

Gravitationswellen von kollidierenden Neutronensternen und die seltsamen Eigenschaften elementarer Materie

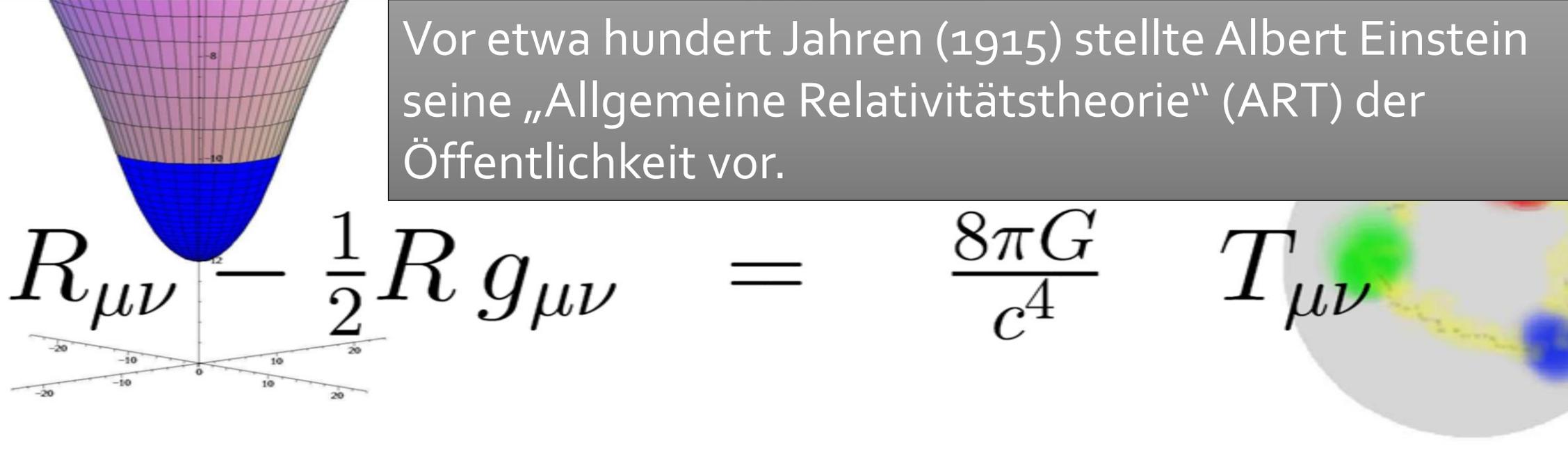
*PHYSIK FÜR ALLE AM 13. SEPTEMBER 2017
AN DER GSI IN WIXHAUSEN*

MATTHIAS HANAUSKE

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

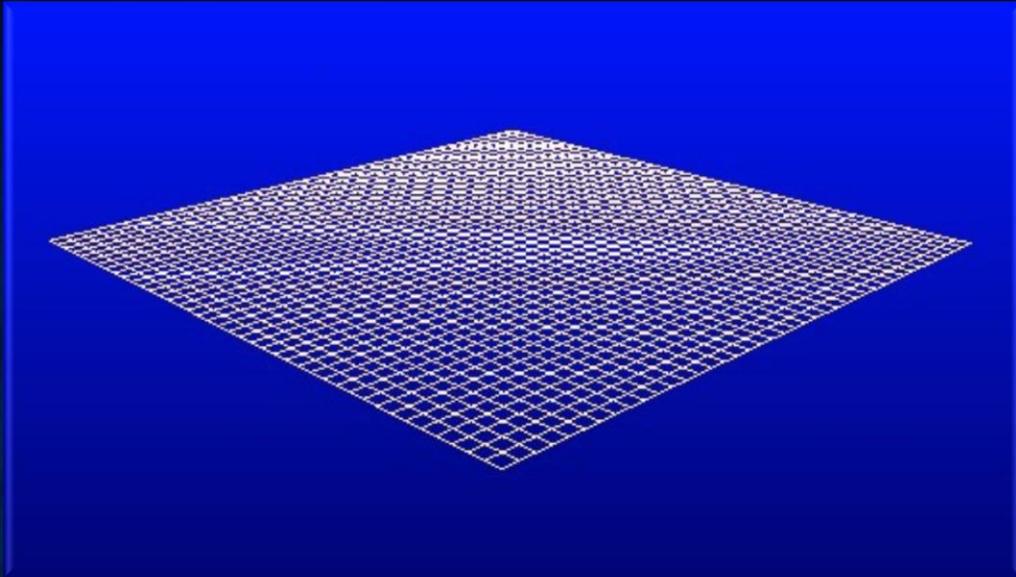
Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Vor etwa hundert Jahren (1915) stellte Albert Einstein seine „Allgemeine Relativitätstheorie“ (ART) der Öffentlichkeit vor.


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

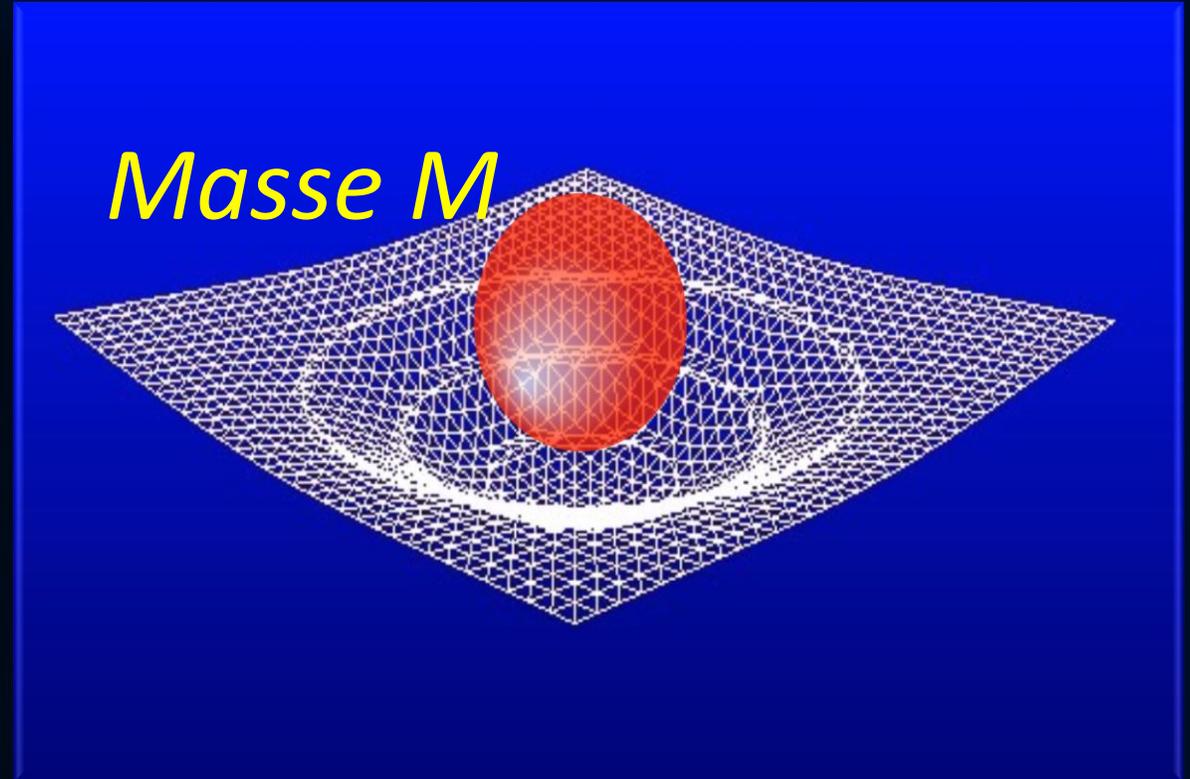
Die ART ist eine sehr revolutionäre Theorie. Sie besagt, dass jegliche Energieformen (z.B. Masse eines Körpers) die „Raumzeit“ verbiegen und durch diese Krümmung des Raumes und der Zeit die Gravitation (Schwerkraft) resultiert. -> Raumzeit-Krümmung = Energie

Was ist Raumzeit-Krümmung?



Flache Raumzeit

Raumzeit ohne Materie und Energie hat keine Krümmung



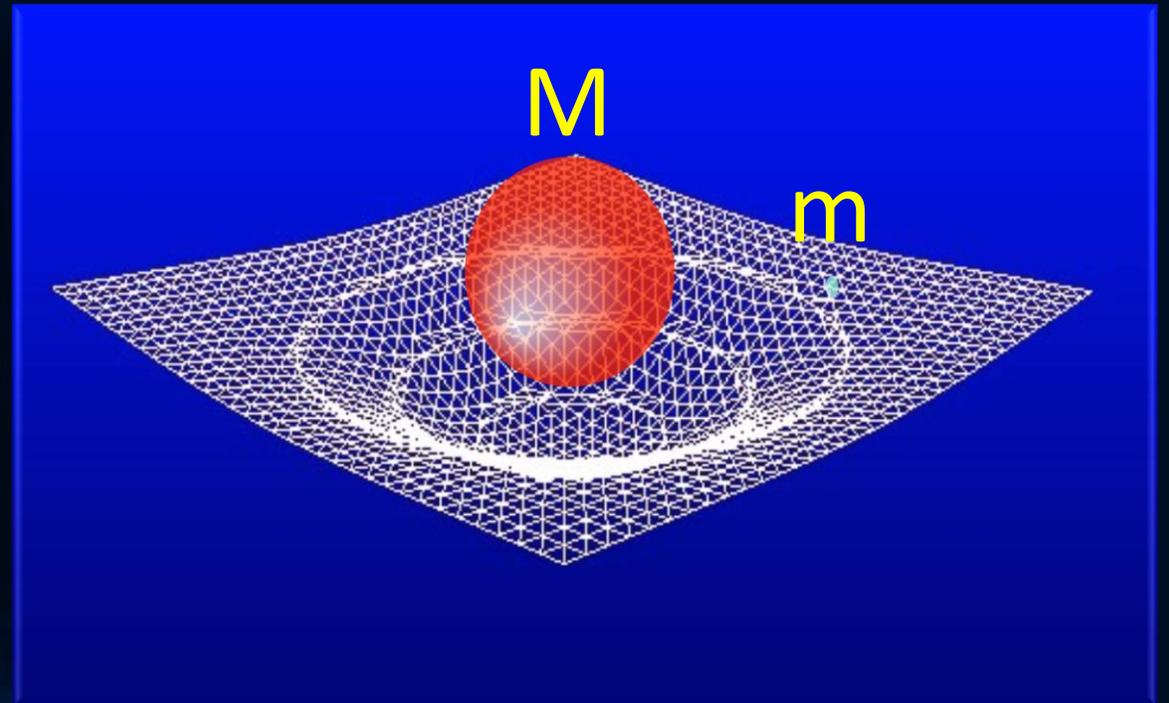
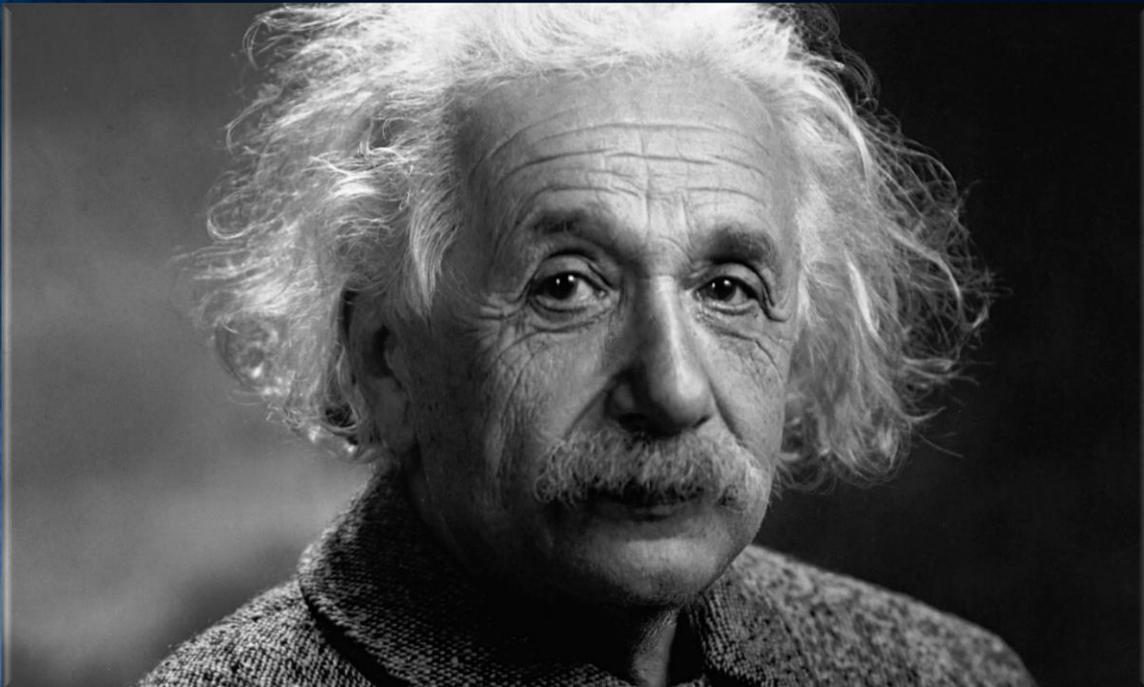
Gekrümmte Raumzeit

Raumzeit mit Materie verbiegt sich

Raumzeit-Krümmung ist Gravitation?

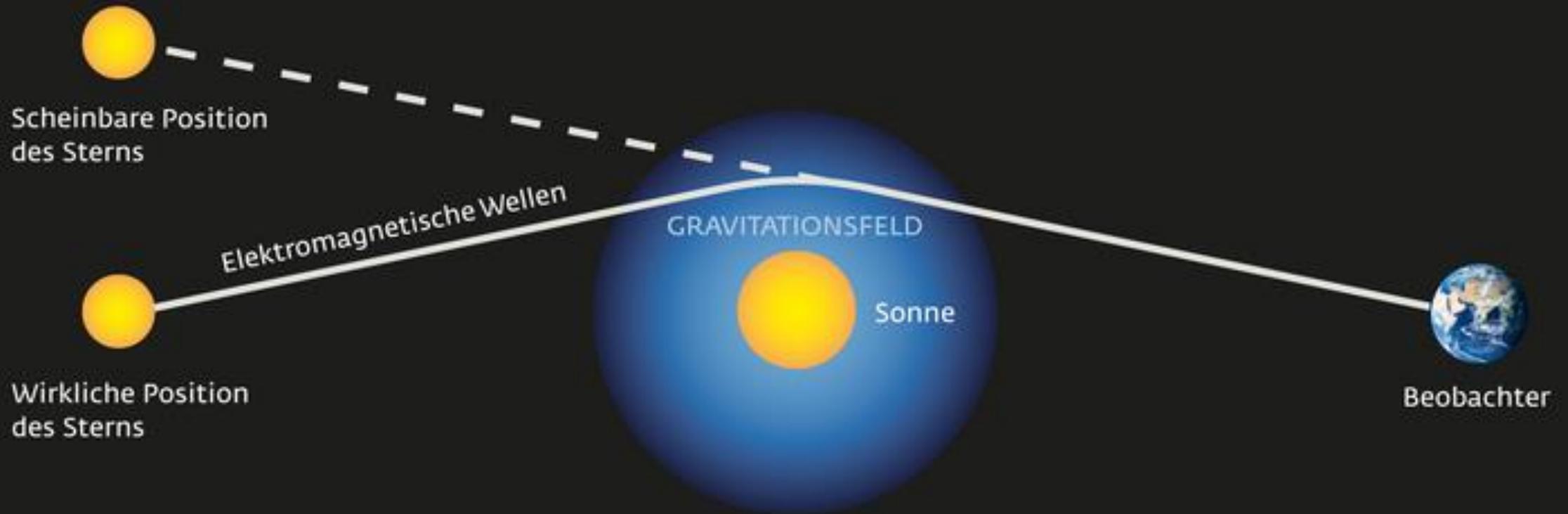
Betrachten wir einen Objekt kleiner Masse m das um ein Objekt großer Masse M kreist (z.B. Erde um die Sonne)

Einstein: Die Krümmung der Raumzeit, verursacht durch die große Masse, bestimmt die Umlaufbahn des kleinen Körpers und ist ursächlicher Grund der gravitativen Wechselwirkung



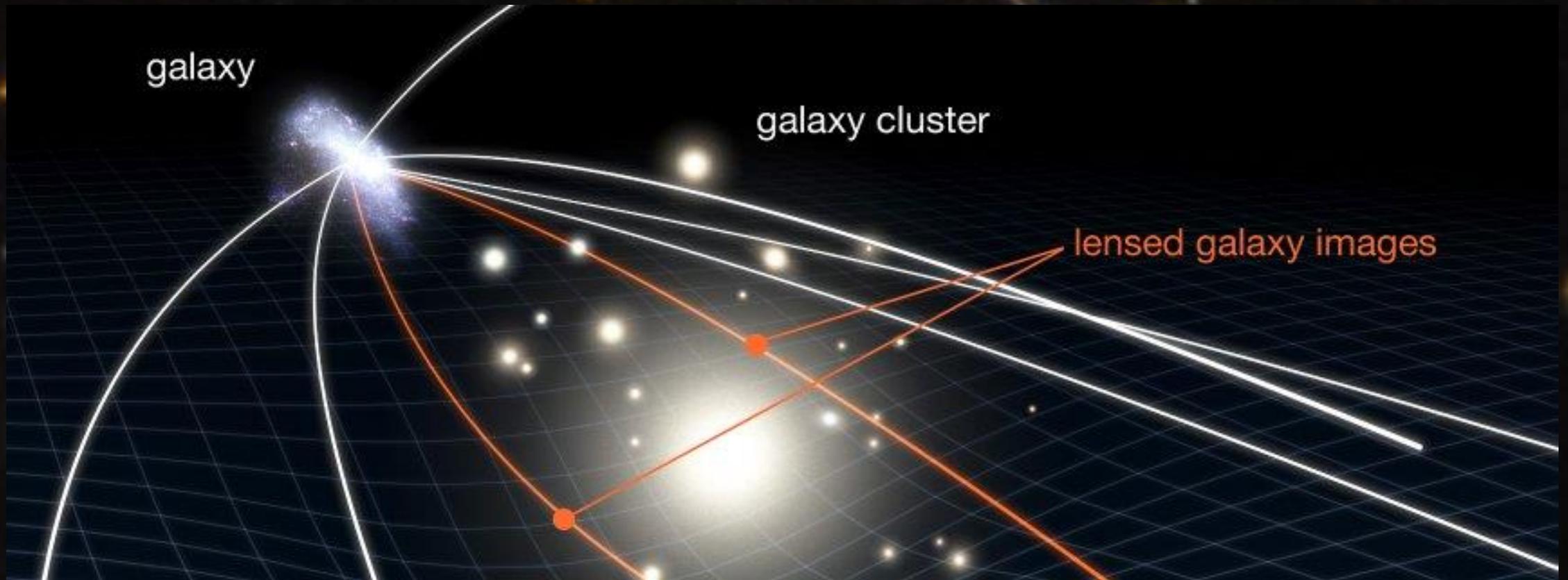
Erste Bestätigung der ART: Sonnenfinsternis 1919

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



Der Gravitationslinsen-Effekt

Der besprochene Gravitationslinsen-Effekt kann auch mehrfache Bilder des gleichen Objektes erzeugen:

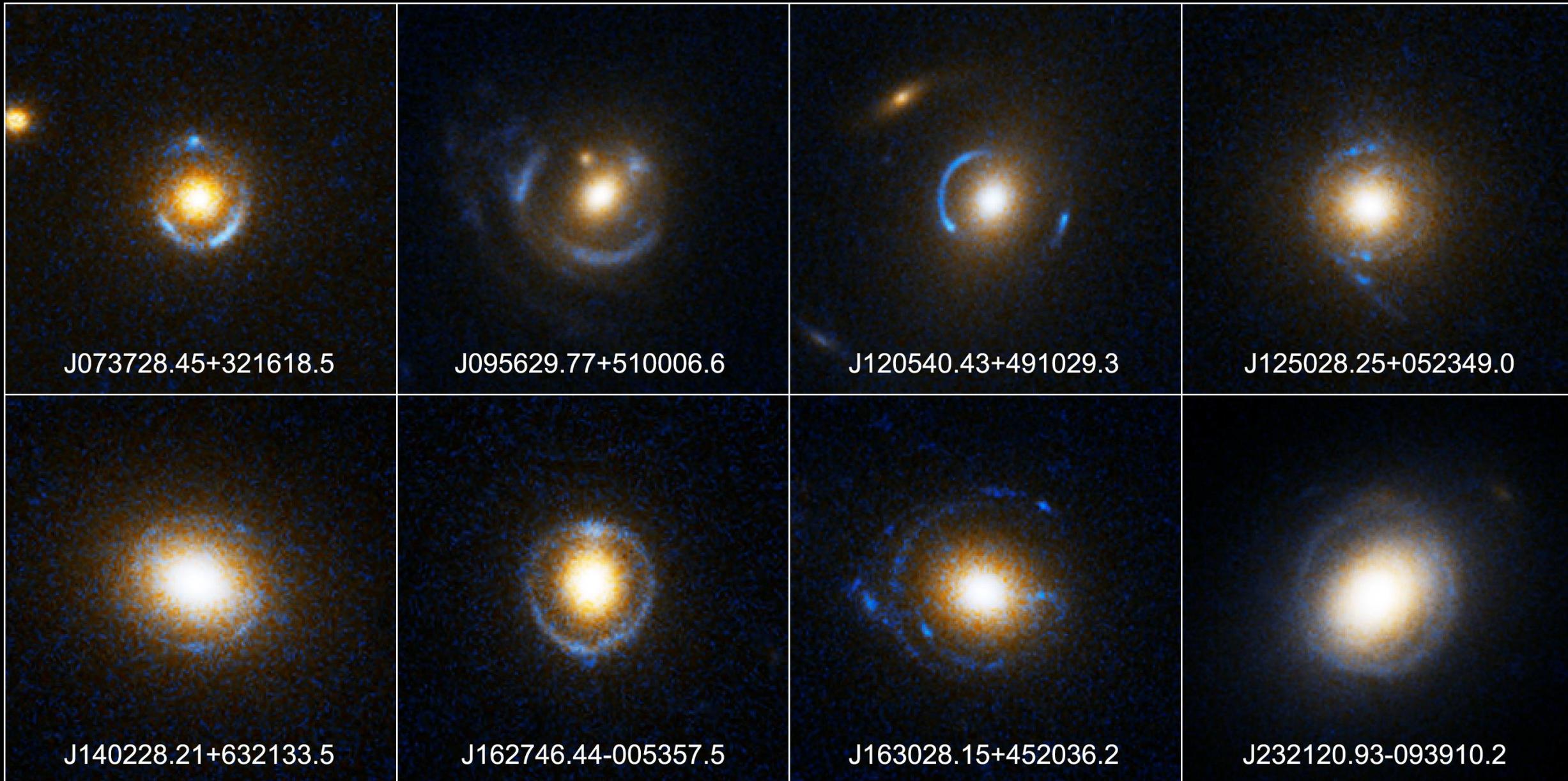


Der Einstein-Ring

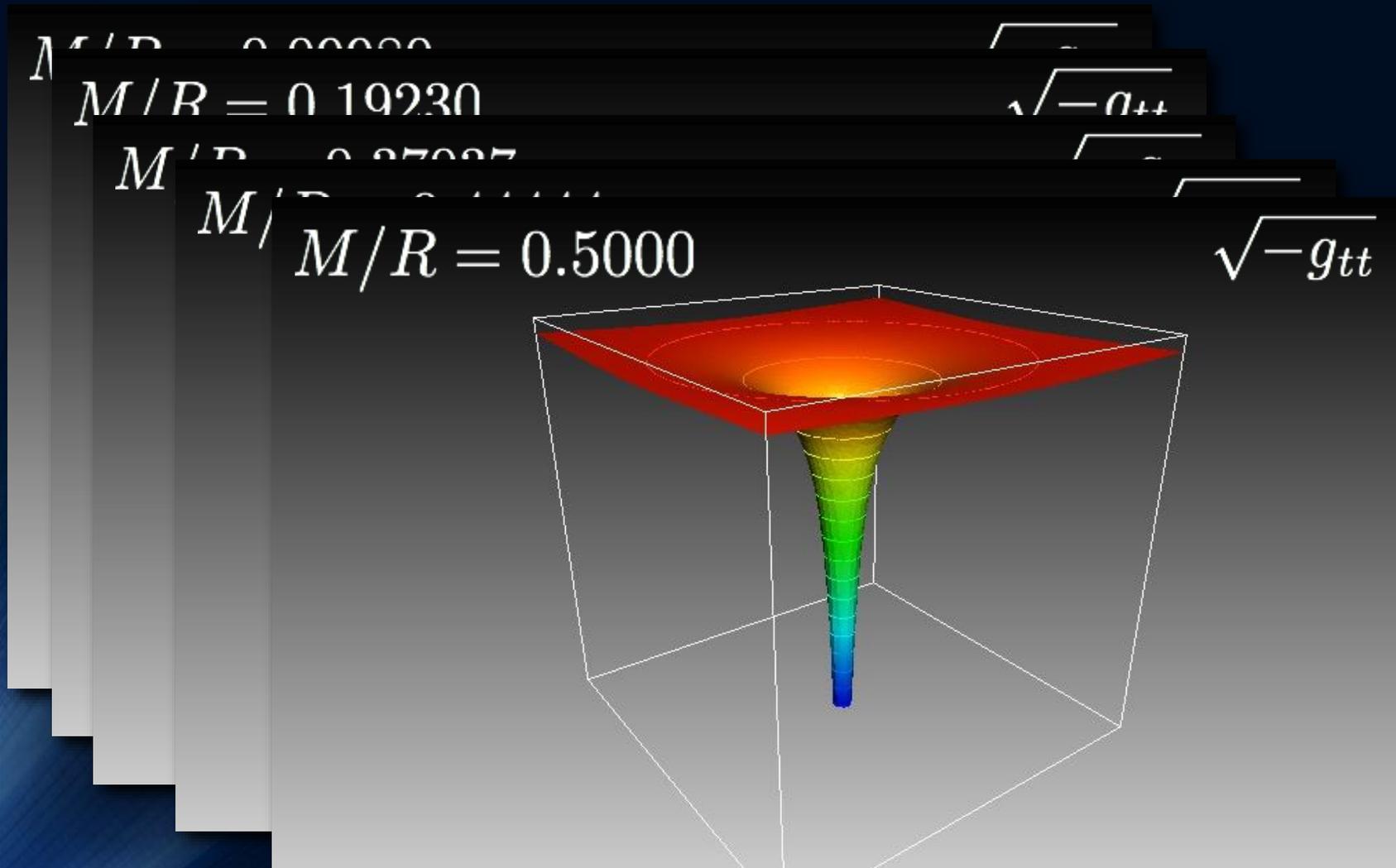


LRG 3-757: im Jahre 2007 mit dem Hubble Space Teleskop aufgenommen

Weitere Einstein-Ringe



Was sind schwarze Löcher?



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

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

Die Schwarzschild Lösung

1915 Einsteins Gravitation:
Krümmung der „Raumzeit“

1916 Karl Schwarzschild:

... geboren 1873 in Frankfurt nahe dem Haus der Rothschild's. Erste Lösung der ART – drei Monate nach Einsteins Artikel! Aussenraummetrik eines nichtrotierenden schwarzen Loches.

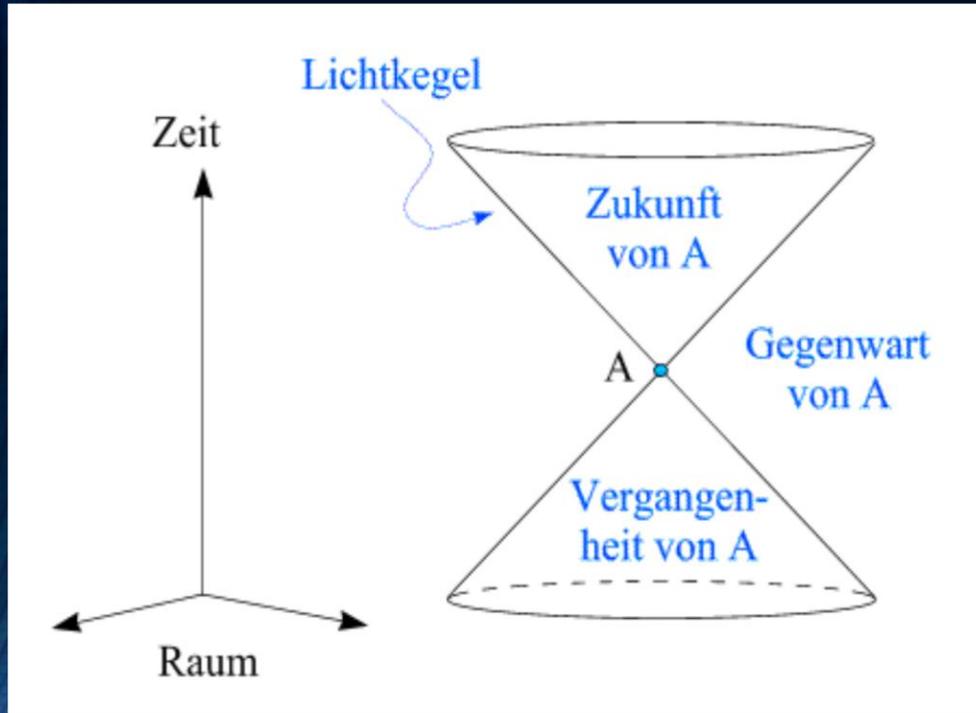
Schwarzschild stirbt einen Monat später an einer Infektion die er sich an der russischen Front einfing...



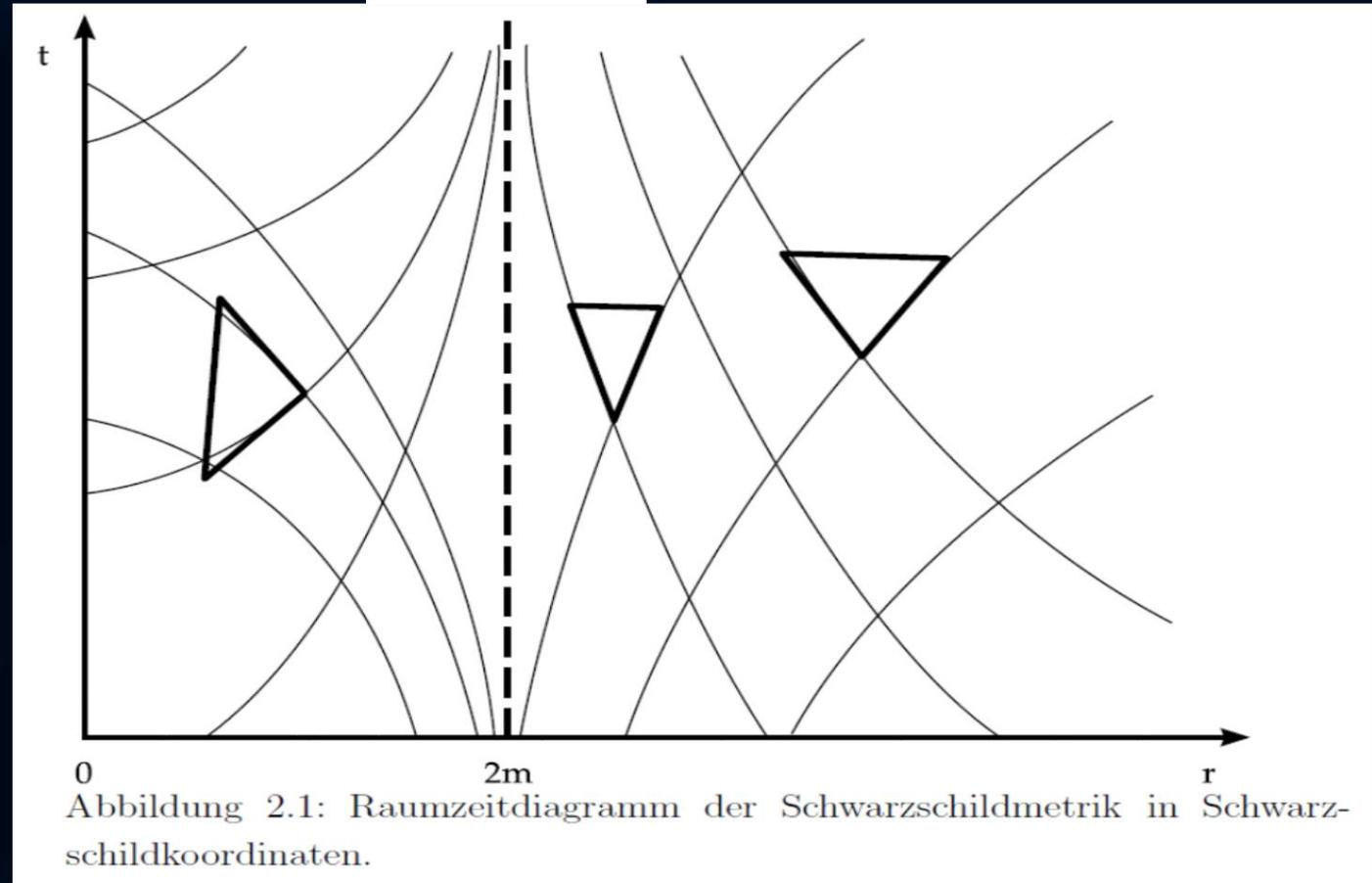
Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

Sichtweise ruhender Beobachter im Unendlichen

Ereignis-
horizont



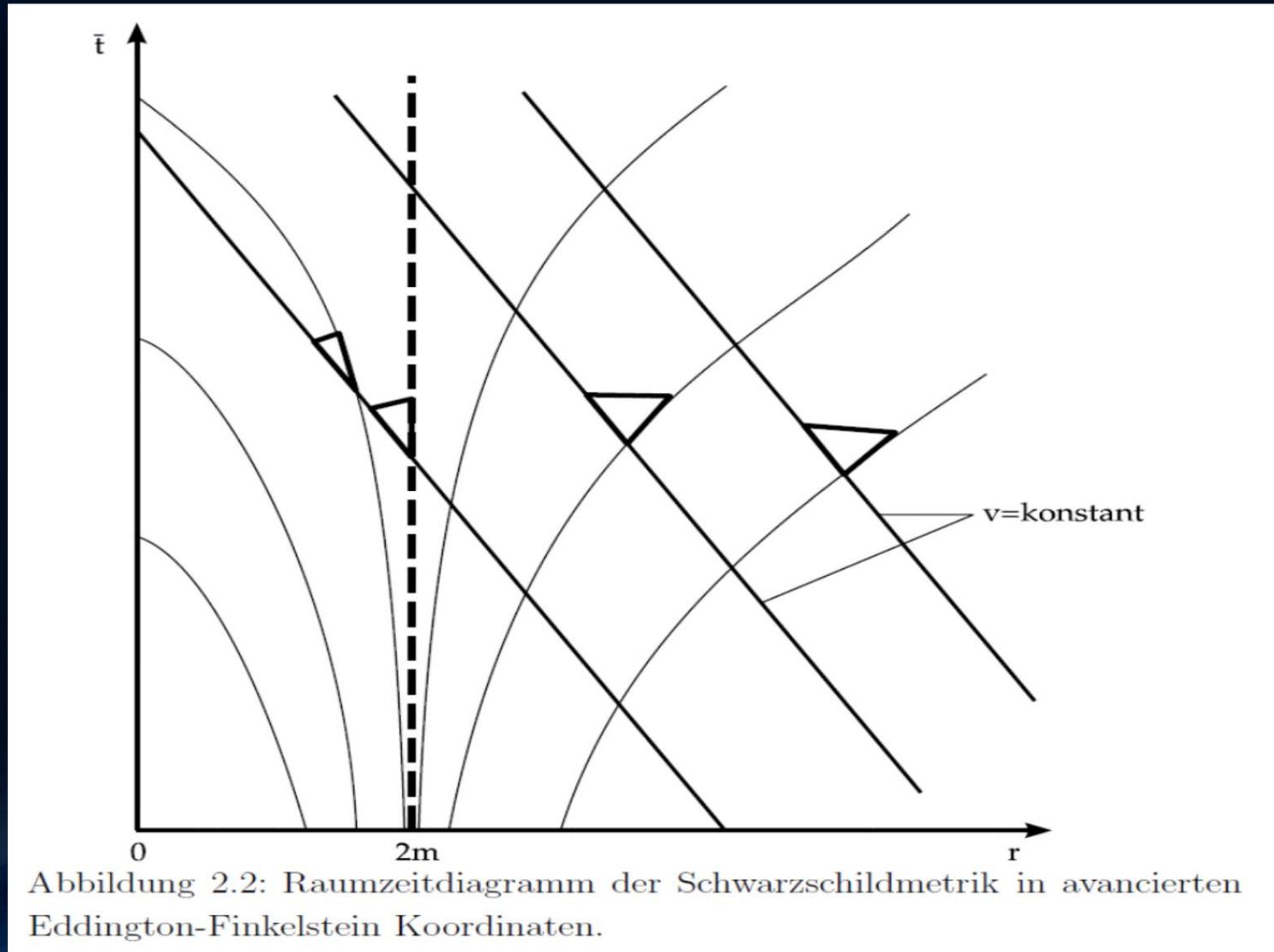
Raumzeit-Struktur
im flachen Raum



Raumzeit-Struktur um ein schwarzes Loch

Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

Sichtweise eines in das schwarze Loch fallenden Beobachters



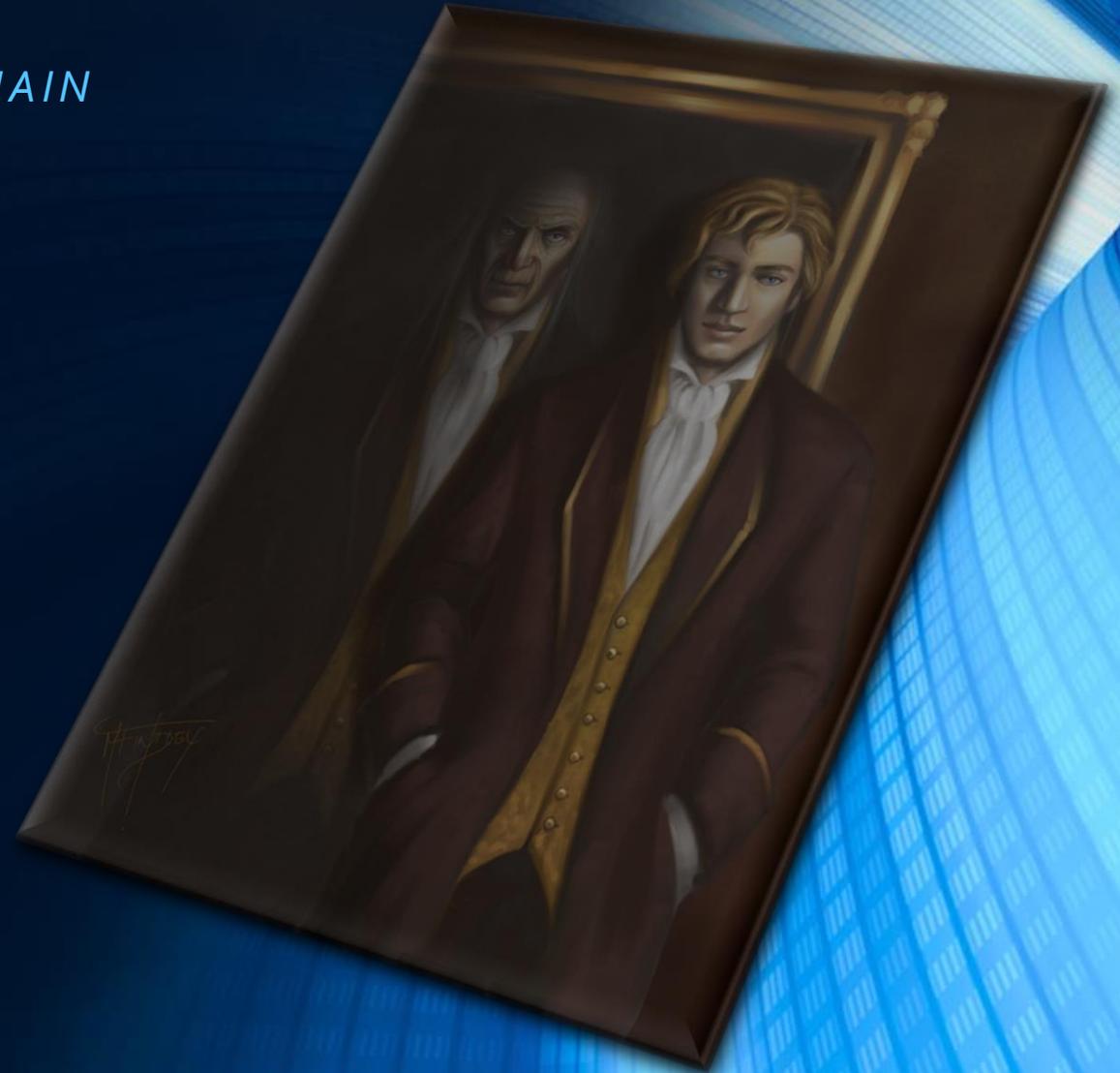
Das Bildnis des schwarzen Lochs

*ASTRONOMIE AM FREITAG AM 7. APRIL 2017
IM PHYSIKALISCHEN VEREIN IN FRANKFURT AM MAIN*



Oscar Wilde

Das Bildnis des
Dorian Gray



Ereignis-
horizont



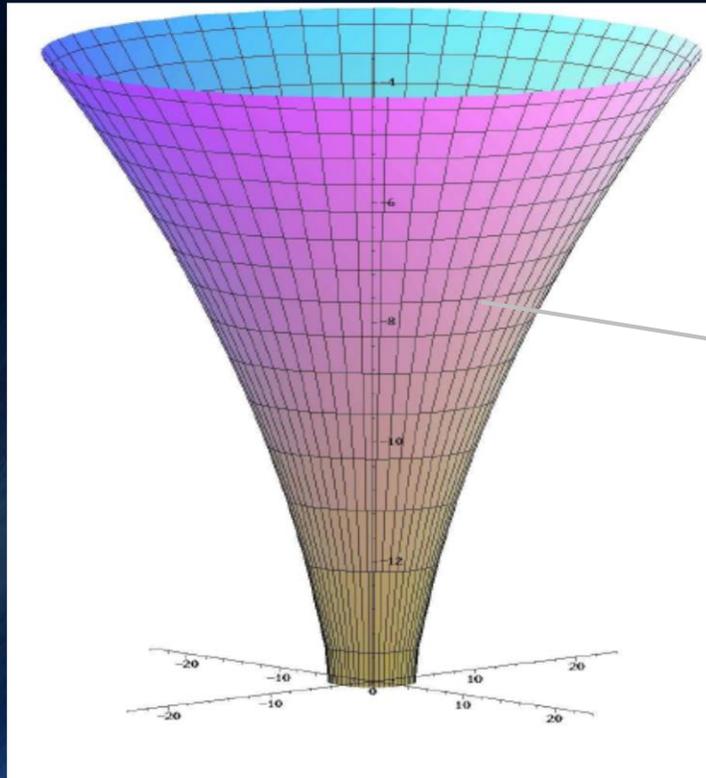
Für den äusseren Beobachter friert das Bild des Körpers, der in das schwarze Loch fällt, am Ereignishorizont ein. Der Körper selbst übertritt jedoch die Grenze und fällt weiter in die echte Singularität im Ursprung.

Dorian Gray wird in das schwarze Loch der moralischen Abründe gezogen und übertritt eine Grenze von der aus er nicht mehr zurück kann.

Das Bildnis des schwarzen Loches

(die wohl beste Veranschaulichung der wesentlichen Eigenschaften eines schwarzen Loches)

Der Raumzeit-Trichter im Reichstagsgebäude



Das Bildnis des schwarzen Loches

(die wohl beste Veranschaulichung der wesentlichen Eigenschaften eines schwarzen Loches)



Ereignis-
horizont

Ereignishorizont

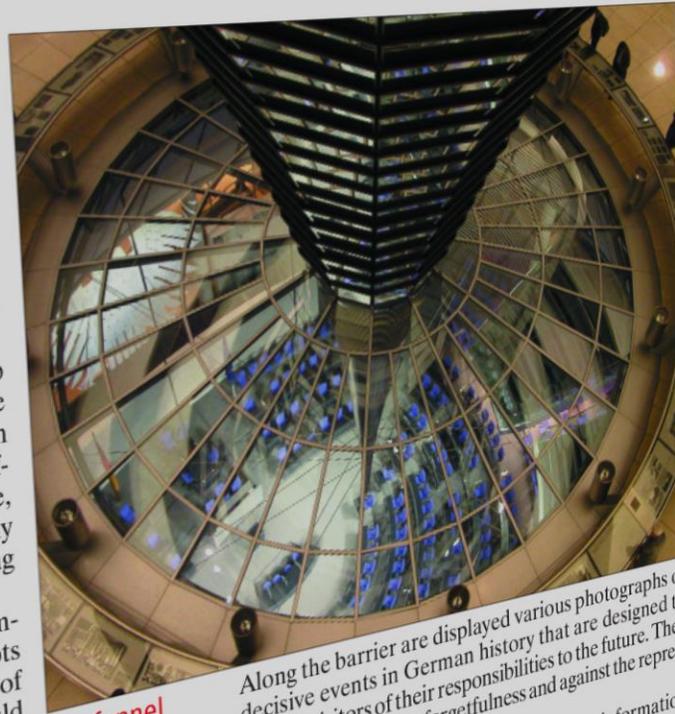
Echte Singularität

Black holes and the German Reichstag

One day a couple of years ago I was attending a meeting of the German Astronomical Society in Berlin, when I was gripped with an almost irrepressible sense of inner unrest. There was no other option – I simply had to leave the lecture halls of the Technical University and enjoy the gorgeous day outside. Before I left, however, I carefully taped my poster to the wall between the entrances to the men's and women's toilets, which seemed the perfect spot for it. Every congress delegate would now be forced – subliminally at least – to notice my creation.

After leaving the university buildings, I first soaked up the summer sunshine in the zoological gardens before heading towards the Reichstag – the home of the German parliament. As I did so, my thoughts wandered off in a different direction. What a waste of time, it occurred to me, all those boring lectures are. What physics desperately needs, I reasoned, is a new and exciting way of presenting the subject.

Unfortunately, modern physics is impossible to comprehend using intuition alone. How can bizarre concepts such as the curvature of space-time or the event horizon of a black hole be understood? What possible imagery could help non-scientists to grasp the significance and vital importance of some of the major insights of theoretical physics? Finding a simple way of conveying those ideas seemed an impossible task.



The funnel looks exactly like the diagrams used to illustrate the curvature of a black hole

Along the barrier are displayed various photographs of decisive events in German history that are designed to remind visitors of their responsibilities to the future. They are a warning against forgetfulness and against the repression of the Nazi era.

Suddenly I saw the significance of the information frozen on the pictures. Just as the politicians sit in the inner area of the black hole from which no useful information ever escapes, so the pictures represent external

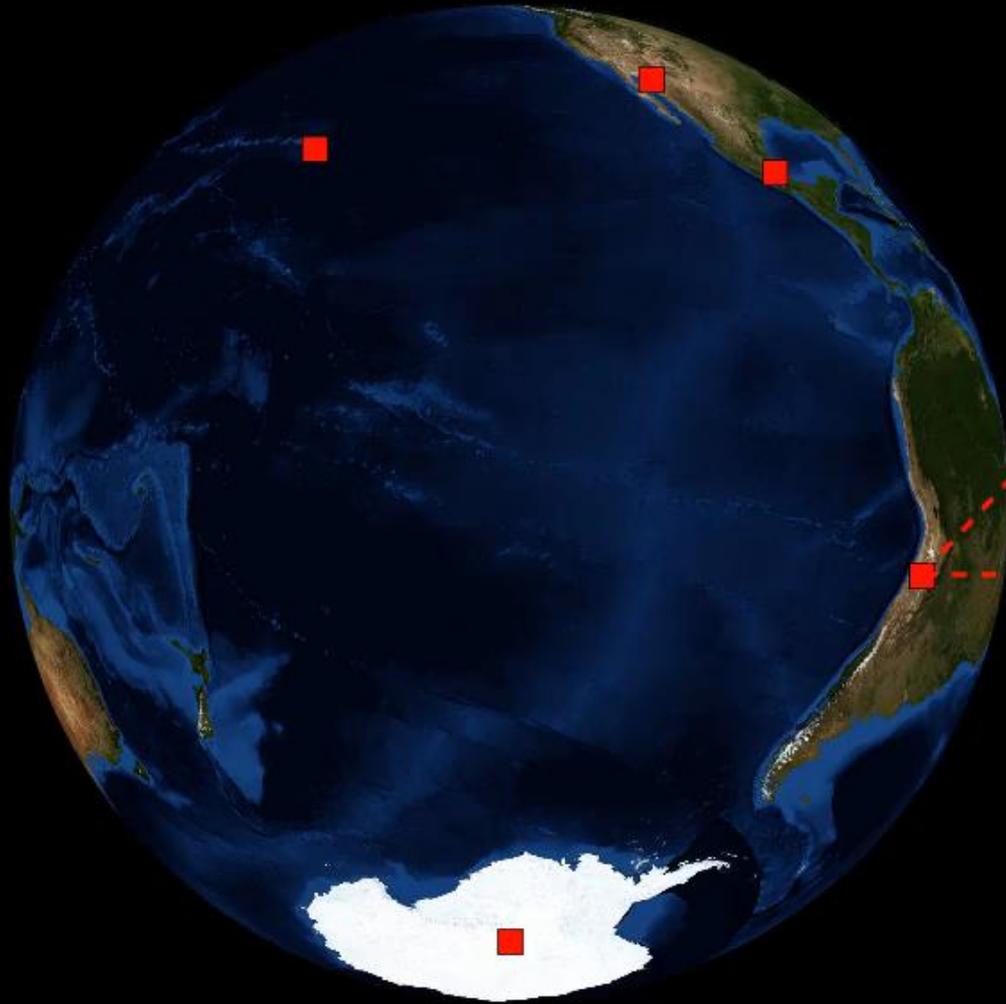
Wie sieht das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie aus?



Das EU-Projekt **BlackHoleCam**
L.Rezzolla, H.Falke und M.Kramer

Black hole cam is a European funded project, which is a partner in the Event Horizon Telescope and not a separate network!

Event Horizon Telescope



Atacama Large
Millimeter Array (ALMA)



Coordinates: $23^{\circ} 01' 09''\text{S}$, $67^{\circ} 45' 12''\text{W}$

Diameter: 12m

Create a virtual radio telescope
the size of the earth, using the
shortest wavelength

International collaboration project of Very Long Baseline Interferometry (VLBI)
at mm (sub-mm) wavelength

*Python-Animation erstellt
von Dr. Christian Fromm*

Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

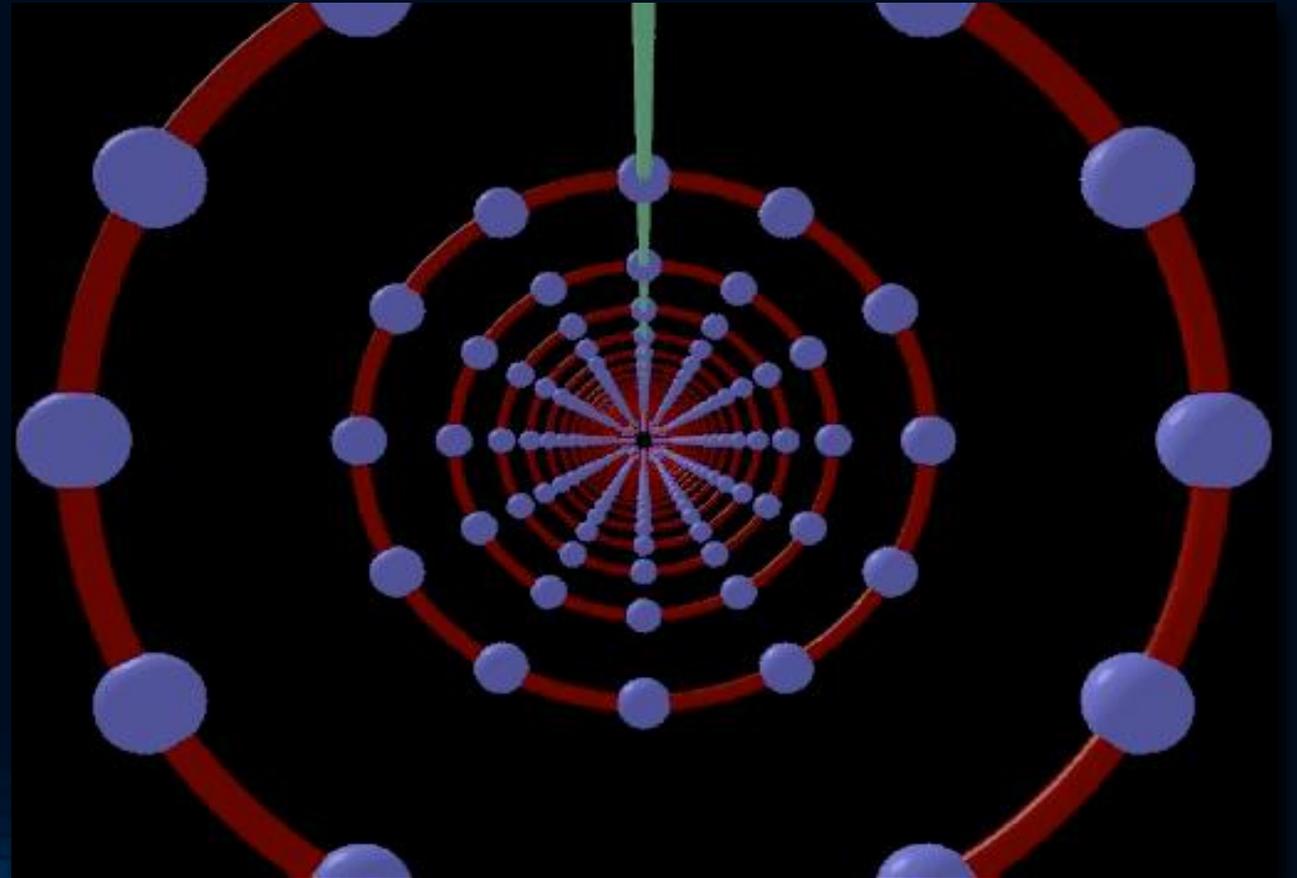
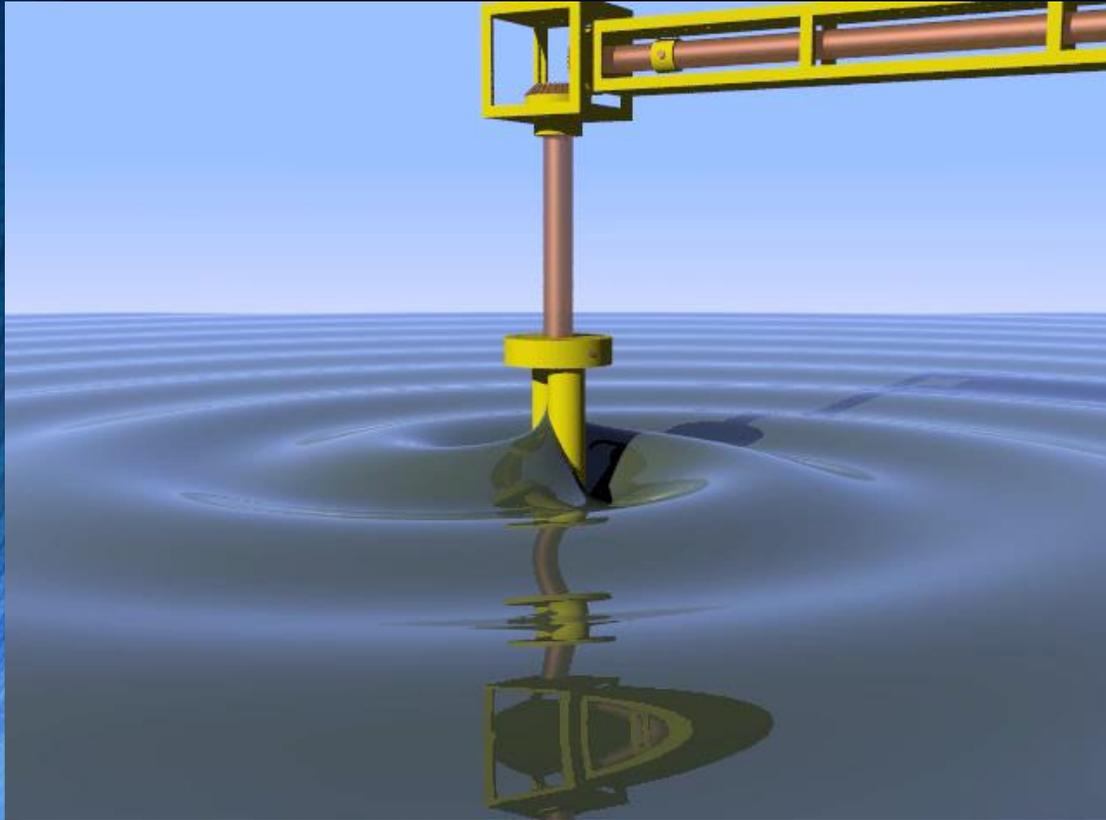
(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Gravitationswellen: Raumzeit Wellen

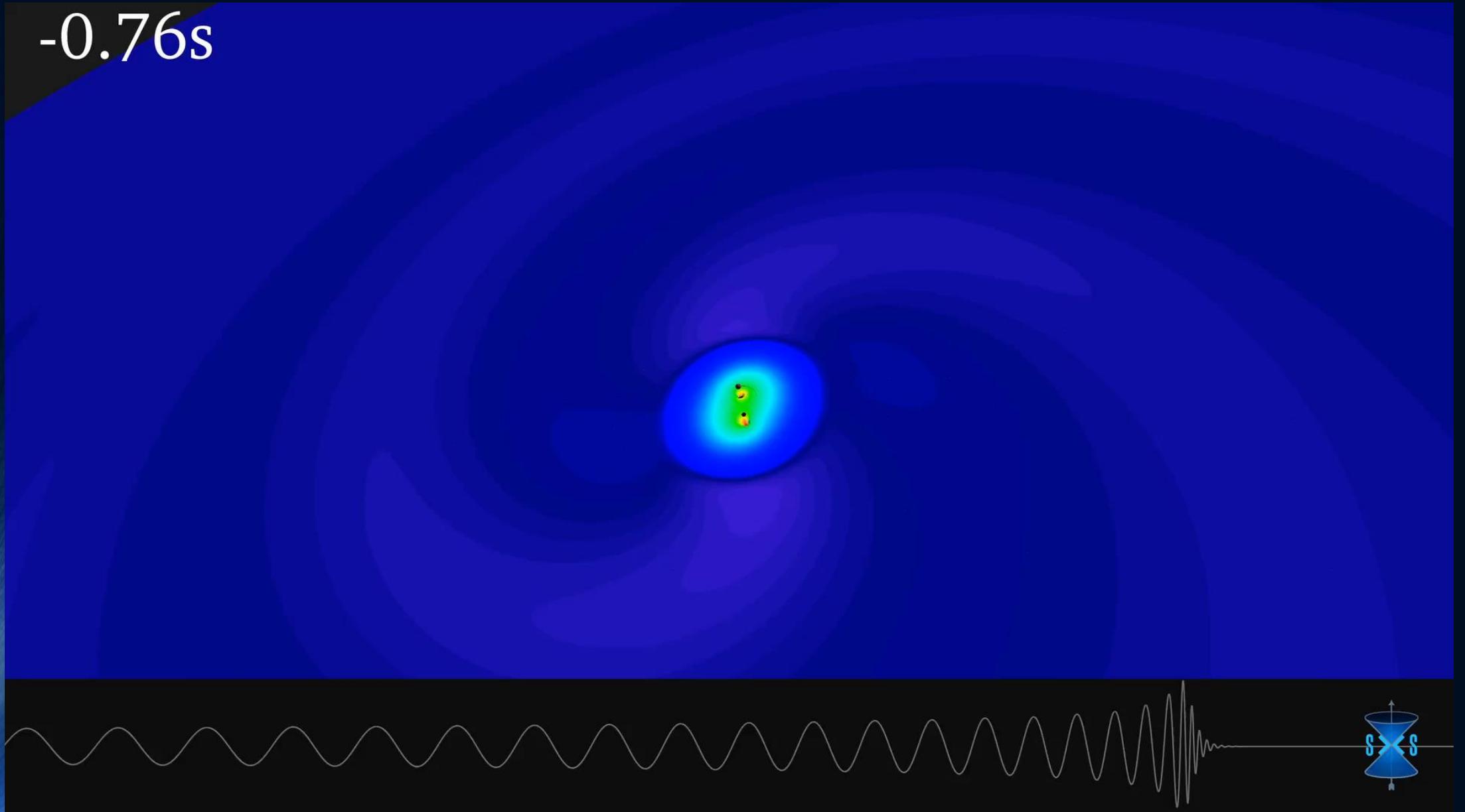
Die ART sagt voraus, dass beschleunigte Massen Gravitationswellen erzeugen.

Diese Wellen sind transversal; sie bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit; quadrupolare Verbiegung des Raumes und der Zeit



Gravitationswellen von kollidierenden Schwarzen Löchern

-0.76s

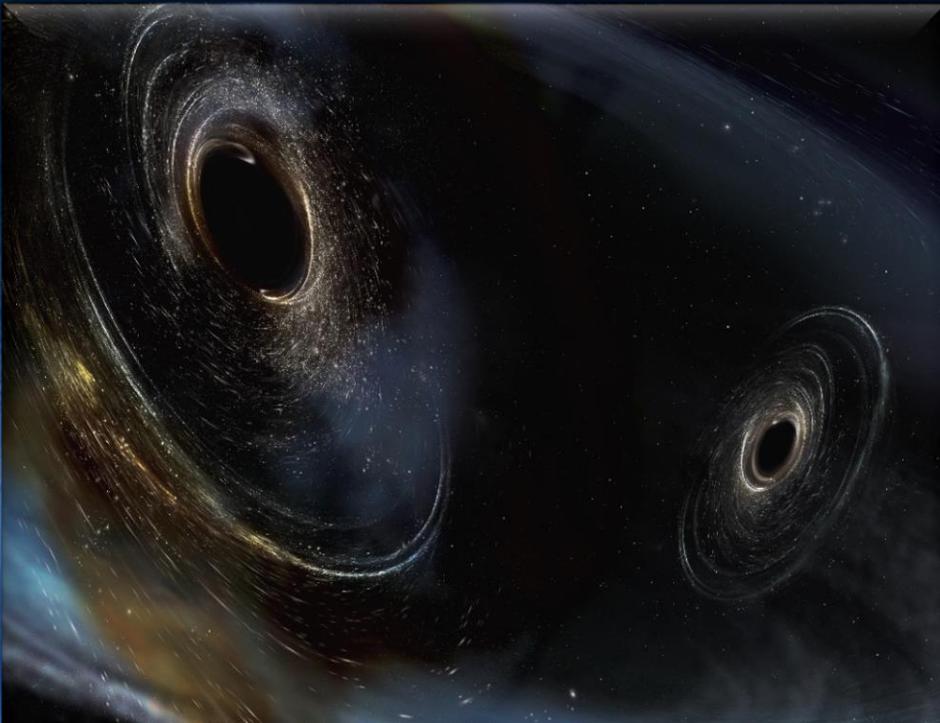


Gravitationswellen gefunden!!!

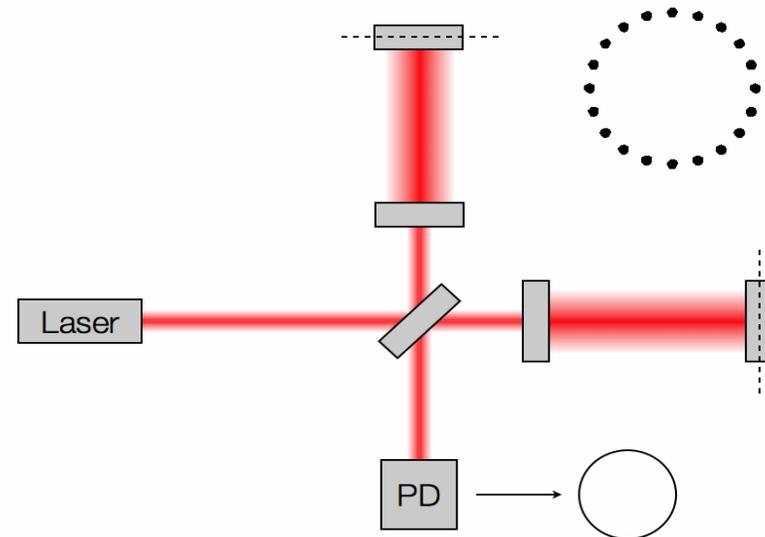
Kollision zweier Schwarzer Löcher GW170104

Massen: 31 & 19 Sonnenmassen

Abstand zur Erde 880 Mpc
(mehr als 2.5 Milliarden Lichtjahre)

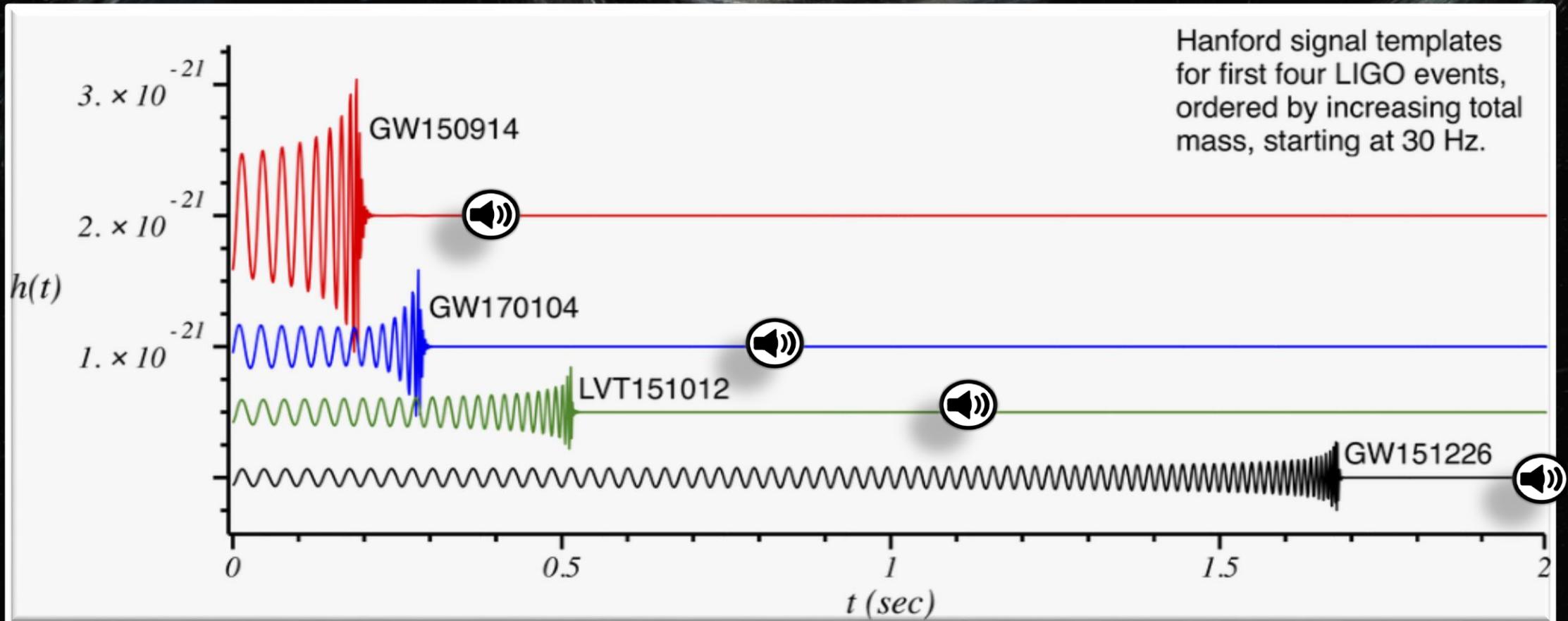


Längen – Differenz $< 10^{-18}$ m



Credit: Les Wade from Kenyon College

Drei (vielleicht vier) Gravitationswellen detektiert



Computersimulation einer Neutronenstern Kollision

**Credits: Cosima Breu, David Radice
and Luciano Rezzolla**



Density

8.5 14



$\lg(\rho)$ [g/cm³]

Temperature

0 50



T [MeV]

Gammastrahlen-Blitze



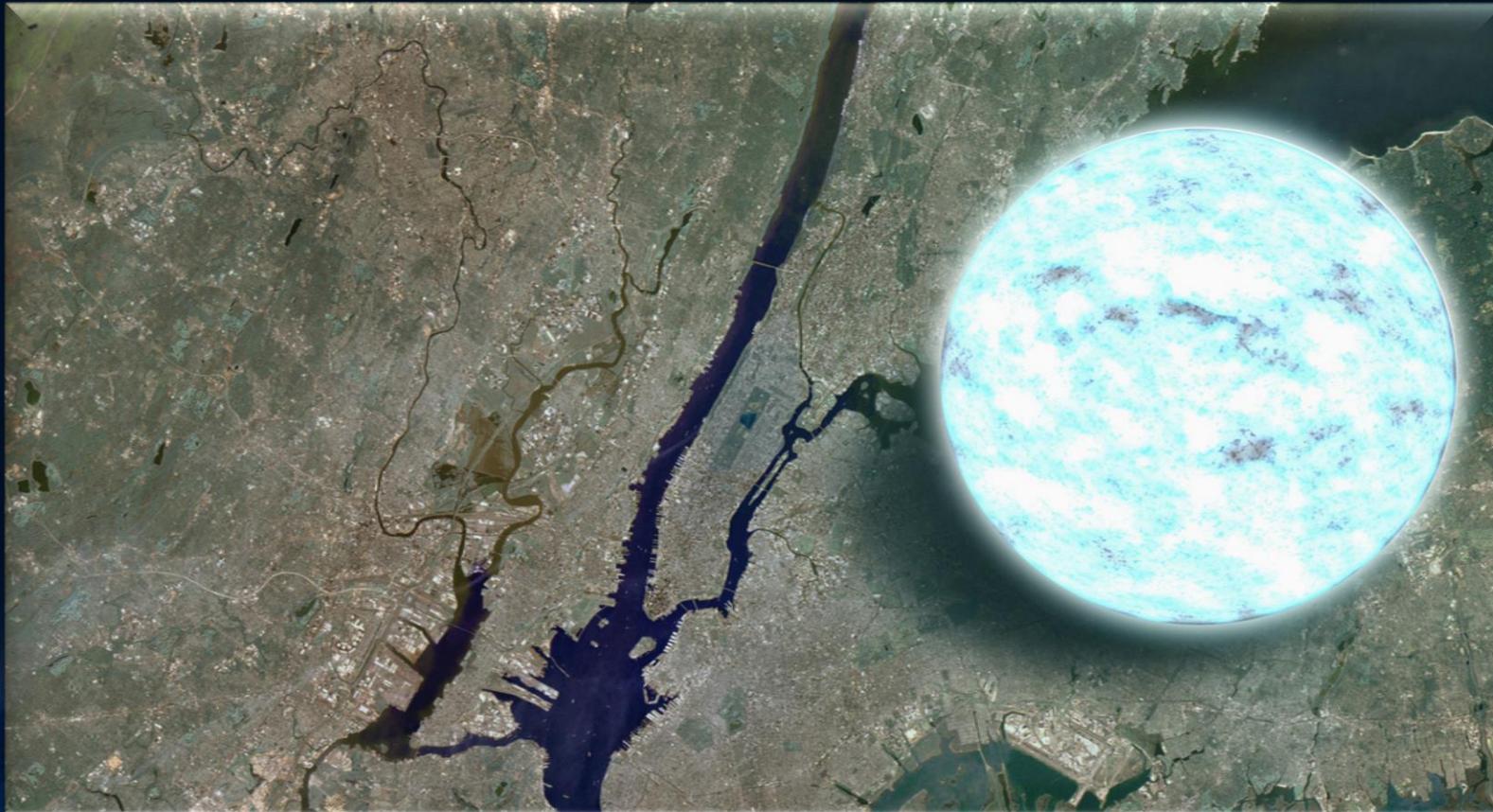
Neutronenstern Kollisionen
dienen als ein Erklärungsmodell
der schon oft beobachteten
kurzen Gammastrahlen-Blitze

Eigenschaften von Neutronensterne

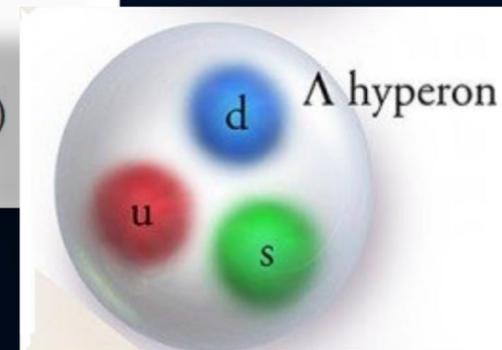
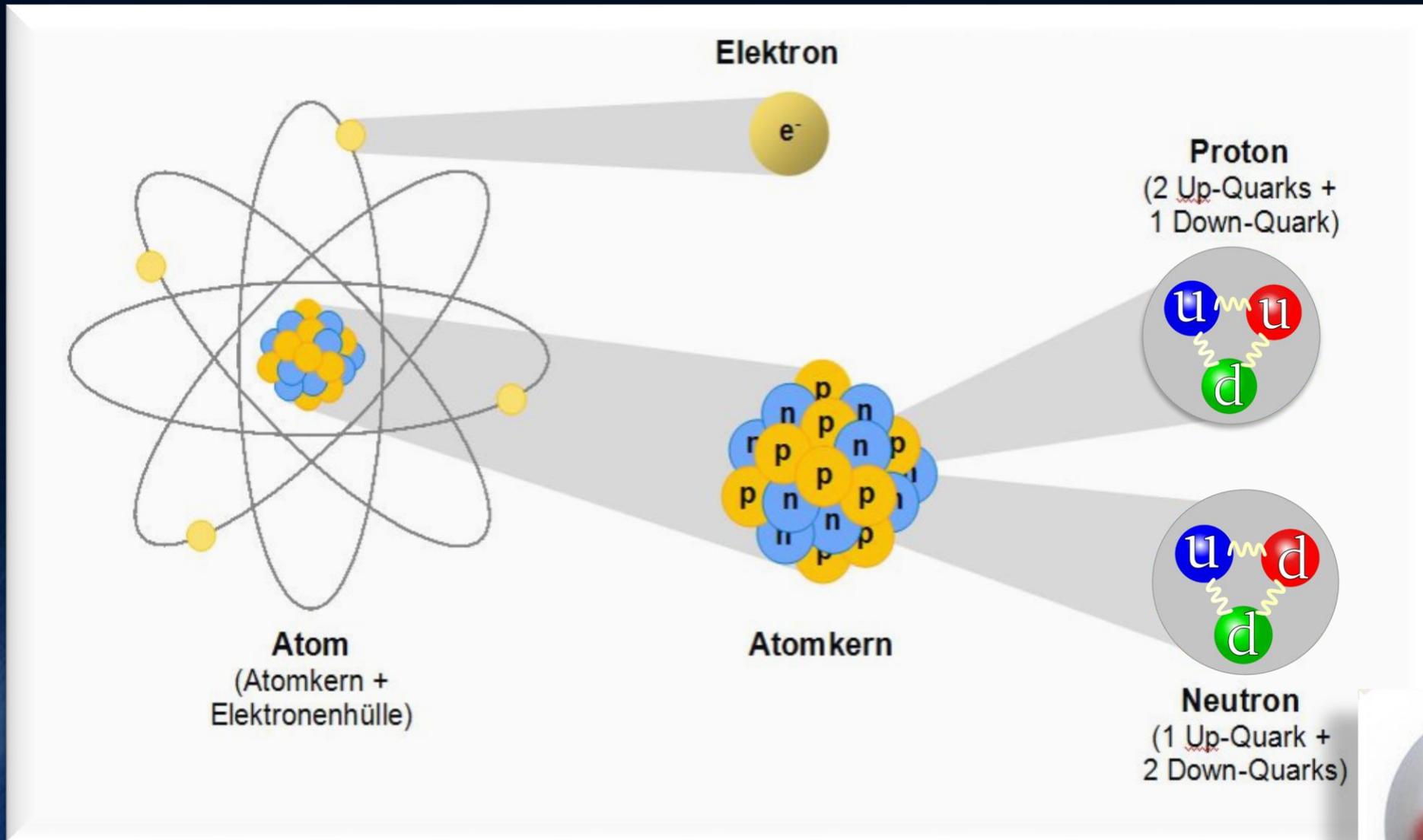
Neutronensterne werden in gewaltigen Supernova-Explosionen geboren.

Radius ~ 10 km

Masse 1-2 Sonnenmassen

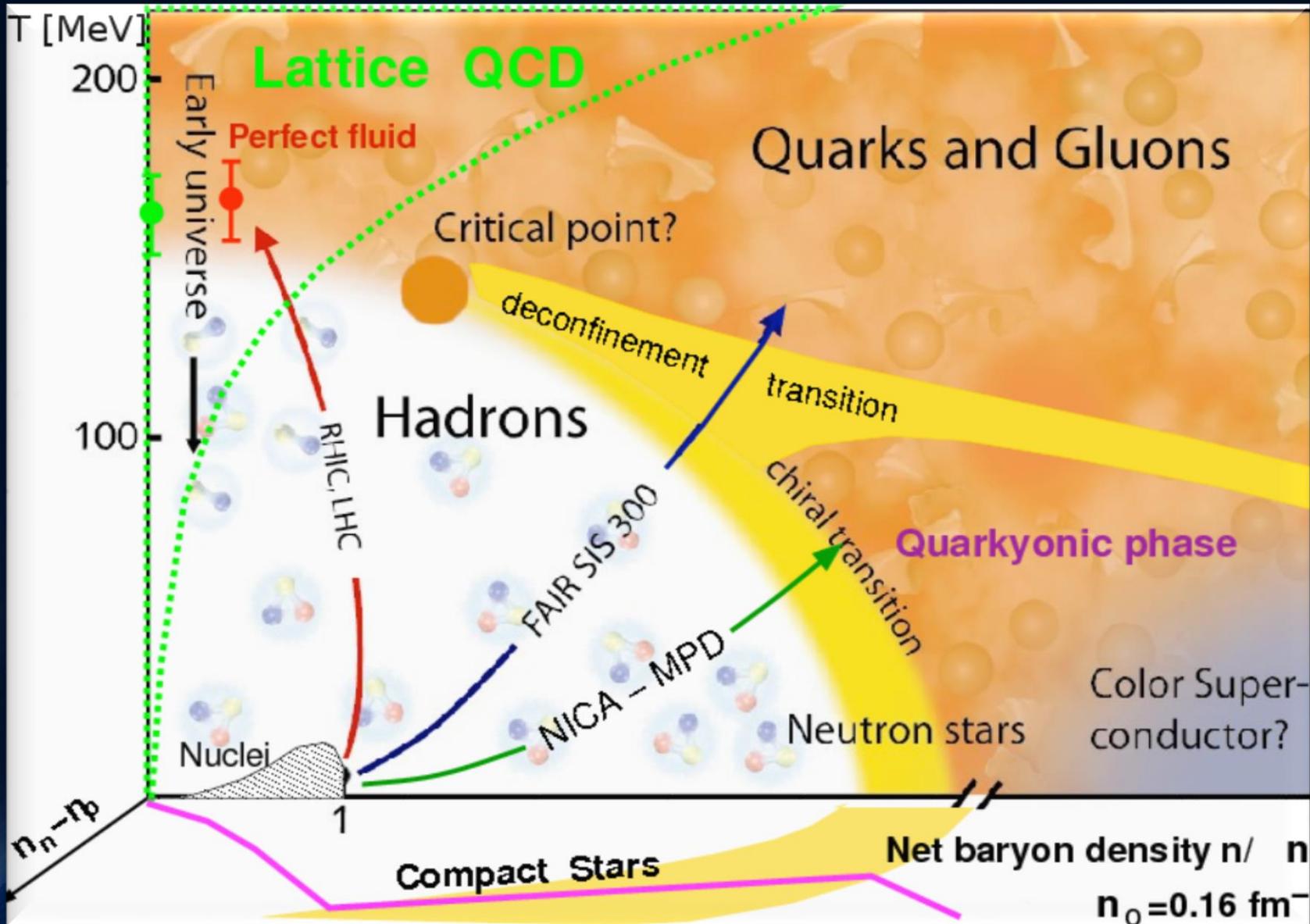


Elementare Materie

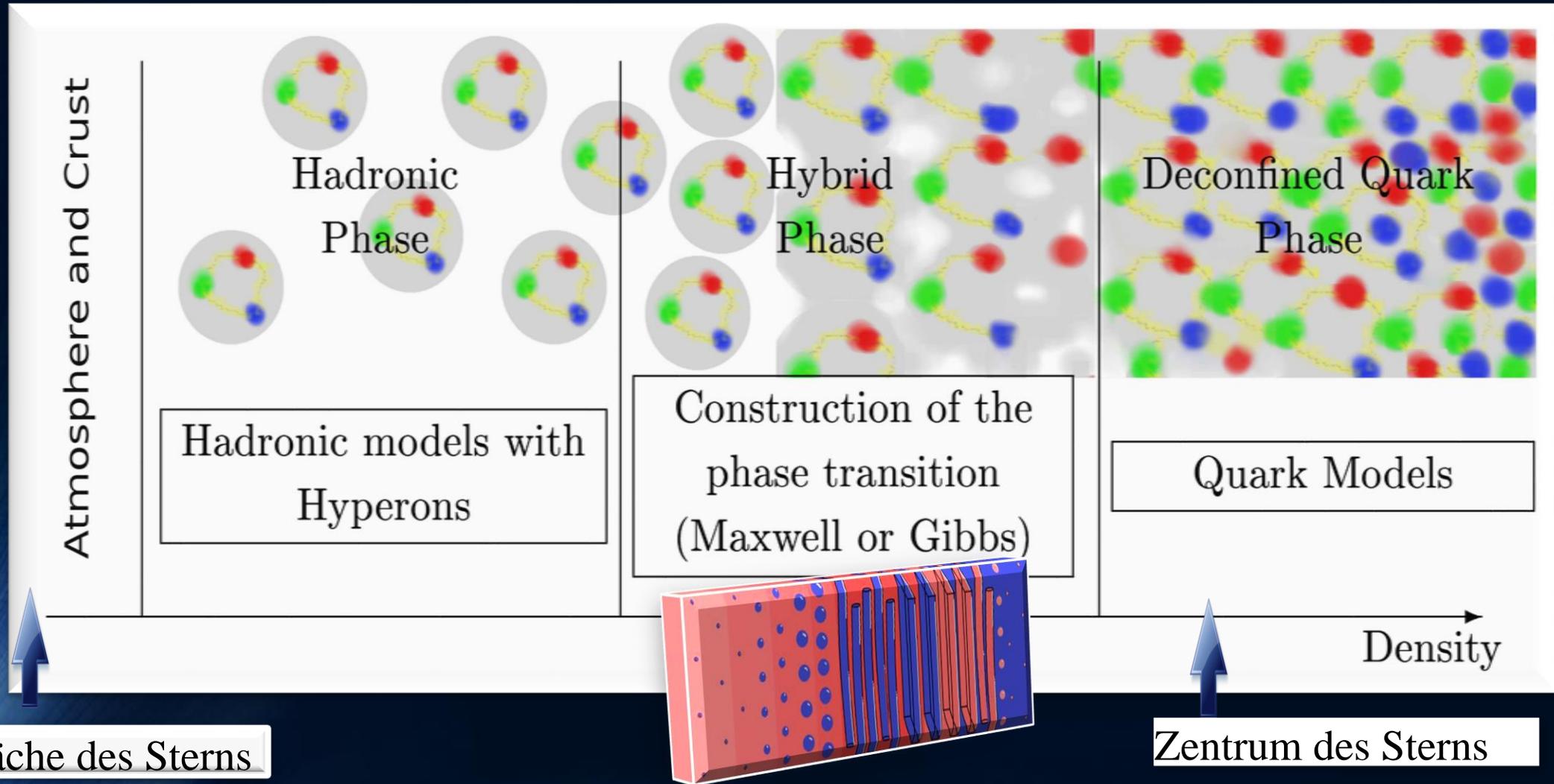


Sehr hohe Dichten/Temperaturen: **Seltsame Hyperonen** entstehen

Der Hadron-Quark Phasenübergang



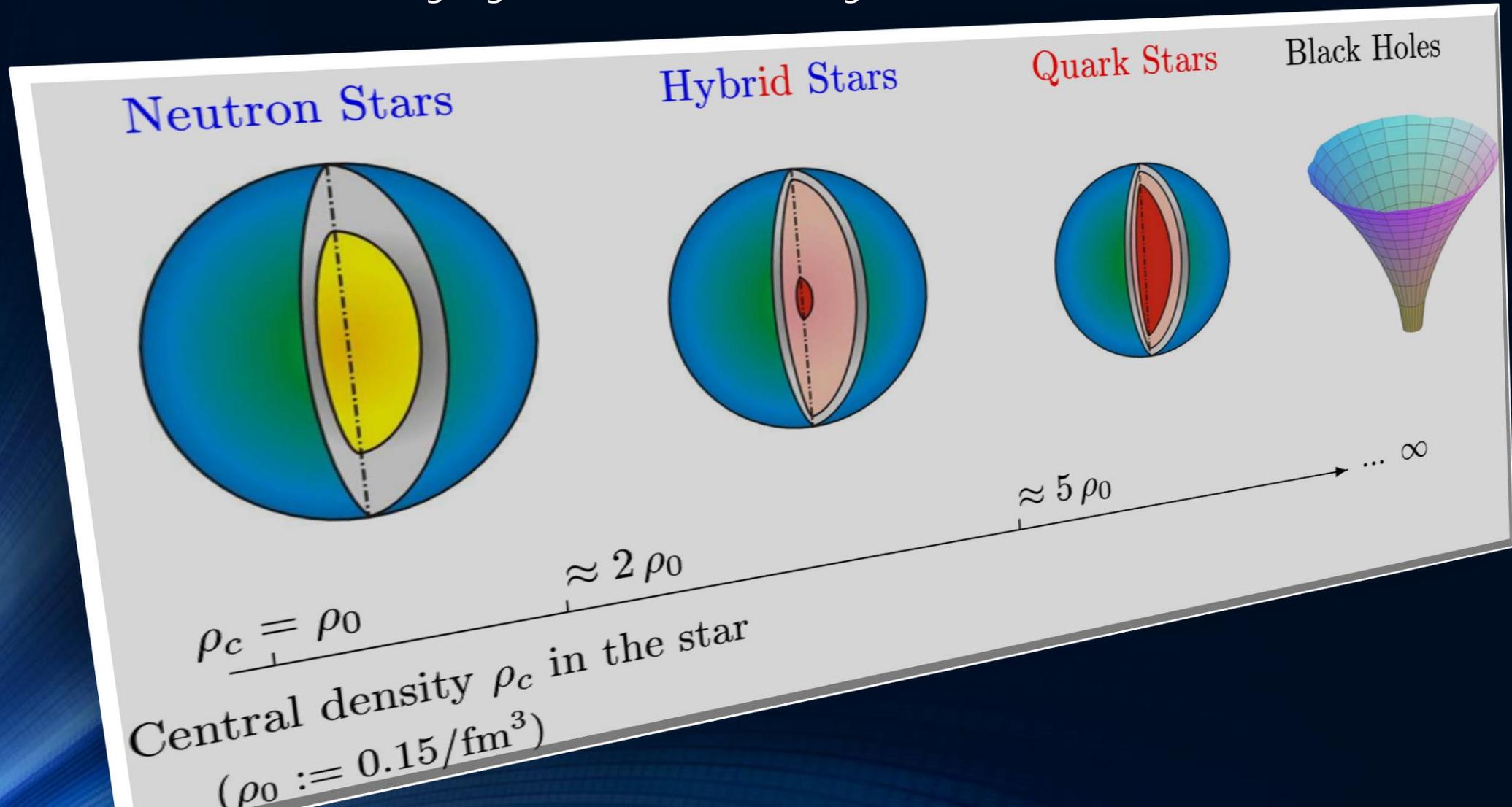
Die Befreiung der elementaren Materie im Inneren eines Hybriden Neutronensterns



Siehe: *Stable hybrid stars within a SU(3) Quark-Meson-Model*,
A.Zacchi, M.Hanuske, J.Schaffner-Bielich, PRD 93, 065011 (2016)

Neutronensterne, Hybride Sterne, Quarksterne und Schwarze Löcher

Bei welcher Dichte der Phasenübergang zum Quark-Gluon-Plasma einsetzt und welche Eigenschaften dieser Übergang im Detail hat ist weitgehend unbekannt.



Neutronenstern

Schwarzes Loch

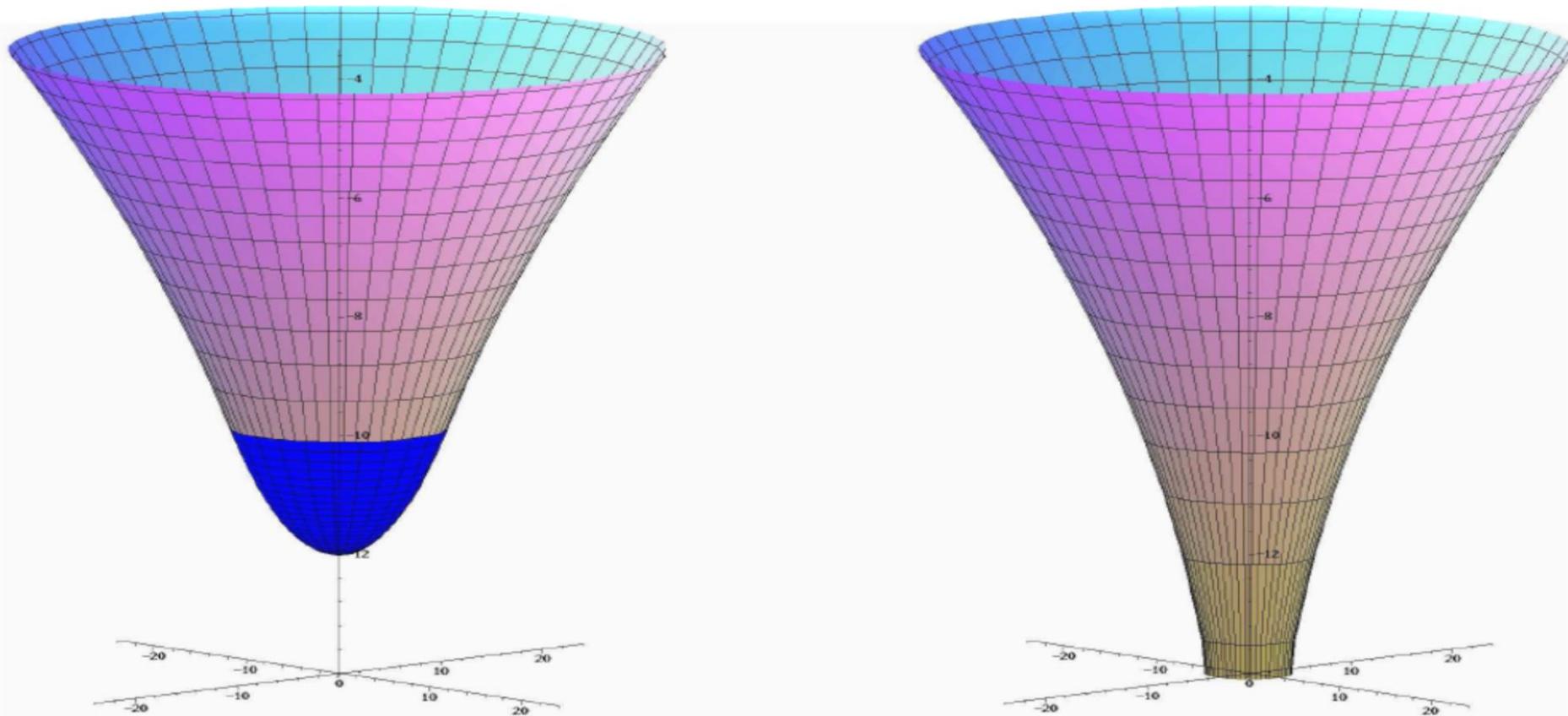
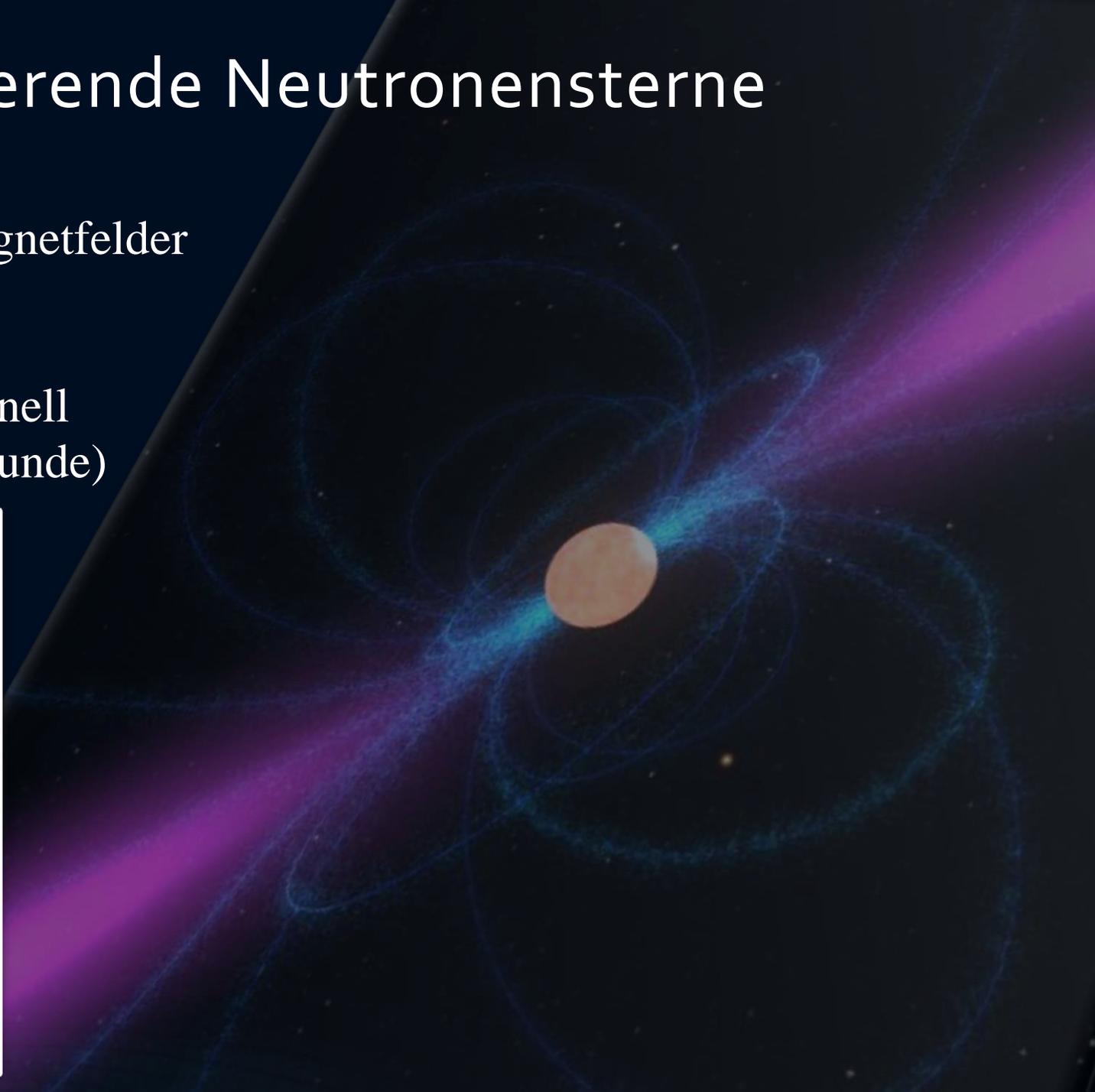
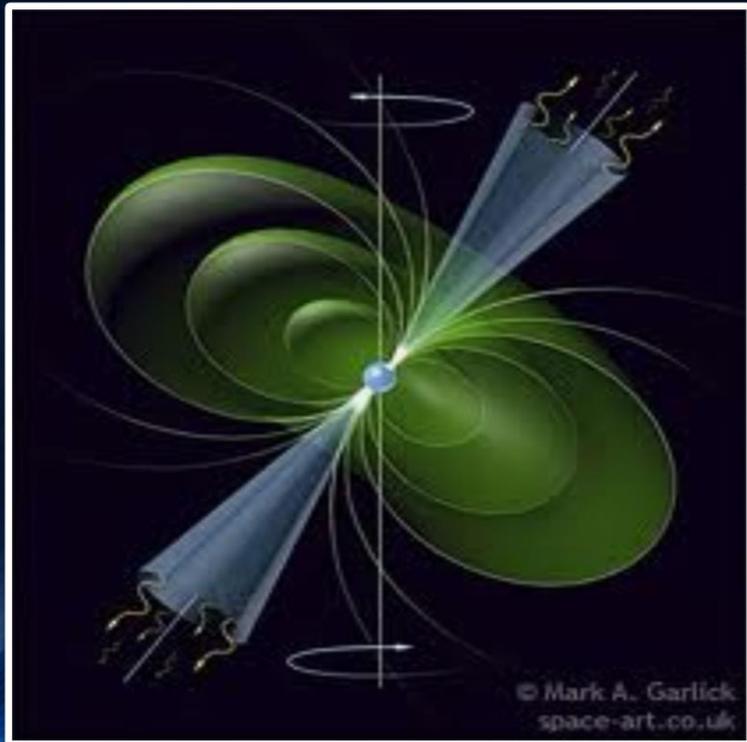


Abbildung 2.5: Eingebettetes Raumzeitdiagramm eines Neutronensterns (links) und eines schwarzen Loches (rechts) wobei $M = 1.4 M_{\odot}$ und die x- und y-Achse in Einheiten km dargestellt sind.

Pulsare sind rotierende Neutronensterne

Neutronensterne haben sehr große Magnetfelder
(bis zu 10^{11} Tesla)

Neutronensterne rotieren sehr schnell
(bis zu 716 Umdrehungen pro Sekunde)



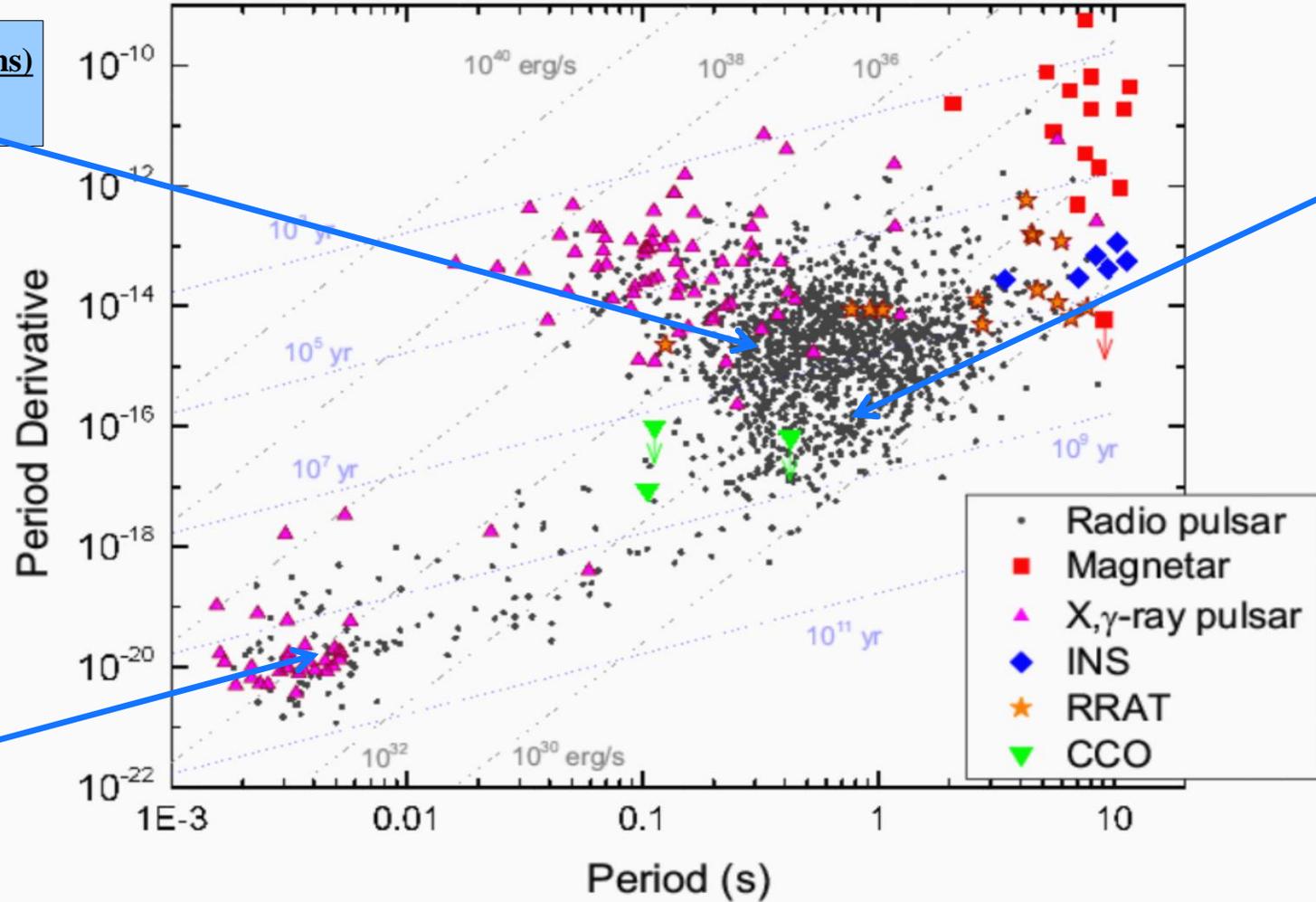
Der Sound eines Pulsars



PSR B0531+21 (33.5 ms)
Crab Pulsar



PSR B0329+54 (0.715 s)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

Binäre Neutronenstern-Systeme

Kramer, Wex, Class. Quantum Grav. 2009

Der **Double Pulsar** (PSR J0737-3039A/B):

Entdeckt in 2003

Exzentrizität: 0.088

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

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

Nur 800,000 km entfernt voneinander

Orbitale periode: 147 Minuten

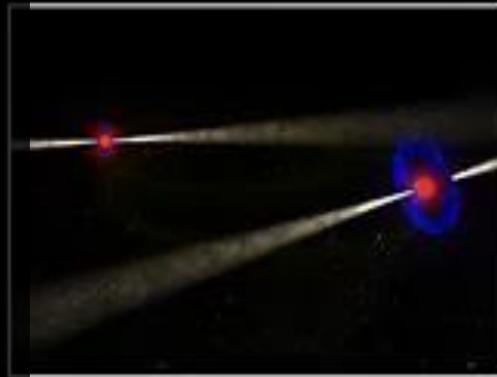
Pulsar A wird von Pulsar B eclipsed

(Dauer 30 s in jedem Orbit)

Abstand schrumpft mit der Zeit

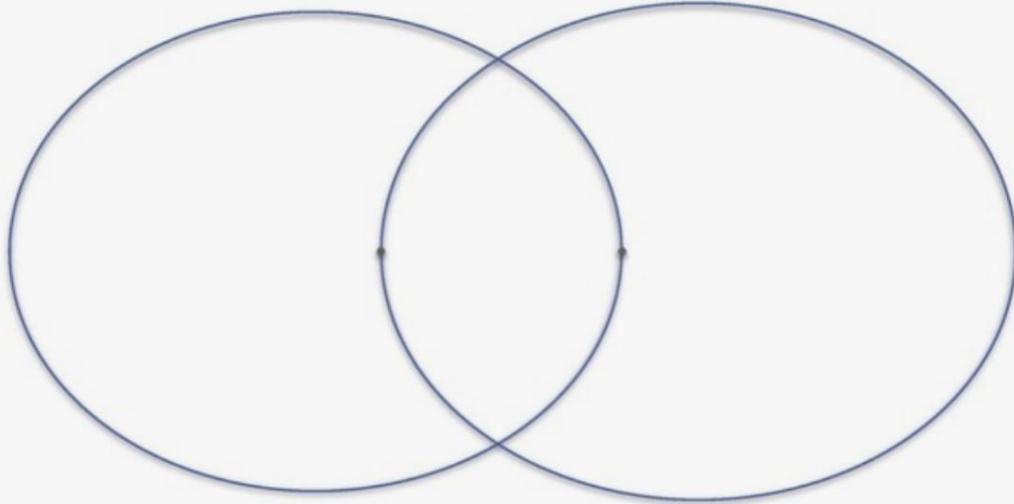
→ Gravitationswellen Emission

→ Kollision in ca. 85 Millionen Jahren!

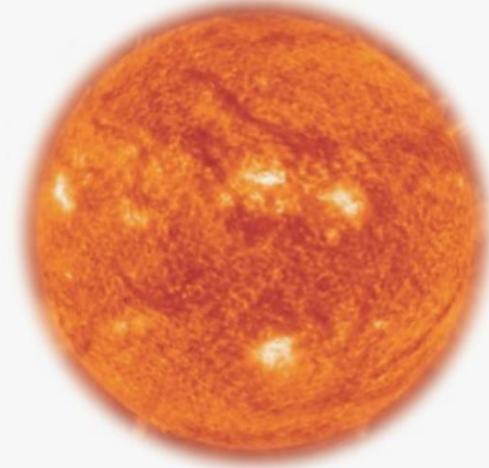


Neues Binärsystem entdeckt: J1757-1854

Hulse-Taylor-Pulsar



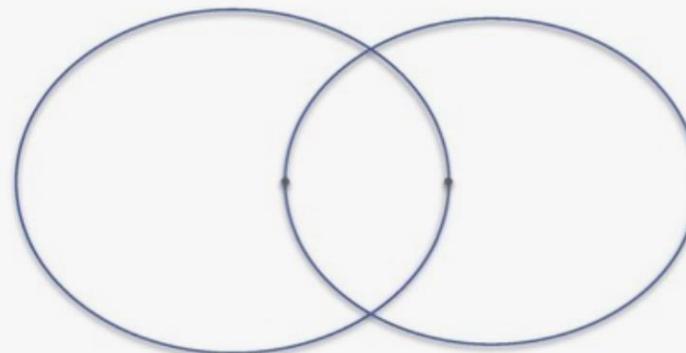
Sonne



Doppelpulsar

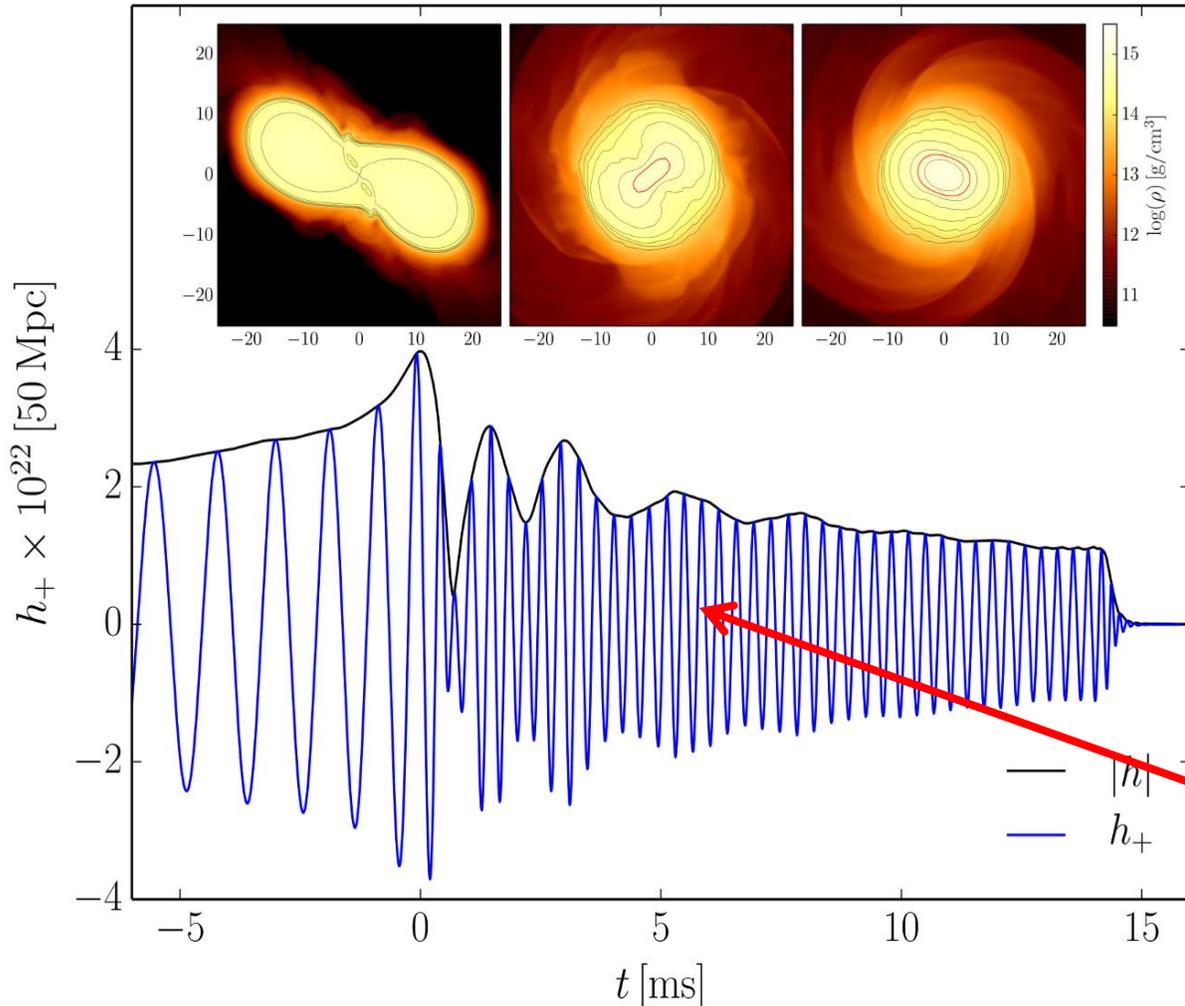


J1757-1854

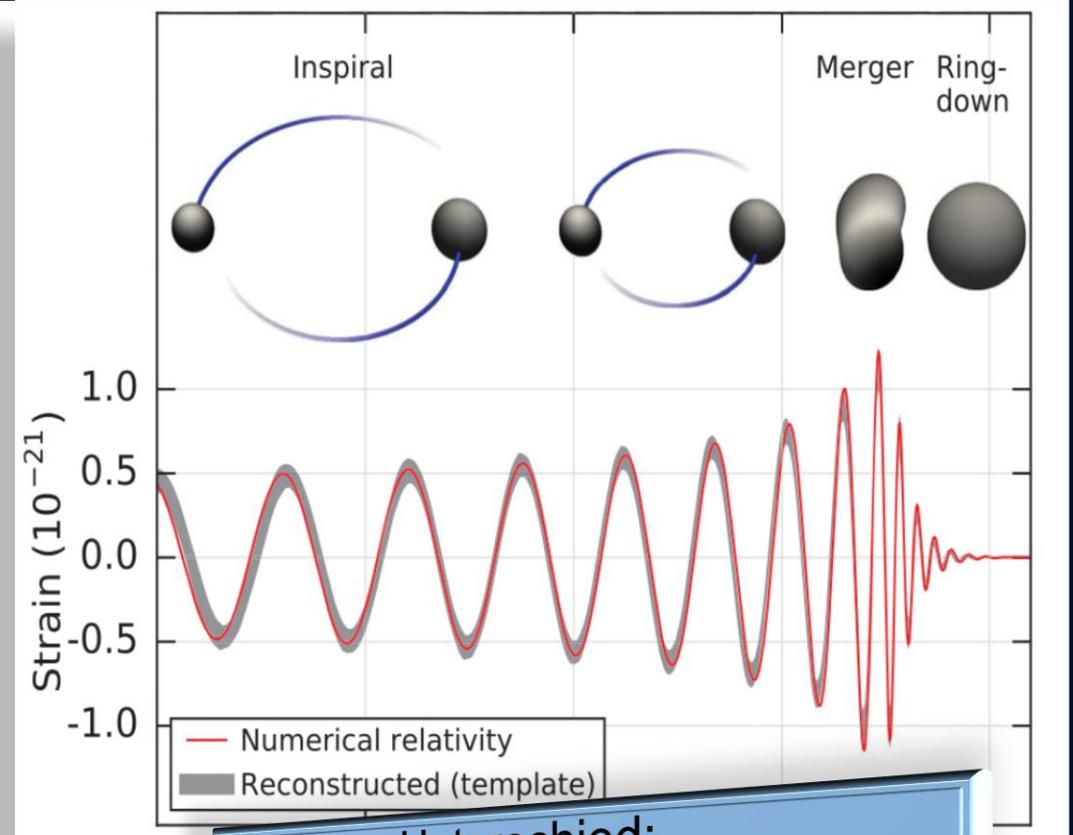


Gravitationswellen von Neutronenstern Kollisionen

Neutronenstern Kollision (Simulation)



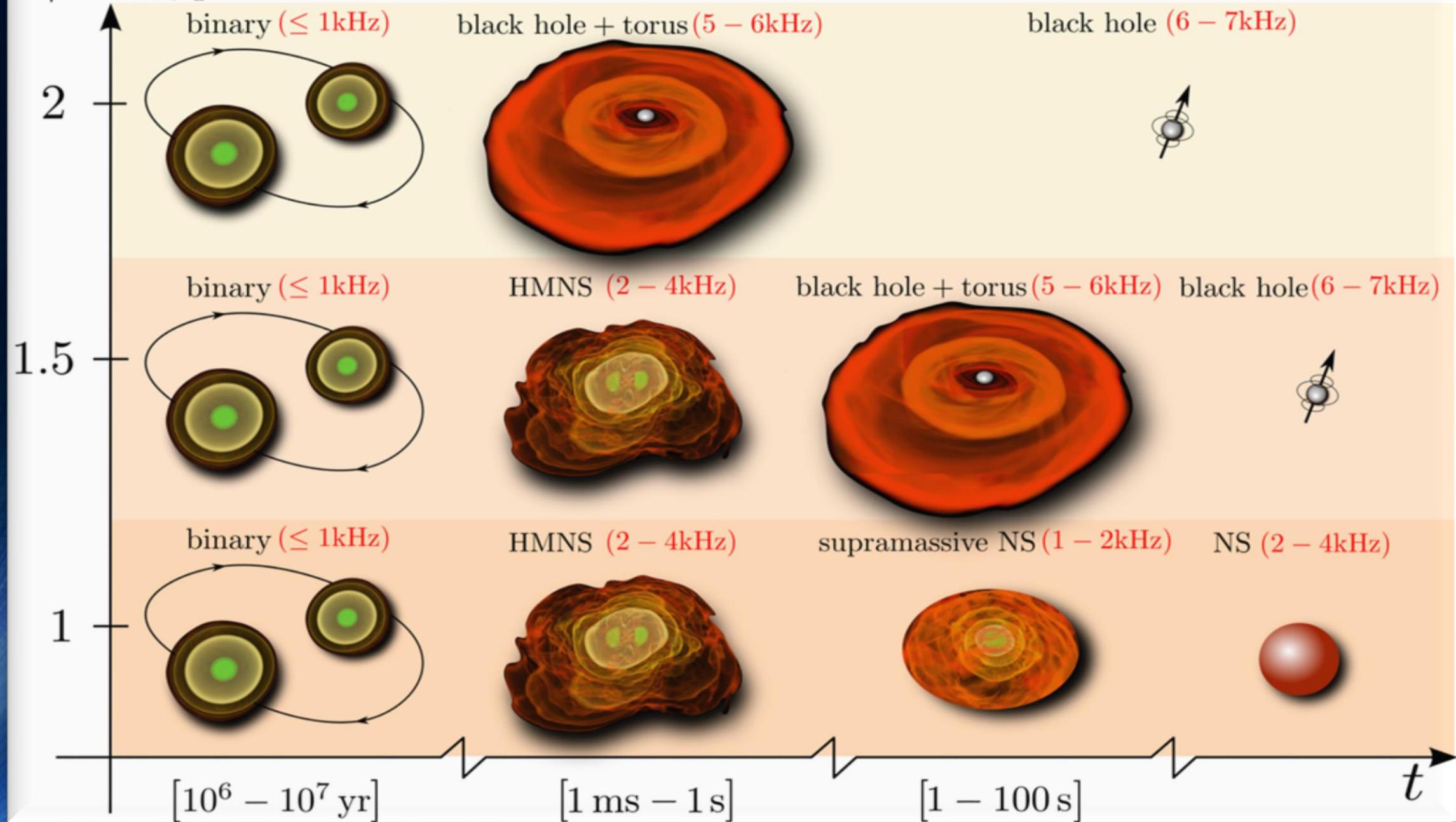
Kollision zweier schwarzer Löcher



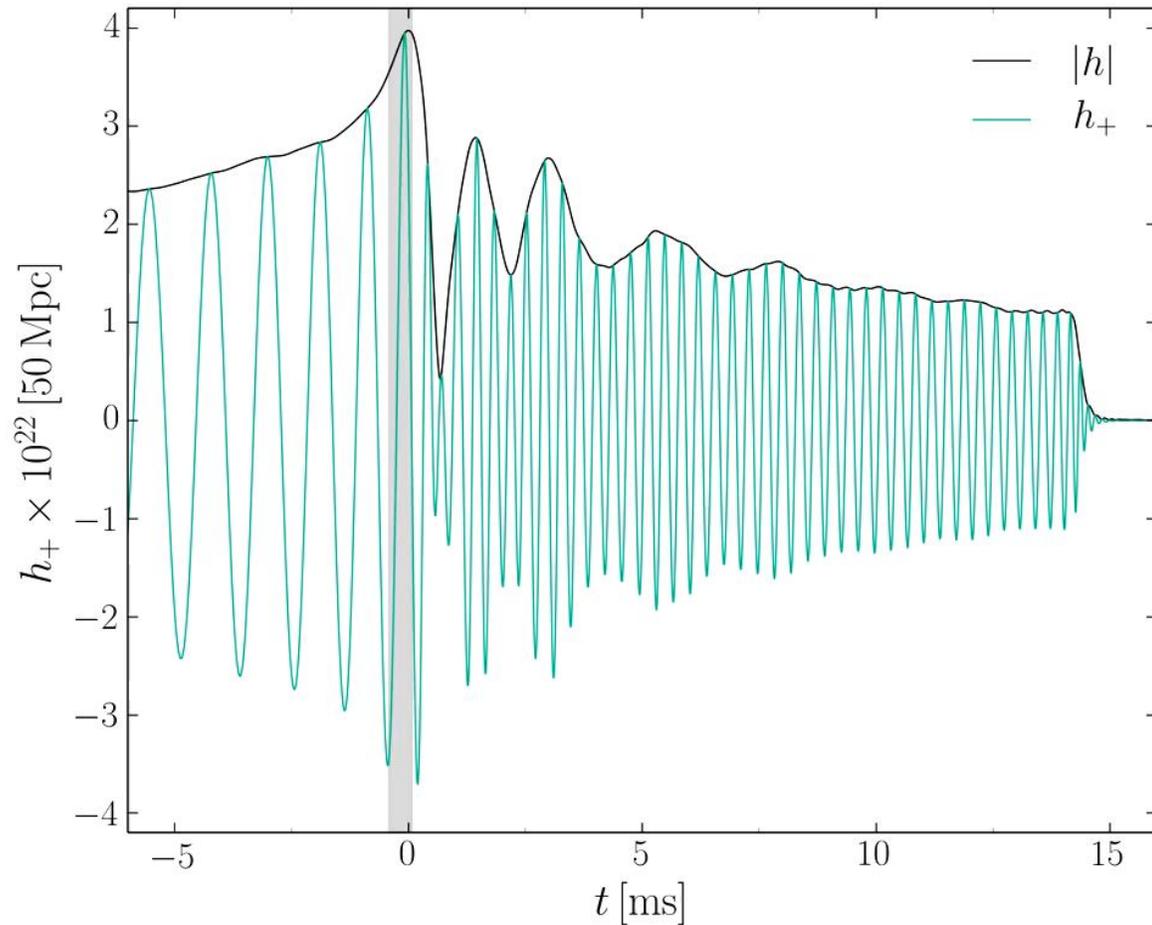
Unterschied:

Bei Neutronenstern Kollisionen
gibt es meistens eine
Post-Kollisionsphase

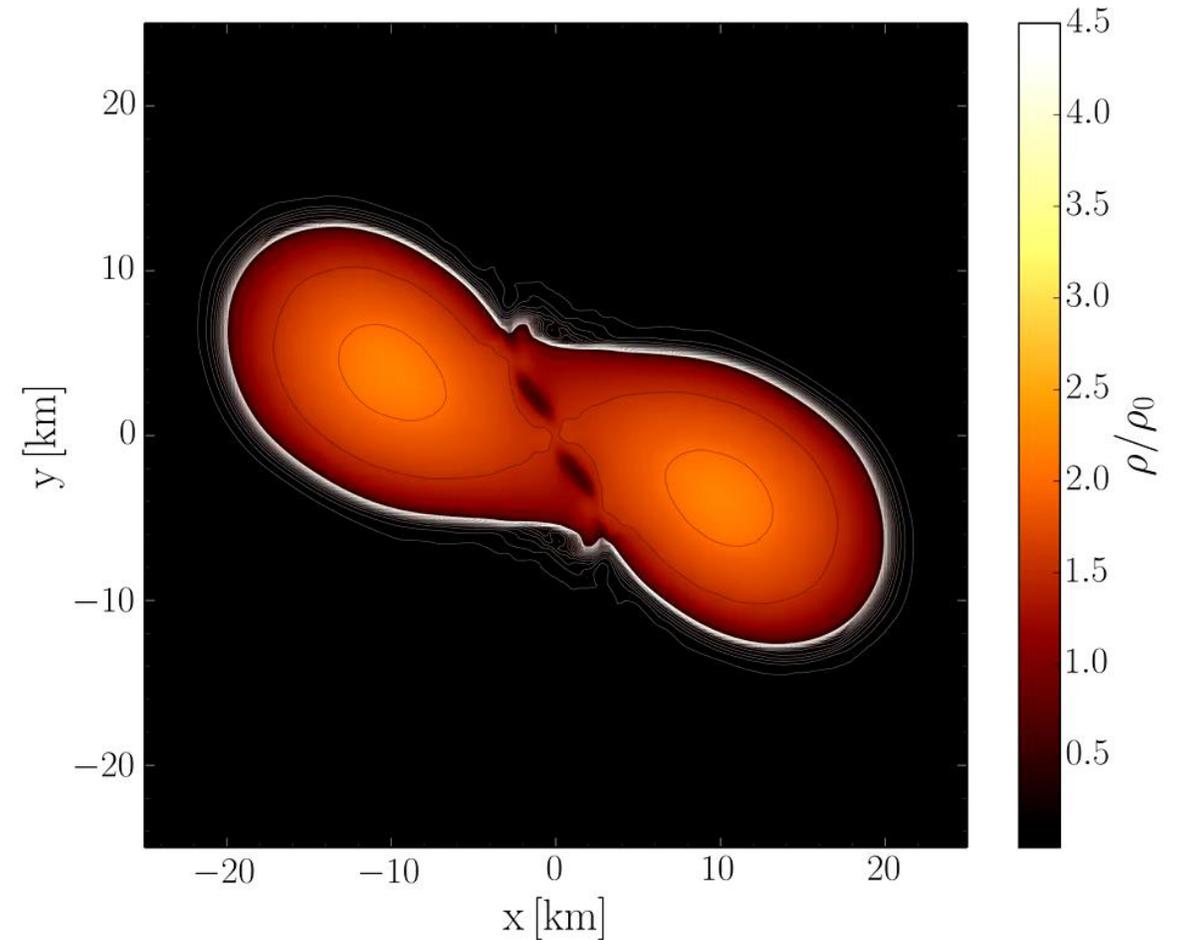
$M/M_{\max}, q \simeq 1$



Zeitliche Entwicklung der Dichtestruktur im Hypermassiven Neutronenstern



Amplitude der emittierten Gravitationswelle
im Abstand von 50 Mpc

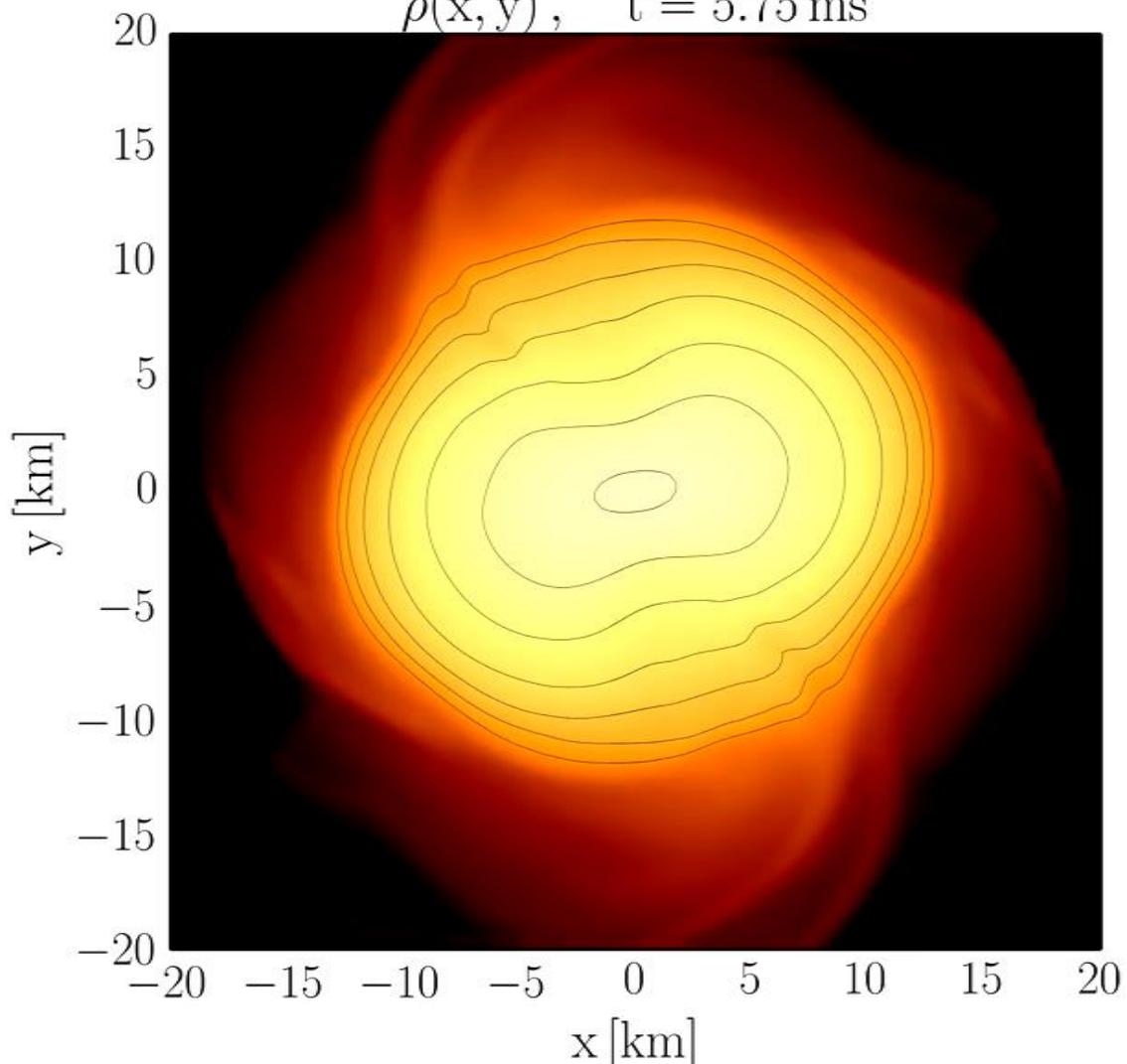


Die Teilchendichte $\rho(x,y)$ in der äquatorialen Ebene
in Einheiten der normalen nuklearen Dichte ρ_0

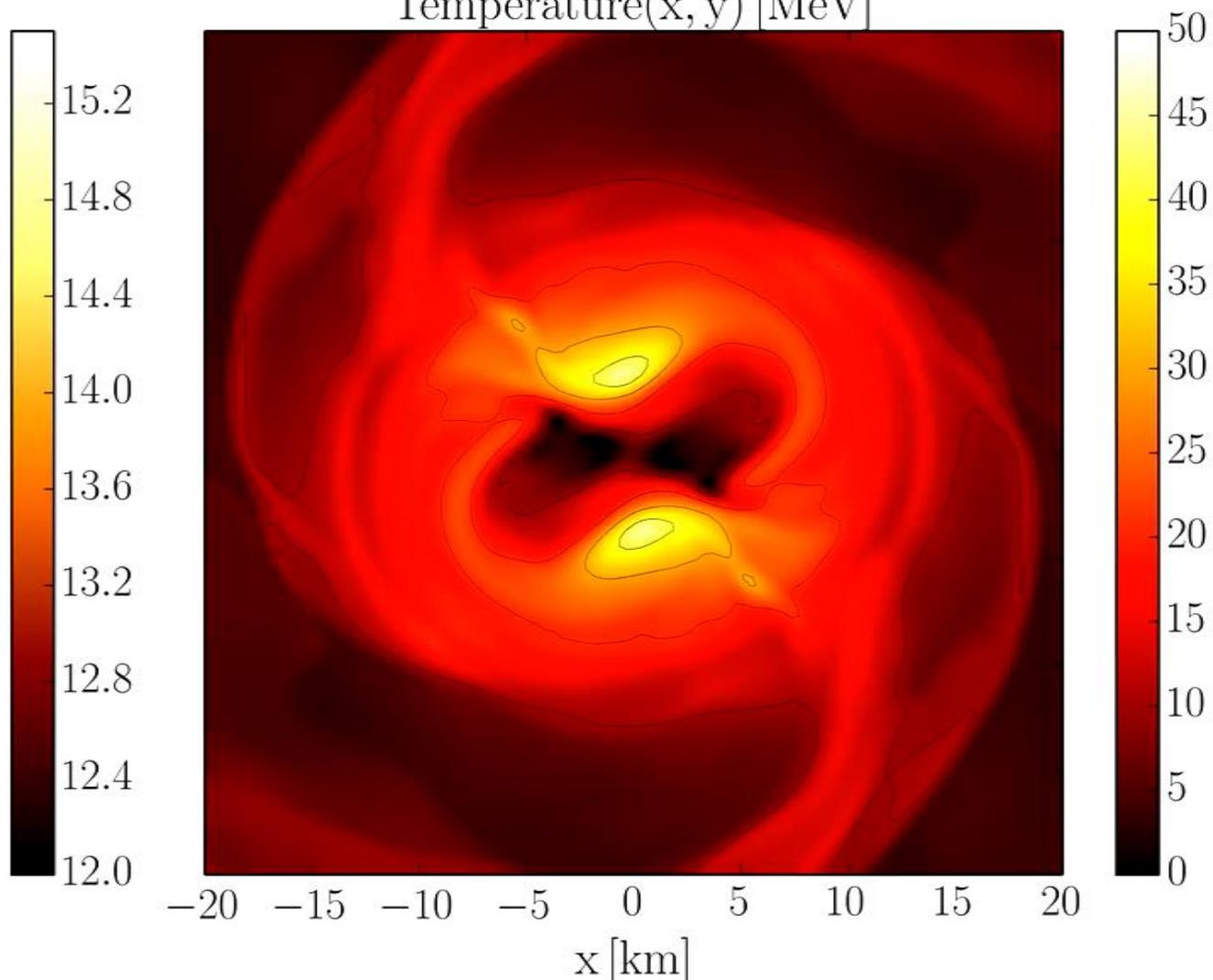
Dichte

Temperatur

$\rho(x, y), \quad t = 5.75 \text{ ms}$



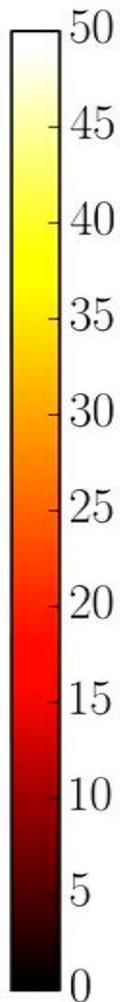
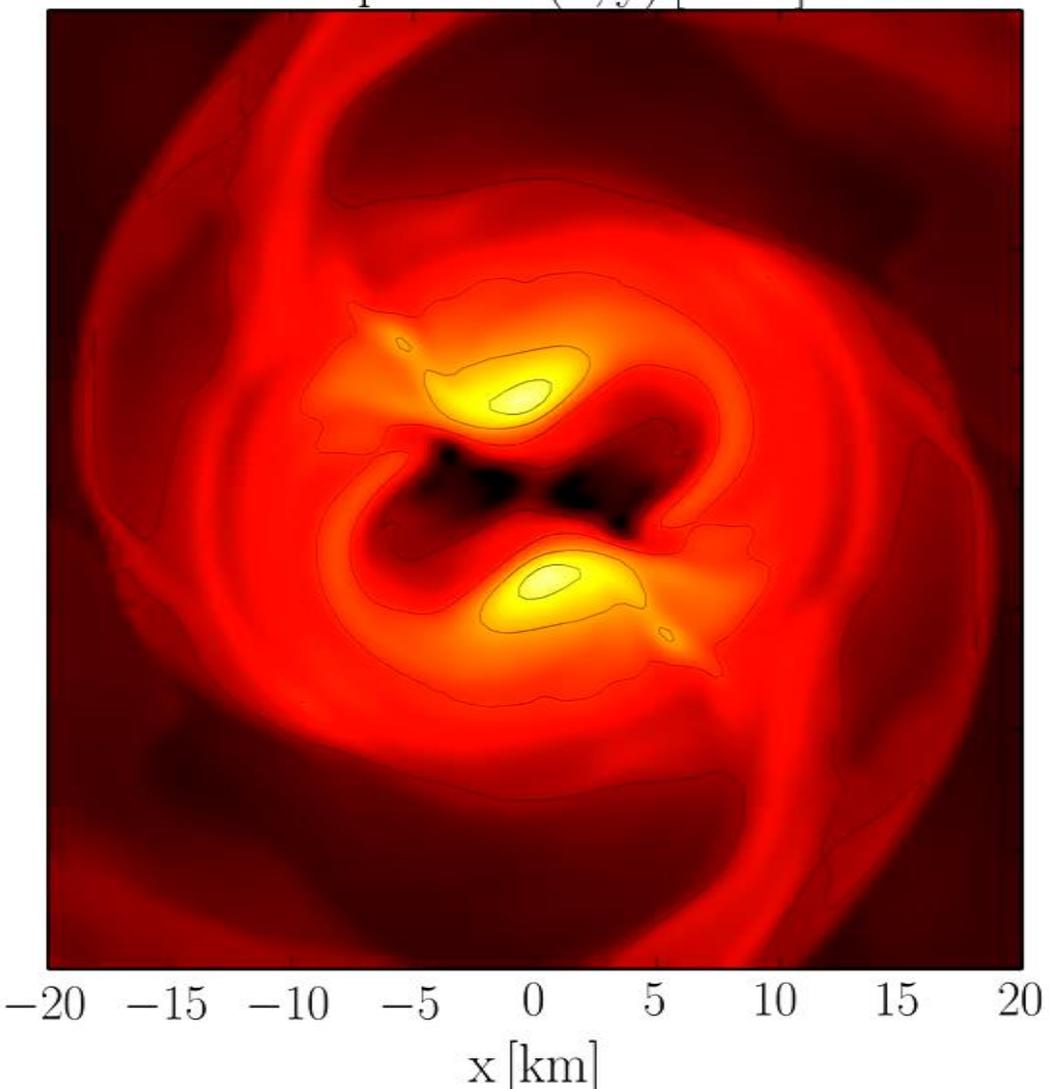
Temperature(x, y) [MeV]



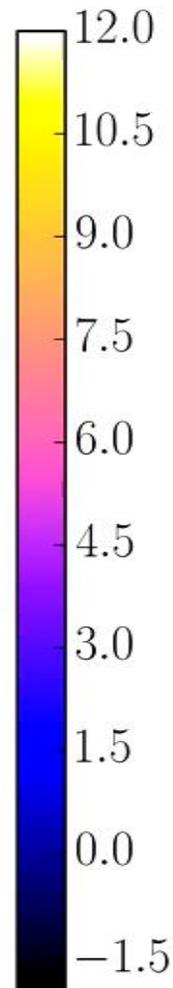
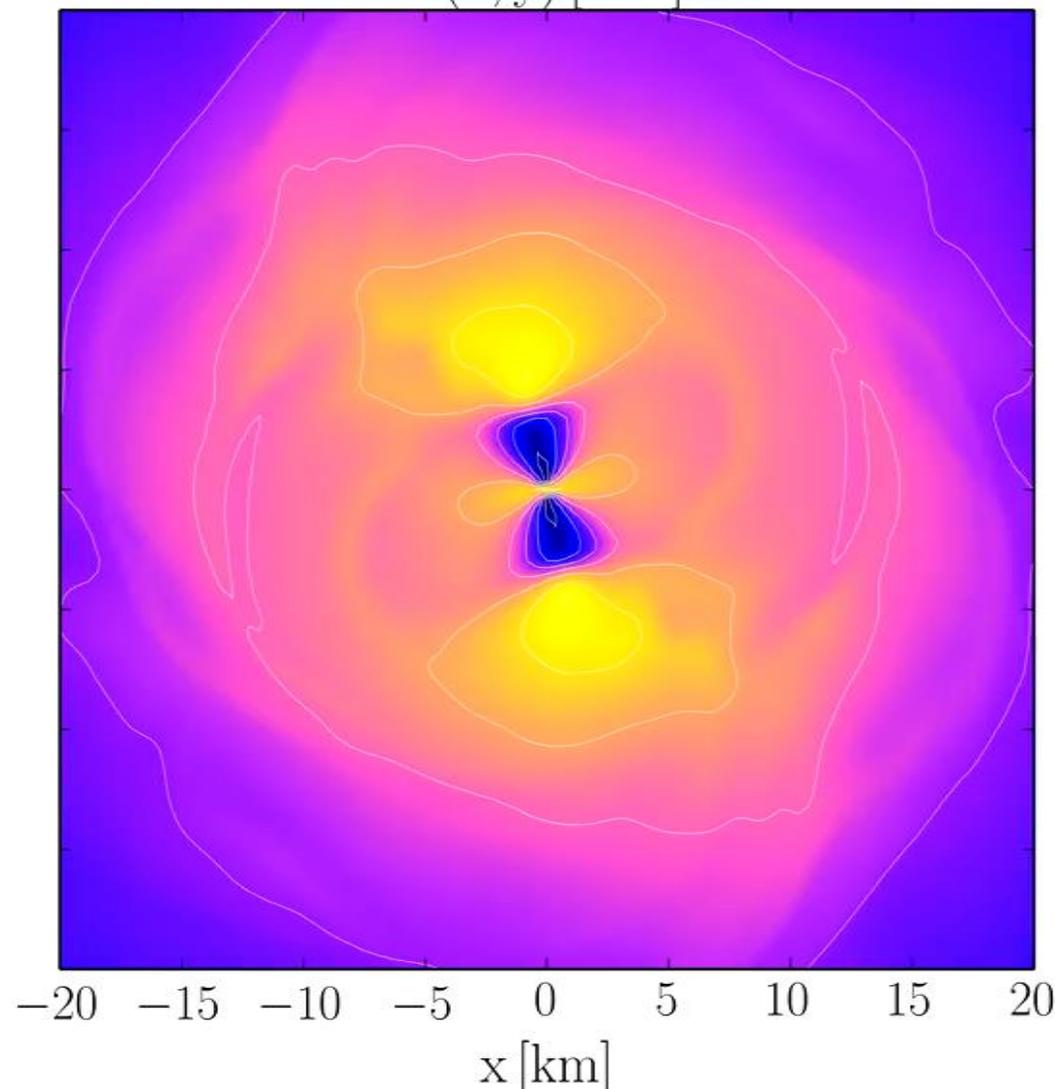
Temperatur

Rotationsgeschwindigkeit

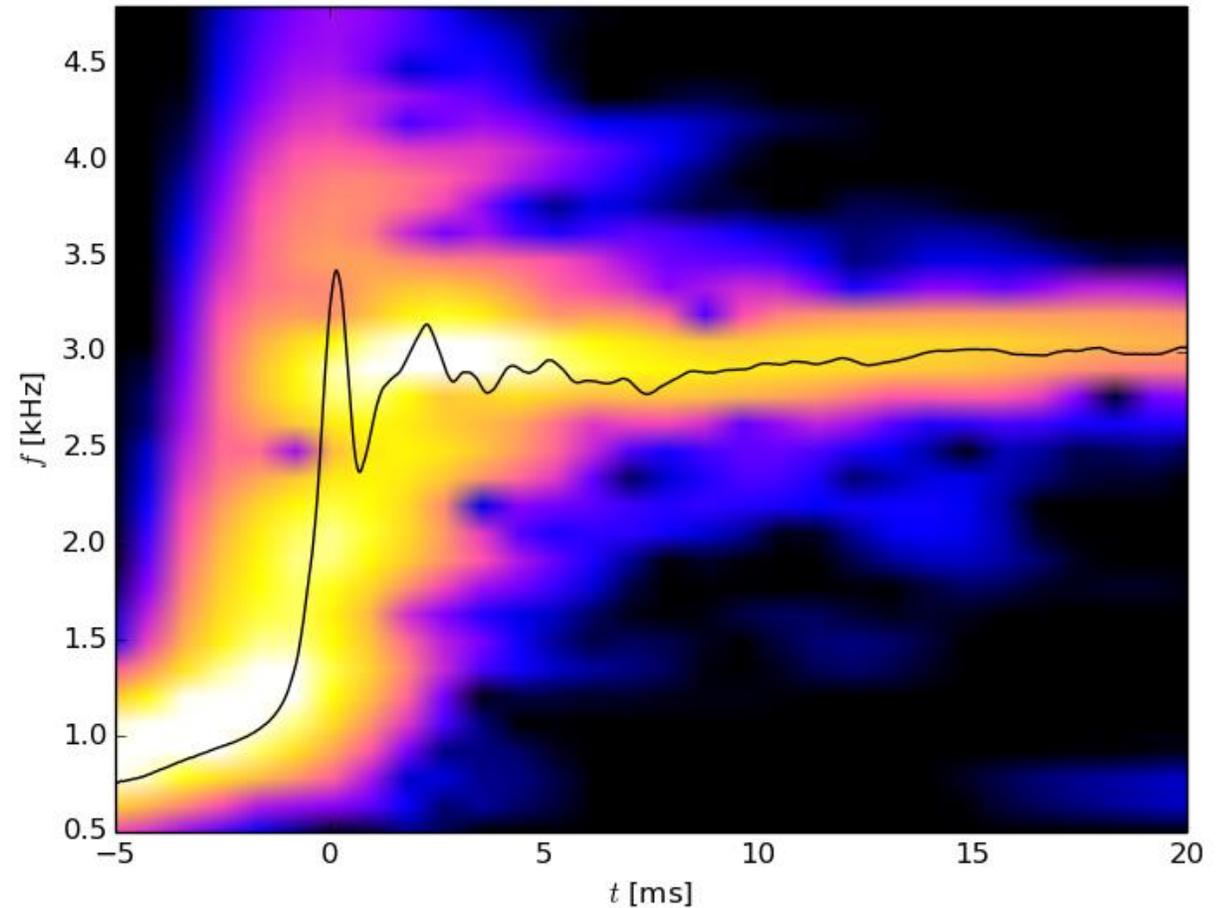
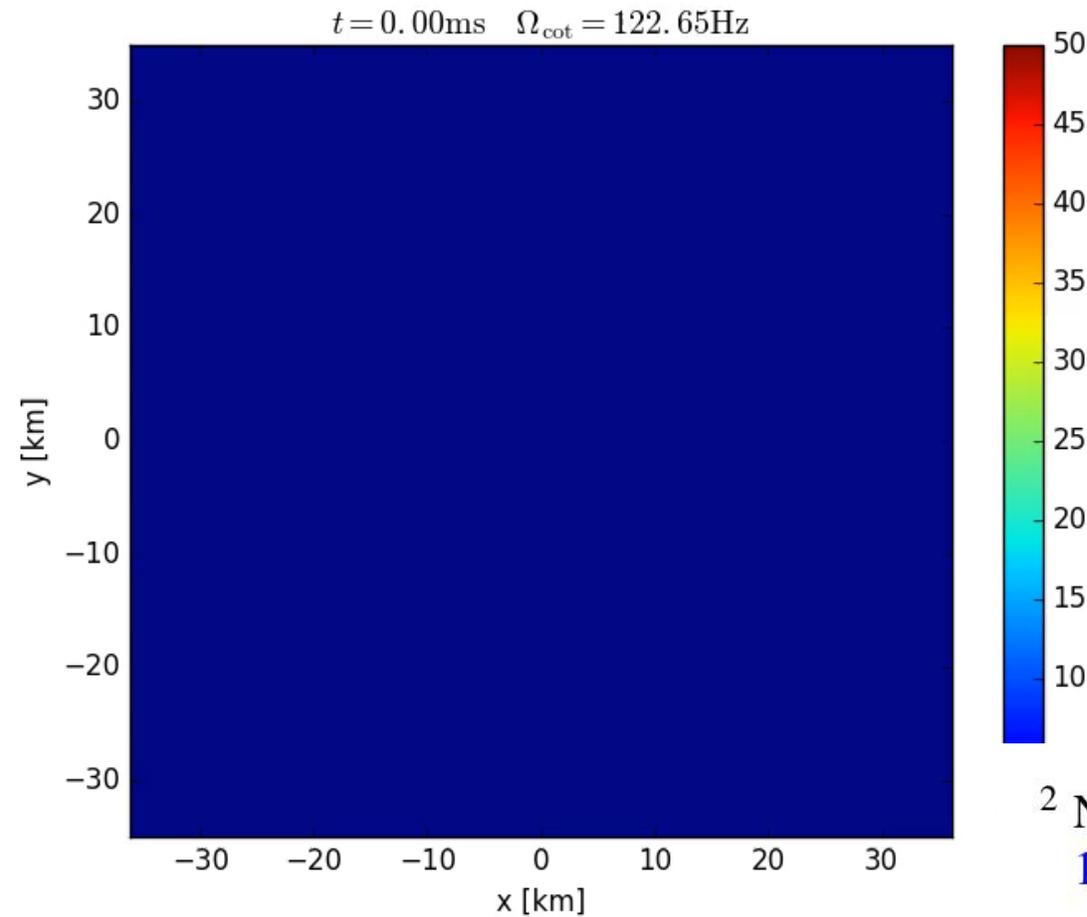
Temperature(x, y) [MeV]



$\Omega(x, y)$ [kHz]

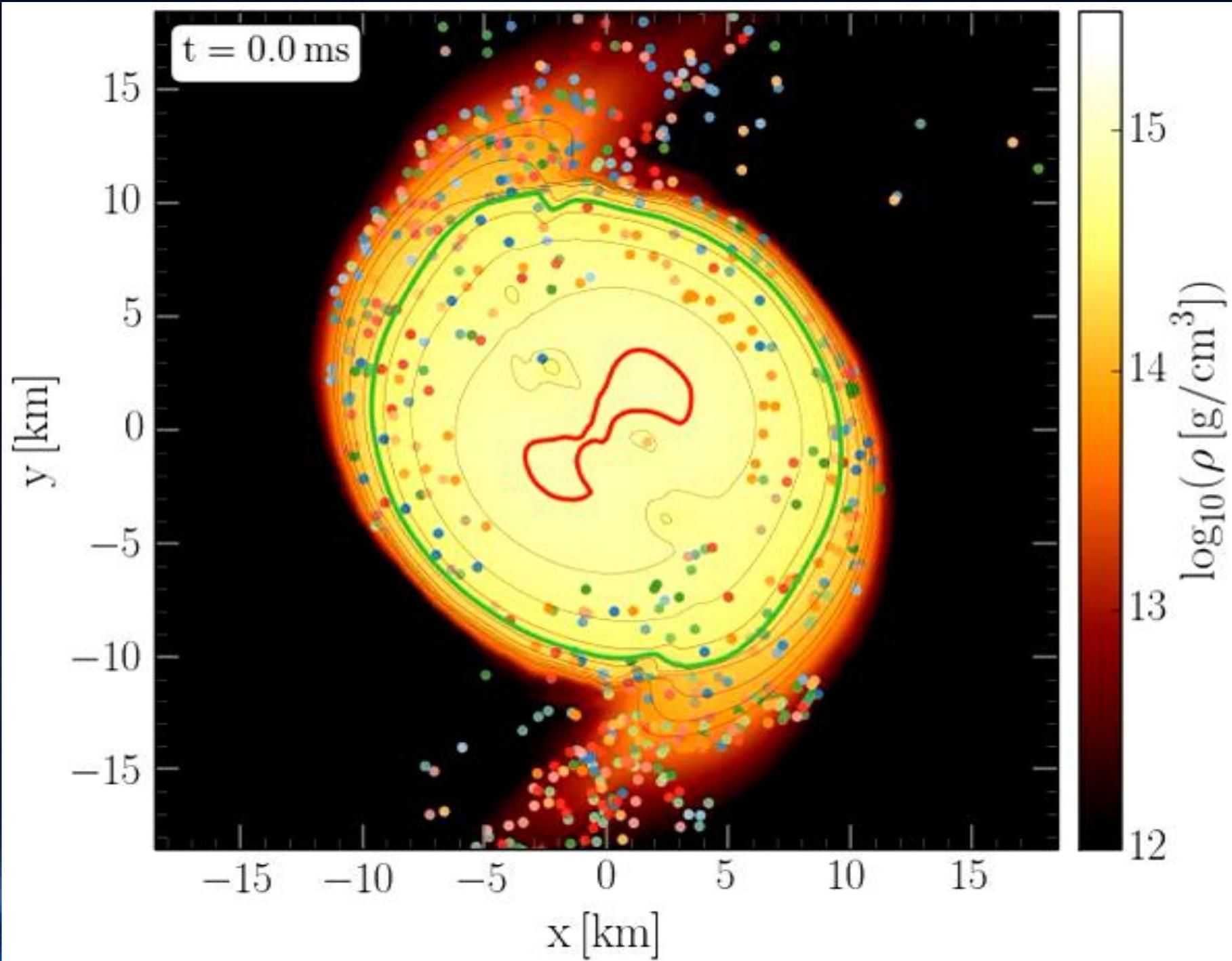


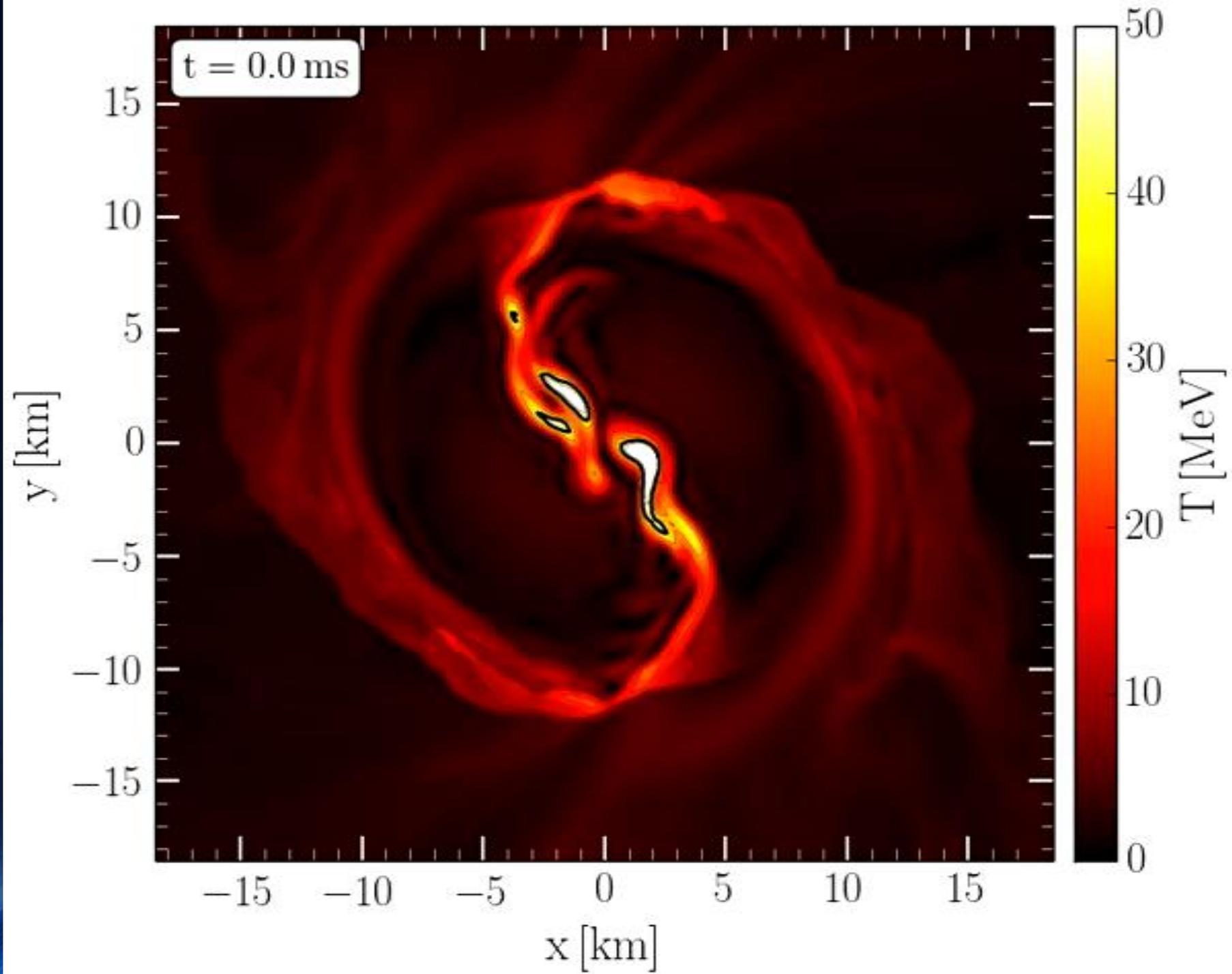
Mitrotierendes Koordinatensystem



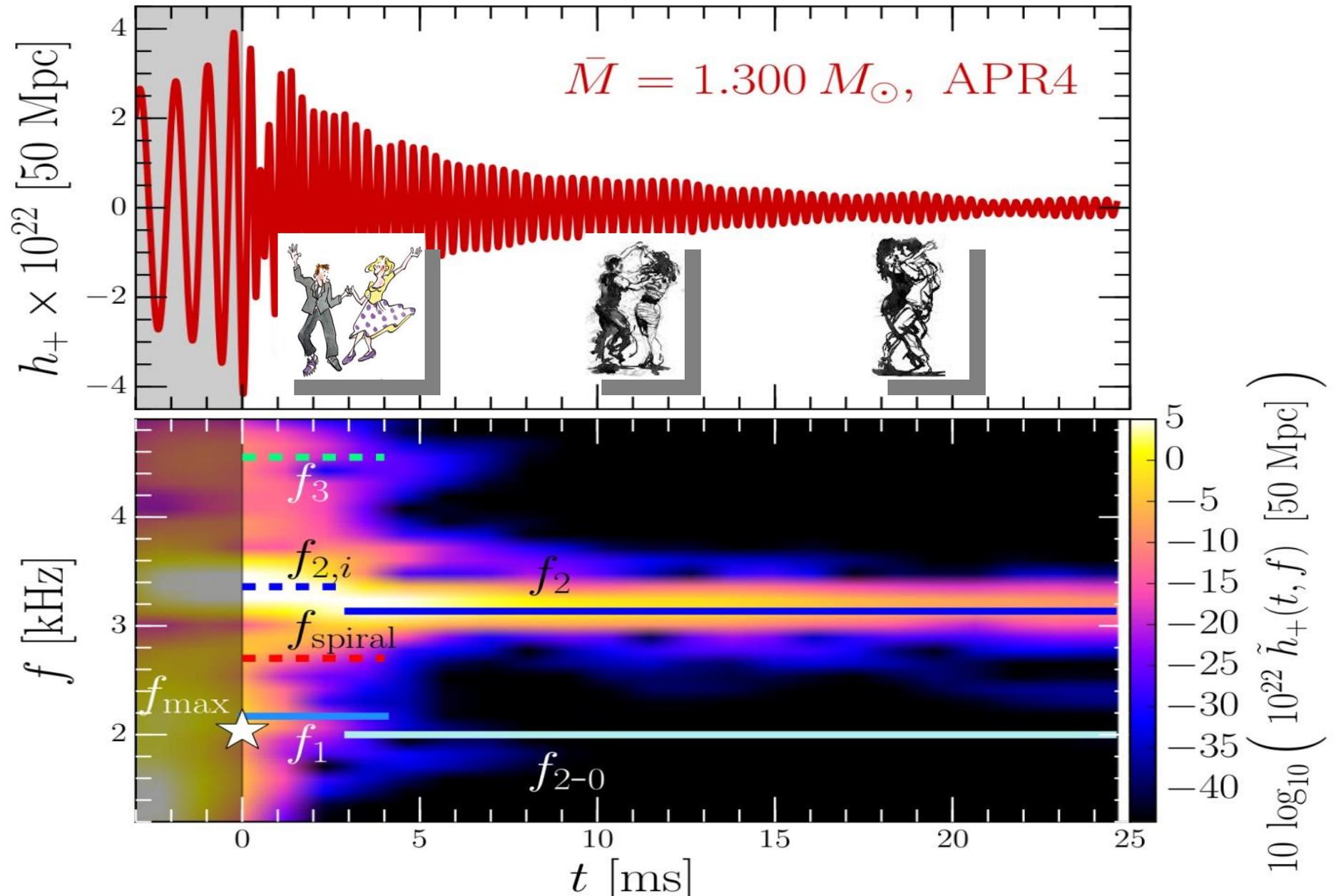
- ² Note that the angular-velocity distribution in the lower central panel of Fig. 10 refers to the corotating frame and that this frame is rotating at half the angular frequency of the emitted gravitational waves, Ω_{GW} . Because the maximum of the angular velocity Ω_{max} is of the order of $\Omega_{\text{GW}}/2$ (cf. left panel of Fig. 12), the ring structure in this panel is approximately at zero angular velocity.

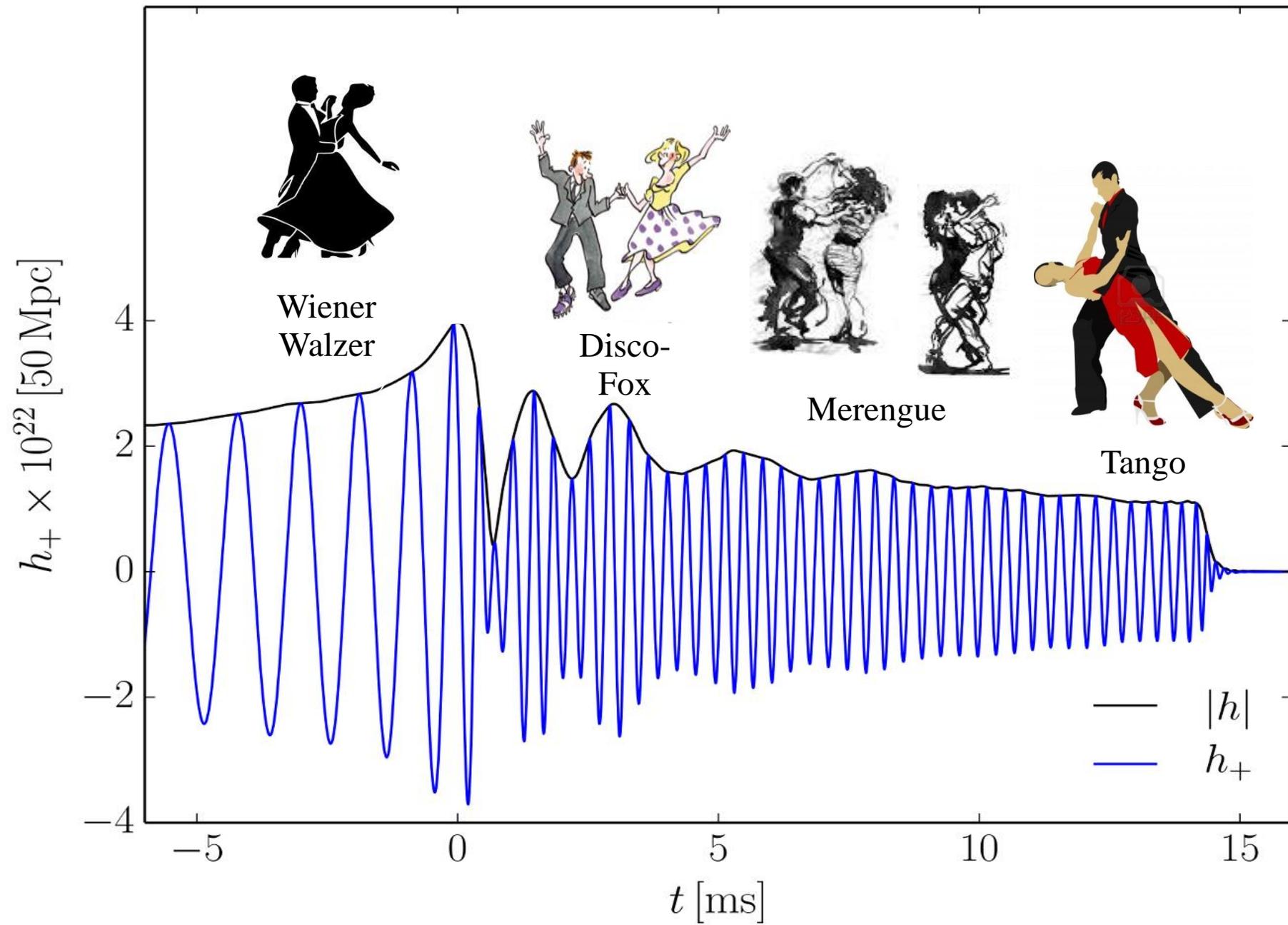
Simulationen und Film
by Luke Bovard





Das Frequenz-Spektrum einer Neutronenstern Kollision







Der Tanz der Neutronensterne

Die Bildung des Ereignishorizontes des Schwarzen Lochs und die Befreiung der elementaren Materie

