

Neutronensterne auf Kollisionskurs

Astronomie am Freitag im physikalischen Verein in Frankfurt am Main 24. Juni 2016

Matthias Hanauske

*Frankfurt Institute for Advanced Studies
Johann Wolfgang Goethe Universität
Institut für Theoretische Physik
Arbeitsgruppe Relativistische Astrophysik
D-60438 Frankfurt am Main
Germany*

Gravitationswellen gefunden!!!!

Kollision zweier schwarzer Löcher

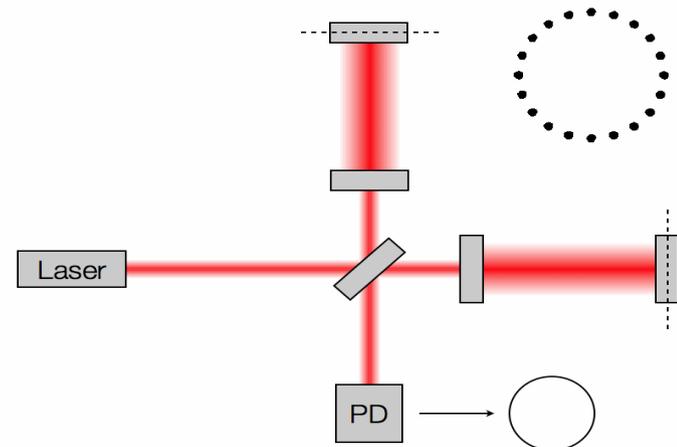
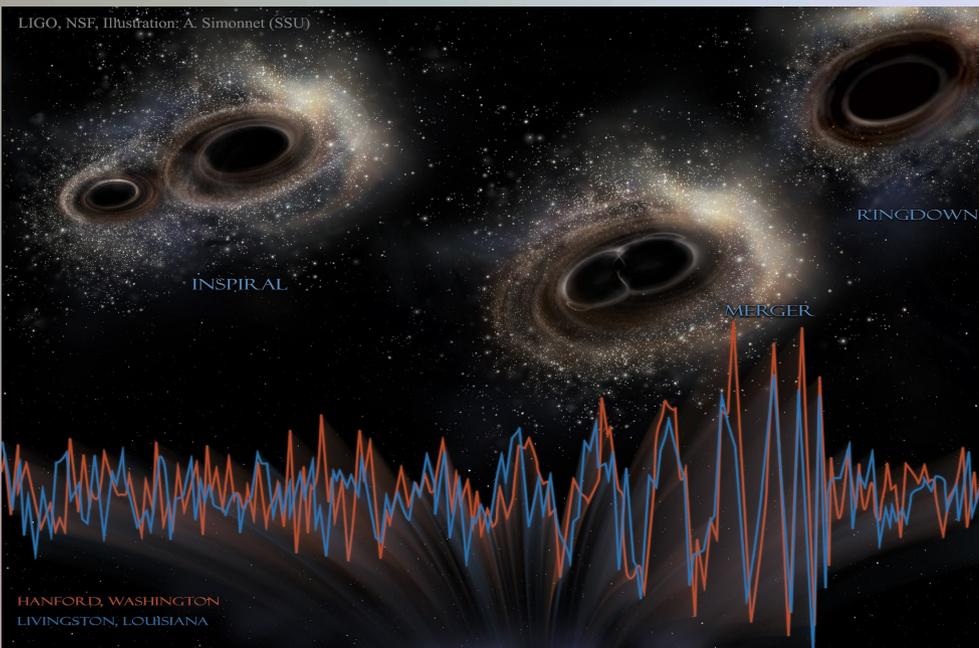
GW150914

Masse der schwarzen Löcher

36 und 29 Sonnenmassen

Abstand zur Erde

410 Mpc (1340 Millionen Lichtjahre)



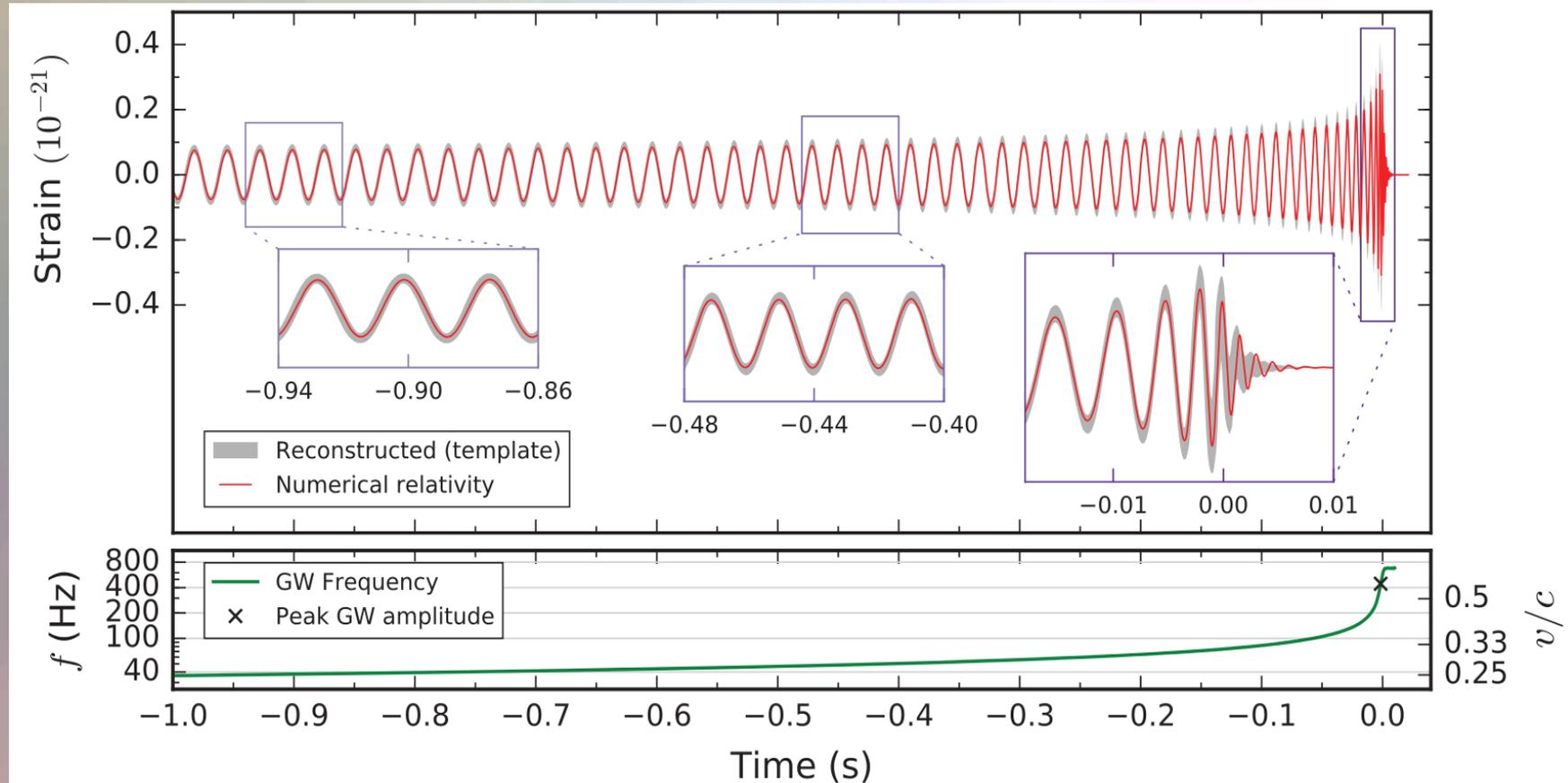
Credit: Les Wade from Kenyon College.

Noch eine Gravitationswelle!!!!

Kollision zweier schwarzer Löcher GW151226

Masse der schwarzen Löcher: 14 und 7 Sonnenmassen

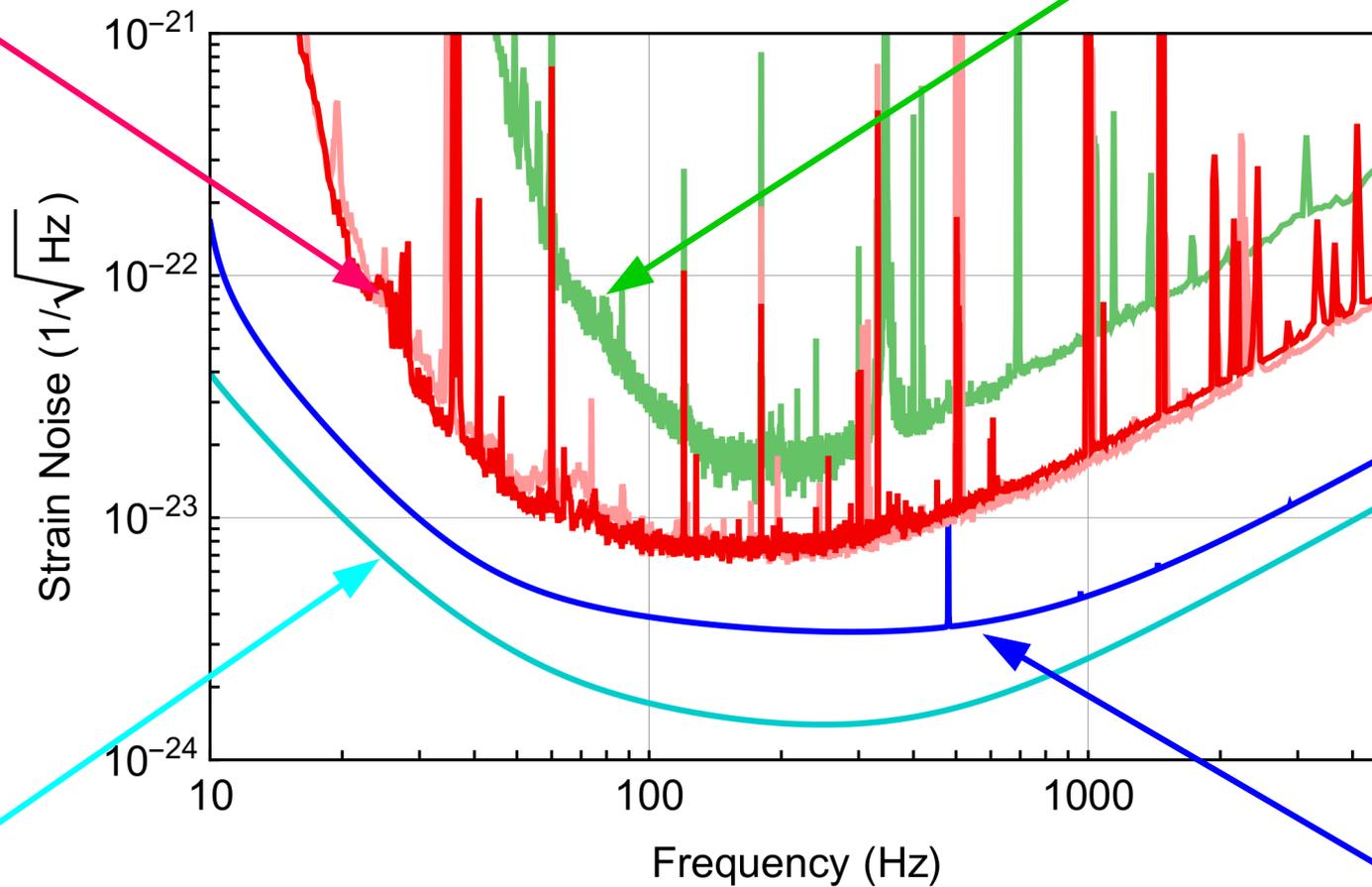
Abstand zur Erde: 440 Mpc (1440 Millionen Lichtjahre)



Warum (noch) keine Gravitationswellen von kollidierenden Neutronensternen?

Wissenschaftliche Datenaufnahme in 2015

Erste Datenaufnahme



Zukünftige Updates

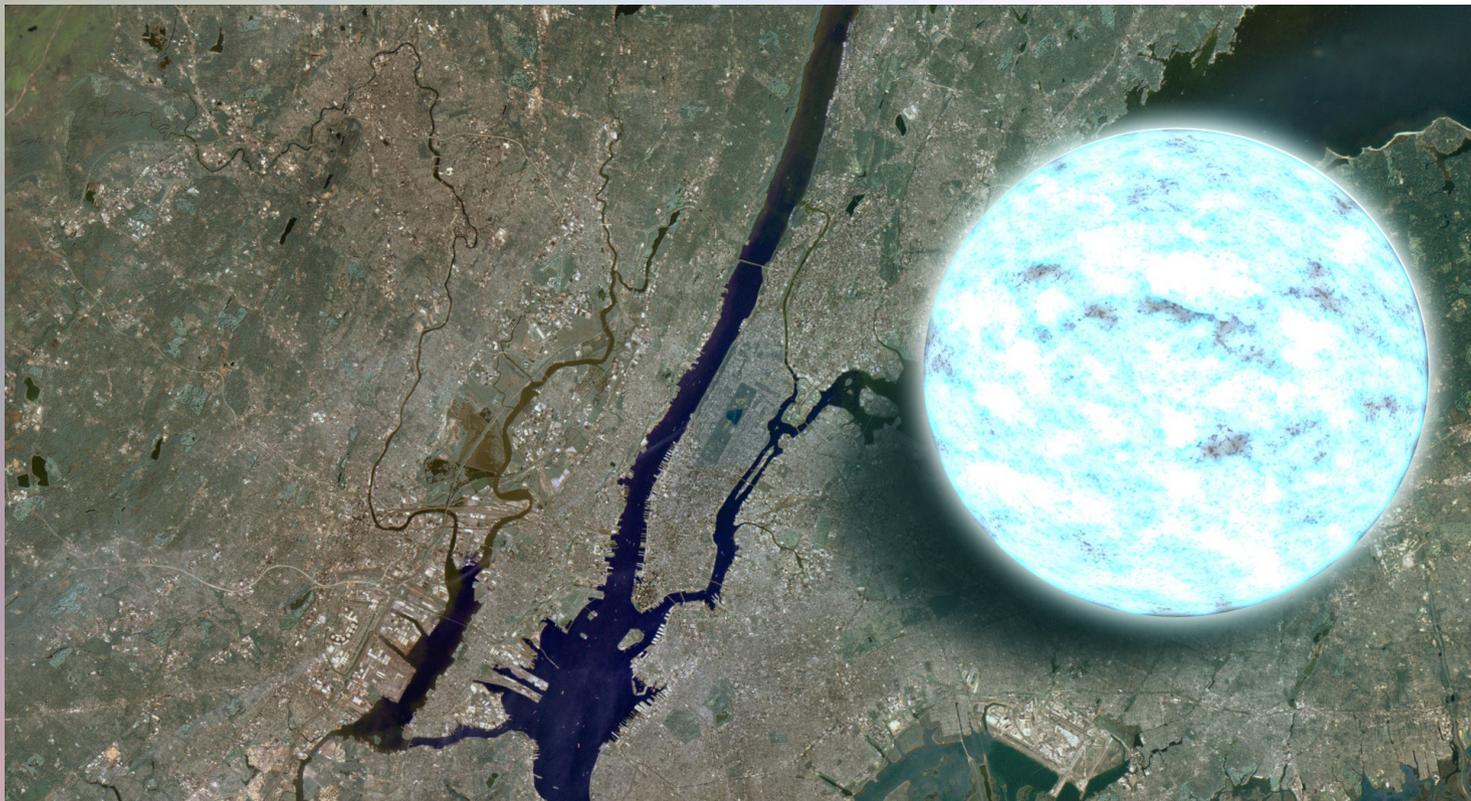
Nächste Datenaufnahme (Herbst 2016)

Eigenschaften von Neutronensterne

Neutronensterne werden in gewaltigen Supernova-Explosionen geboren.

Radius ~ 10 km

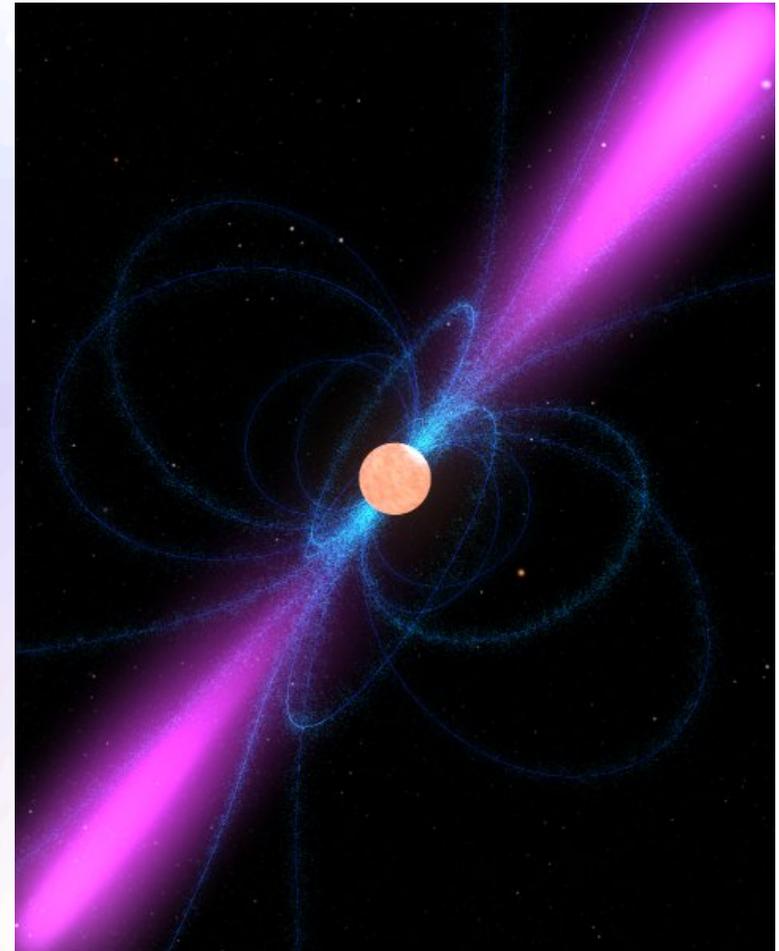
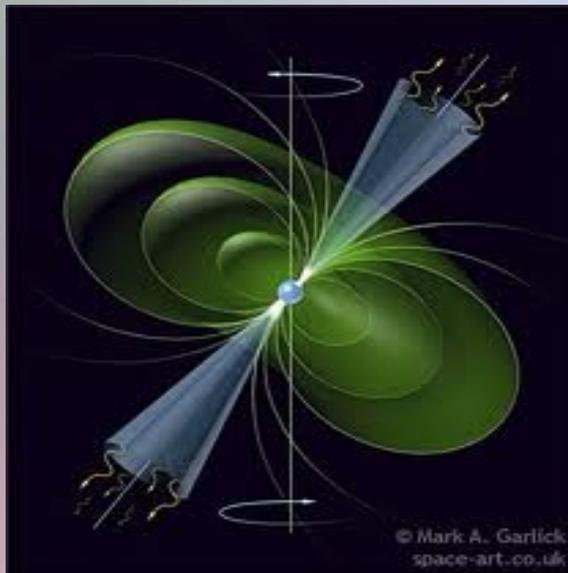
Masse 1-2 Sonnenmassen



Pulsare sind rotierende Neutronensterne

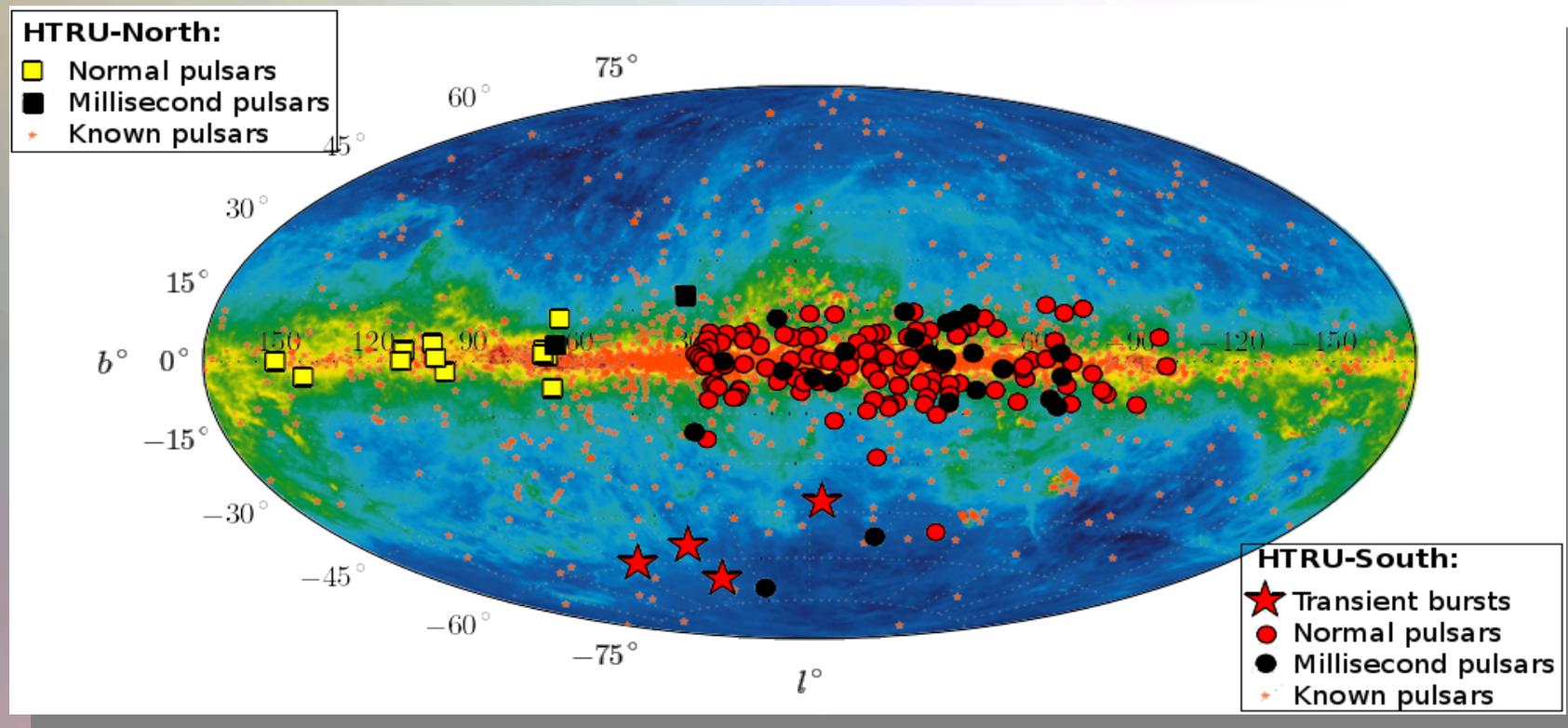
Neutronensterne haben sehr große Magnetfelder
(bis zu 10^{11} Tesla)

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



Pulsare sind rotierende Neutronensterne

Zurzeit kennen wir ca. 2500 Neutronensterne.



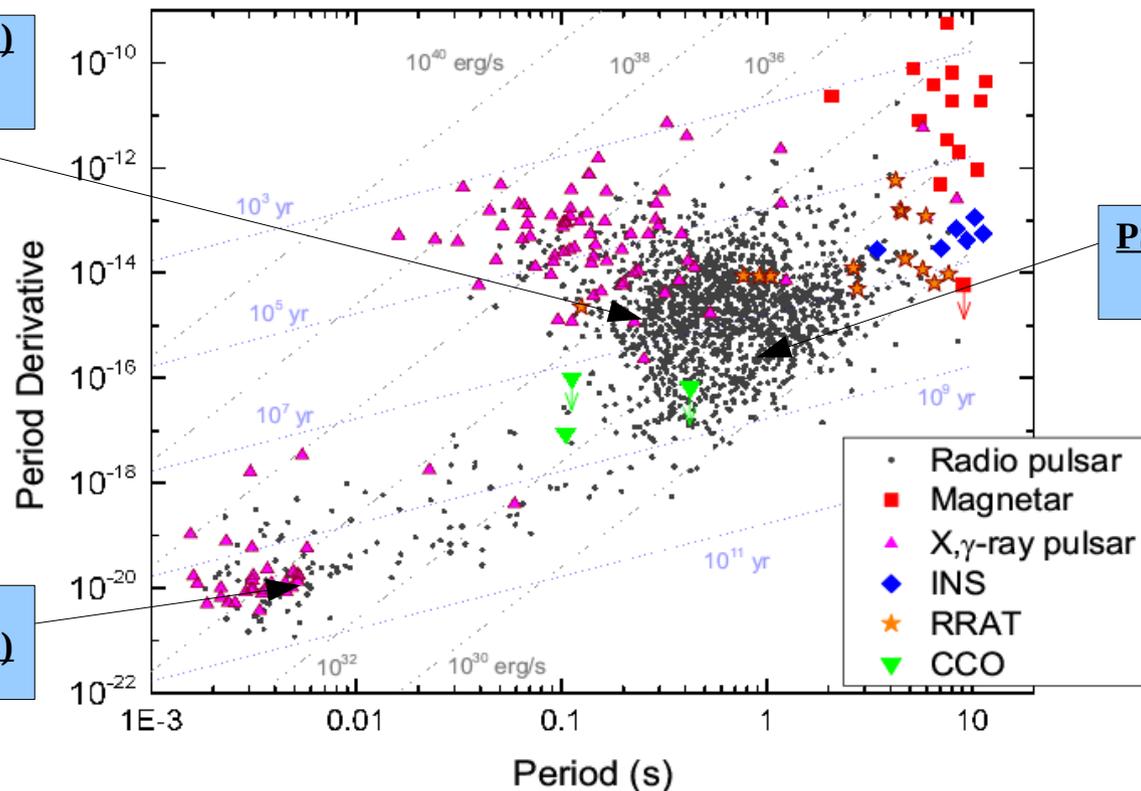
Millisekunden und Sekunden Pulsare



PSR B0531+21 (33.5 ms)
Crab Pulsar



PSR B1937+21 (1.56 ms)



PSR B0329+54 (0.715 s)

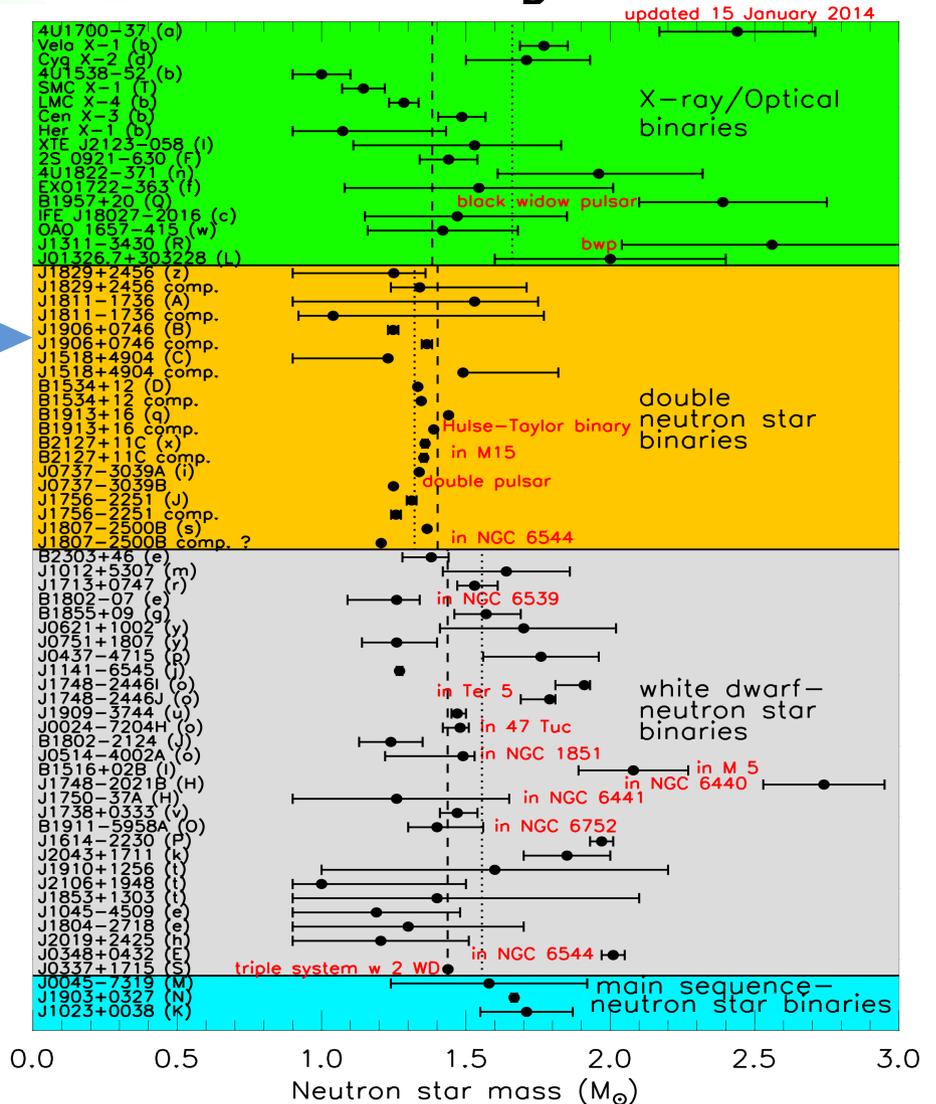
Beobachtete Massen von Neutronensternen in binären Systemen

Einige der bekannten Neutronensterne befinden sich in Zweiersystemen: NS-Planet, NS-(weißer Zwerg) oder NS-NS Systeme

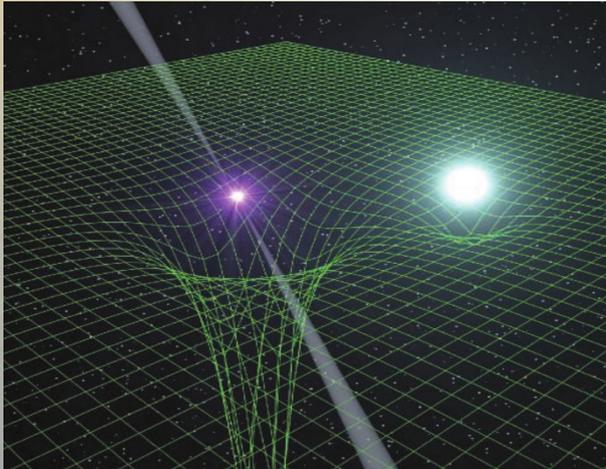
PSR J1906+0746

144-ms Pulsar, entdeckt in 2004
 Orbitale Periode: 3.98 Stunden,
 Exzentrizität: 0.085
 Pulsar Masse: 1.291(11)
 Masse Begleiter: 1.322(1)
 In den Jahren 1998-2009 beobachtet, dannach verschwand der Pulsar aufgrund der Spin-Präzession

Van Leeuwen et al, arXiv:1411.1518



Beobachtete Massen von Neutronensternen in binären Systemen



Picture from J. Antoniadis et.al. Science 2013

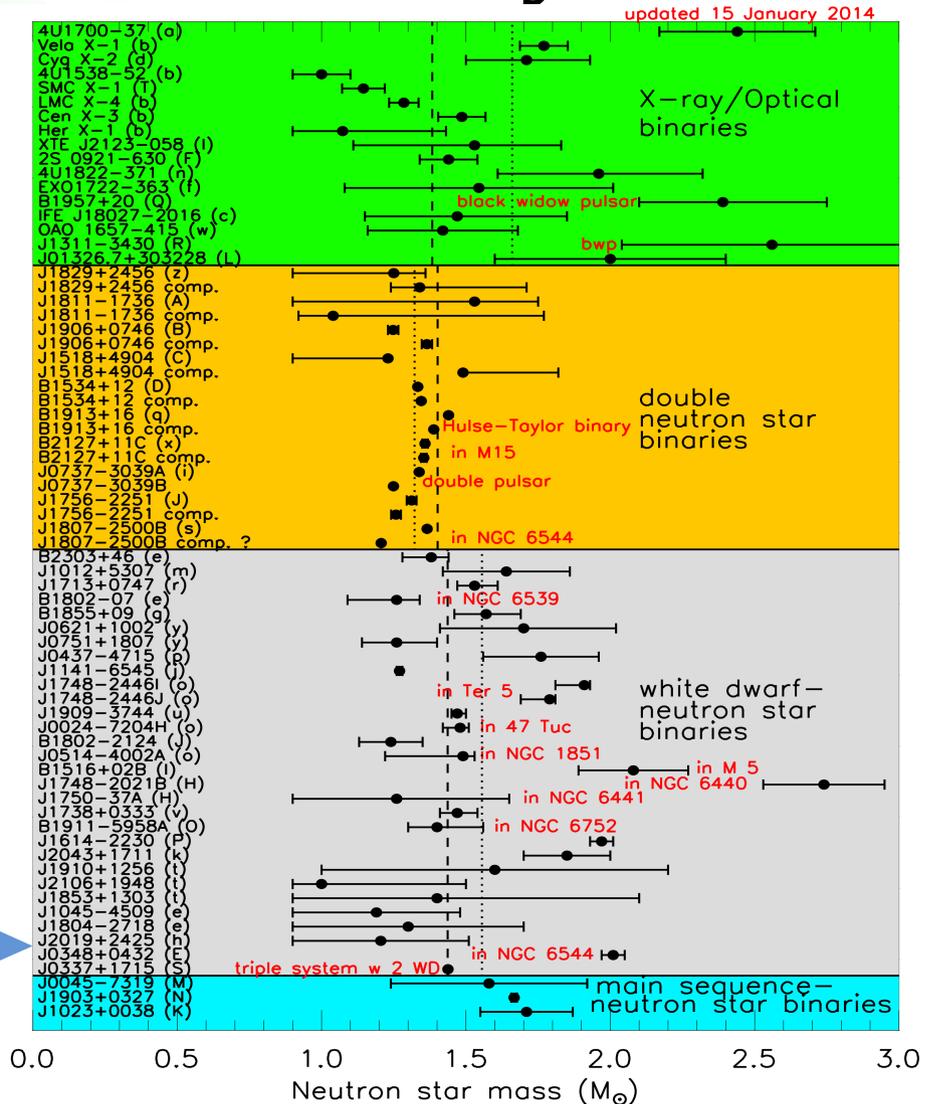
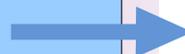
PSR J0348+0432

Orbitale Periode: 2.46 Stunden

Pulsar mass: 2.01 ± 0.04

Masse weißer Zwerg:

$M = 0.172 \pm 0.003$

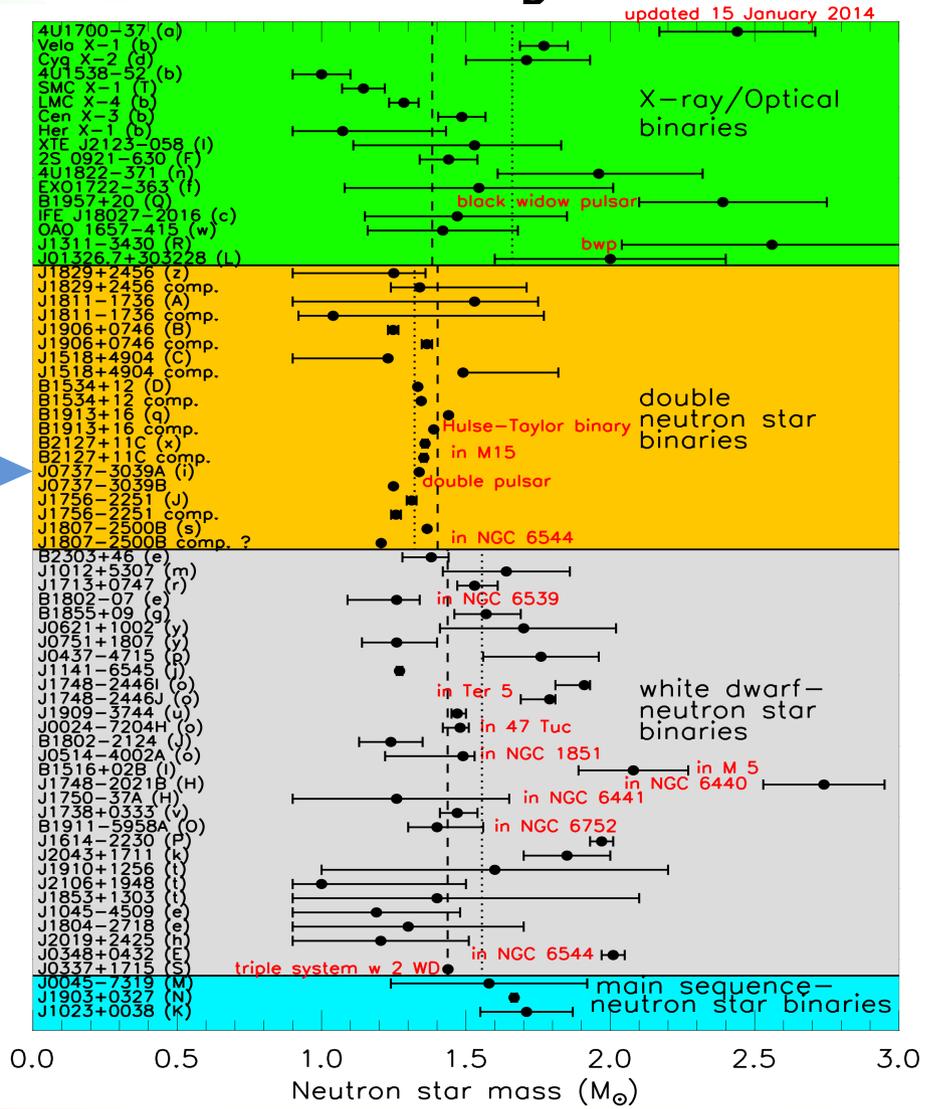


Beobachtete Massen von Neutronensternen in binären Systemen

Der Doppel Pulsar PSR J0737-3039

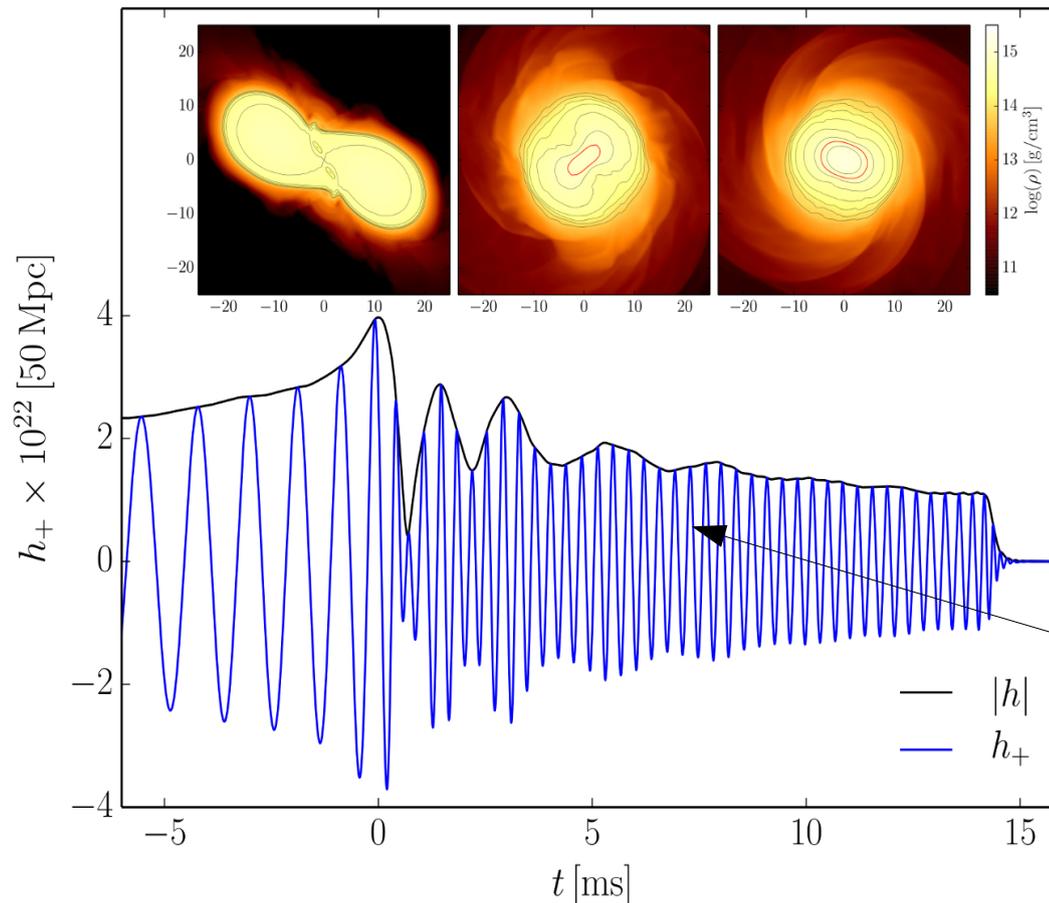
Entdeckt im Jahre 2003
 Pulsare nur 800,000 km entfernt voneinander
 Orbitale Periode: 147 min
 Exzentrizität: 0.088
 Pulsar A: $P=23$ ms, $M=1.3381(7)$
 Pulsar B: $P=2.7$ s, $M=1.2489(7)$
 Pulsar A wird von B eclipsed (für 30 s pro Orbit)

Kramer, Wex, Class. Quantum Grav. 2009

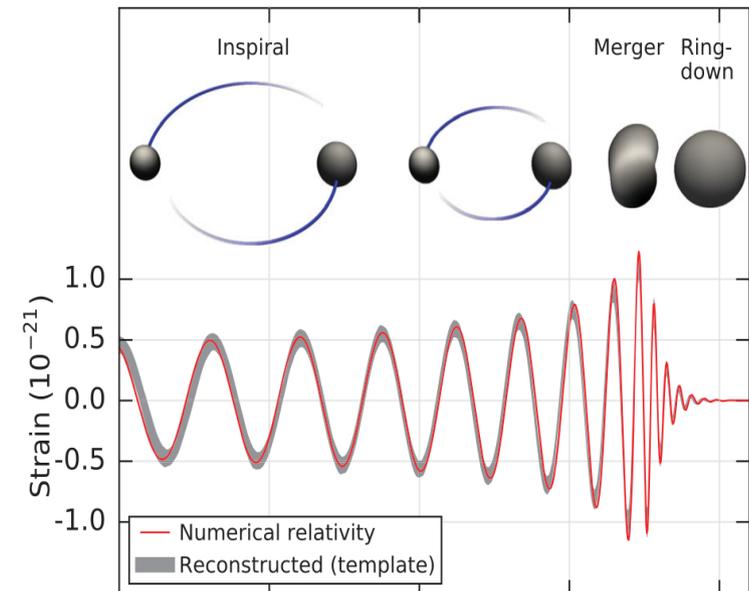


Gravitationswellen von Neutronenstern Kollisionen

Neutronenstern Kollision (Simulation)

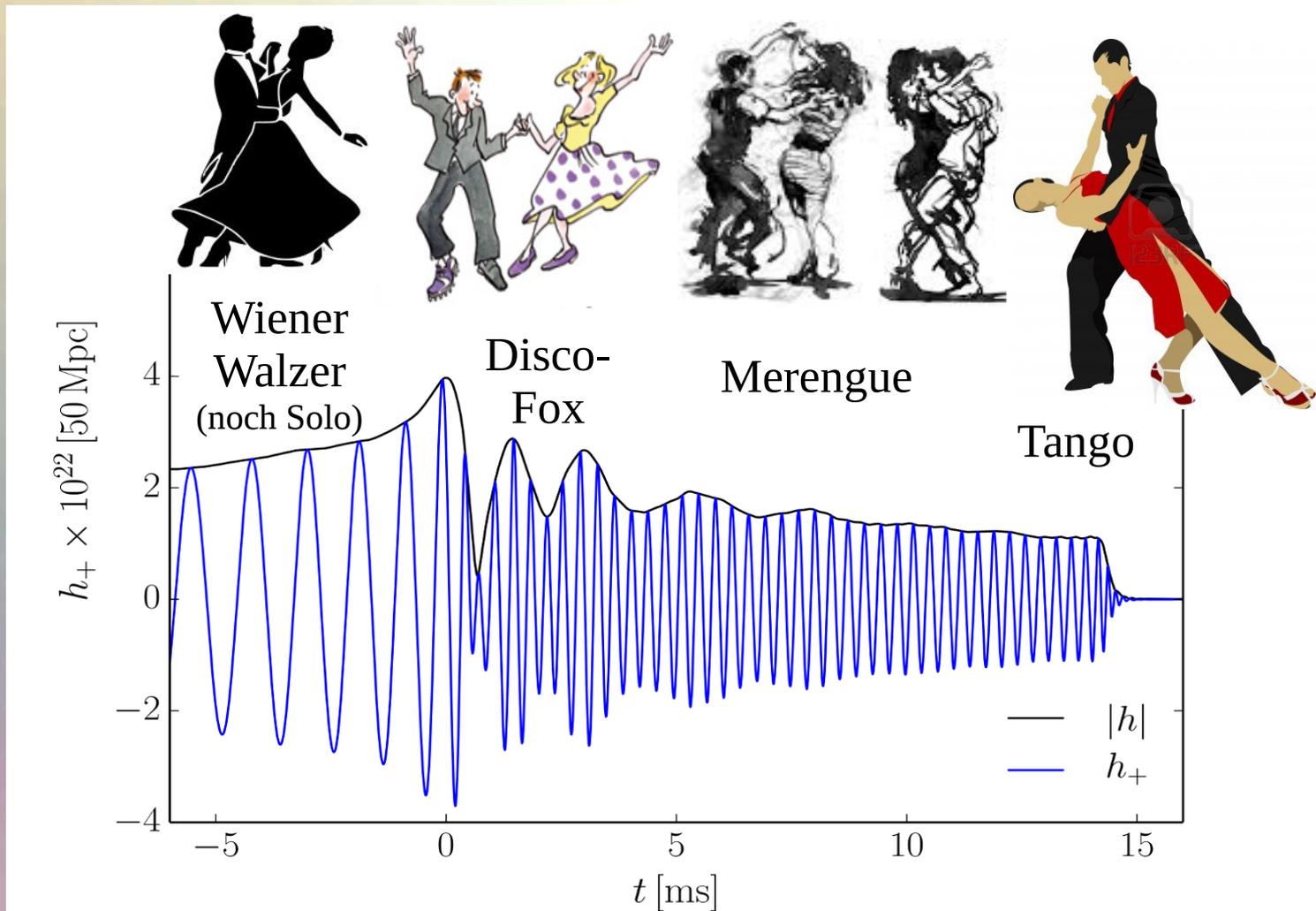


Kollision zweier schwarzer Löcher



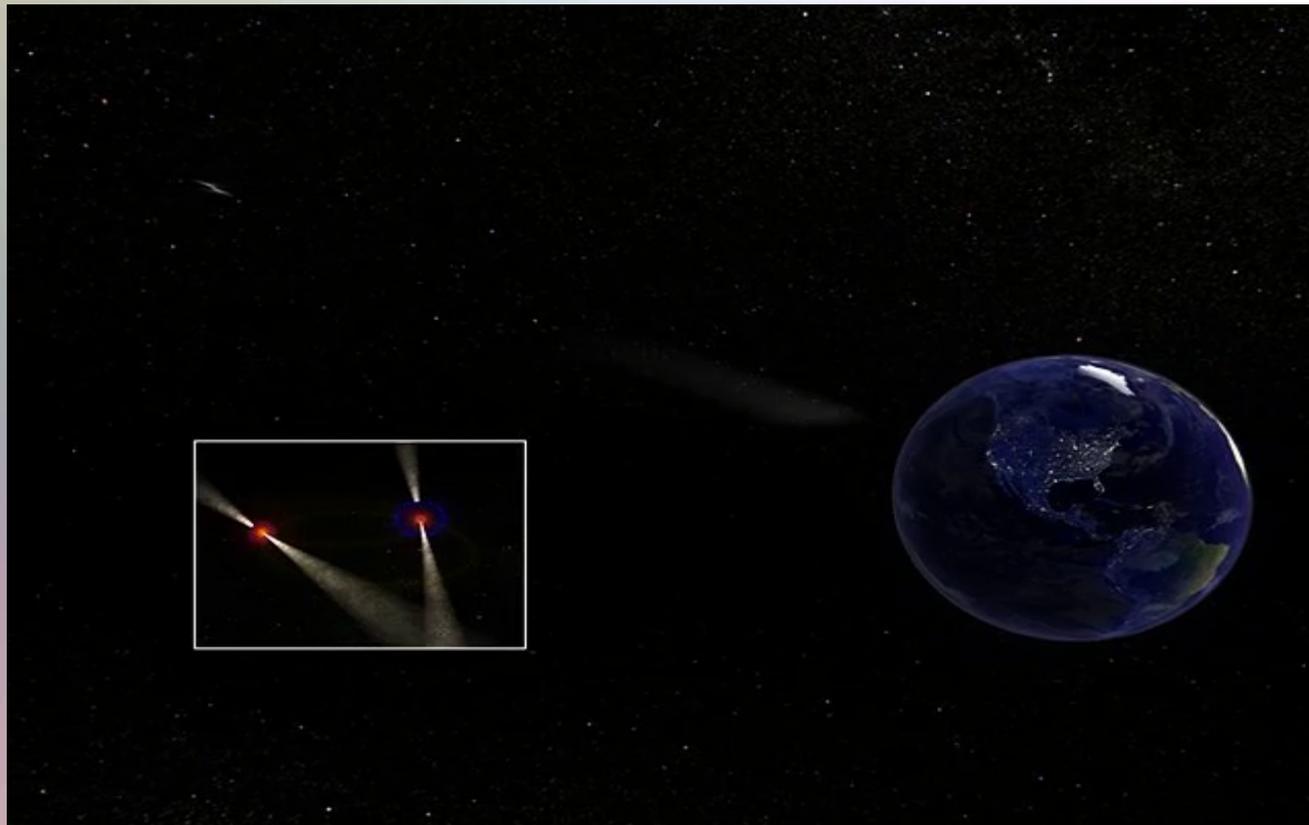
Unterschied:
Bei Neutronenstern Kollisionen gibt es meistens eine **Post-Kollisionsphase**

Der Tanz der Neutronensterne



Binäre Neutronenstern Systeme

Der **Doppel Pulsar** (PSR J0737-3039A/B): Entdeckt in 2003, beide Pulsare nur 800,000 km entfernt voneinander, Umlaufzeit: 147 Minuten, Abstrahlung von Gravitationswellen → In 85 Millionen Jahren kollidieren sie miteinander!



Die Einstein Gleichung

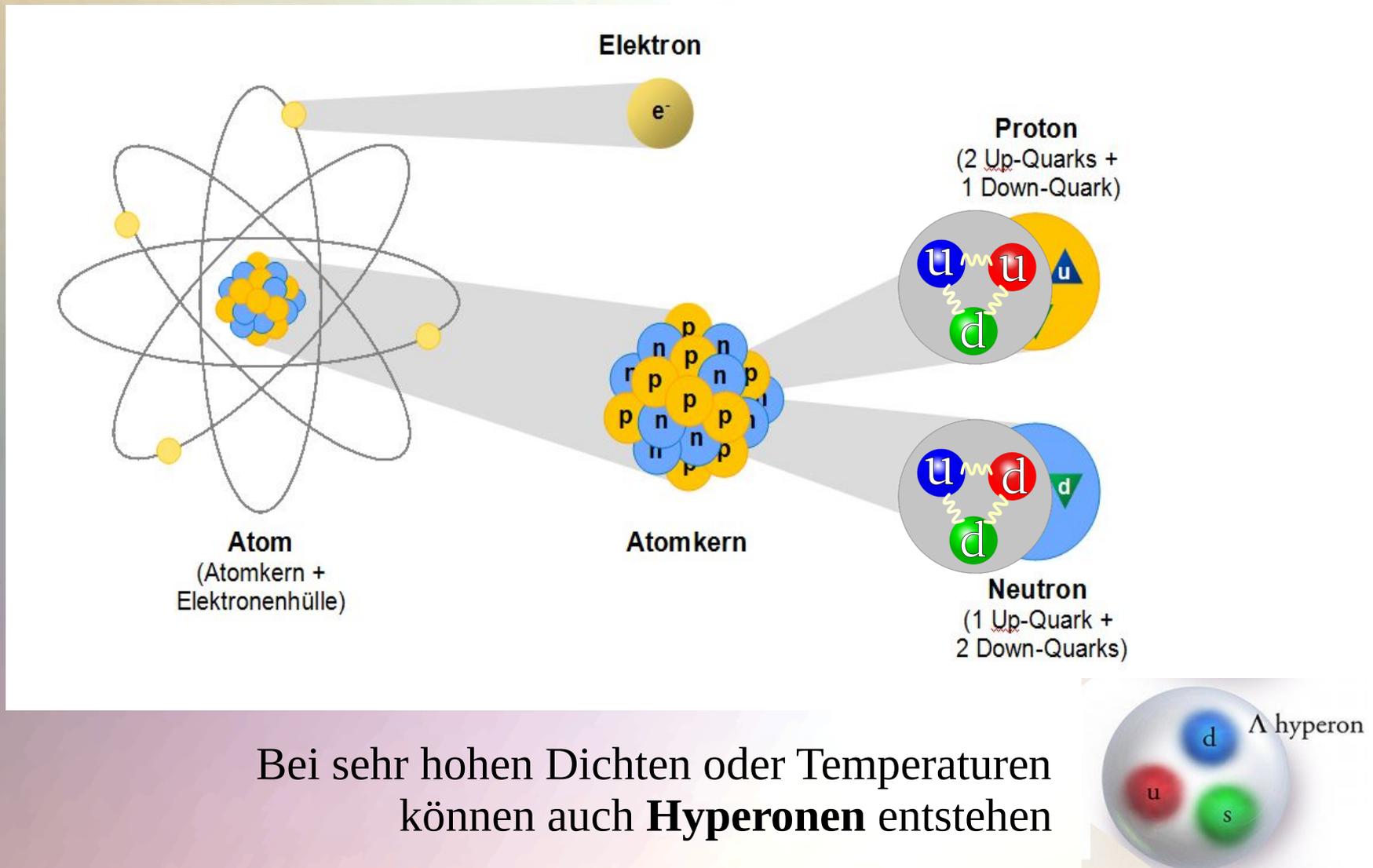
Vor etwa 100 Jahren präsentierte Albert Einstein die Grundgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie – die sogenannte **Einstein-Gleichung**:

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

Raumzeitkrümmung
Eigenschaften der Metrik
der Raumzeit

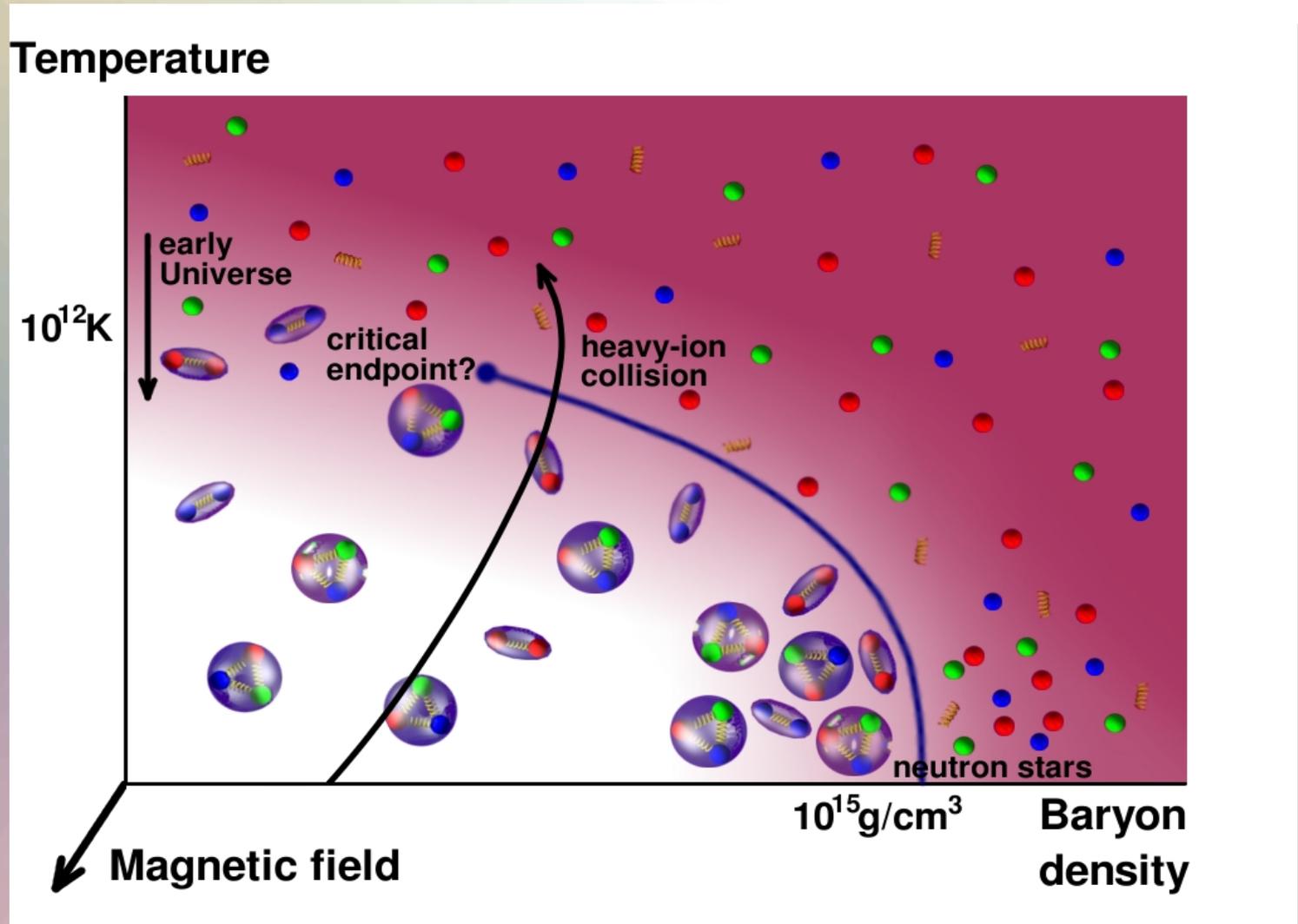
Masse, Energie und Impuls des Systems
Zustandsgleichung der Materie
Druck (Dichte , Temperatur)

Elementare Materie



Bei sehr hohen Dichten oder Temperaturen können auch **Hyperonen** entstehen

Die Zustandsgleichung der Materie und das Quark-Gluon-Plasma



Neutronensterne, 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. Theoretische Modellierung mittels unterschiedlicher effektiver Elementarteilchenmodelle.

Model 1

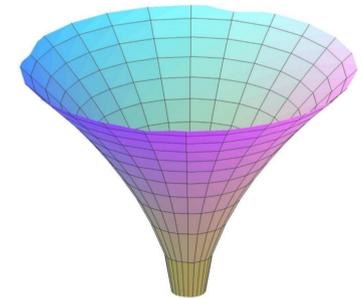
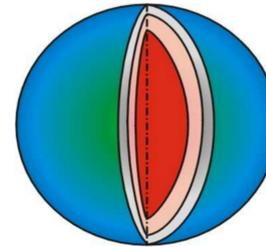
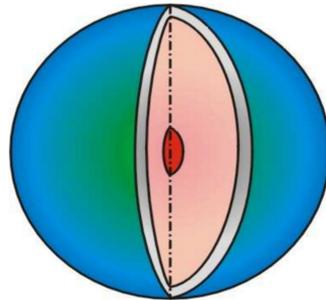
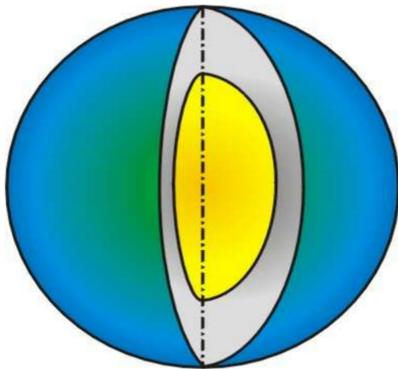
Model 2

Neutron Stars

Hybrid Stars

Quark Stars

Black Holes



$$\rho_c = \rho_0$$

$$\approx 2 \rho_0$$

$$\approx 5 \rho_0$$

... ∞

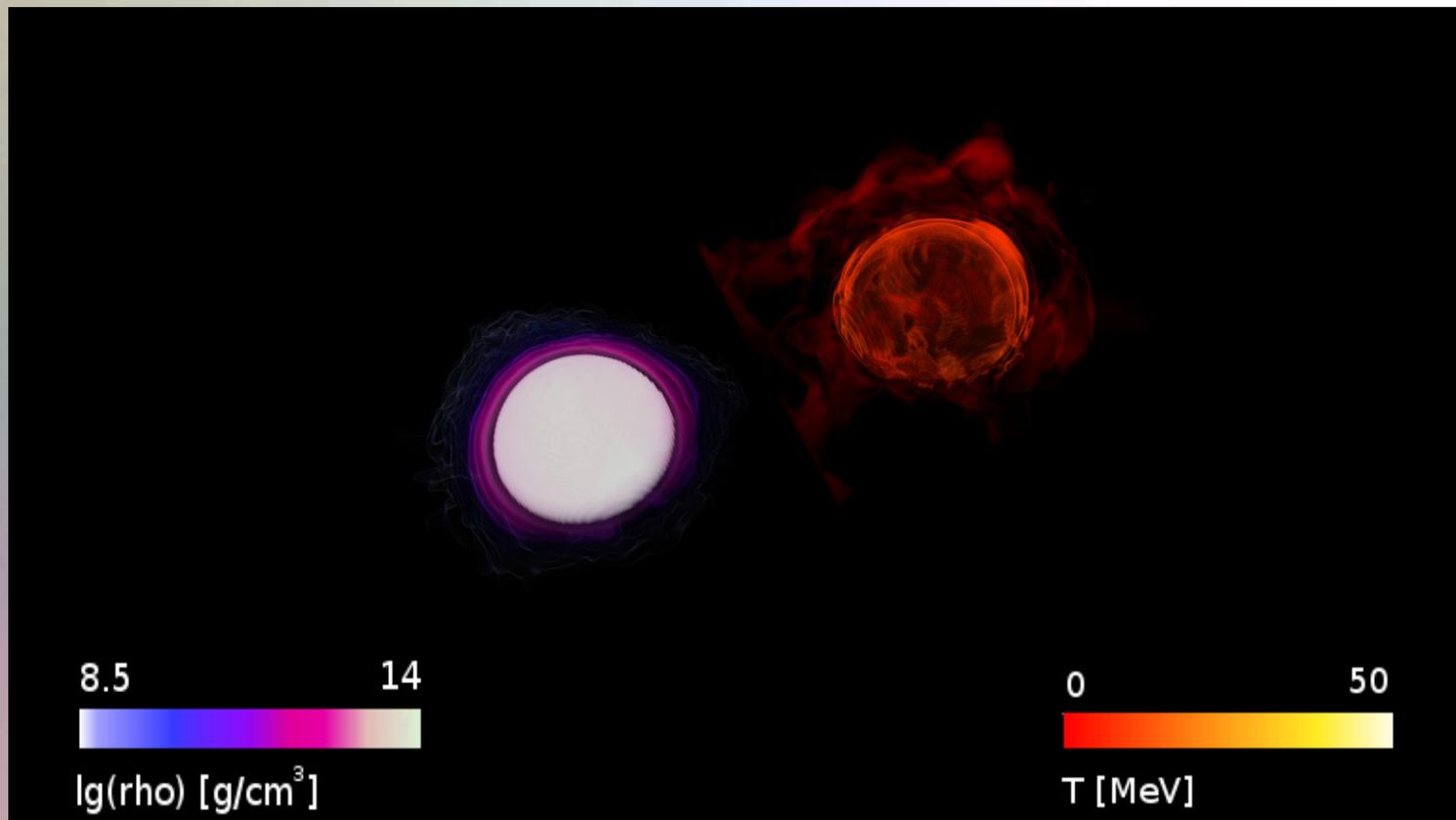
Central density ρ_c in the star

$$(\rho_0 := 0.15/\text{fm}^3)$$

Computersimulationen von Neutronenstern Kollisionen

Dichte der
Neutronenstern Materie

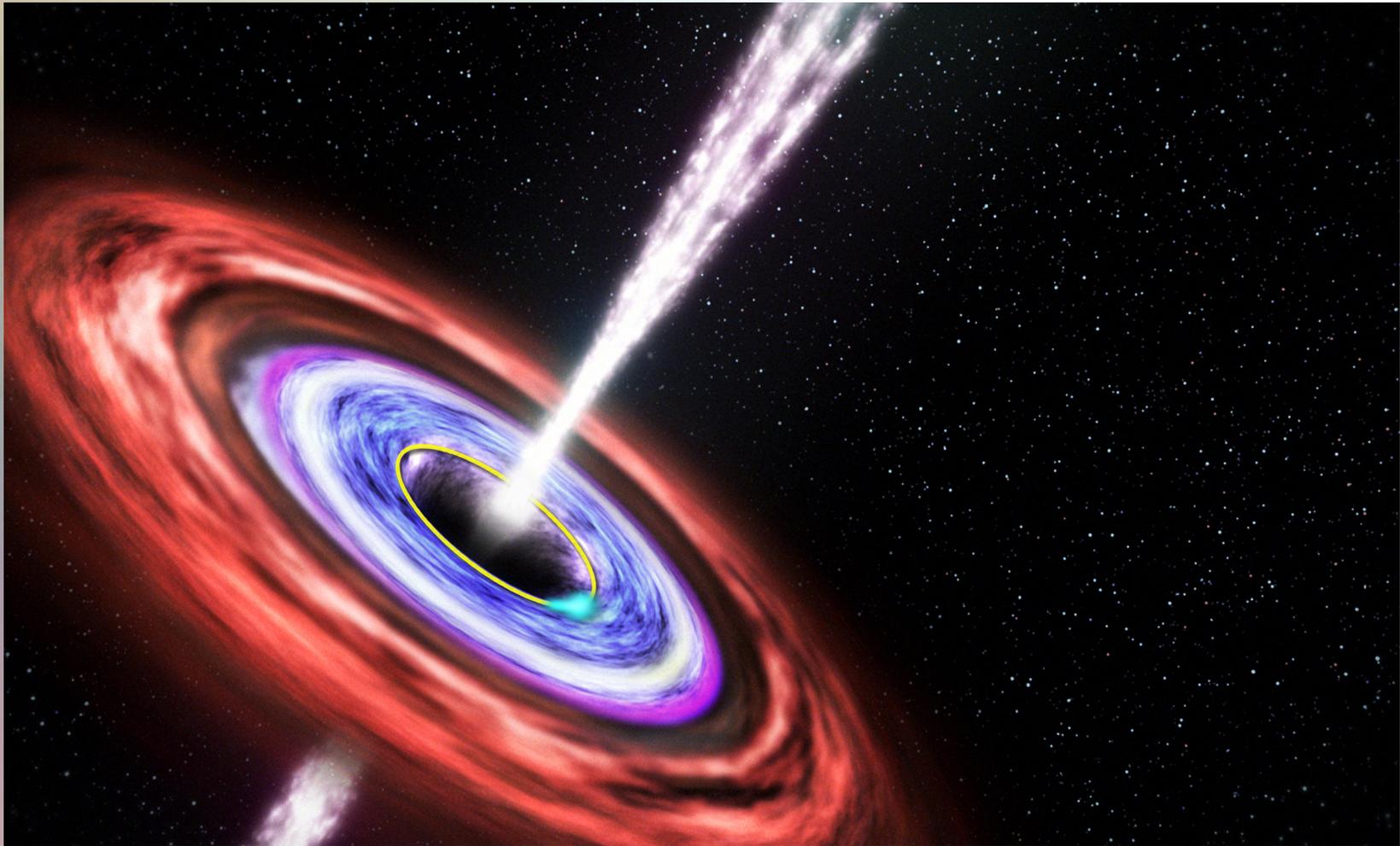
Temperatur der
Neutronenstern Materie



Credits: Cosima Breu, David Radice und Luciano Rezzolla

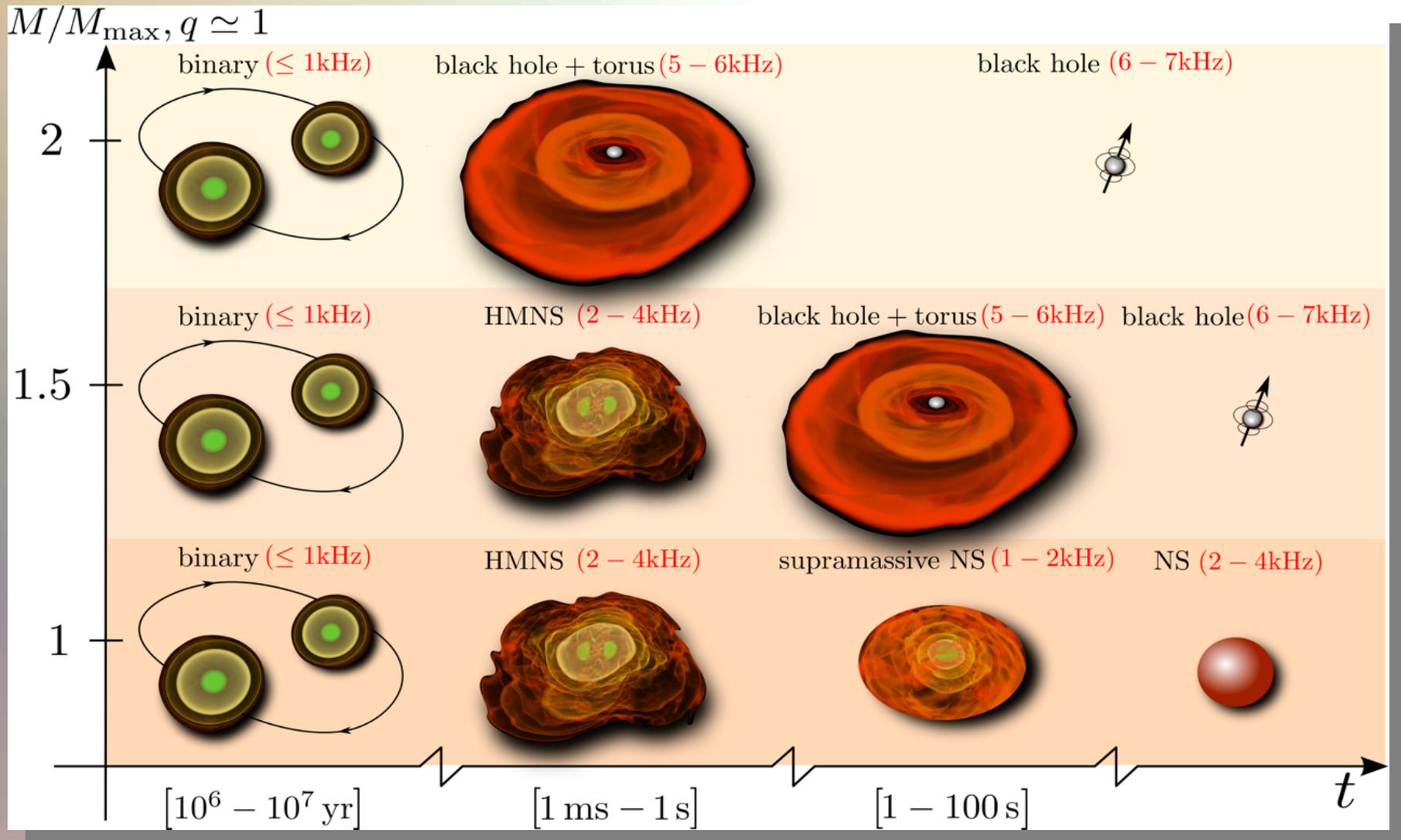
Gammastrahlen-Blitze

Neutronenstern Kollisionen dienen als ein Erklärungsmodell der schon oft beobachteten kurzen Gammastrahlen-Blitze (dauern zwischen 0.01 und 2 Sekunden).

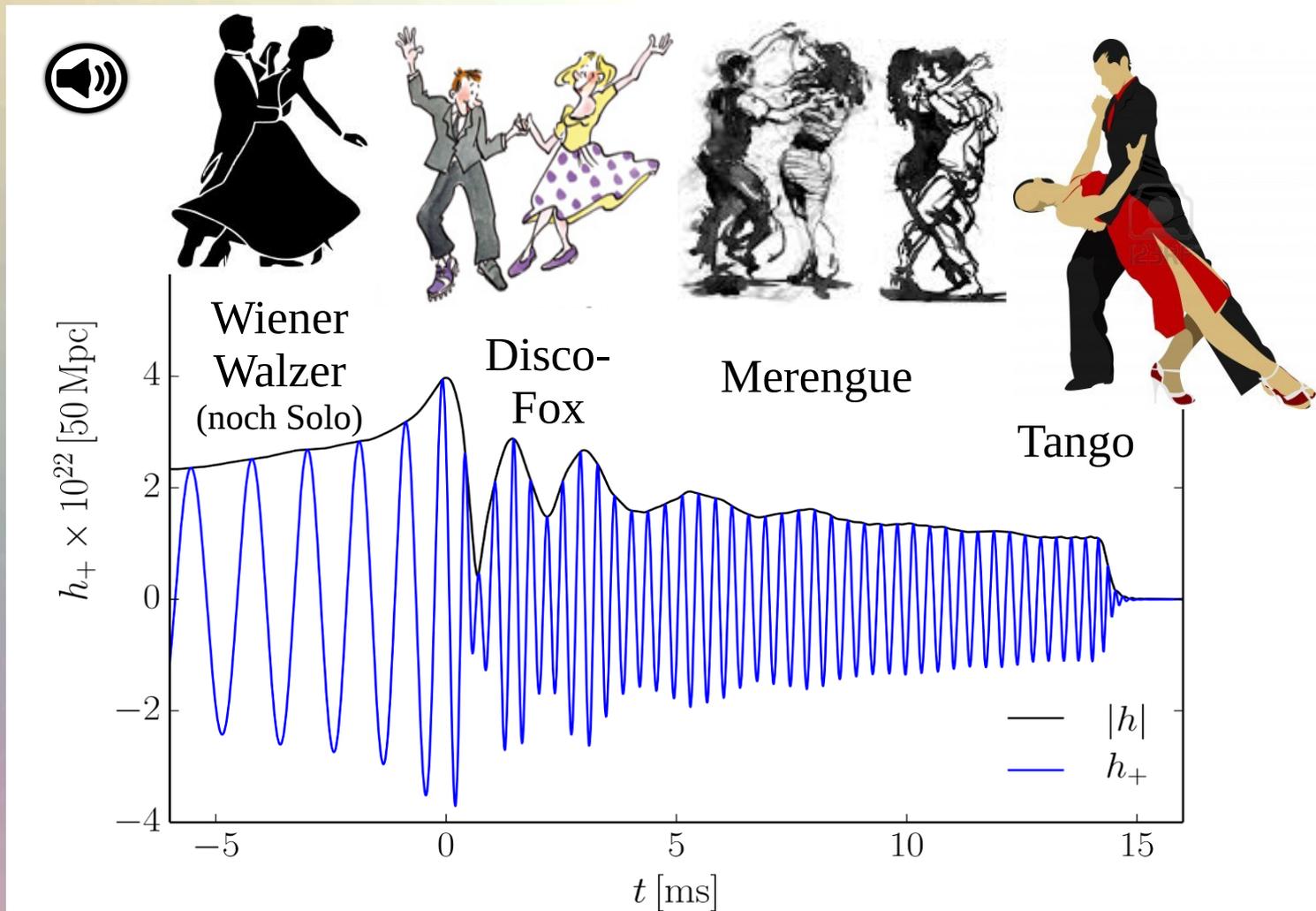


Neutronenstern Kollisionen

Drei mögliche Szenarien



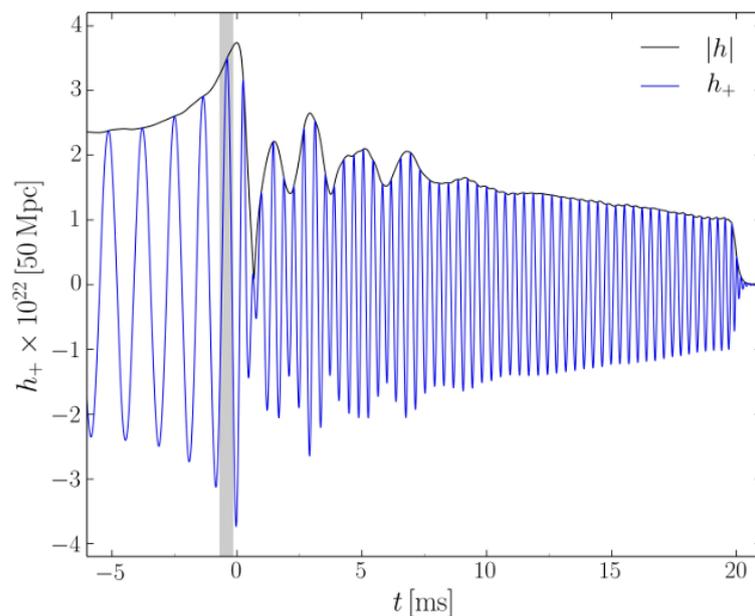
Der Tanz der Neutronensterne



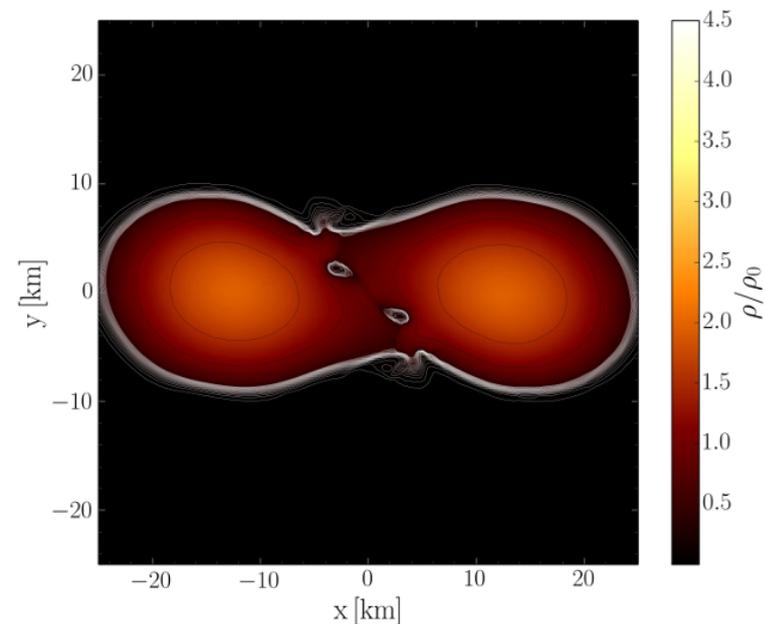
Die Dichtestruktur im Hypermassiven Neutronenstern

Model 1: Neutronen mit kleinen Beimischungen von Protonen, Elektronen und
bei hohen Dichten auch hyperonische Teilchen

Ausgangsmassen der beiden Neutronensterne: 1.35 Sonnenmassen



Amplitude der emittierten Gravitationswelle
im Abstand von 50 Mpc

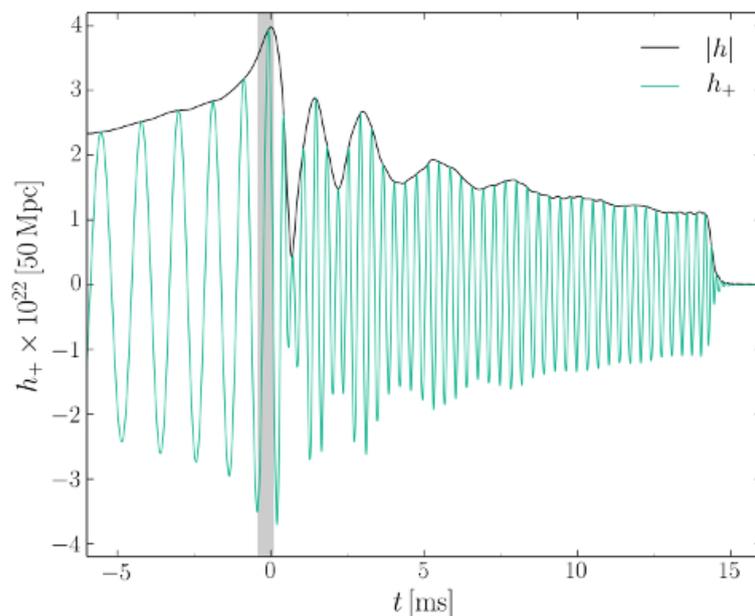


Die Teilchendichte $\rho(x,y)$
in der äquatorialen Ebene in Einheiten der
normalen nuklearen Dichte ρ_0

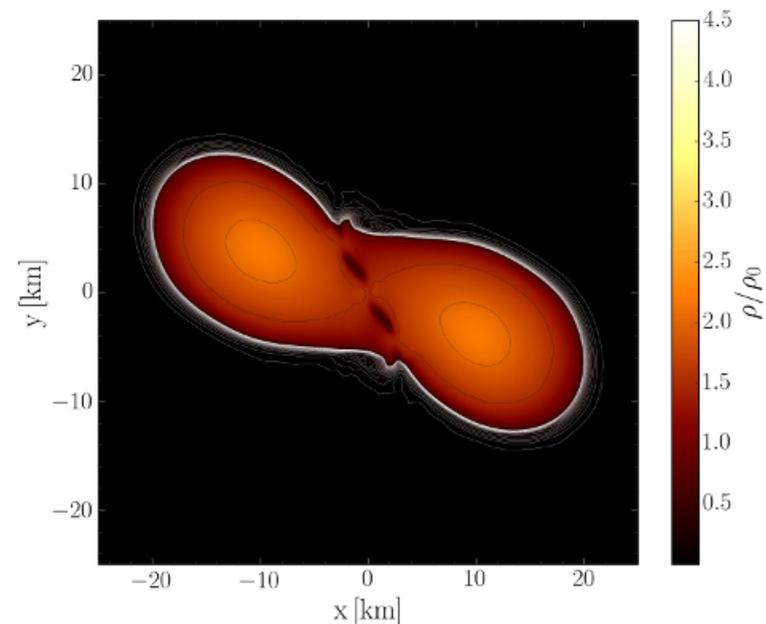
Die Dichtestruktur im Hypermassiven Neutronenstern

Model 2: Neutronen mit kleinen Beimischungen von Protonen, Elektronen und
bei hohen Dichten ($3\rho_0$) gemischte Quarkphase

Ausgangsmassen der beiden Neutronensterne: 1.35 Sonnenmassen

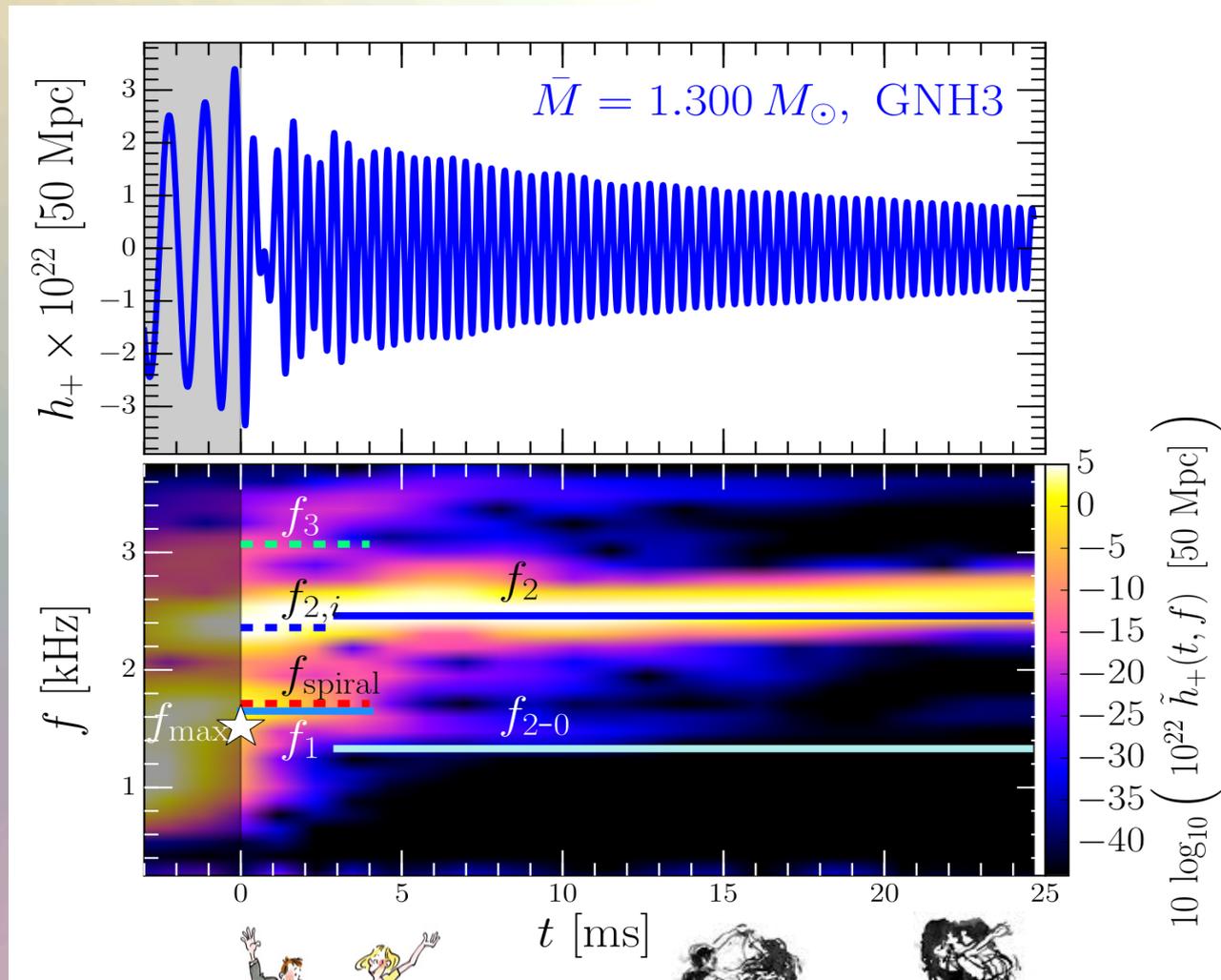


Amplitude der emittierten Gravitationswelle
im Abstand von 50 Mpc

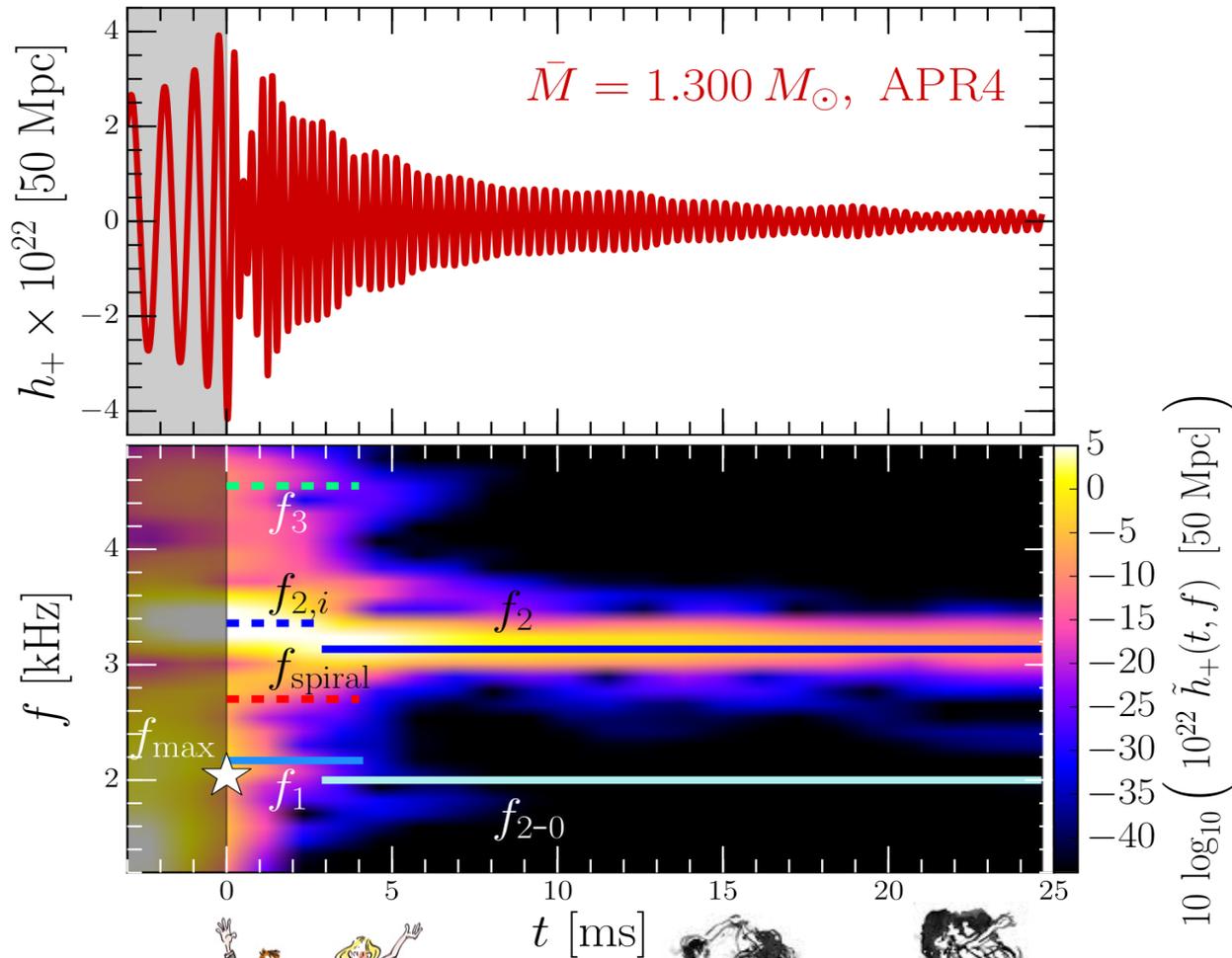


Die Teilchendichte $\rho(x,y)$
in der äquatorialen Ebene in Einheiten der
normalen nuklearen Dichte ρ_0

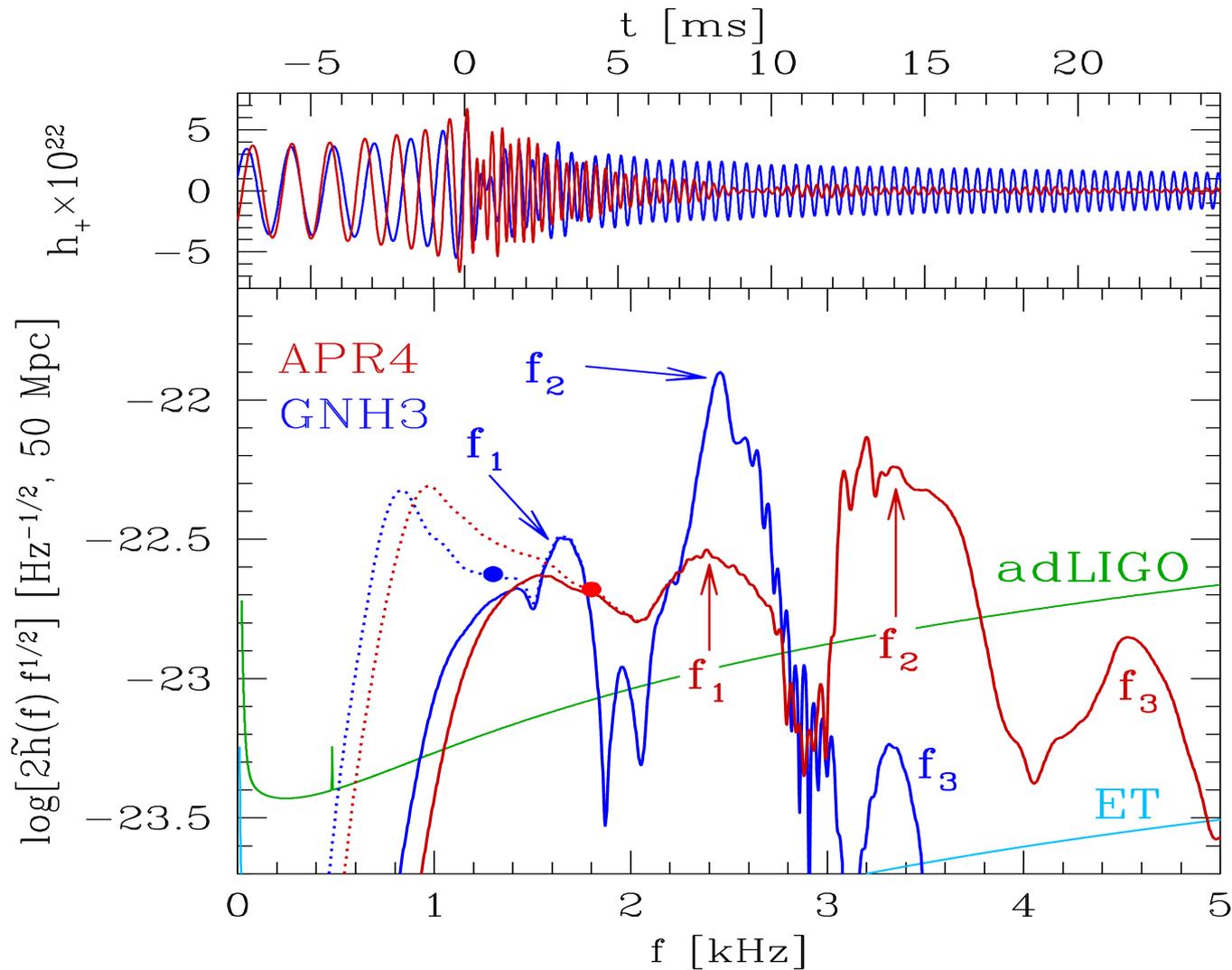
Das Frequenz Spektrum



Das Frequenz Spektrum



Gravitationswellen-Spektrum und die Eigenschaften der elementaren Materie

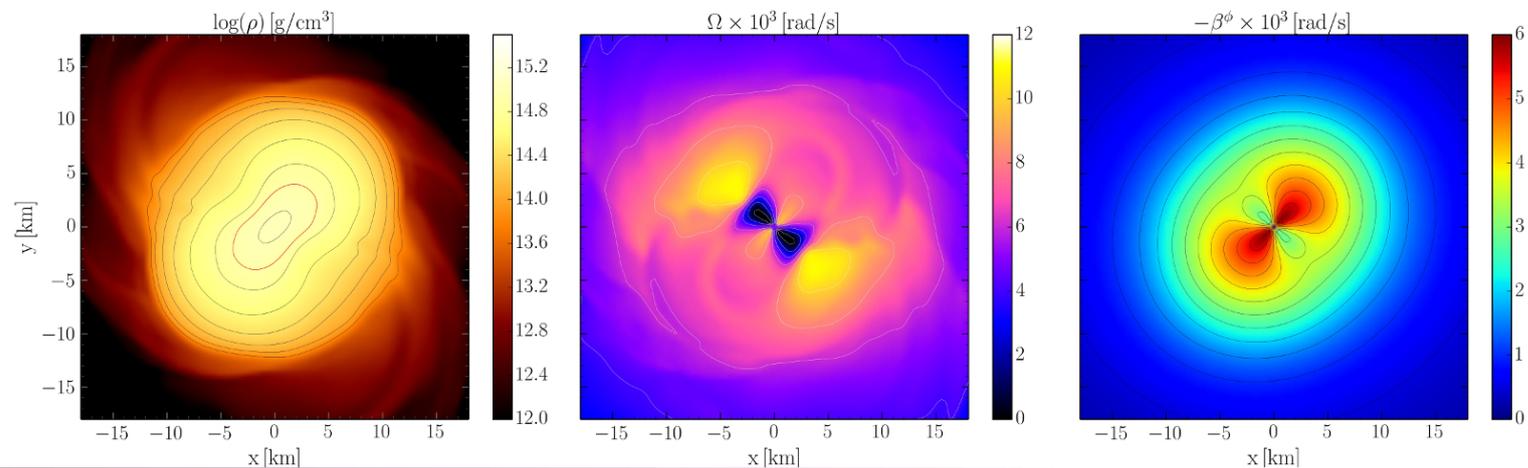


Der Mitführungseffekt der Raumzeit in der „Merengue“ Phase

Die Teilchendichte
 $\text{Log}(\rho(x,y))$
in der äquatorialen Ebene
in Einheiten $[\text{g}/\text{cm}^3]$

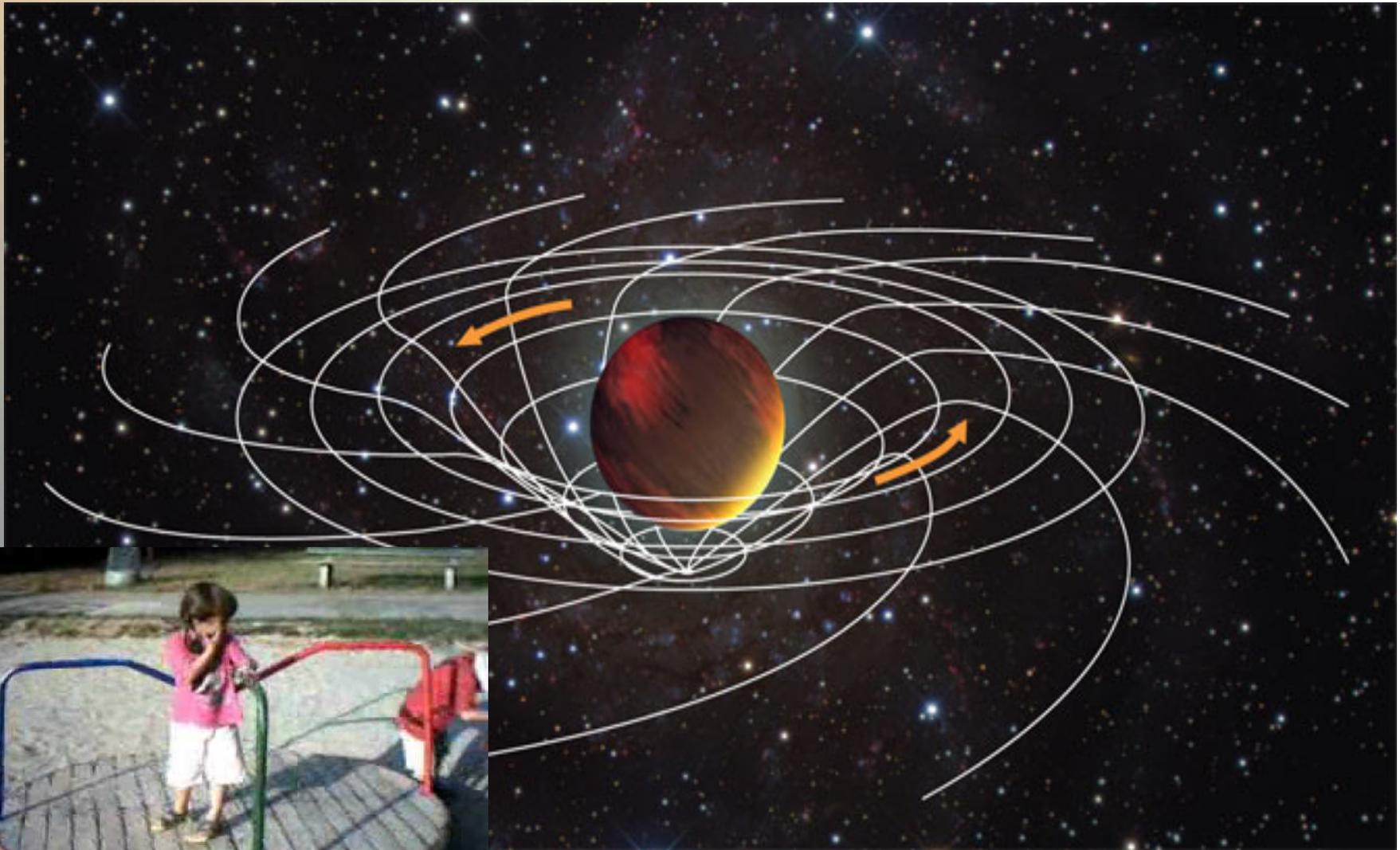
Äquatoriales Profil der
Rotationsfrequenz der
Neutronenstern Materie

Wie stark rotiert die Raumzeit
im Inneren des
Hypermassiven Neutronensterns

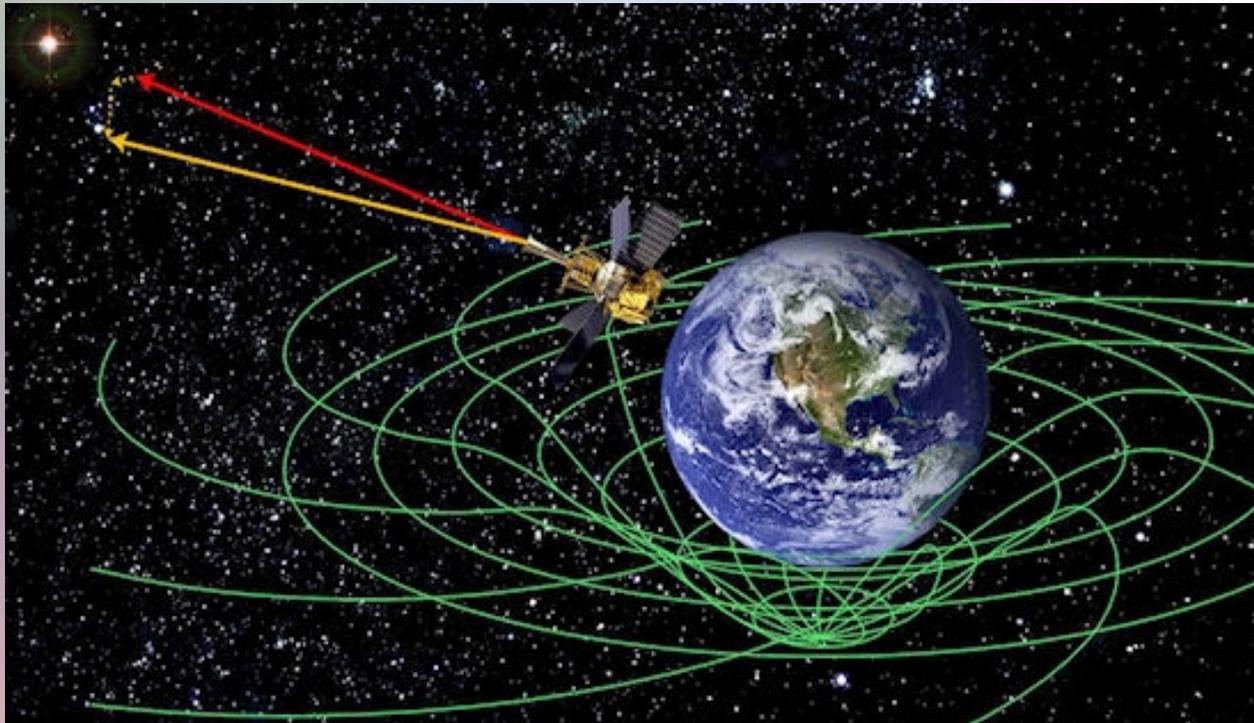


Credits: Luke Bovard und Luciano Rezzolla

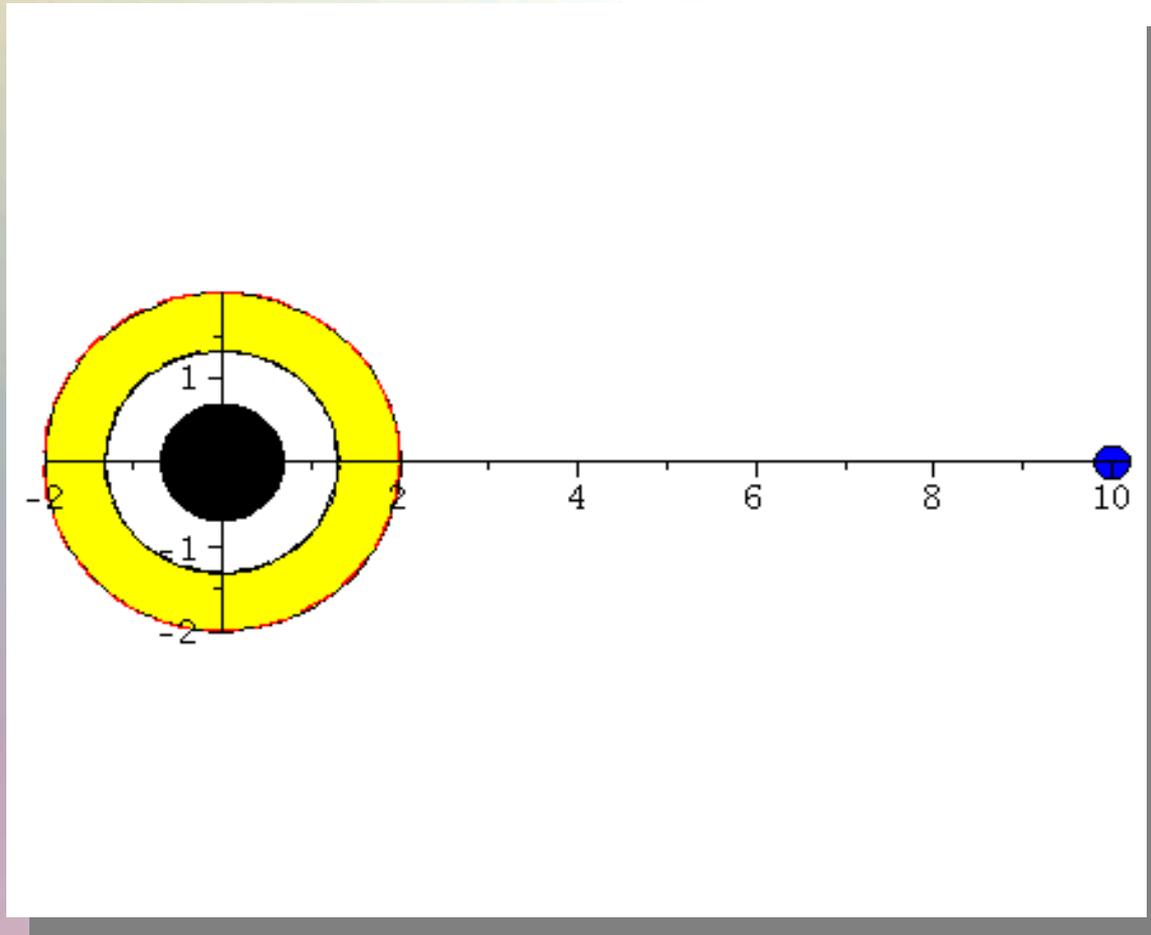
Der Mitführungseffekt der Raumzeit



Experimente zur Überprüfung des
Lense-Thirring Effektes:
Laser Relativity Satellite (LARES)
und Gravity Probe B



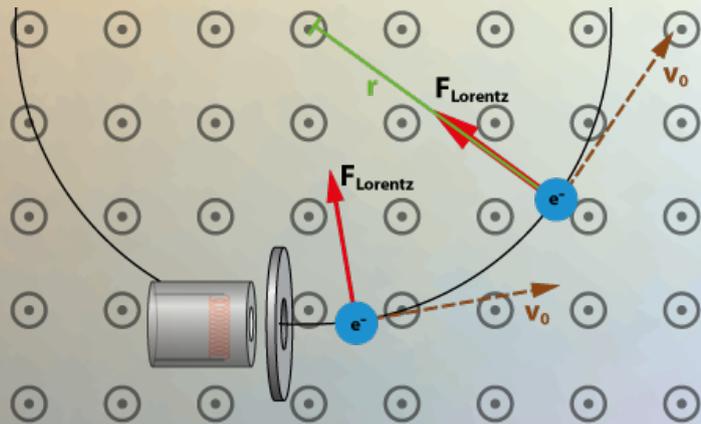
Der „Frame-Dragging“ Effekt



Roter Probekörper fällt in ein nicht rotierendes schwarzes Loch

Blauer Probekörper fällt in ein (entgegen dem Uhrzeigersinn) rotierendes schwarzes Loch

Der gravitomagnetische Effekt

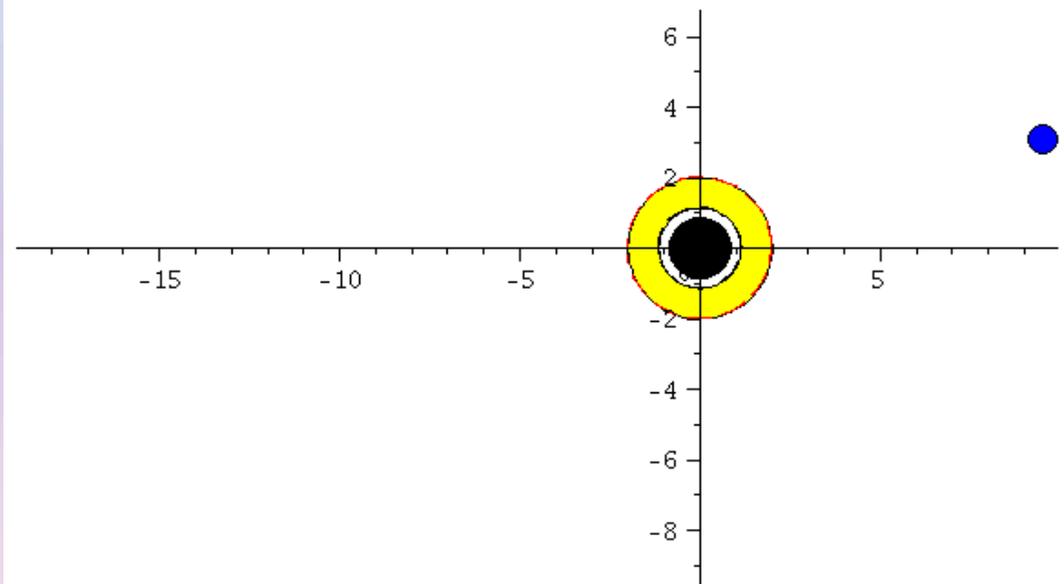


Grüner Probekörper bewegt sich um ein nicht rotierendes schwarzes Loch

Blauer Probekörper um ein (entgegen dem Uhrzeigersinn) rotierendes schwarzes Loch

Roter Probekörper um ein (im Uhrzeigersinn) rotierendes schwarzes Loch

Aufgrund des Mitführungseffektes der Raumzeit entsteht eine anscheinend zusätzliche Kraft, die in ähnlicher Weise wie die Lorentz Kraft wirkt.

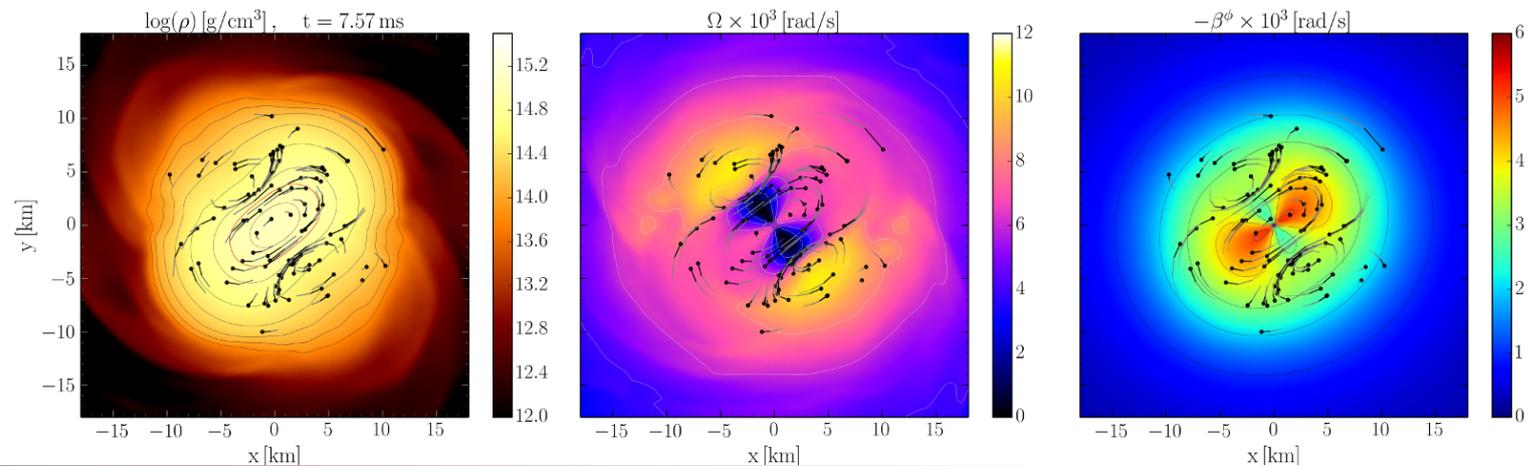


Der gravitomagnetische Effekt in der „Merengue“ Phase

Die Teilchendichte
 $\text{Log}(\rho(x,y))$
in der äquatorialen Ebene
in Einheiten $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Äquatoriales Profil der
Rotationsfrequenz der
Neutronenstern Materie

Wie stark rotiert die Raumzeit
im Inneren des
Hypermassiven Neutronensterns



Perspektive des Videos rotiert mit dem Hypermassiven Neutronenstern
Schwarze Linien markieren die Bewegung einzelner Flüssigkeitselemente

Credits: Luke Bovard und Luciano Rezzolla

Die Einstein Gleichung

Vor etwa 100 Jahren präsentierte Albert Einstein die Grundgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie – die sogenannte **Einstein-Gleichung**:

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

Raumzeitkrümmung
Eigenschaften der Metrik
der Raumzeit

Masse, Energie und Impuls des Systems
Zustandsgleichung der Materie
Druck (Dichte , Temperatur)

Neutronensterne und schwarze Löcher

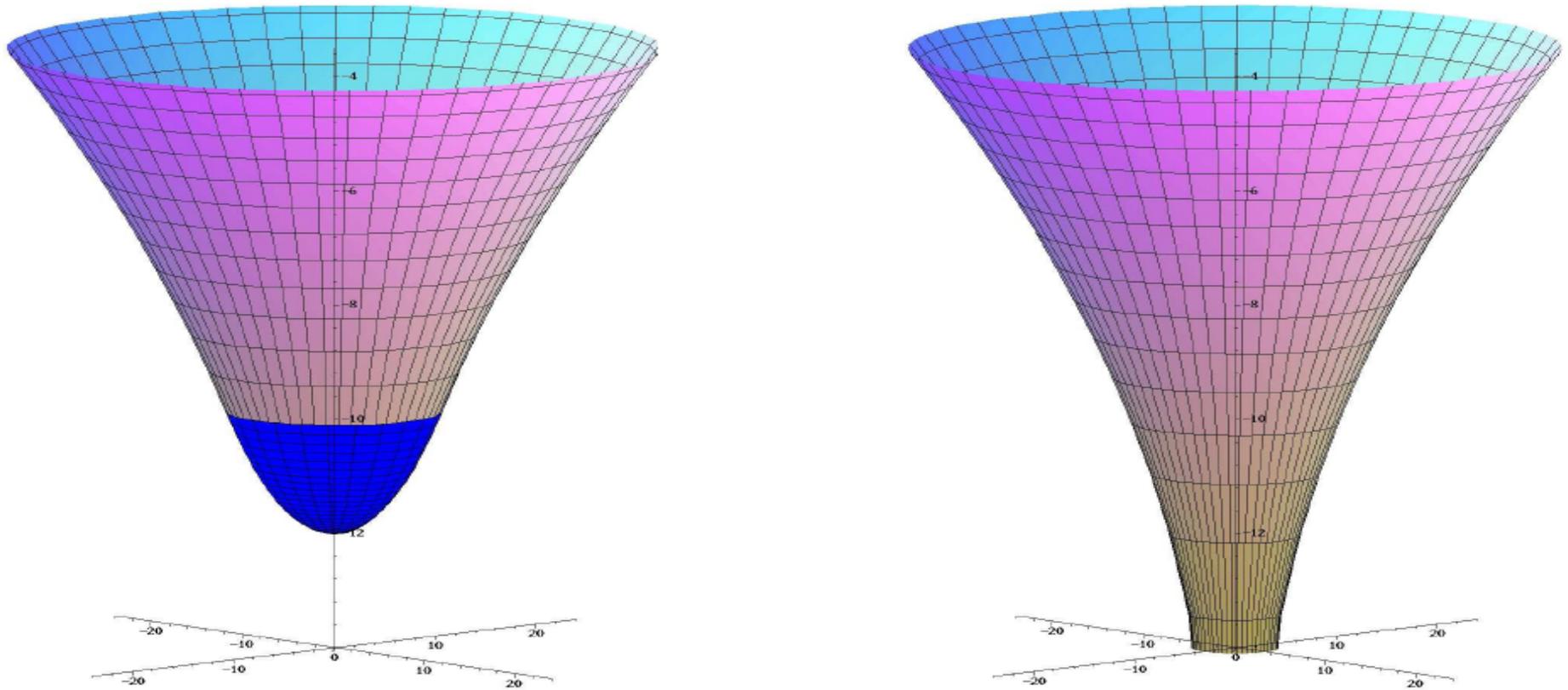
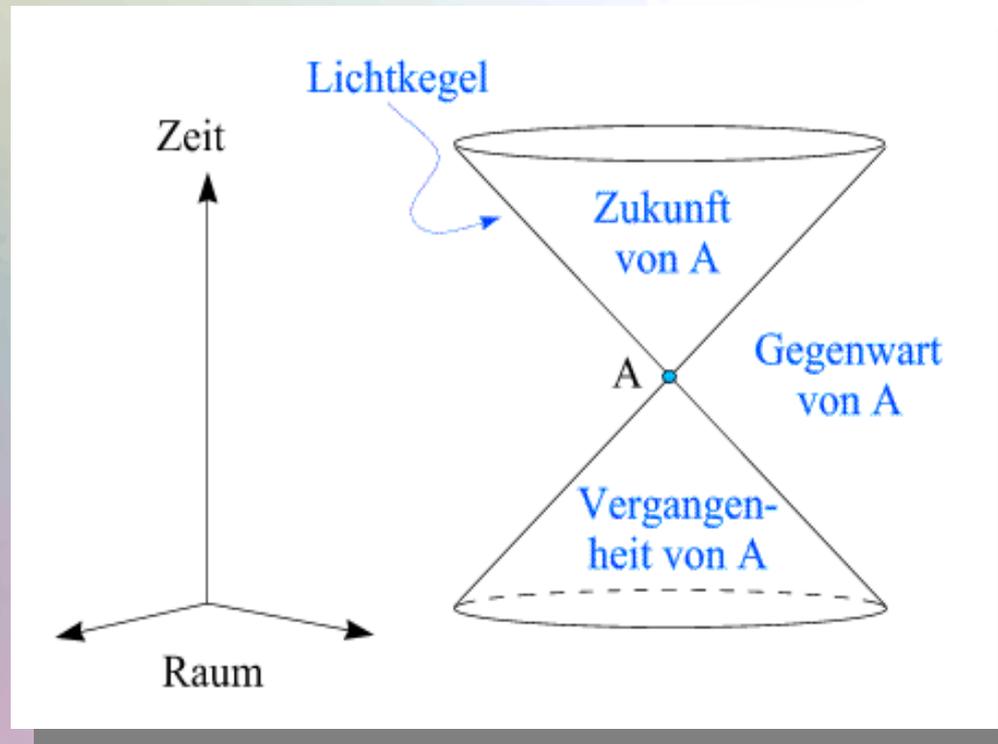


Abbildung 2.5: Eingebettetes Raumzeitdiagramm eines Neutronensterns (links) und eines schwarzen Loches (rechts) wobei $M = 1.4 M_{\odot}$ und die x- und y-Achse in Einheiten km dargestellt sind.

Raumzeit Diagramme



Raumzeit Struktur von schwarzen Löcher

Sichtweise von einem weit entfernten äußeren Beobachter

Ereignis-
horizont

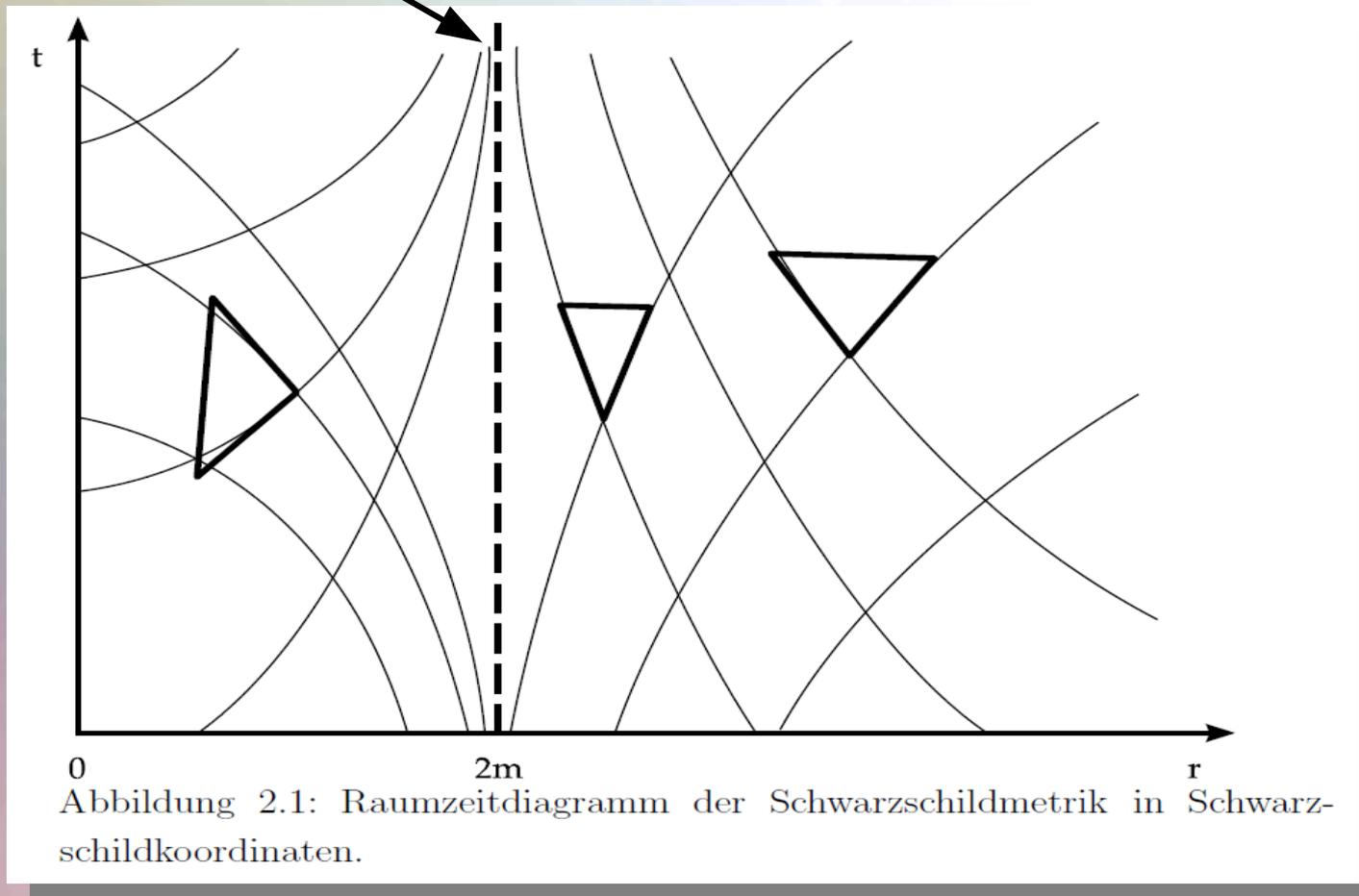


Abbildung 2.1: Raumzeitdiagramm der Schwarzschildmetrik in Schwarzschildkoordinaten.

Raumzeit Struktur von schwarzen Löcher

Sichtweise von einem in das schwarze Loch fallenden Beobachters

Ereignis-
horizont

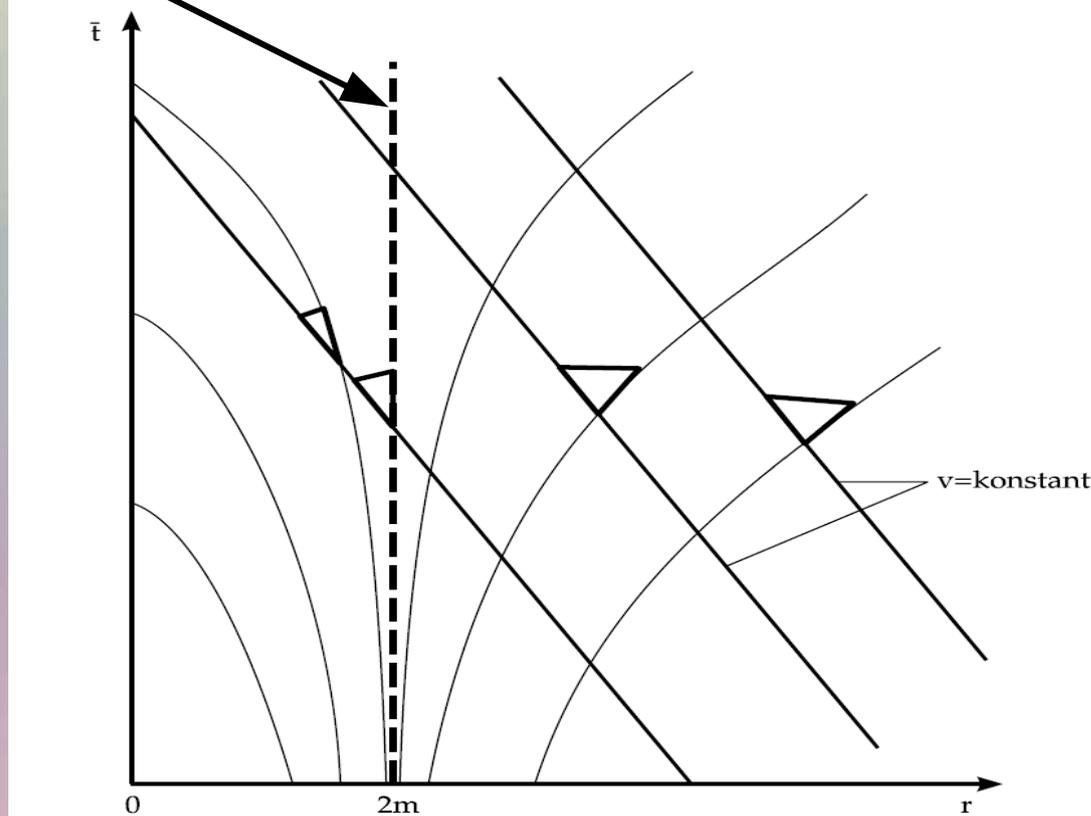
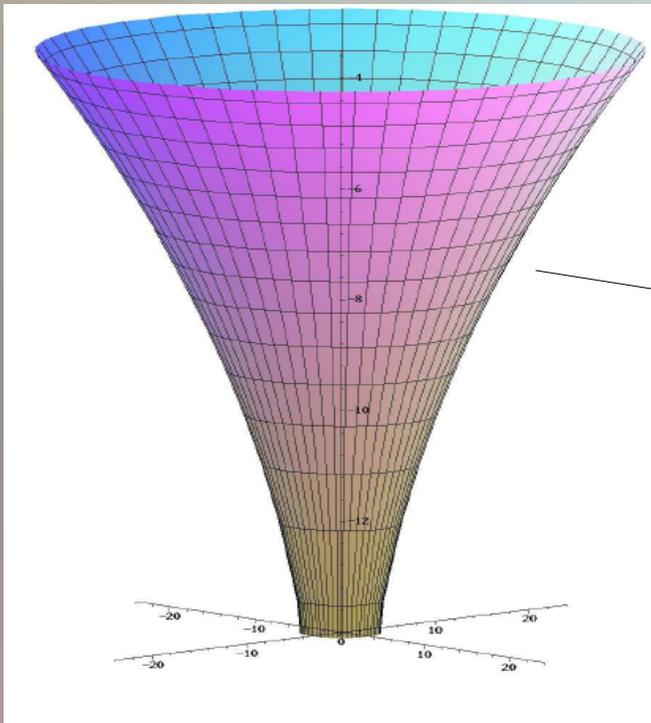


Abbildung 2.2: Raumzeitdiagramm der Schwarzschildmetrik in avancierten Eddington-Finkelstein Koordinaten.

Der Raumzeit-Trichter im Reichstagsgebäude



Veranschaulichung des Ereignishorizonts im Reichstagsgebäude

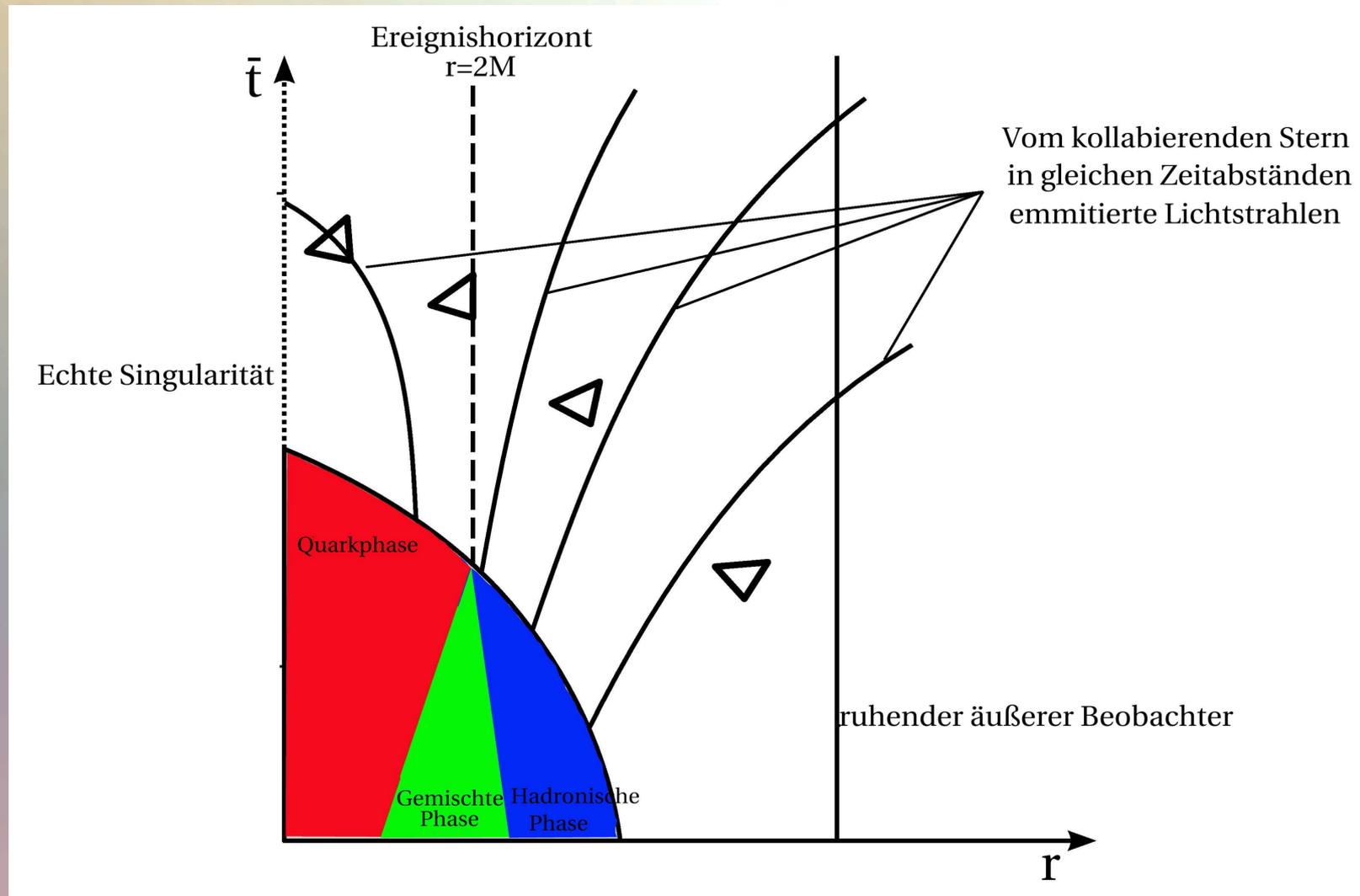


Ereignis-
horizont

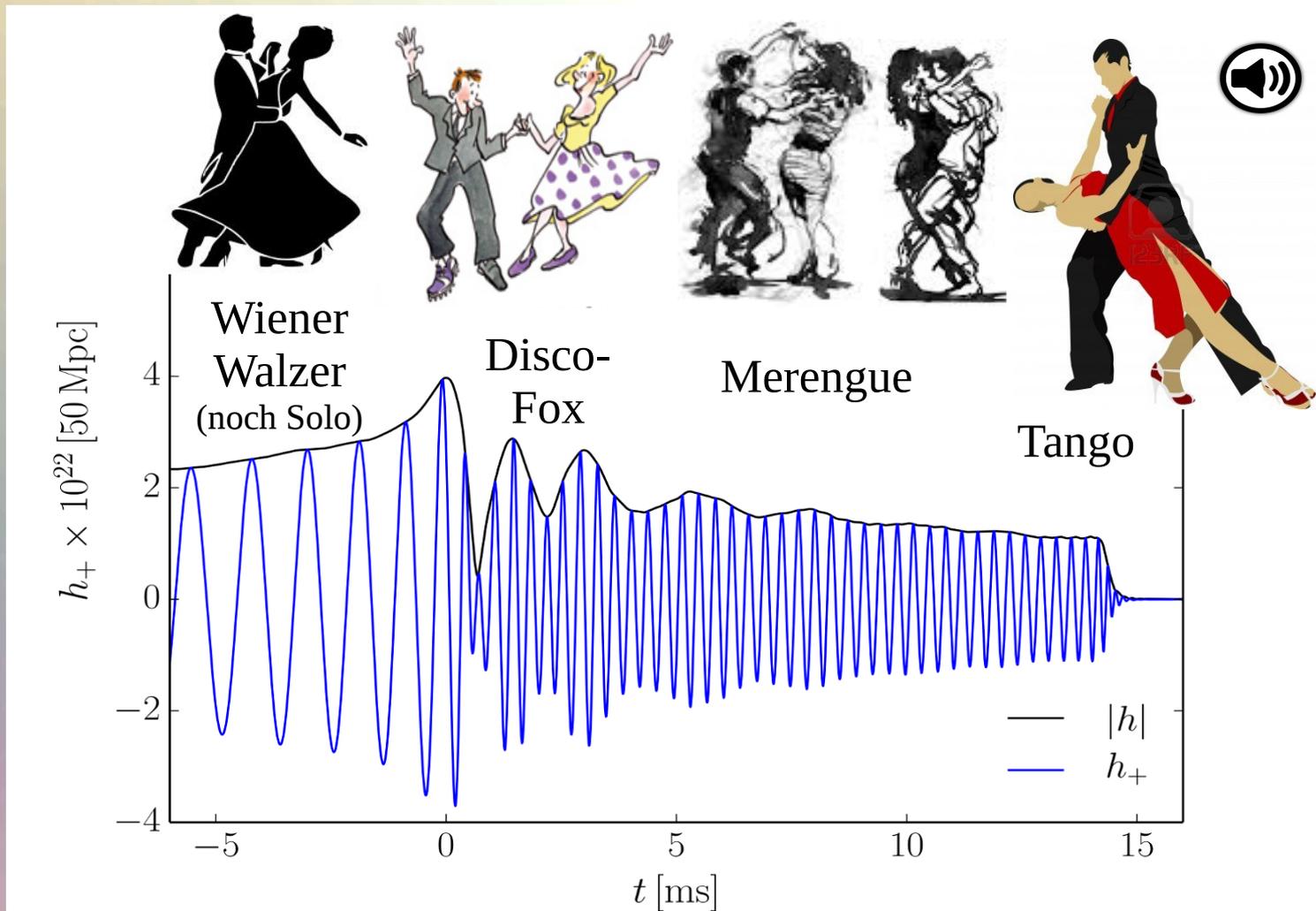
Ereignishorizont

Echte Singularität

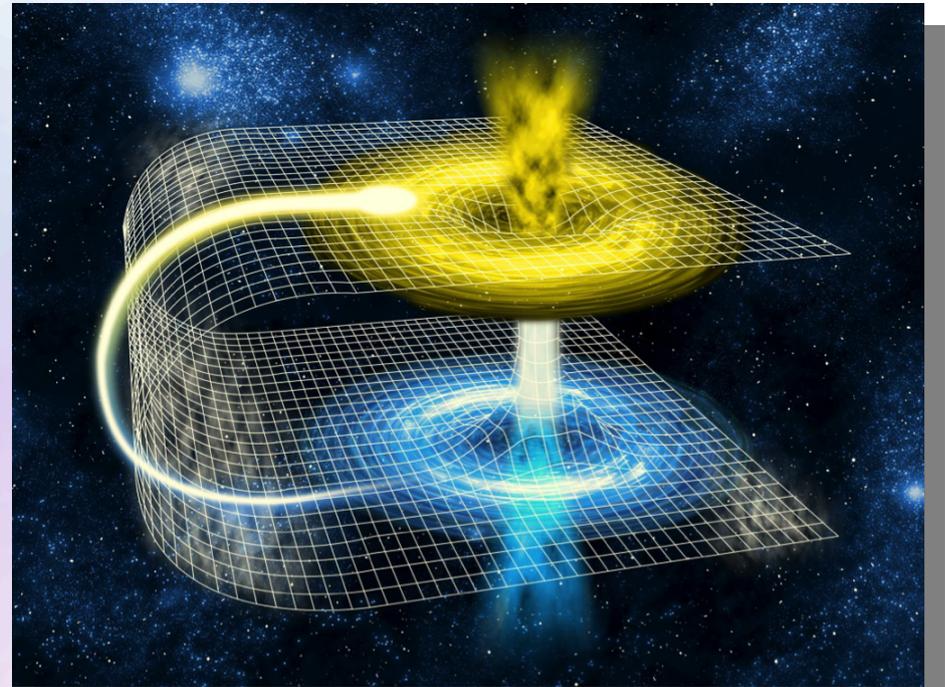
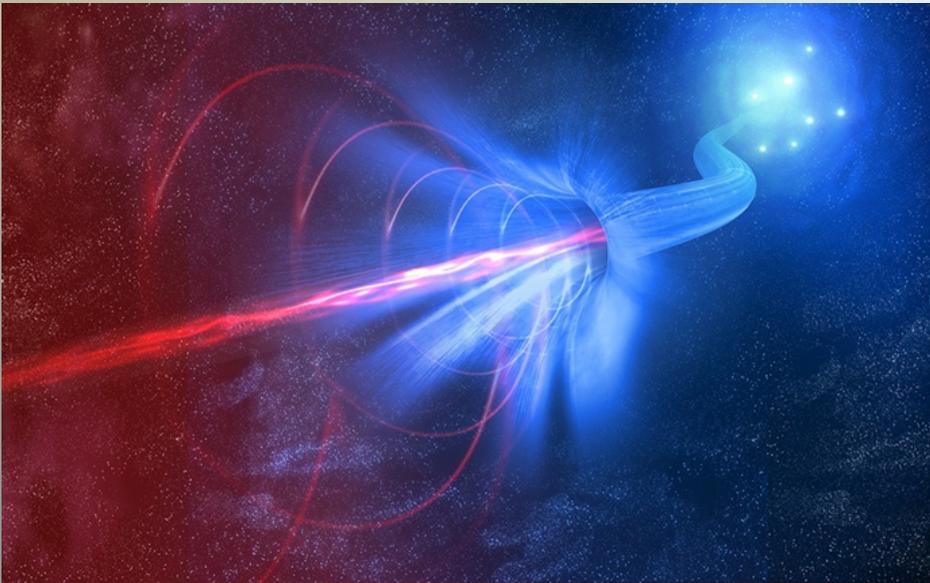
Der Kollaps zum schwarzen Loch



Der Tanz der Neutronensterne



Vielleicht doch ein Leben hinter dem Ereignishorizont



Wurmlöcher: Schwarzes Loch + Weißes Loch