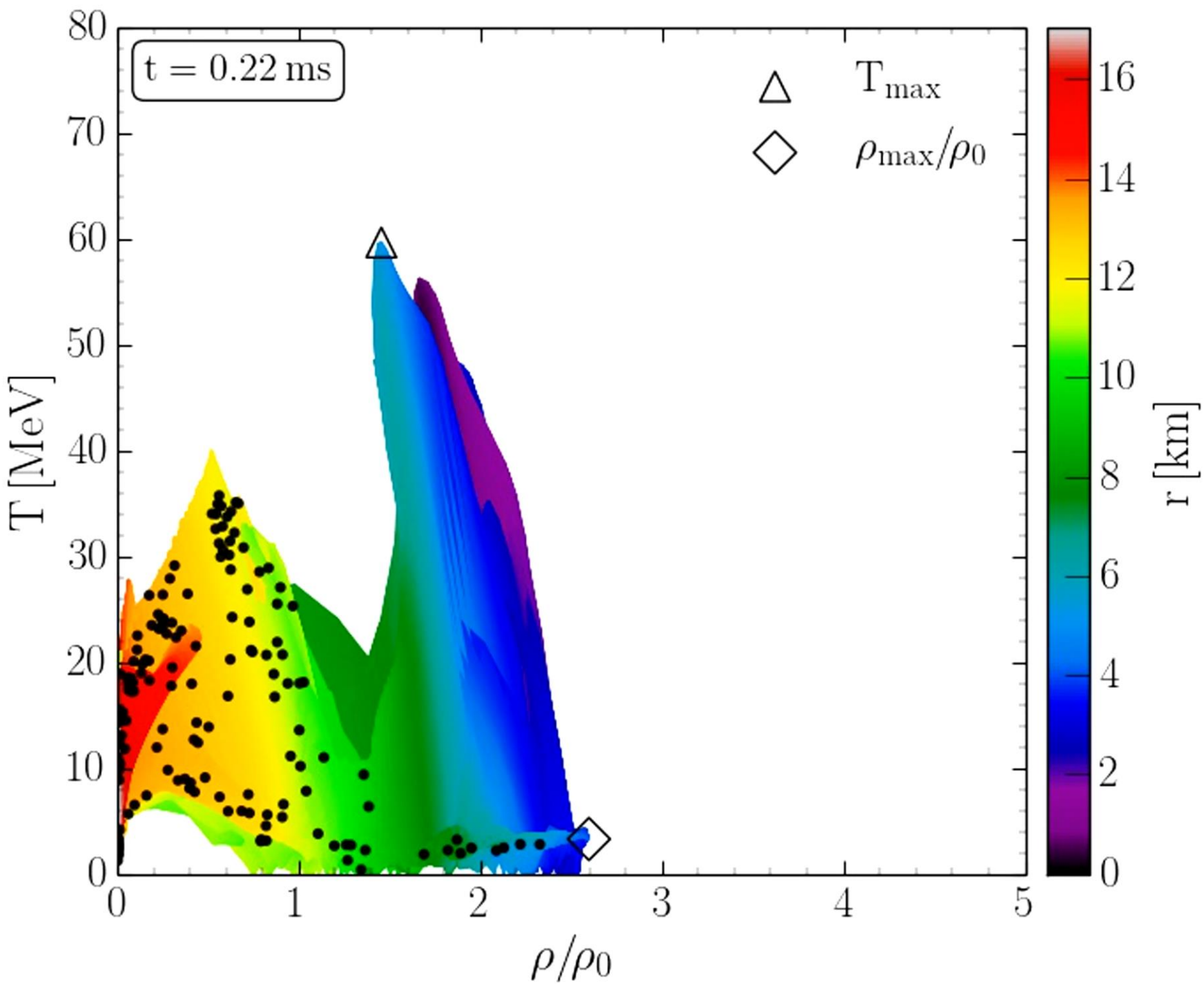
Density and Temperature Evolution inside the HMNS



Rest mass density on the equatorial plane

Temperature on the equatorial plane

Binary Neutron Star Mergers in the QCD Phase Diagram

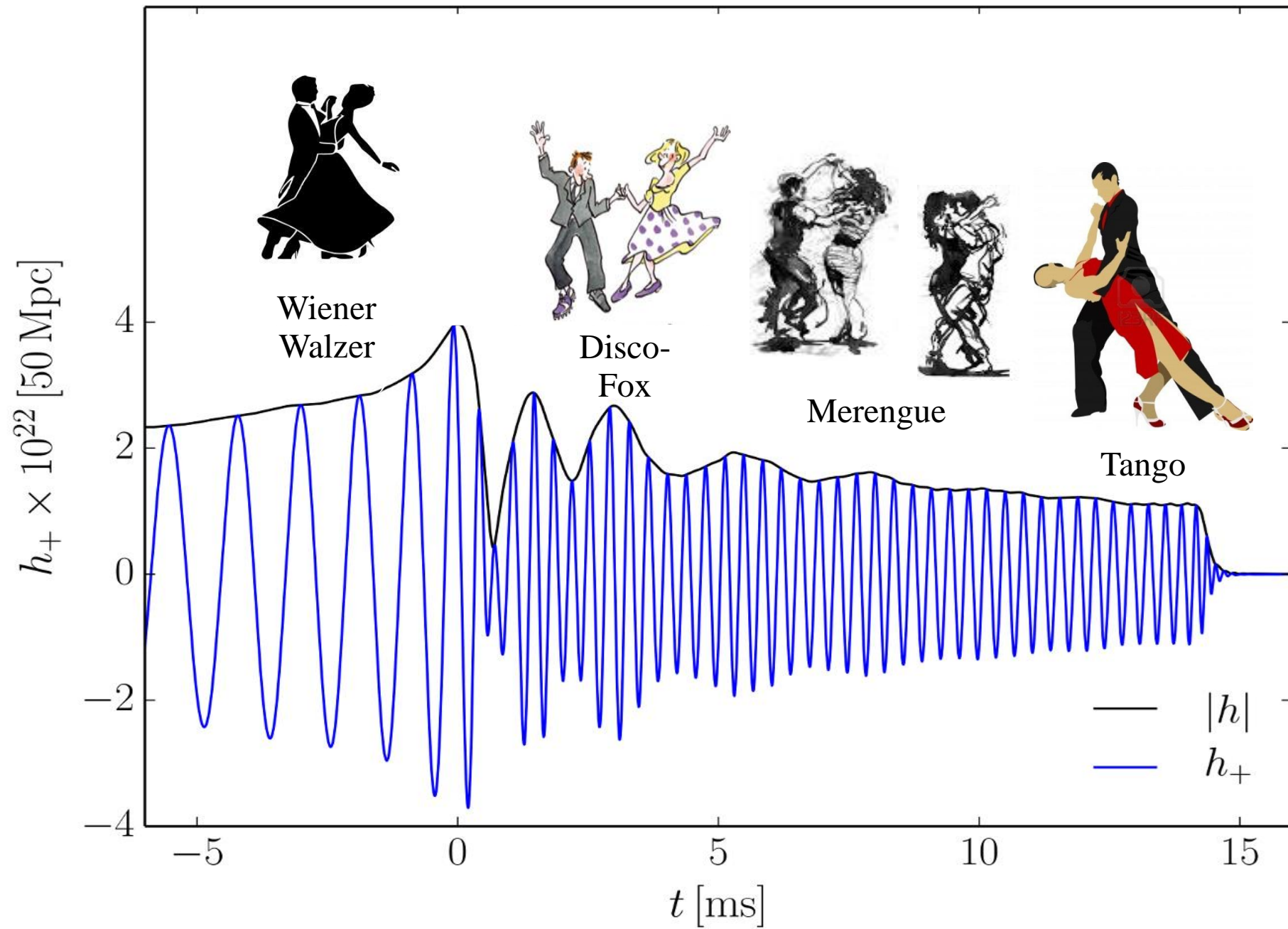


Evolution of hot and dense matter inside the inner area of a hypermassive neutron star simulated within the LS220 EOS with a total mass of $M_{\text{total}}=2.7 M_{\text{solar}}$ in the style of a $(T-\rho)$ QCD phase diagram plot

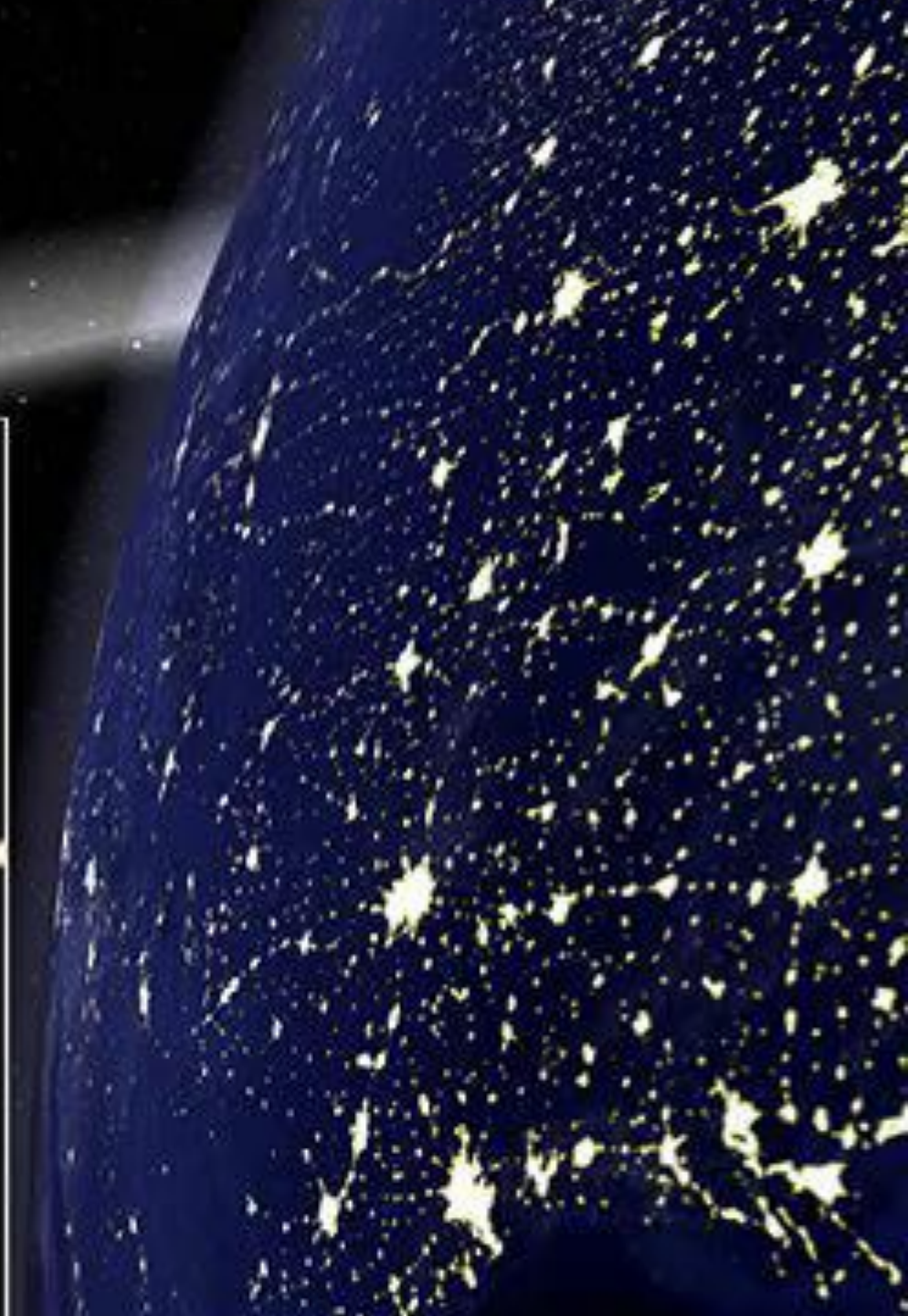
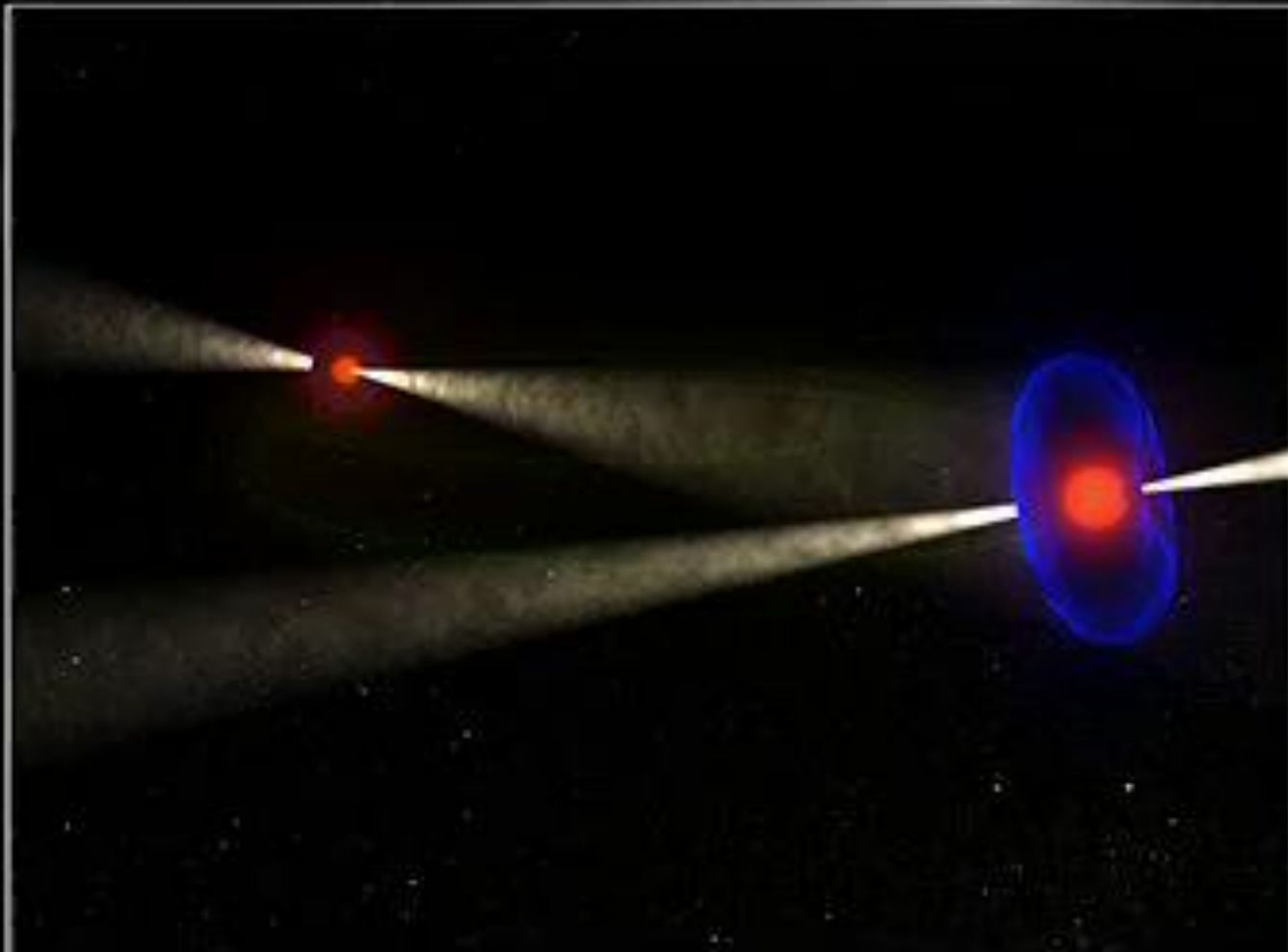
The color-coding indicates the radial position r of the corresponding $(T-\rho)$ fluid element measured from the origin of the simulation $(x, y) = (0, 0)$ on the equatorial plane at $z = 0$.

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

Tanz der Neutronensterne

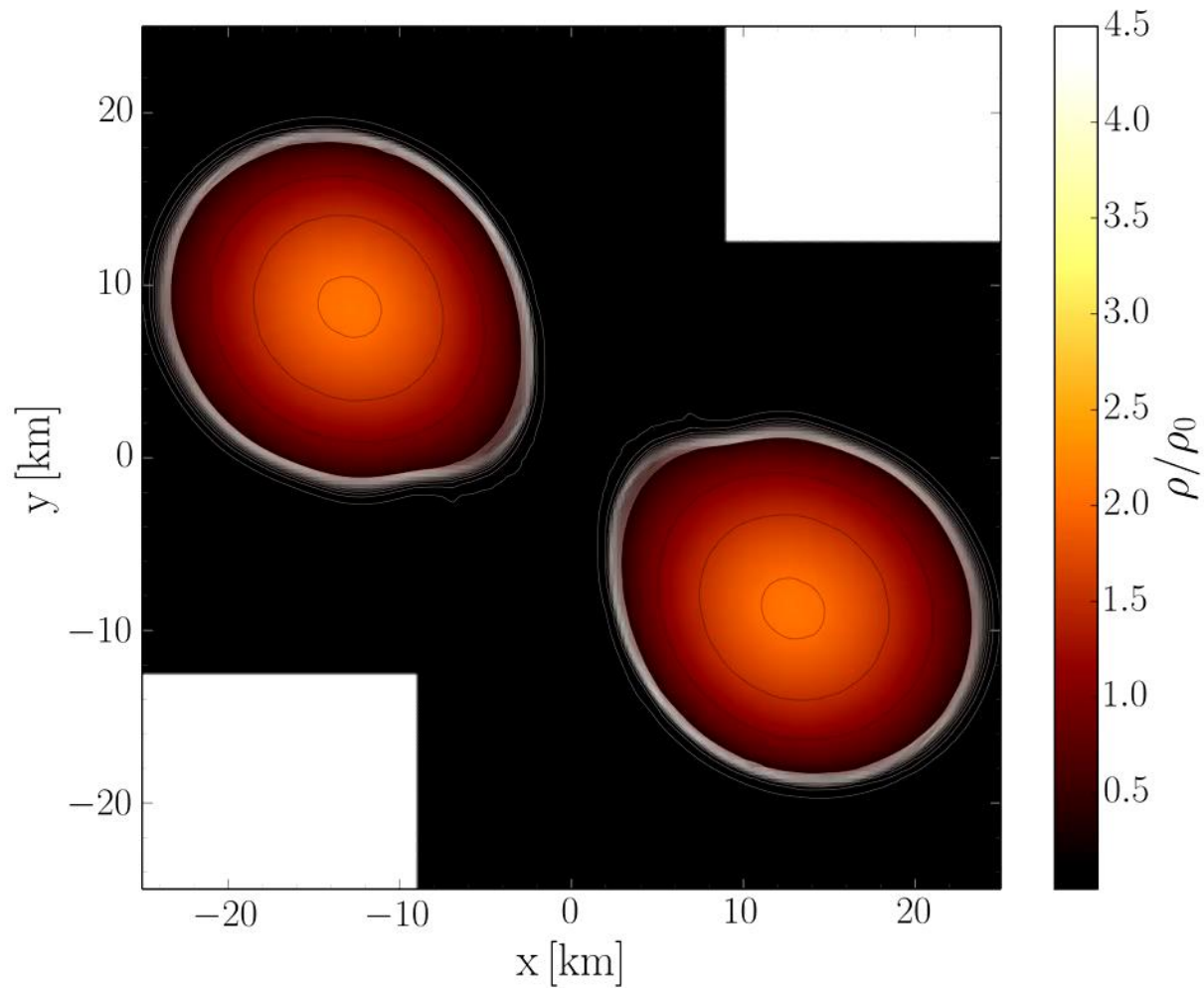
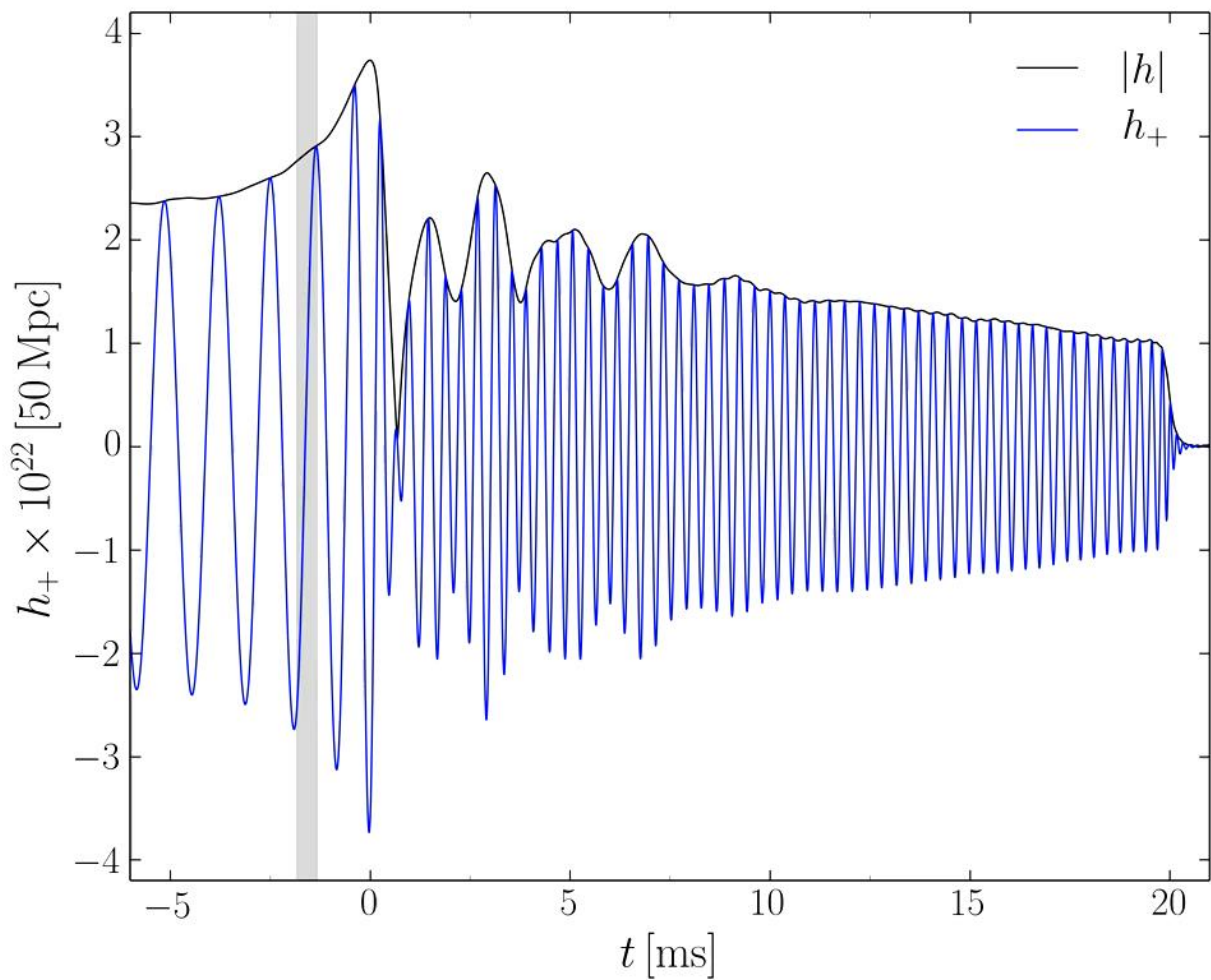


Wiener Walzer Phase





Disco-Fox, Merengue und Tango Phase





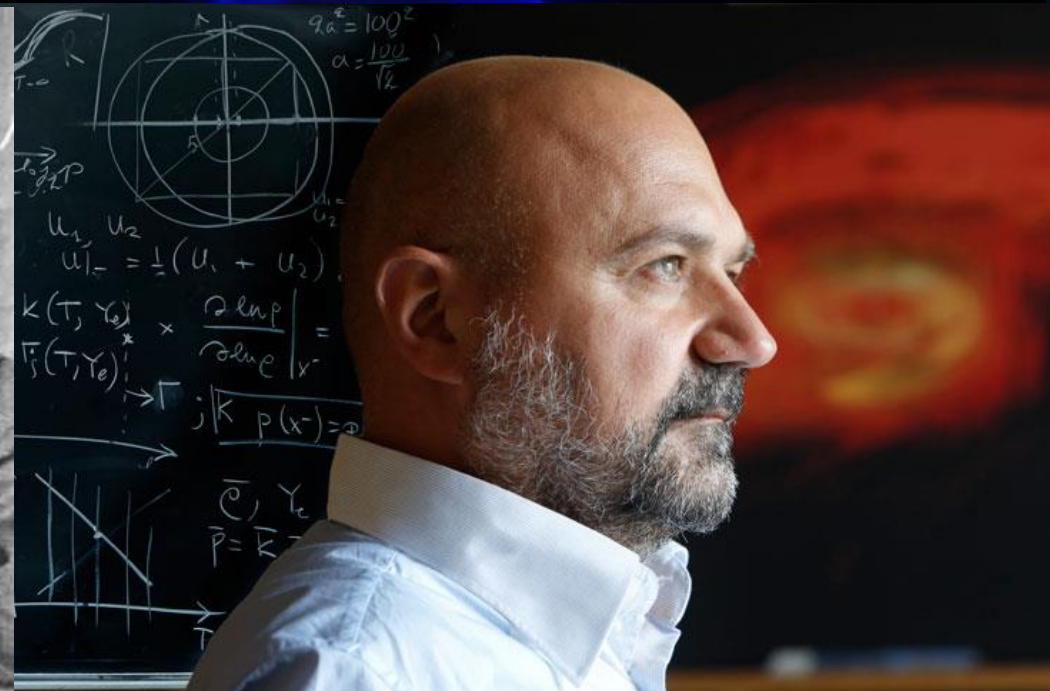
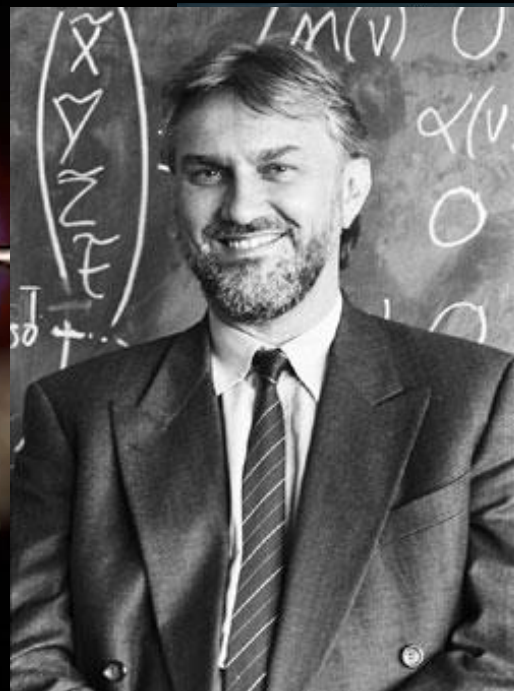
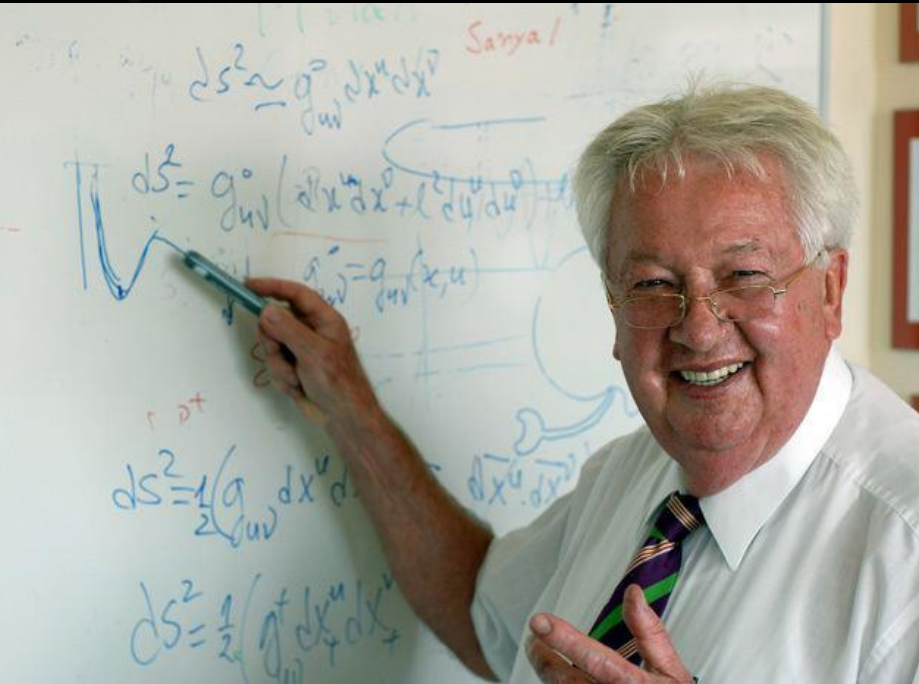
Credits to ...

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