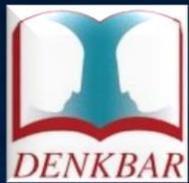


Gravitationswellen und Quantenspieltheorie erweitern den Horizont menschlicher Erkenntnis

DENKBAR-ONLINE

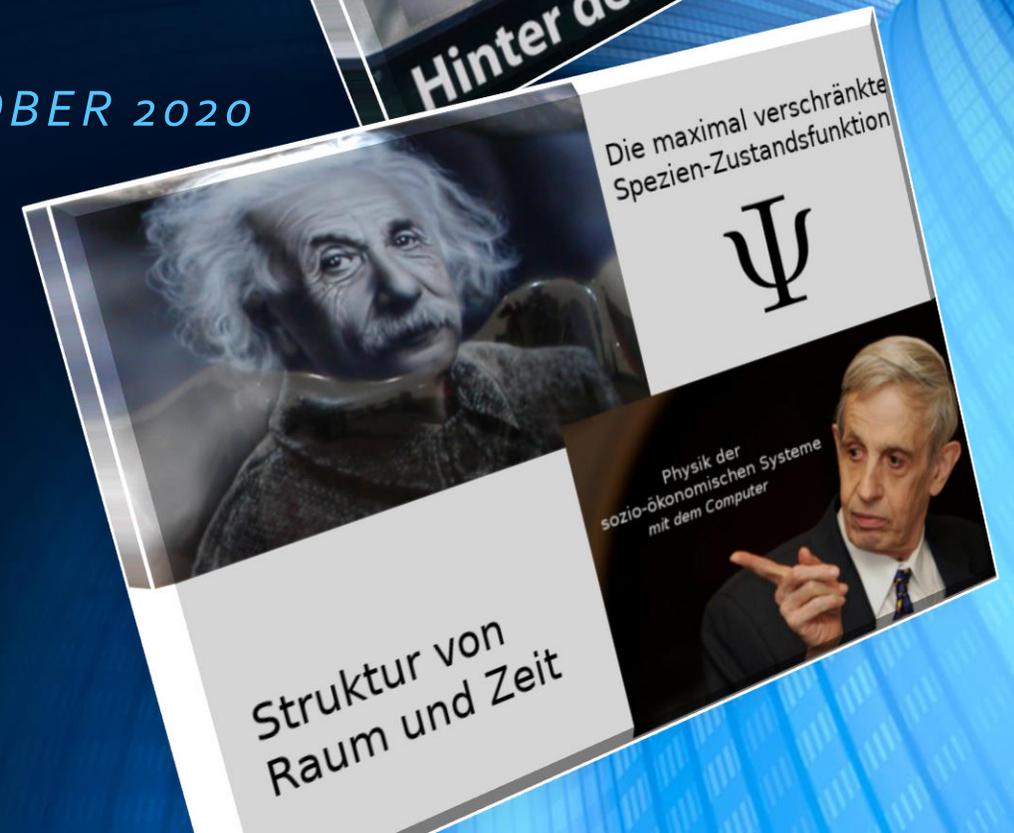


FRANKFURT AM MAIN, 12. OKTOBER 2020

MATTHIAS HANAUSKE

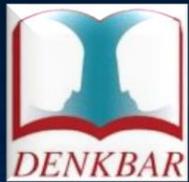
FRANKFURT INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT
INSTITUT FÜR THEORETISCHE PHYSIK
ARBEITSGRUPPE RELATIVISTISCHE ASTROPHYSIK
D-60438 FRANKFURT AM MAIN

Verein für Philosophie und Naturwissenschaft
Hinter der Natur



Gravitationswellen und Quantenspieltheorie erweitern den Horizont menschlicher Erkenntnis

DENKBAR-ONLINE



FRANKFURT AM MAIN, 12. OKTOBER 2020

MATTHIAS HANAUSKE

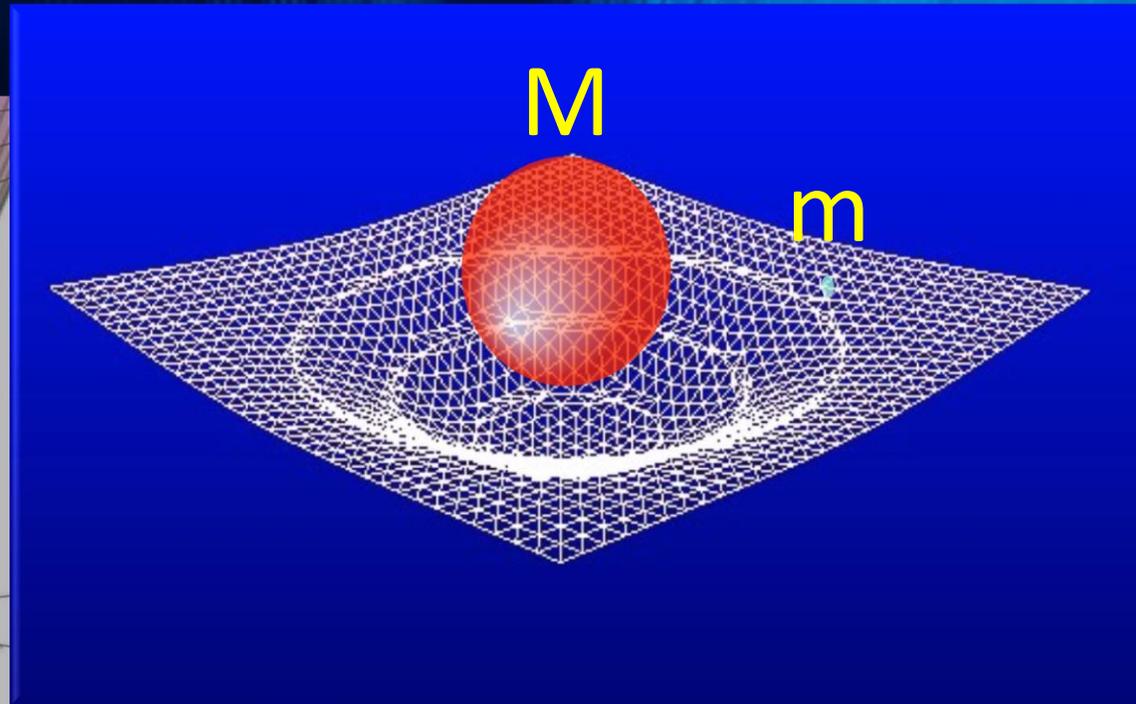
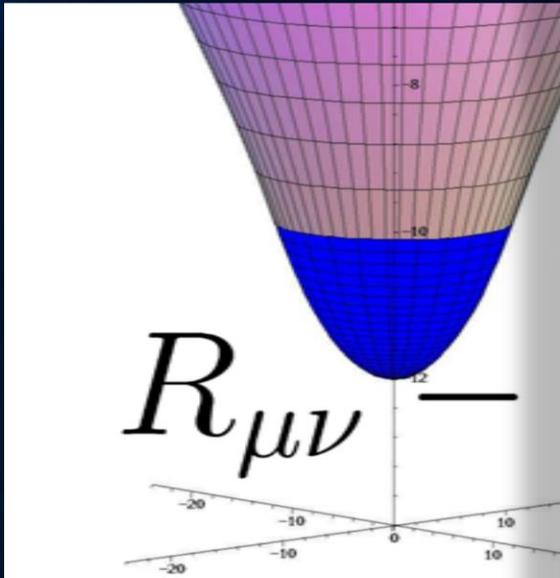
FRANKFURT INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT
INSTITUT FÜR THEORETISCHE PHYSIK
ARBEITSGRUPPE RELATIVISTISCHE ASTROPHYSIK
D-60438 FRANKFURT AM MAIN

Verein für Philosophie und Naturwissenschaft
Hinter der Natur



Allgemeinen Relativitätstheorie

Die Einsteingleichung



„Allgemeine Relativitätstheorie“ (ART) der

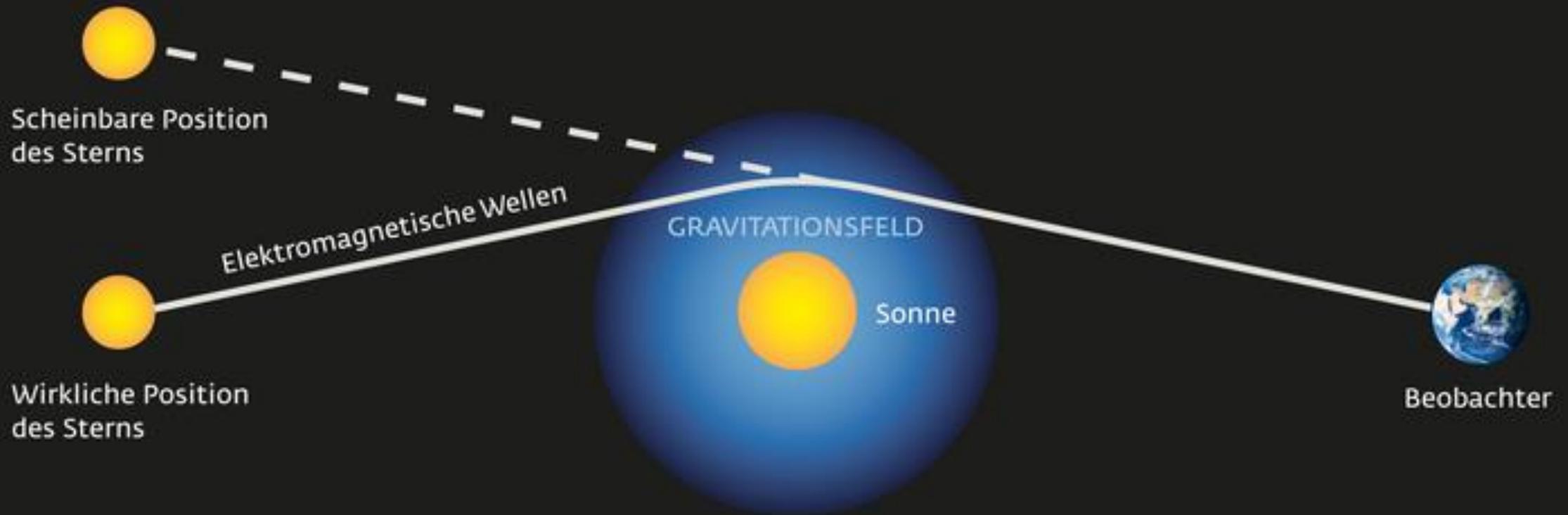
$T_{\mu\nu}$

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 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:

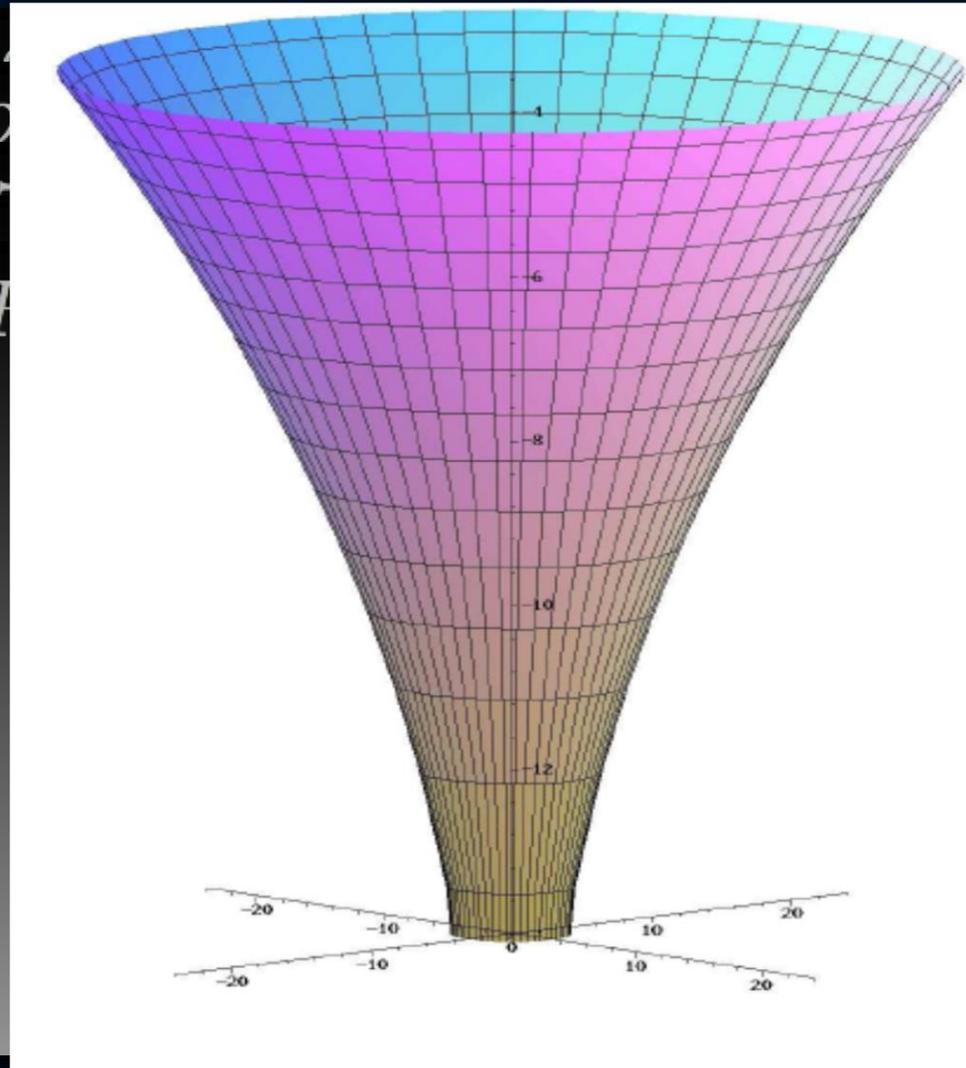


Der Einstein-Ring



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

Schwarze Löcher und der Raumzeit-Trichter



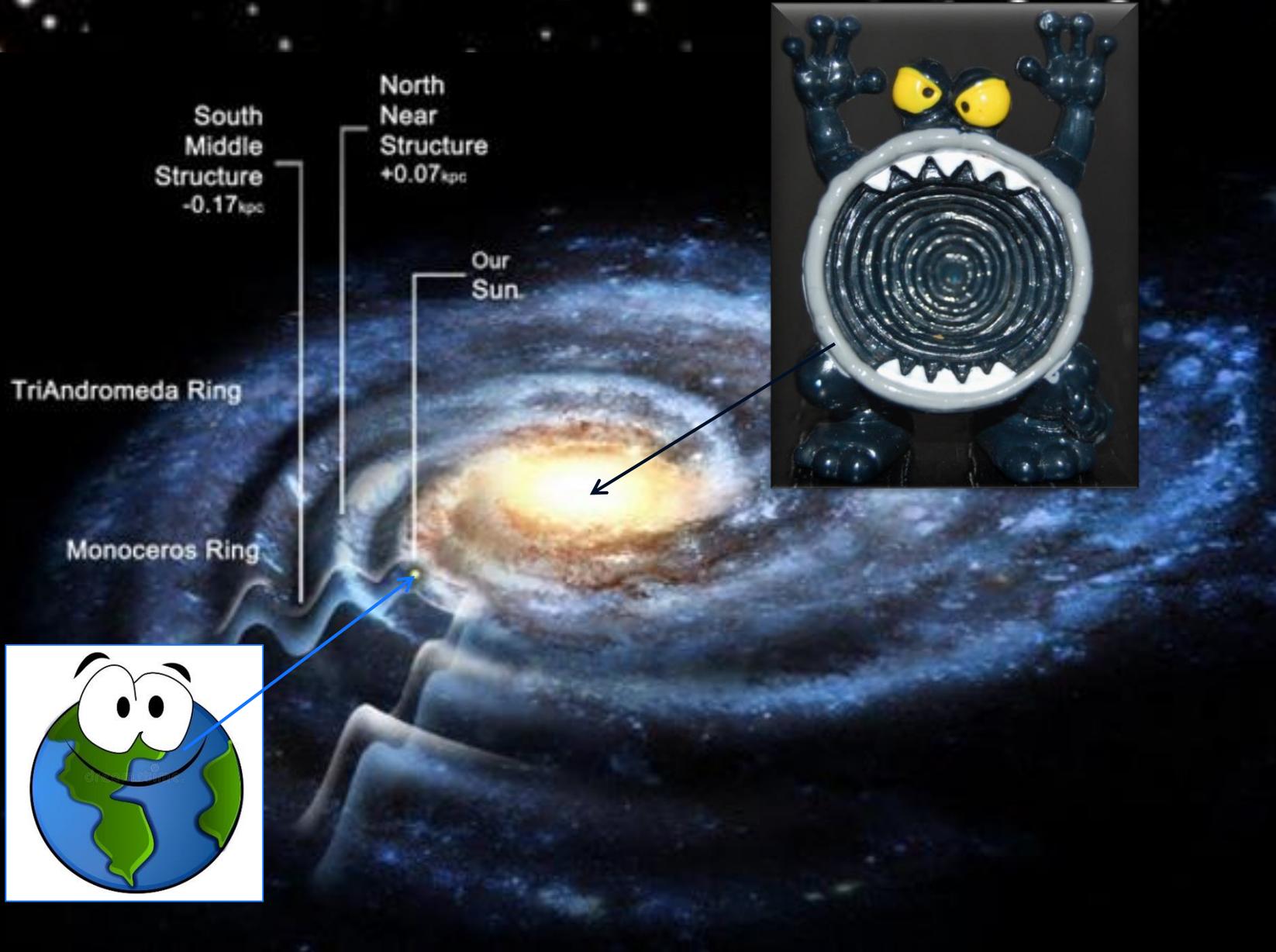
M: Masse des Objektes
R: Radius des Objektes
 g_{tt} : Metrik der Raumzeit

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

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

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

Das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie



Nobel Preis 2020

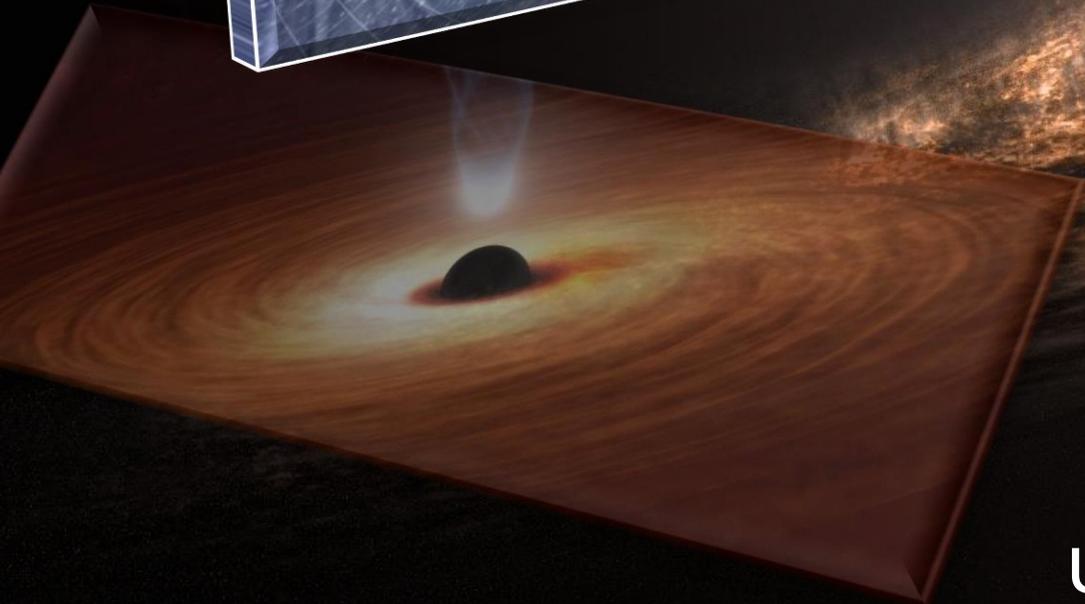
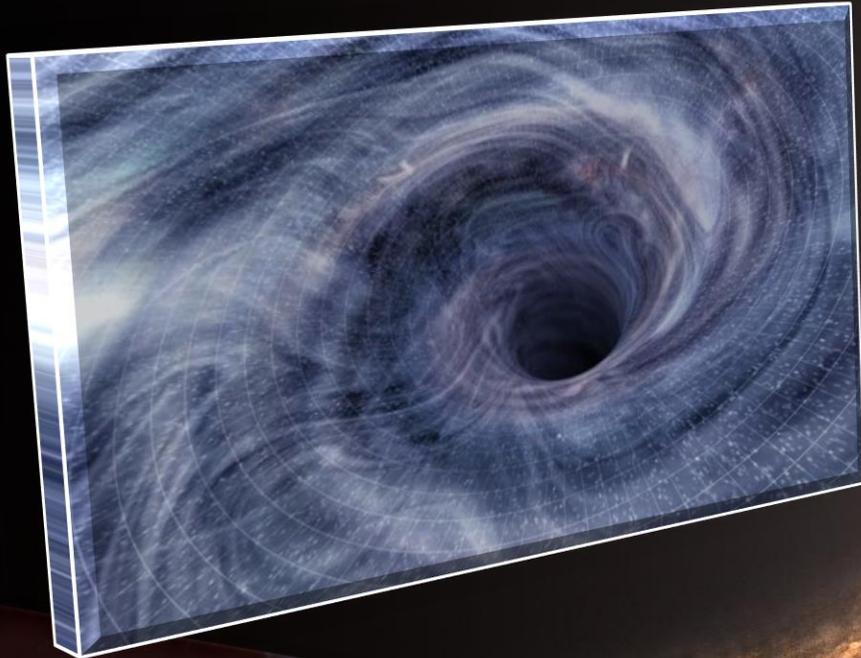
IN PHYSICS 2020

Illustrations: Niklas Elmehed



Für die Entdeckung, dass die Bildung von Schwarzen Löchern eine robuste Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie ist (R. Penrose) und die Entdeckung eines supermassiven kompakten Objekts im Zentrum unserer Galaxie (R. Genzel und).

Was sind schwarze Löcher?



und wie sehen sie aus?



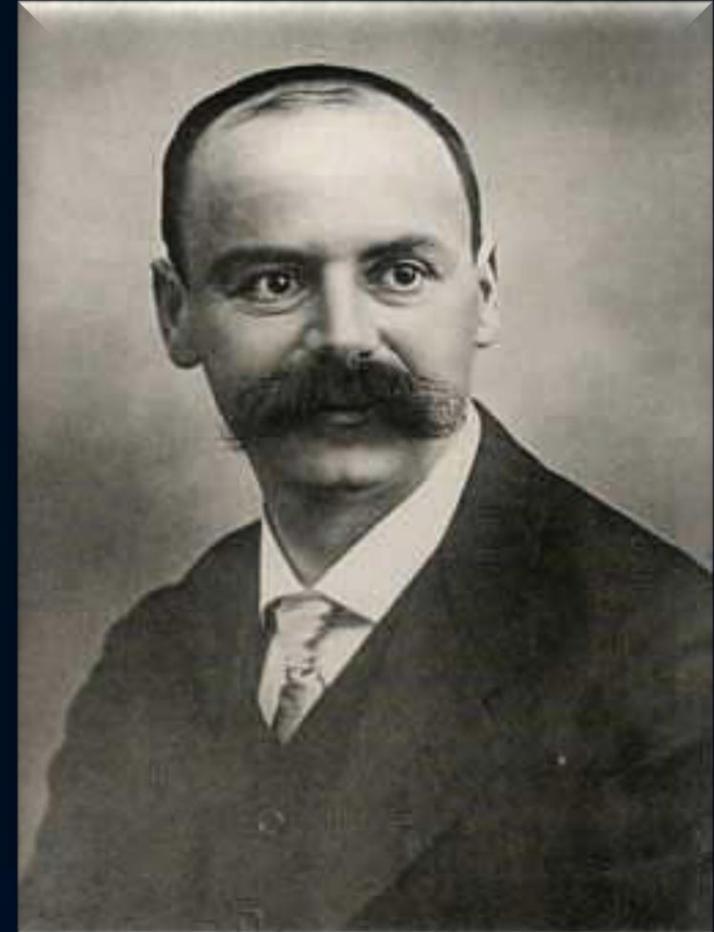
Die Schwarzschild Lösung

1915 Einsteins Gravitation:
Krümmung der „Raumzeit“

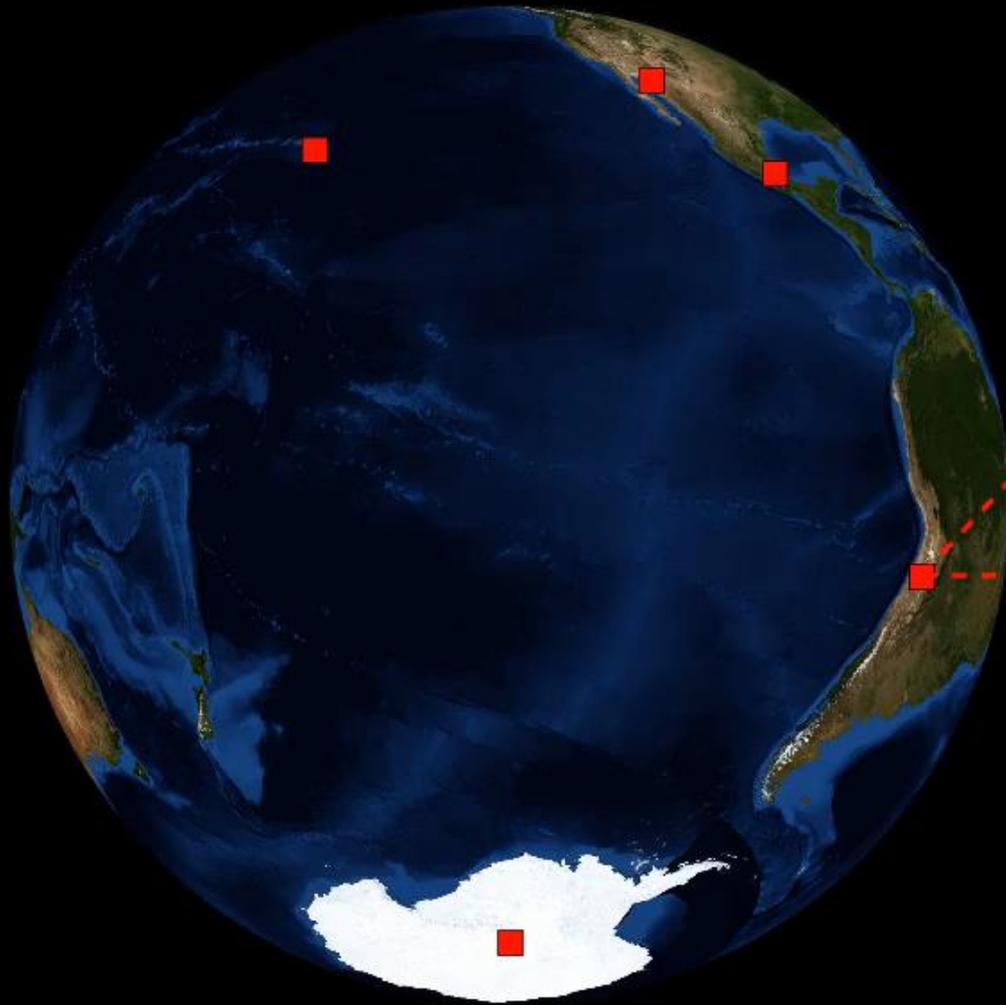
1916 Karl Schwarzschild:

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

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



Event Horizon Telescope



Atacama Large
Millimeter Array (ALMA)



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

Diameter: 12m

Das EHT ist ein
virtuelles Radioteleskop
der Größe der Erde

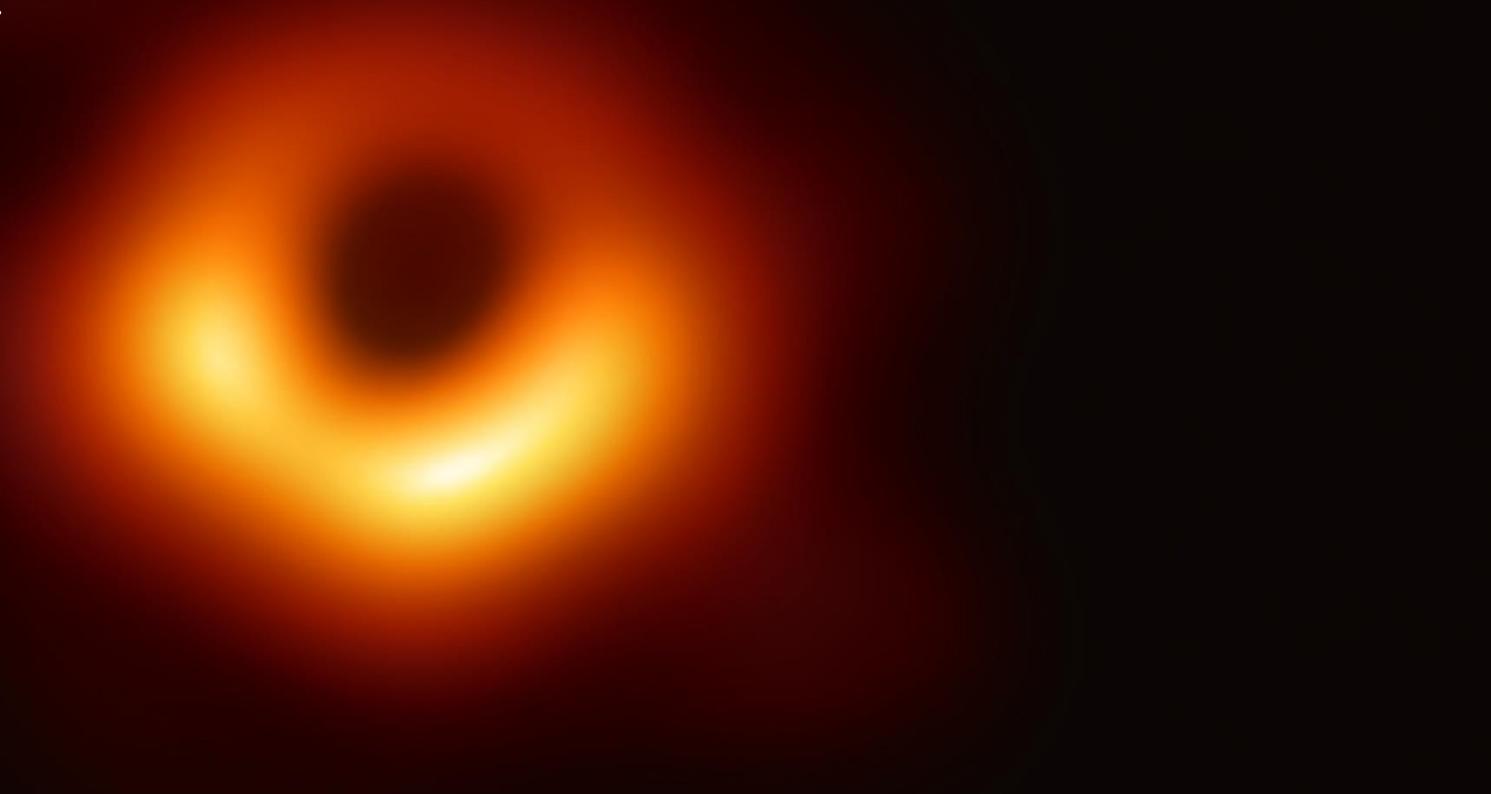
Das Event Horizon Teleskop (EHT) ist eine hochgradig internationale Kooperation von Radioteleskopen die mittels Langbasisinterferometrie das erste Bild eines schwarzen Loches aufzeichnen konnte

*Python-Animation erstellt
von Dr. Christian Fromm*

Die ersten Bilder eines Schwarzen Lochs

Ein Meilenstein in der Geschichte der Astronomie

Ein wenig mehr als hundert Jahre nachdem Albert Einstein seine Feldgleichungen der *Allgemeinen Relativitätstheorie* formulierte, und er damit die Grundlage für Gravitationswellen und schwarzer Löcher legte, wurde im Jahre 2019 das erste Bild eines schwarzen Lochs (siehe rechte Abbildung) der Öffentlichkeit präsentiert



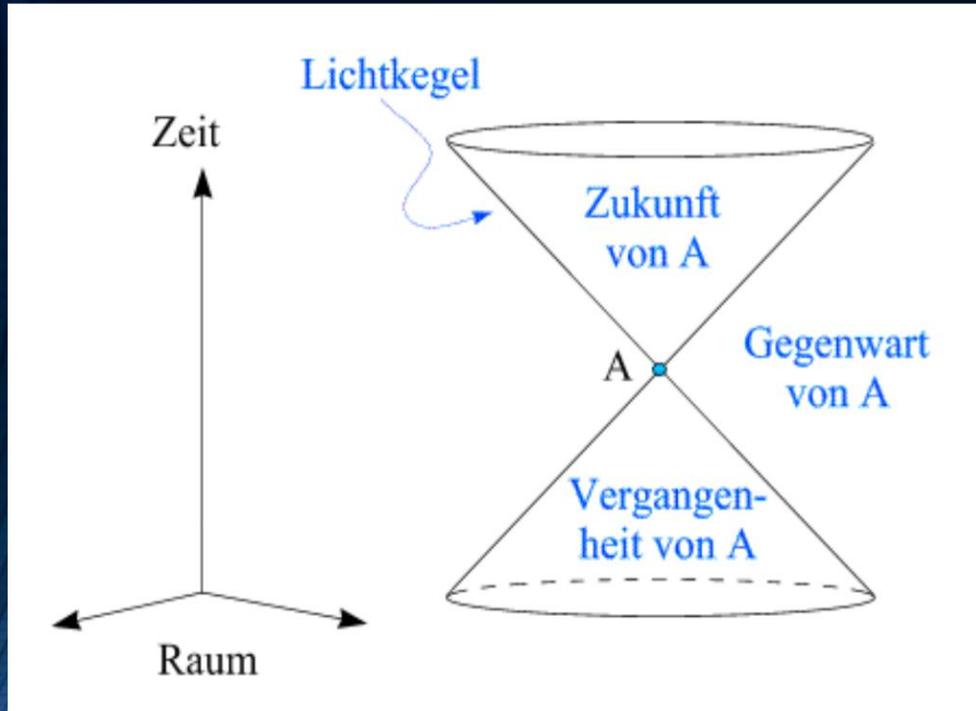
YouTube Video: https://www.youtube.com/watch?v=Zh5p9Sro_VU&list=PLn5gYfEKlag8nps1GKLqUW35AOgQY7aM2

Anlässlich der bahnbrechenden Aufnahme des ersten Bildes eines schwarzen Lochs im Zentrum unserer Nachbargalaxie M87, wurde am 17. April 2019 um 20 Uhr ein öffentlicher, populärwissenschaftlicher Abendvortrag im Otto Stern Zentrum (OSZ H1) am Campus Riedberg der Goethe Universität gehalten. Es sprachen die drei „Principal Investigators“ des europäischen Black Hole Cam-Projekts (L.Rezzolla, M.Kramer und H.Falke), welches neben der EHT-Kollaboration für das Bild verantwortlich ist.

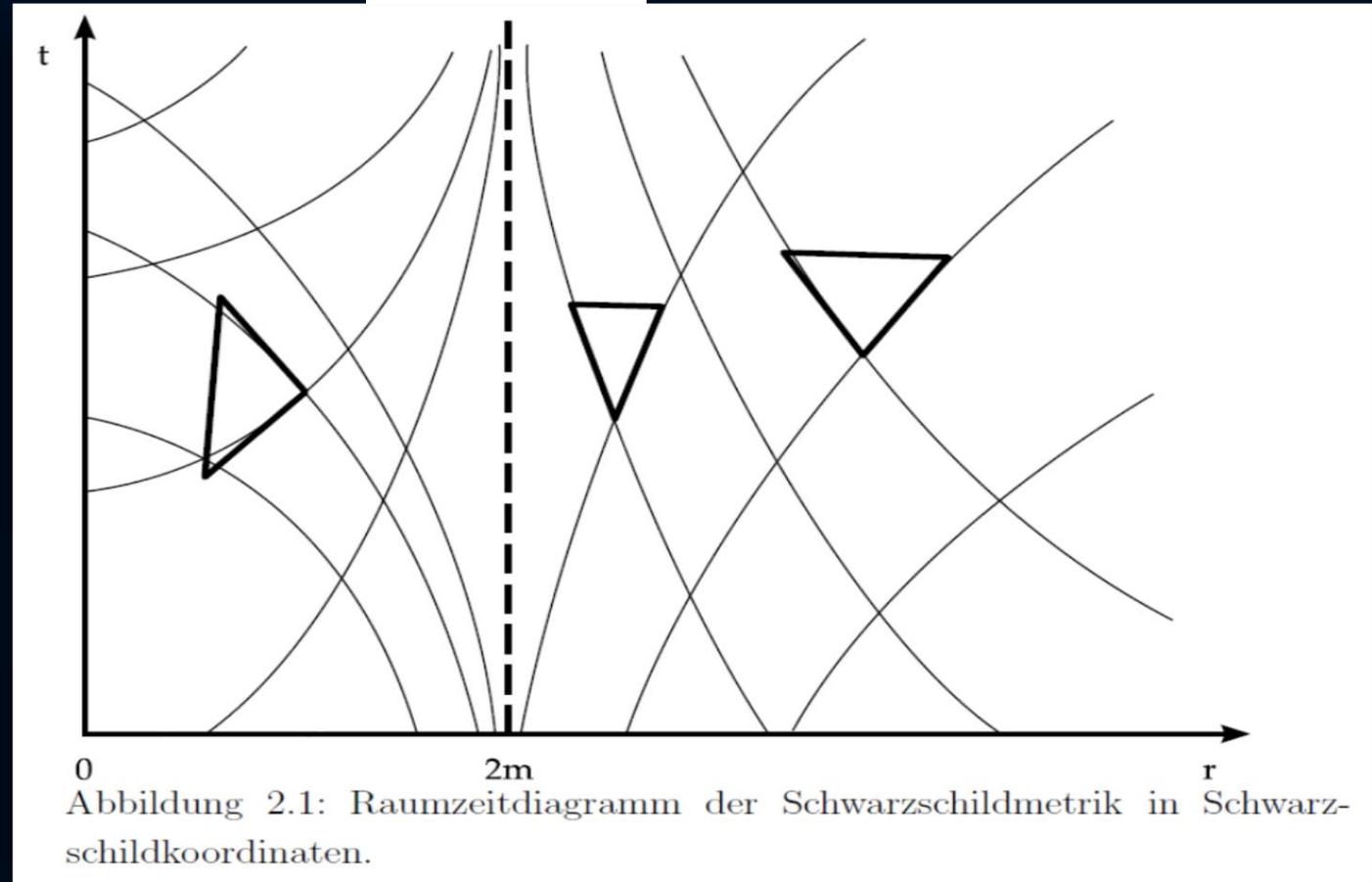
Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

Sichtweise ruhender Beobachter im Unendlichen

Ereignis-
horizont



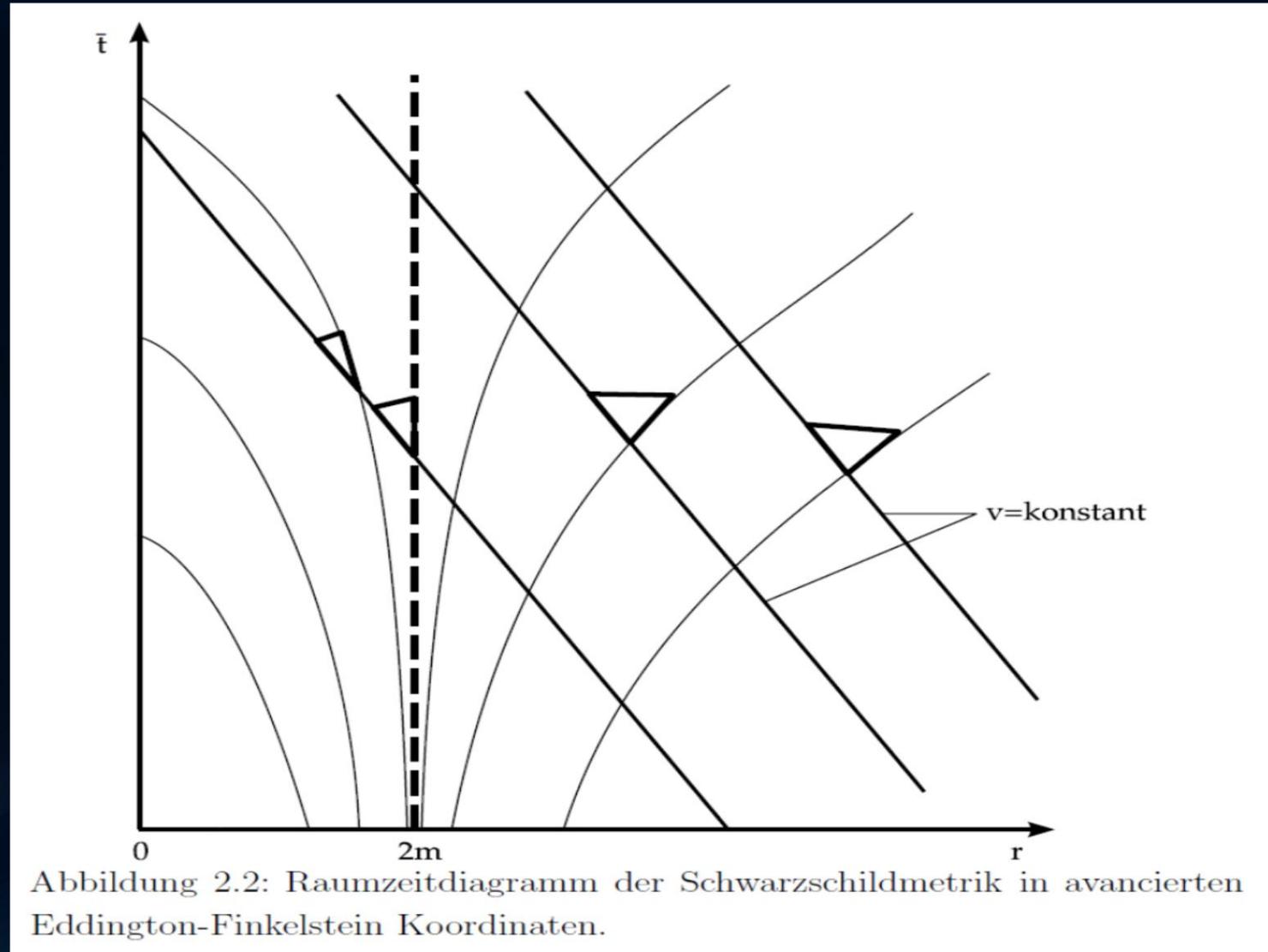
Raumzeit-Struktur
im flachen Raum



Raumzeit-Struktur um ein schwarzes Loch

Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

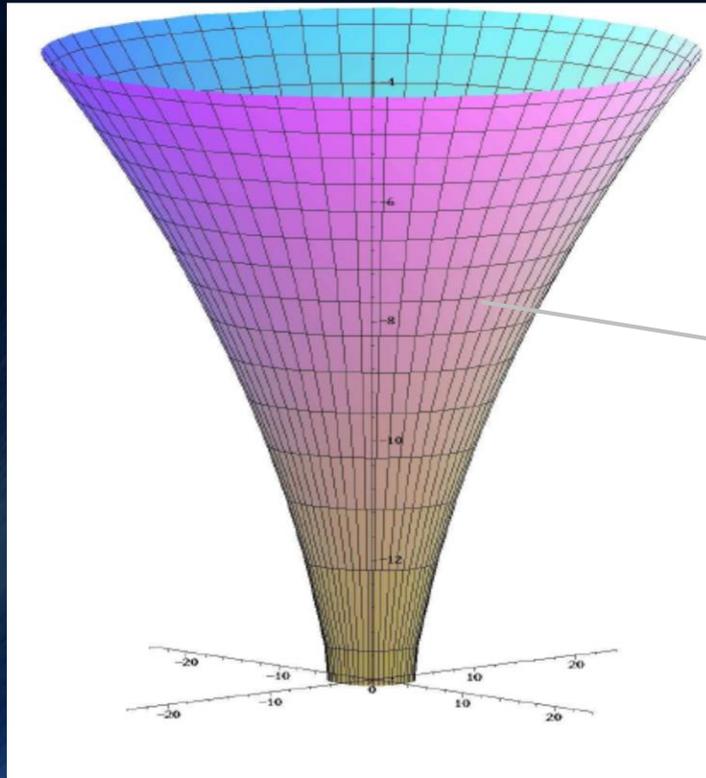
Sichtweise eines in das schwarze Loch fallenden Beobachters



Das Bildnis des schwarzen 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

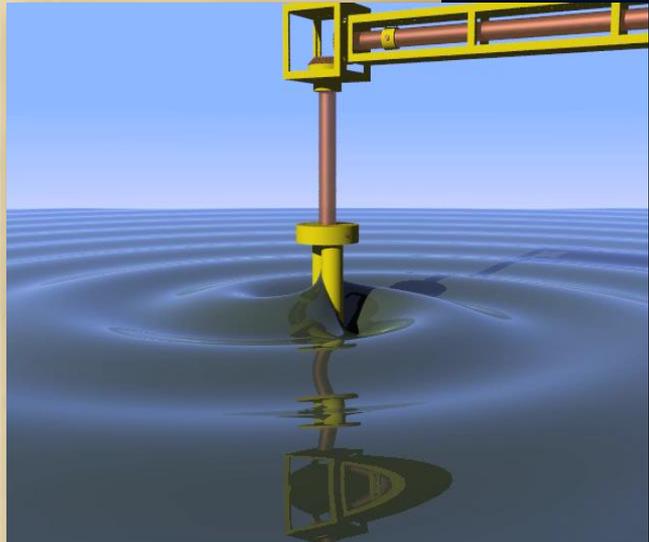
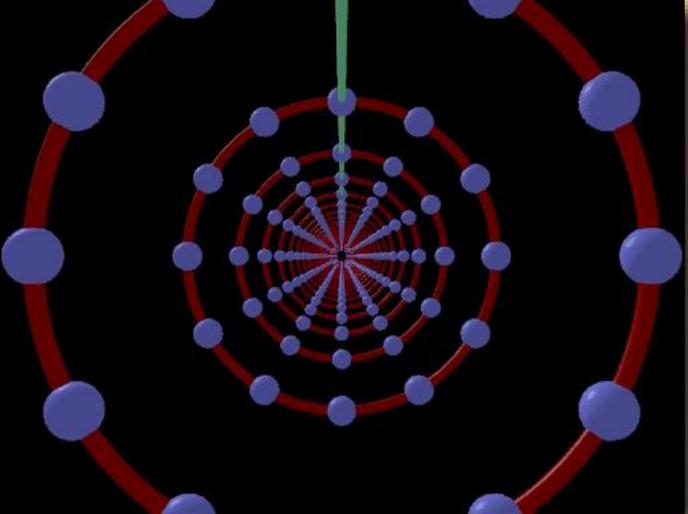
Echte Singularität

Für den äußeren
Beobachter
festgeschriebene,
eingefrorene Bilder
prägender Ereignisse
deutscher Geschichte

Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

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

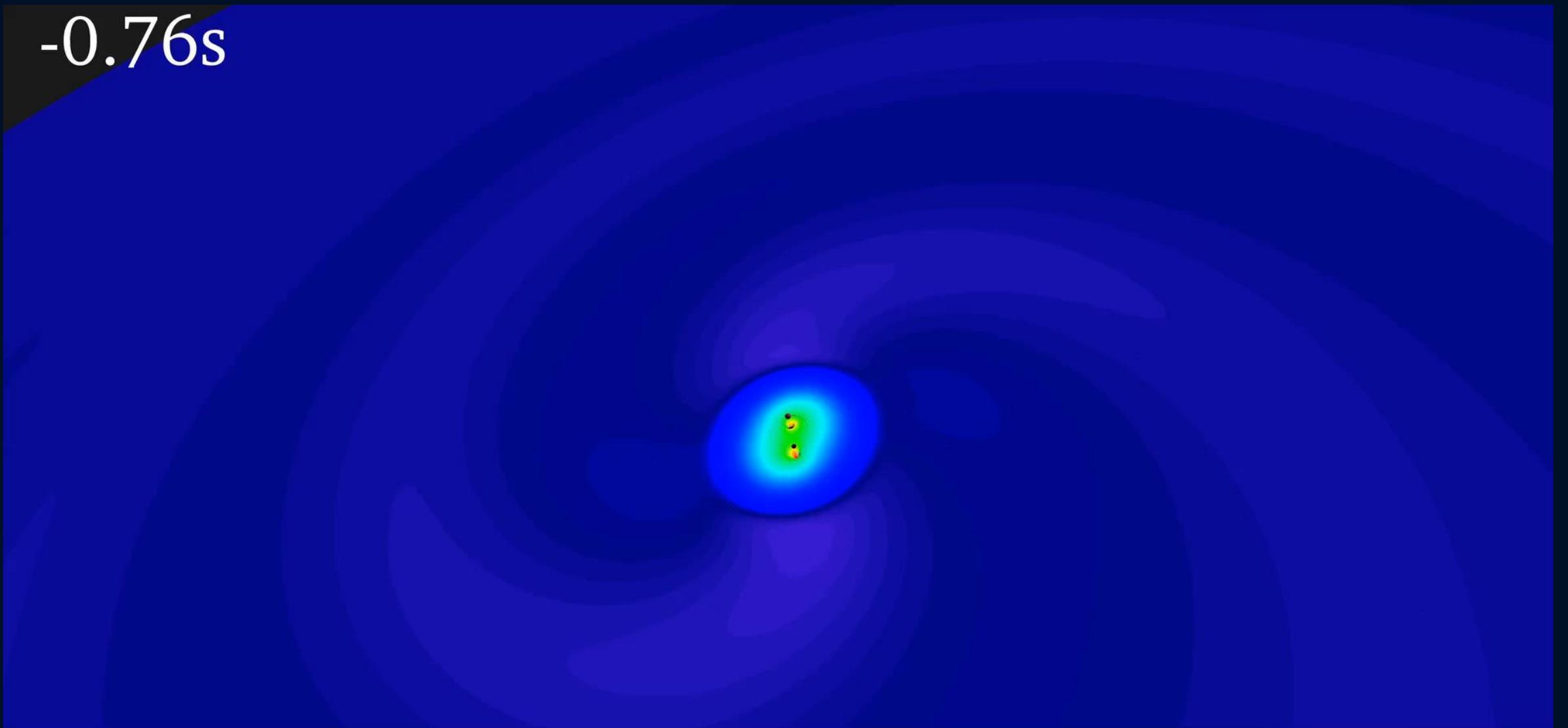


Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist,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

Einsteins erste Arbeit über Gravitationswellen, Juni 1916, war leider falsch ...
Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften

Kollidierende Schwarze Löcher

-0.76s



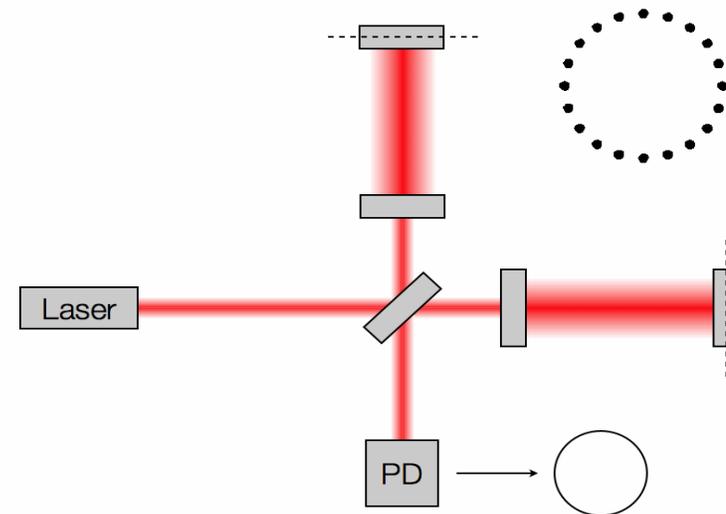
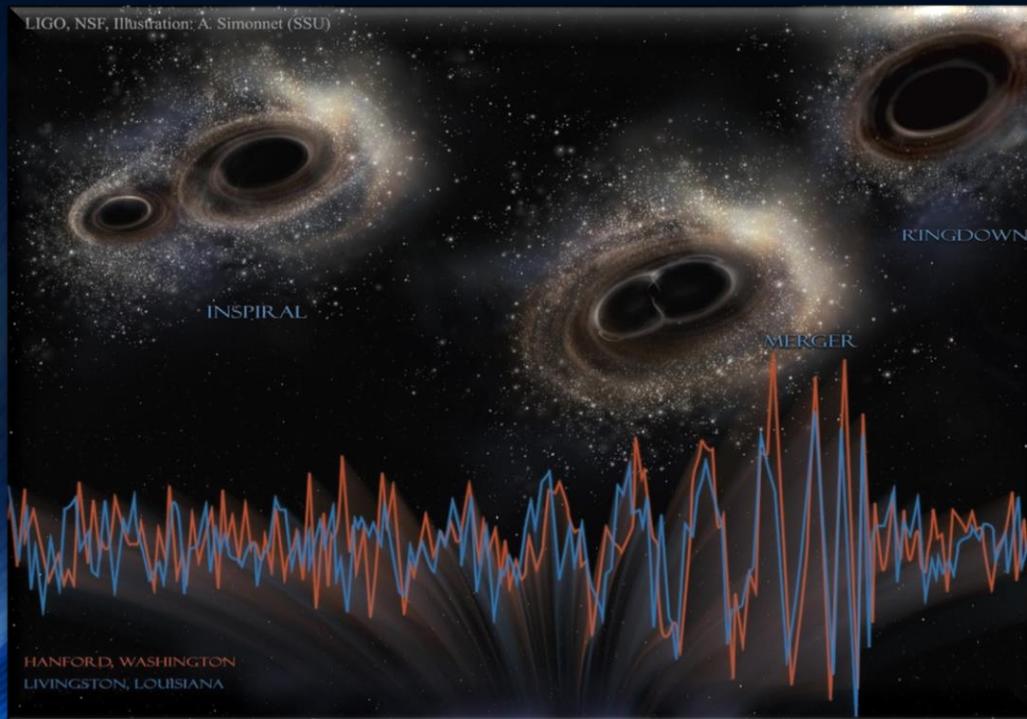
Im Jahre 2015

Erste Gravitationswellen gefunden: LIGO!!!

Kollision zweier Schwarzer Löcher GW150914

Massen: 36 & 29 Sonnenmassen

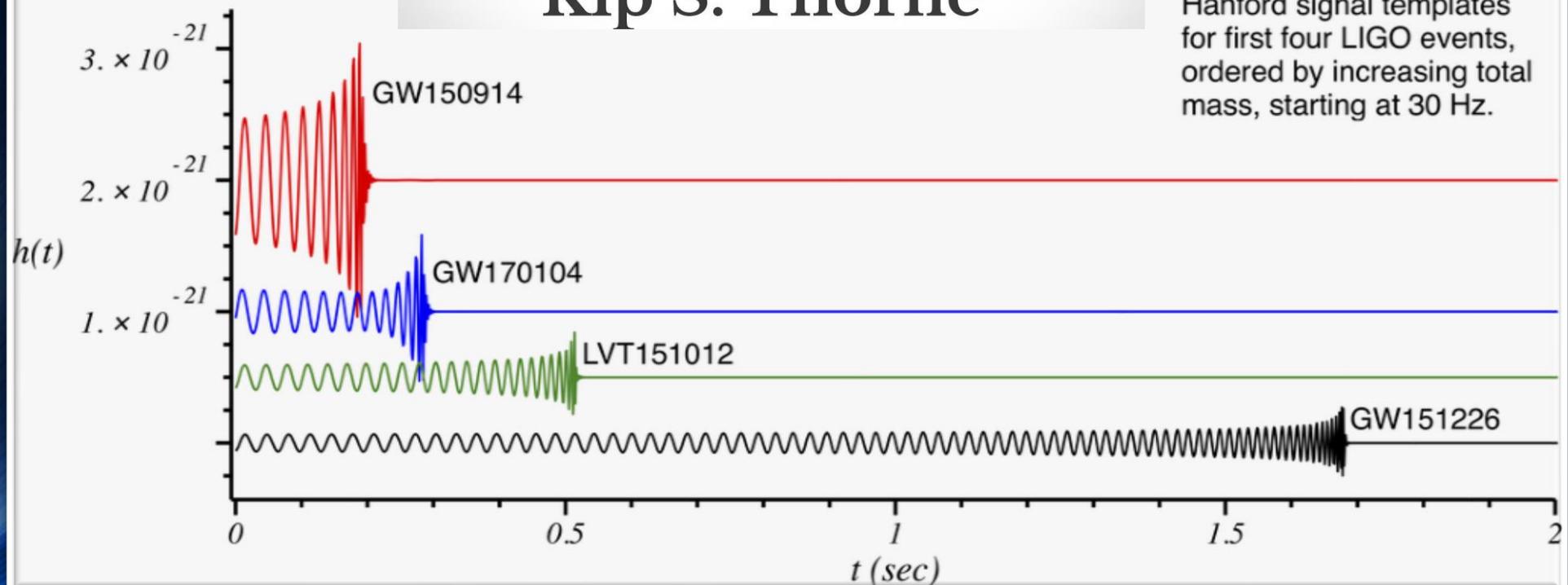
Abstand zur Erde 410 Mpc
(1.34 Milliarden Lichtjahre)



2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



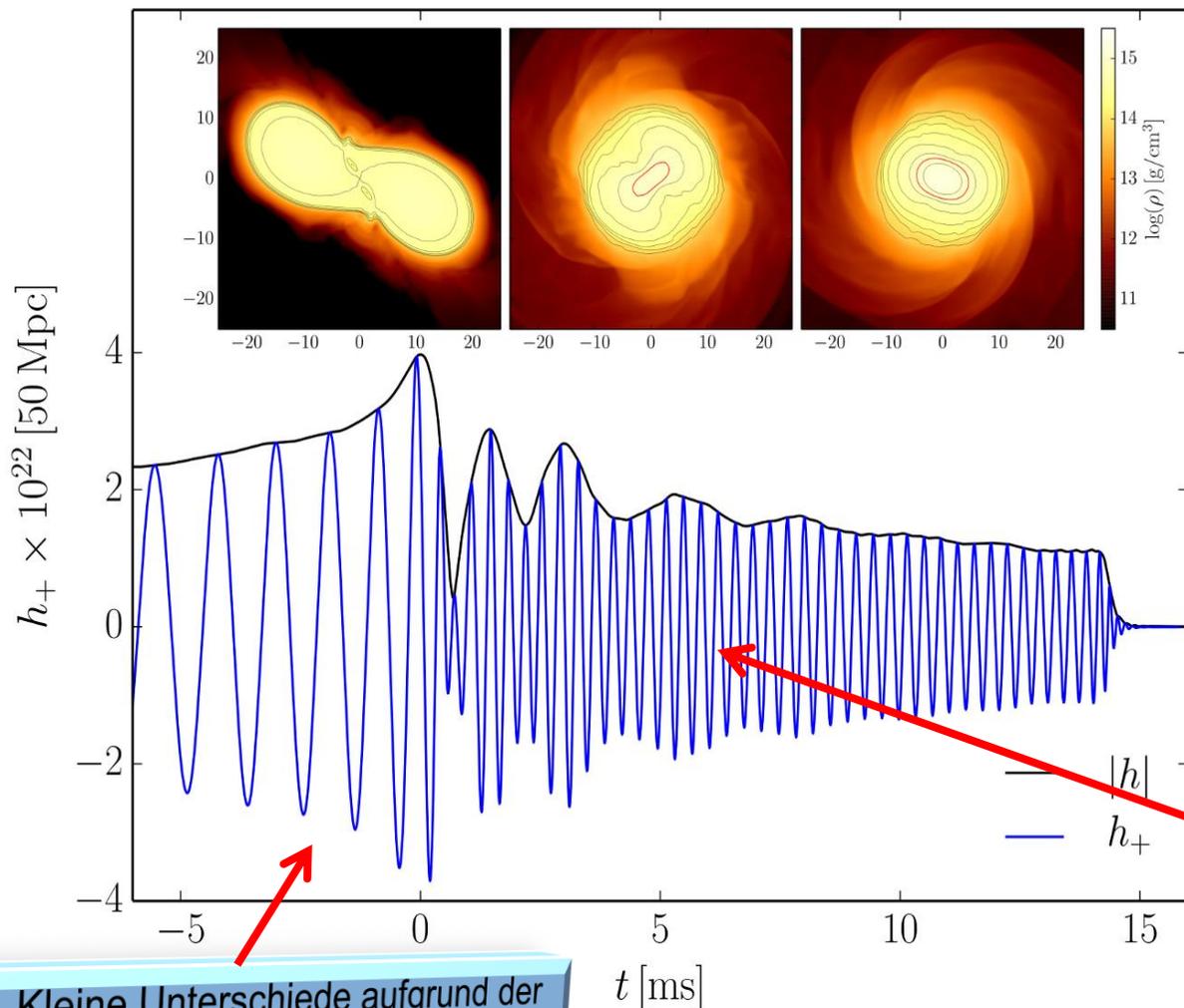
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



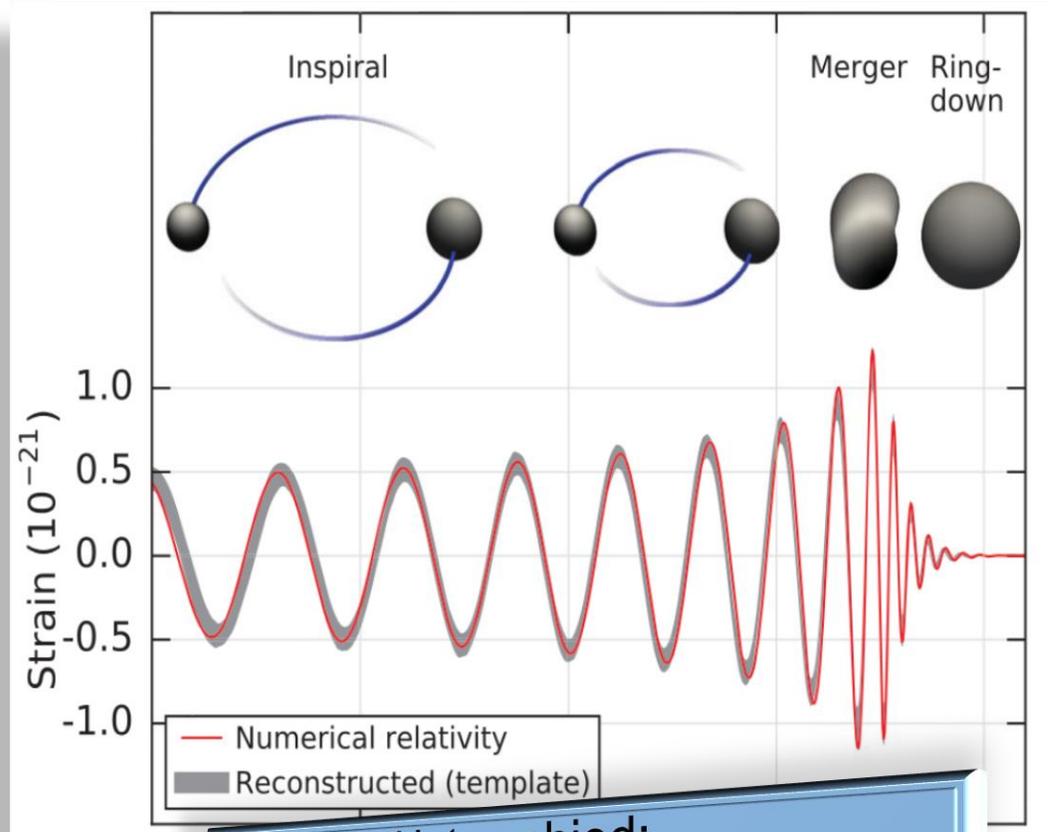
Hanford signal templates
for first four LIGO events,
ordered by increasing total
mass, starting at 30 Hz.

Gravitationswellen von Neutronenstern Kollisionen

Neutronenstern Kollision (Simulation)



Kollision zweier schwarzer Löcher



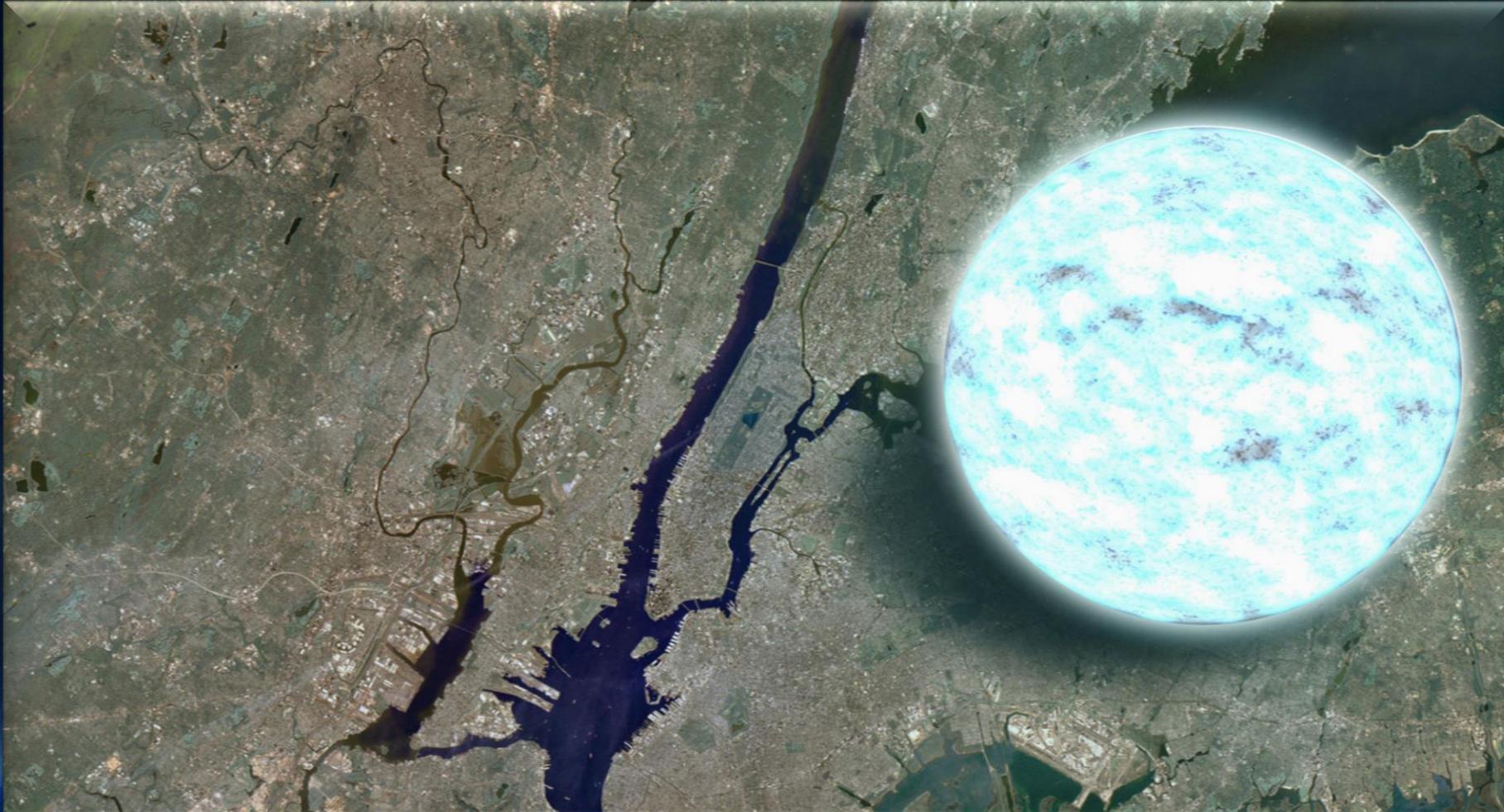
Unterschied:
Bei Neutronenstern Kollisionen
gibt es oft eine
Post-Kollisionsphase

Kleine Unterschiede aufgrund der
Verformbarkeit der Neutronensterne

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)

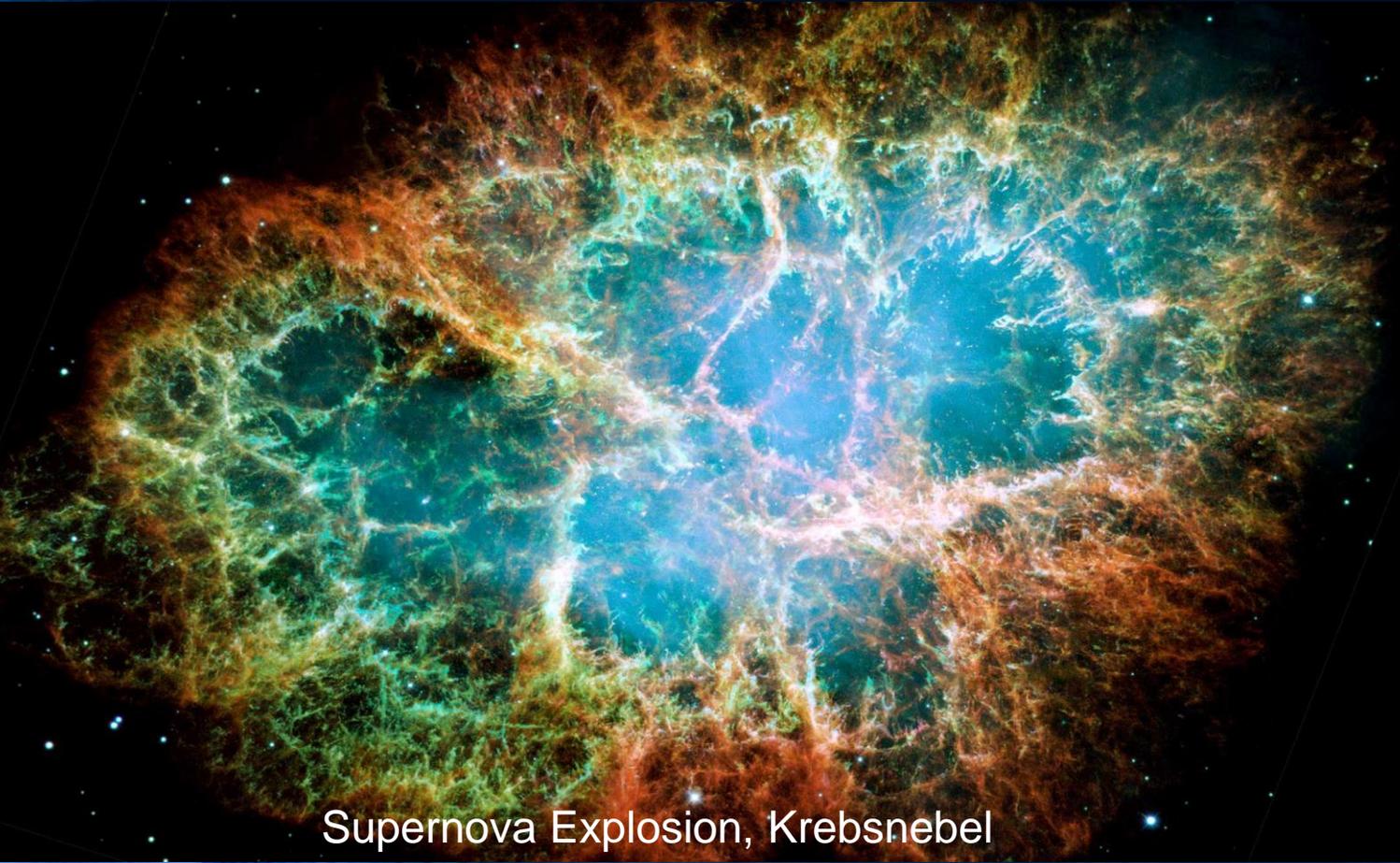


Wie entstehen Neutronensterne?

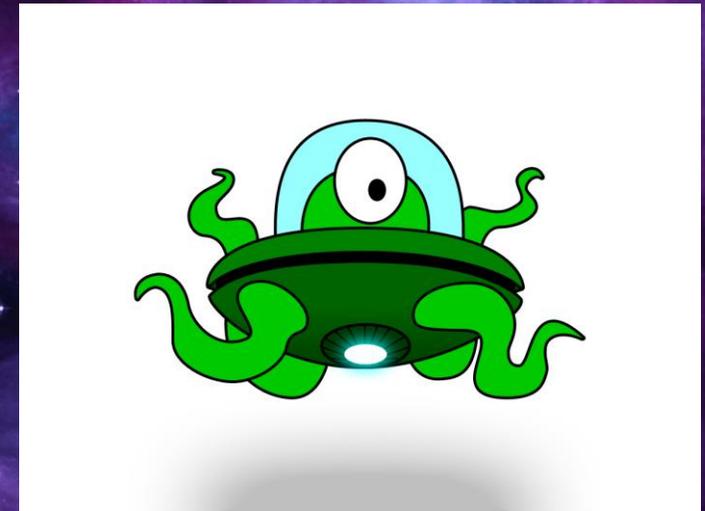
Neutronensterne entstehen in einer Supernova Explosion. Sonnen, die mindestens 8-mal schwerer als unsere Sonne sind explodieren am Ende ihrer Lebenszeit in einer Supernova Explosion – im Zentrum bleibt ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch zurück.



Im Zentrum des Nebels
ist ein Neutronenstern

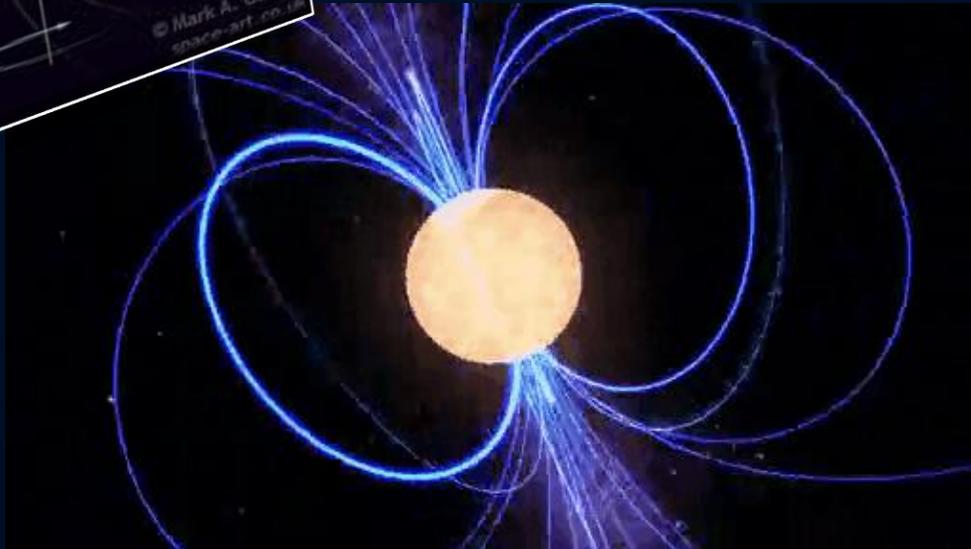
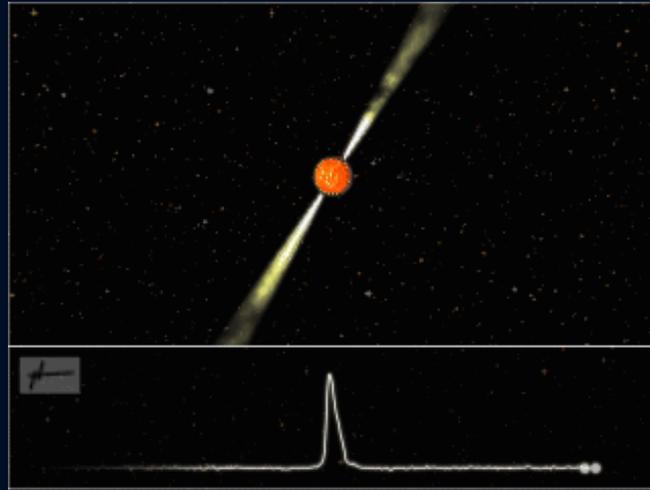
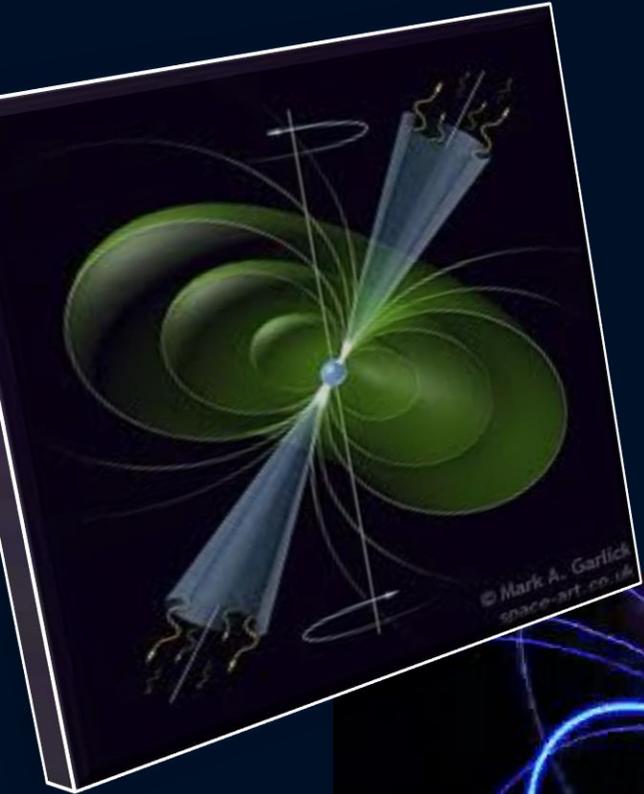


Supernova Explosion, Krebsnebel



Krebsnebel (Röntgenteleskop Chandra)

Pulsare sind Rotierende Neutronensterne mit starkem Magnetfeld



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, $M=1.3381(7)$

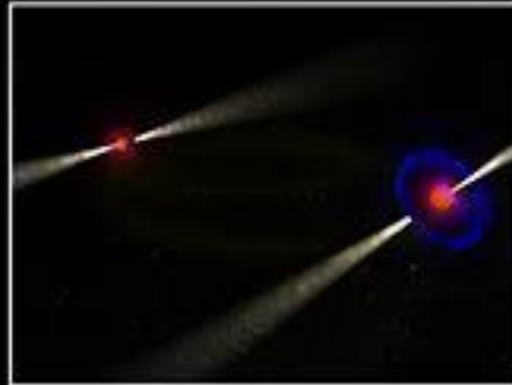
Pulsar B: $P=2.7$ s, $M=1.2489(7)$

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



Das lang ersehnte Ereignis GW170817

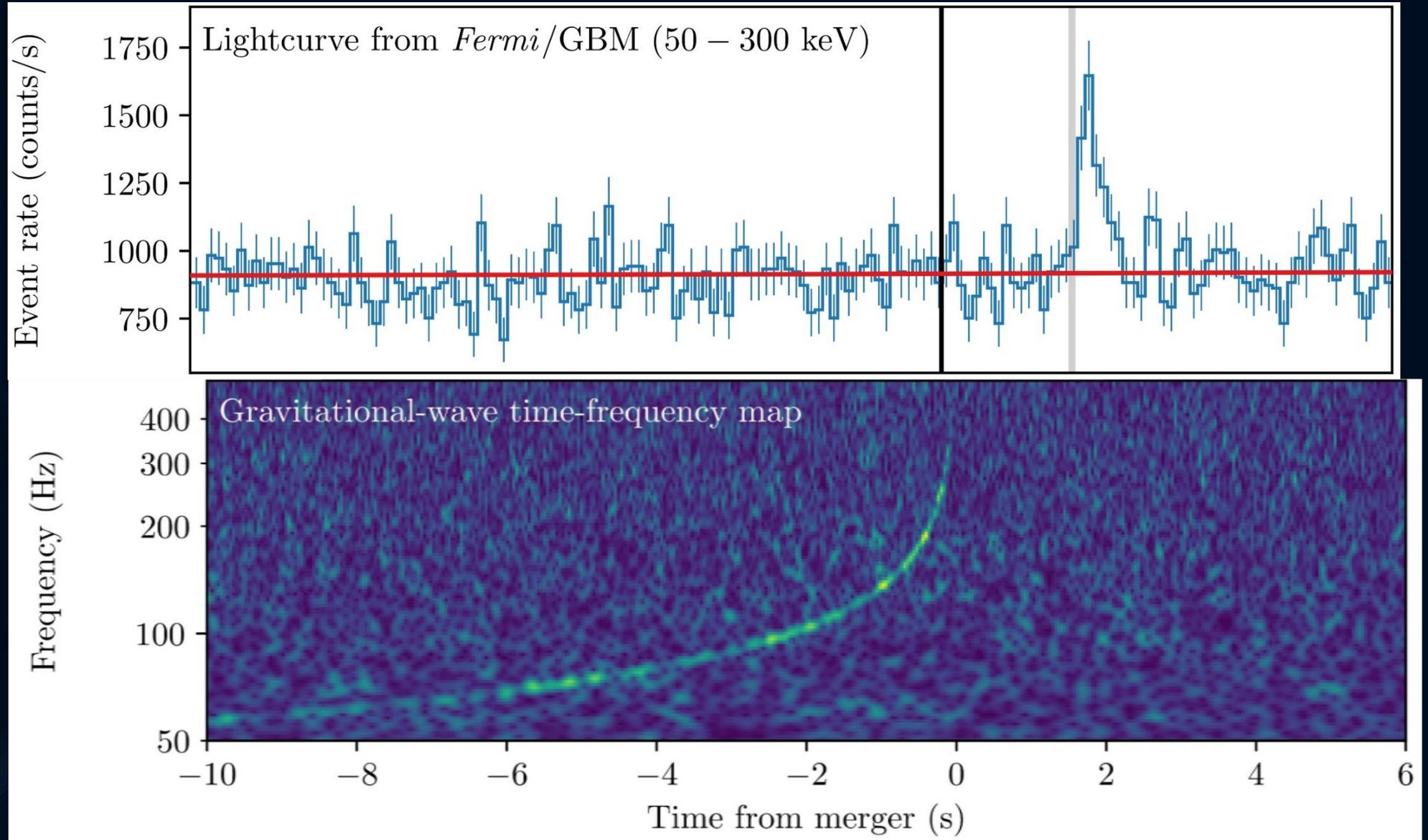
	Low-spin priors ($ \chi \leq 0.05$)	High-spin priors ($ \chi \leq 0.89$)
Primary mass m_1	$1.36\text{--}1.60 M_\odot$	$1.36\text{--}2.26 M_\odot$
Secondary mass m_2	$1.17\text{--}1.36 M_\odot$	$0.86\text{--}1.36 M_\odot$
Chirp mass \mathcal{M}	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio m_2/m_1	$0.7\text{--}1.0$	$0.4\text{--}1.0$
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 $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400

17. August 2017

Gravitationswelle einer
Neutronenstern Kollision gemessen!

Die gemessene Gravitationswelle und der darauf folgende hochenergetische Lichtblitz

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



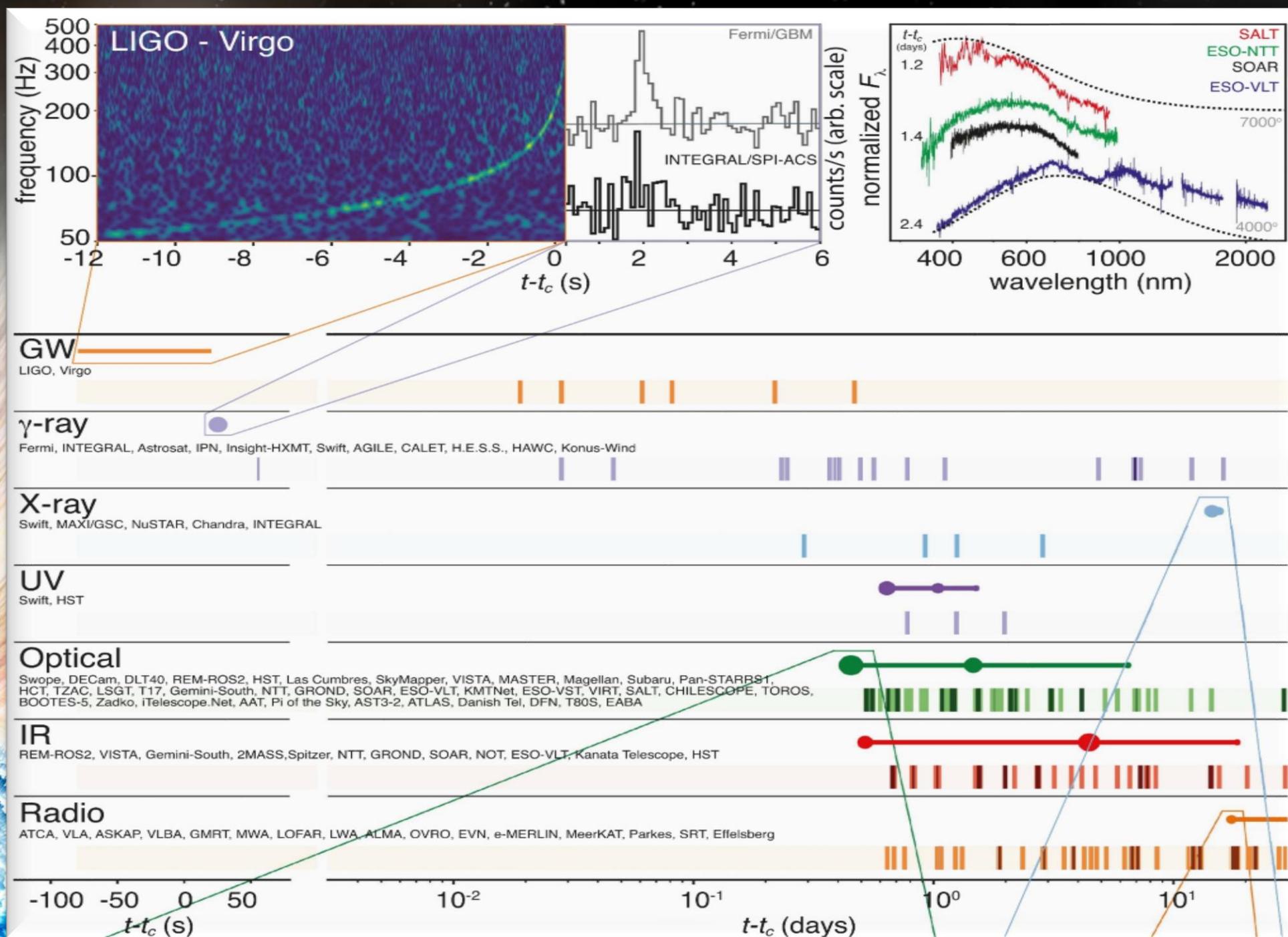
Die von dem
Gravitationswellen
Detektor LIGO
detektierte
Frequenz der
Gravitationswelle



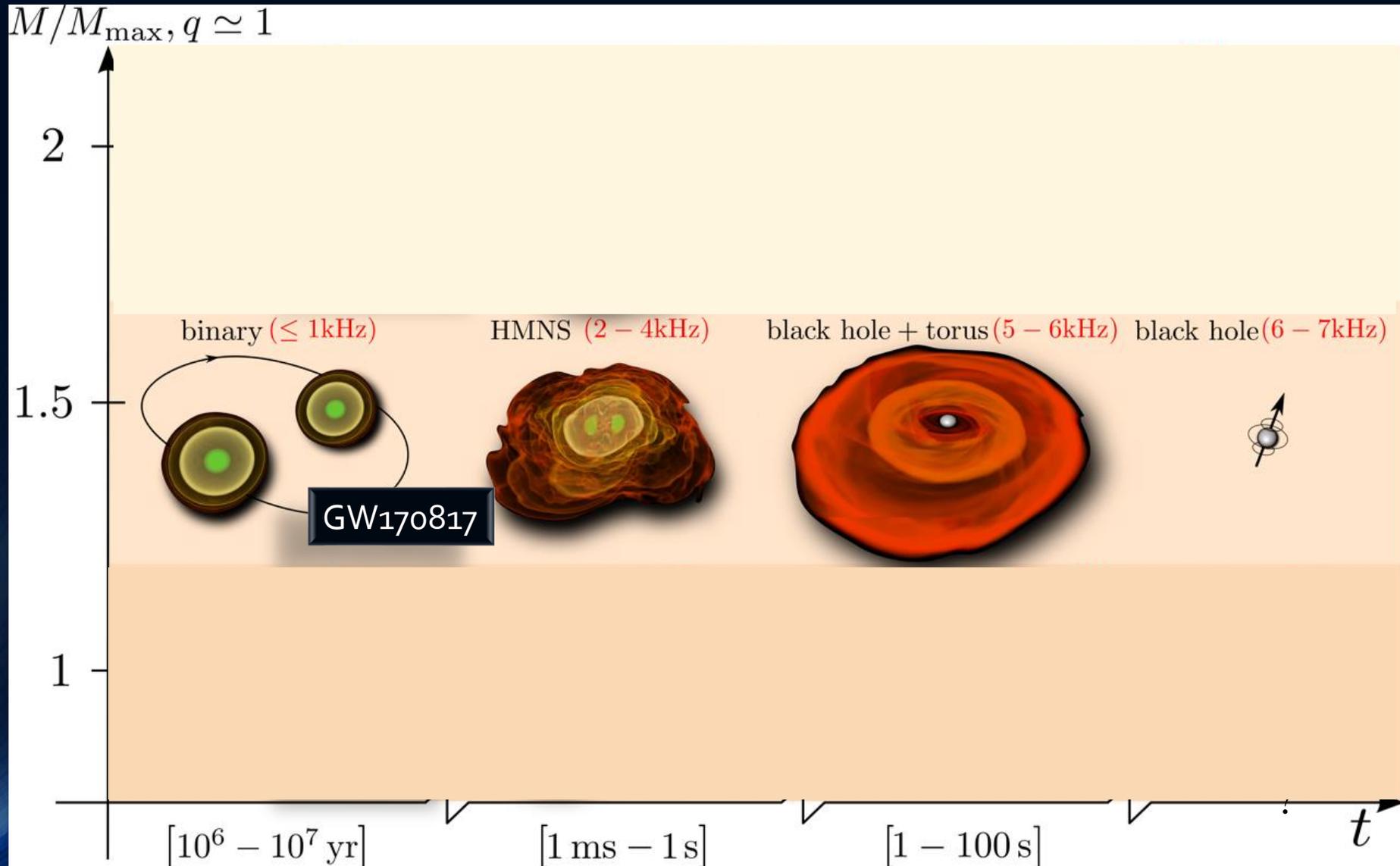
GW170817

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

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)



Broadbrush picture

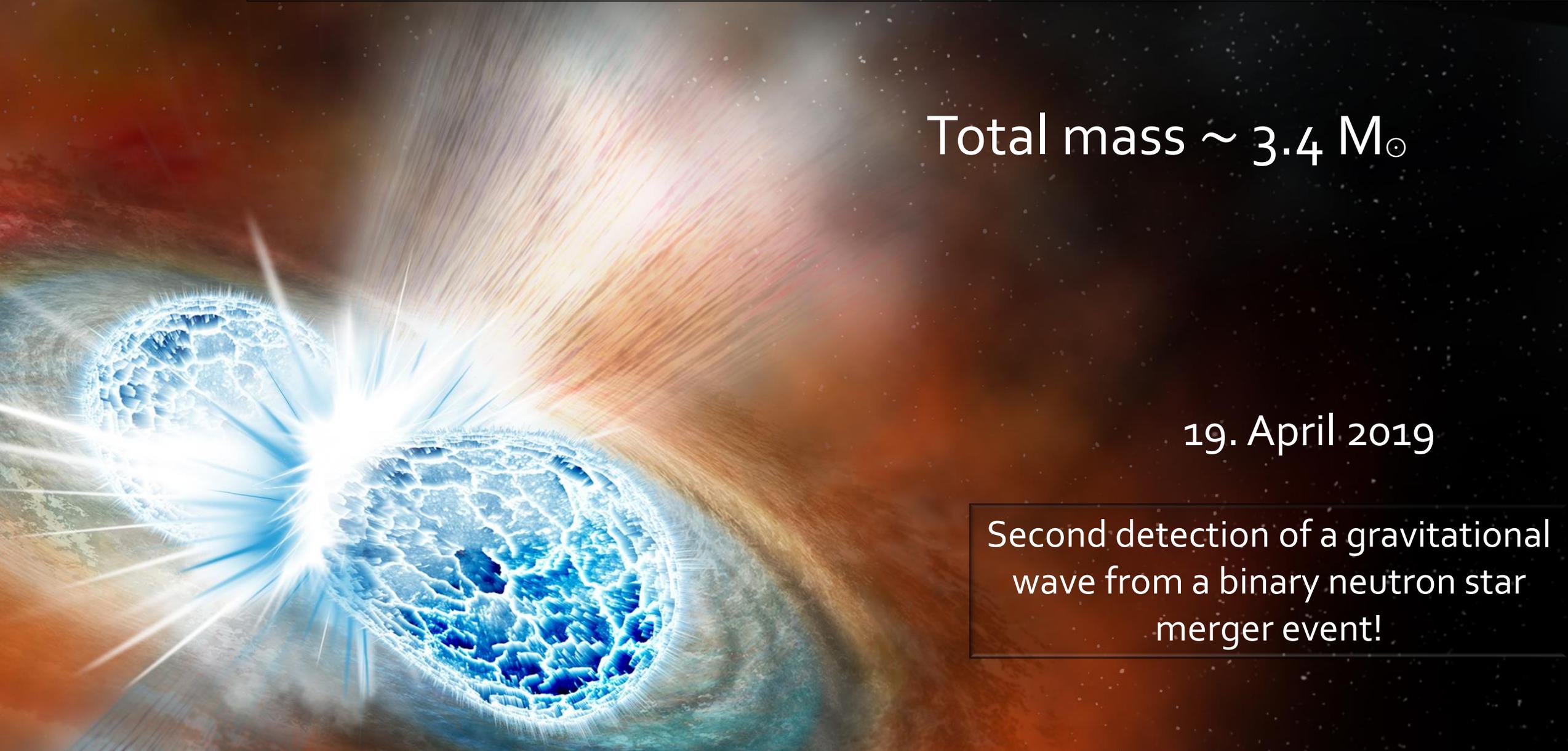


The second event: GW190425

Total mass $\sim 3.4 M_{\odot}$

19. April 2019

Second detection of a gravitational wave from a binary neutron star merger event!



GW190814

The third event ???

**Black
Hole**

$M_1 \sim 23 M_{\odot}$

**Neutron
Star**

& ?

**Black
Hole**

$M_2 \sim 2.6 M_{\odot}$

14. August 2019



Zoom Webinar Chat

From **Ignazio Bombaci** to **Everyone**: 04:01
good morning

From **Jeff Garrett** to **Everyone**: 04:01
Morning

From **Leo Singer** to **Everyone**: 04:01
I don't hear anything

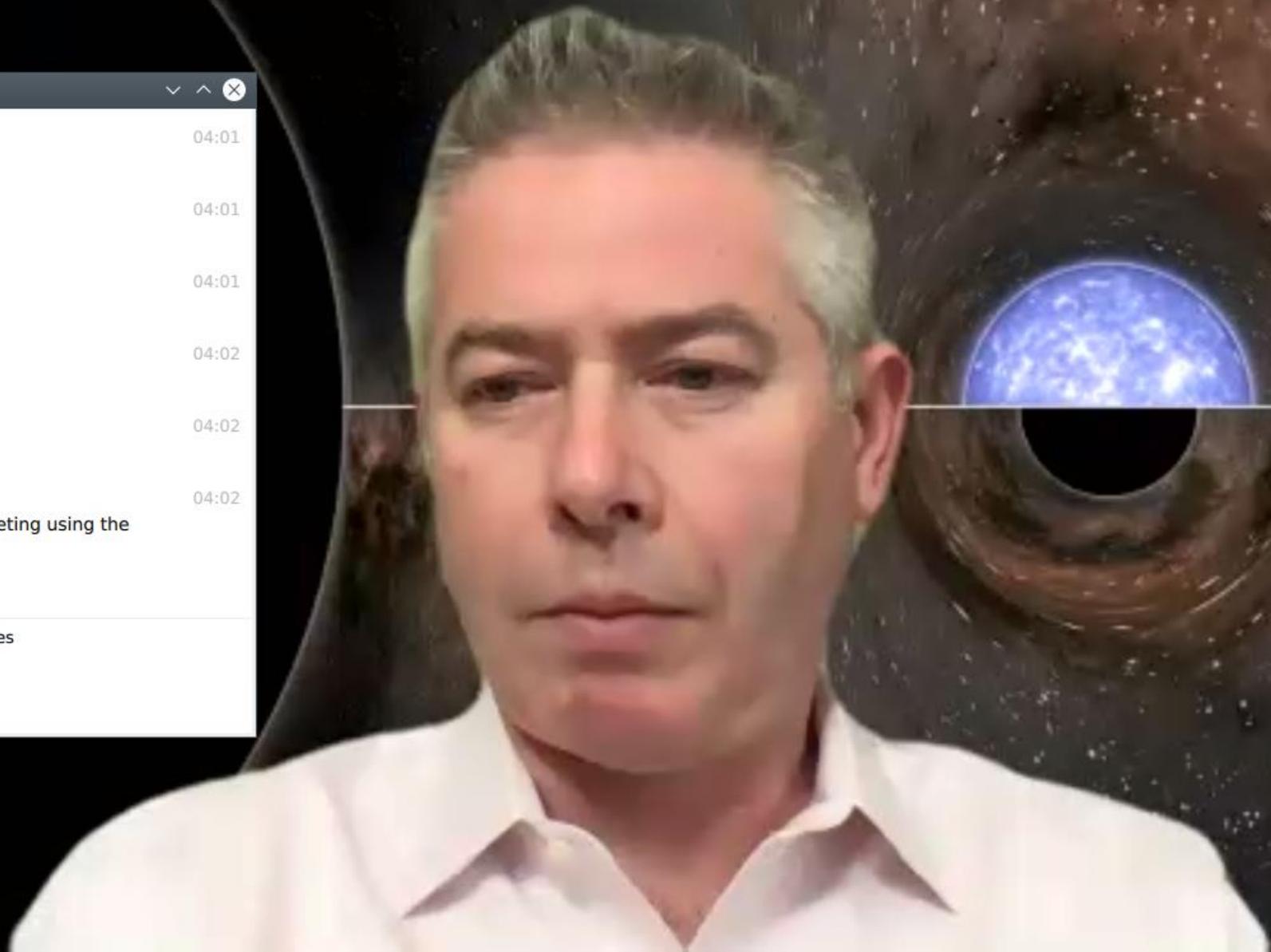
From **Junik Sengupta** to **Everyone**: 04:02
good morning

From **Odysse Halim** to **Everyone**: 04:02
Good evening from Indonesia.

From **Ignazio Bombaci** to **Everyone**: 04:02
is it possible to ask questions during the meeting using the microphone?

To: All panelists All panelists and attendees

Your text can only be seen by panelists





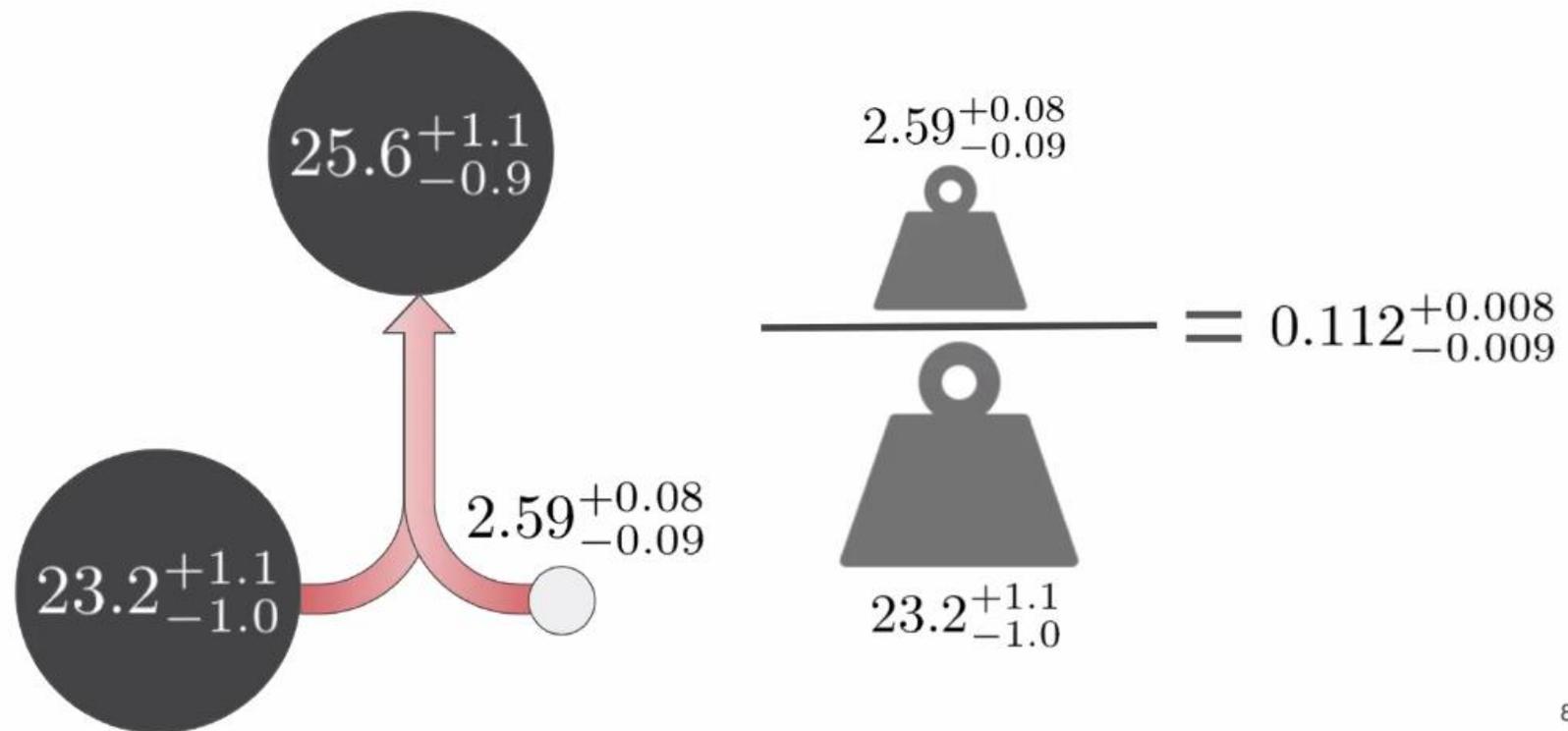
GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a $23 M_{\odot}$ Black Hole with a $2.6 M_{\odot}$ Compact Object

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration
<https://dcc.ligo.org/G2000963>



R. Hurt

GW190814 - Source frame masses

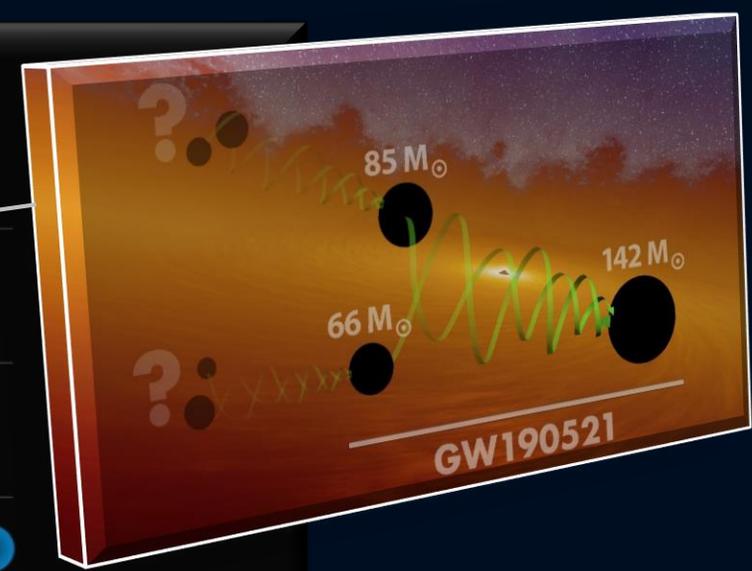
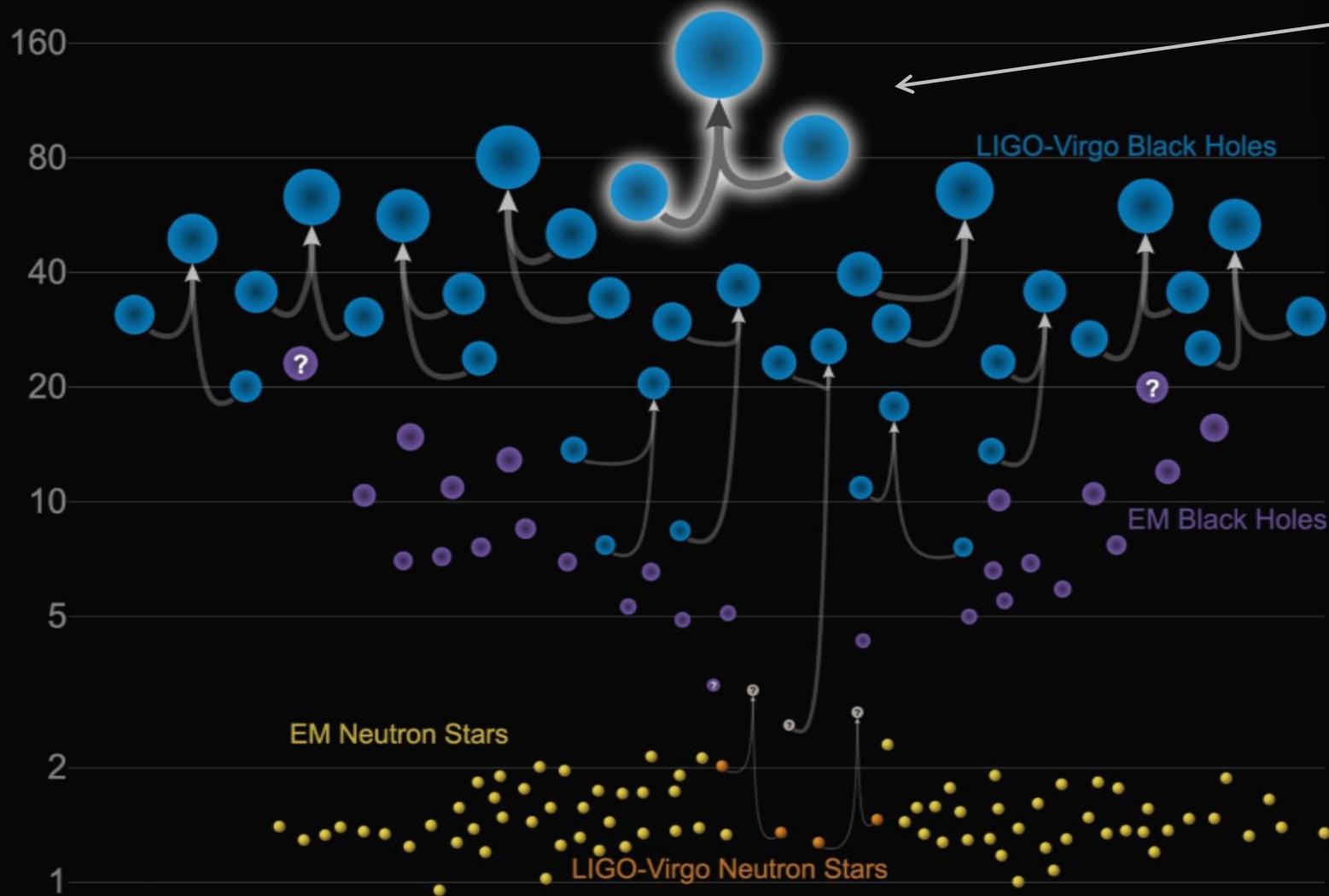


8



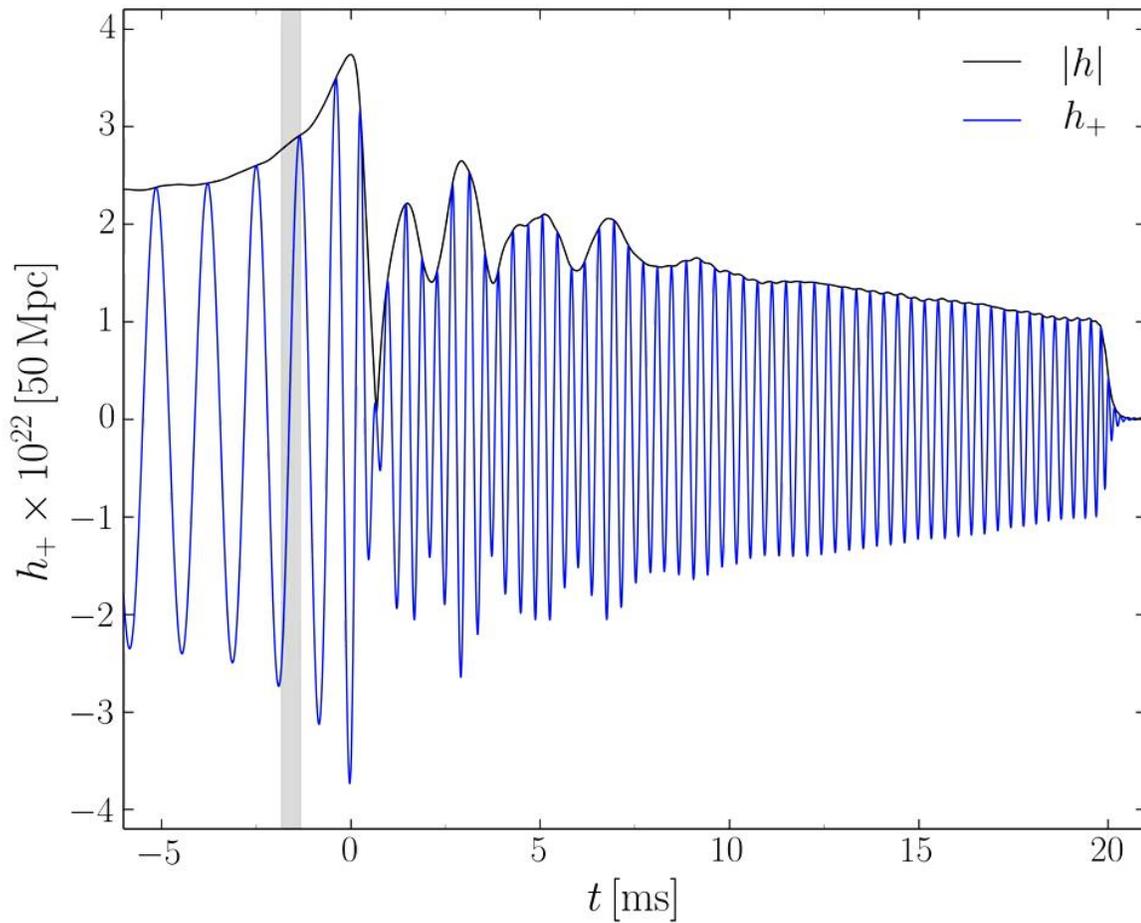
Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses

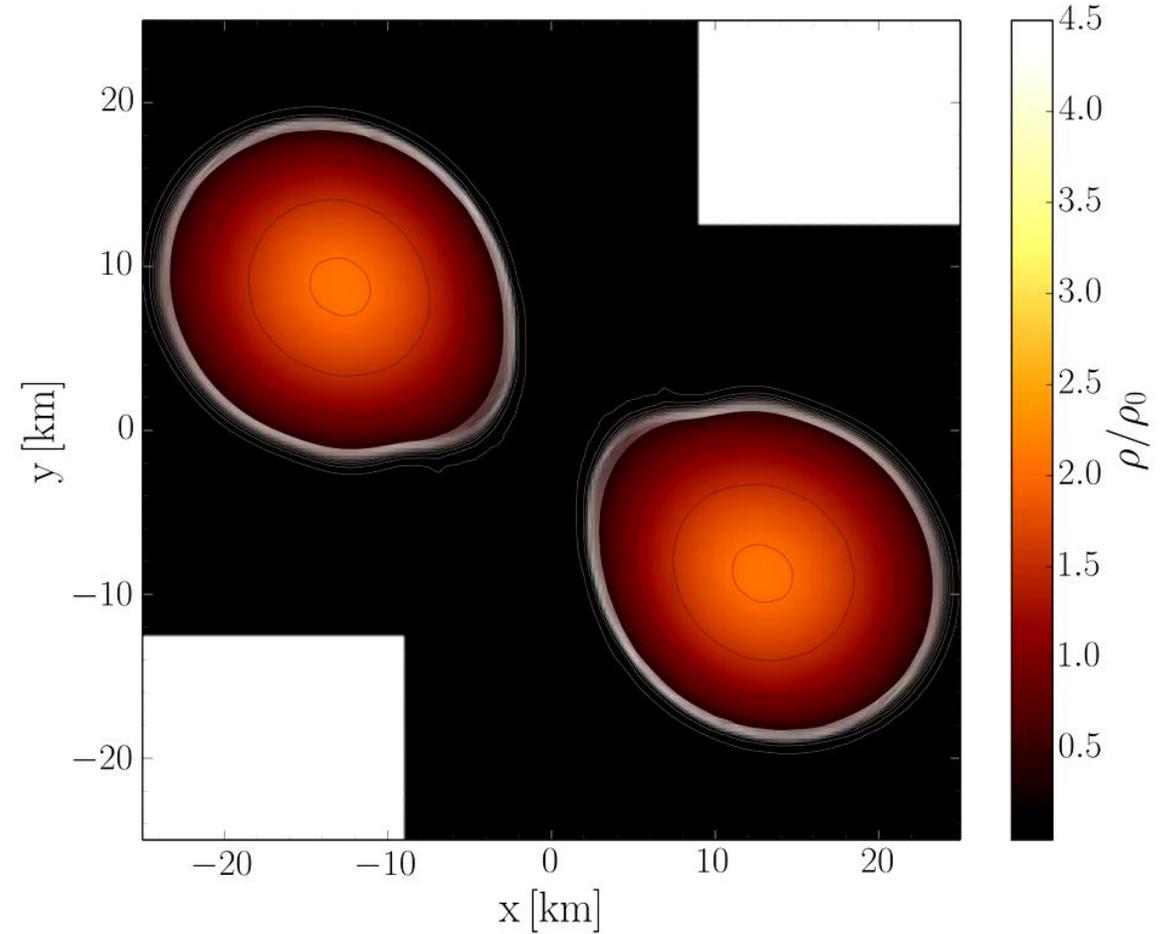


Neuste Bekanntmachung:

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

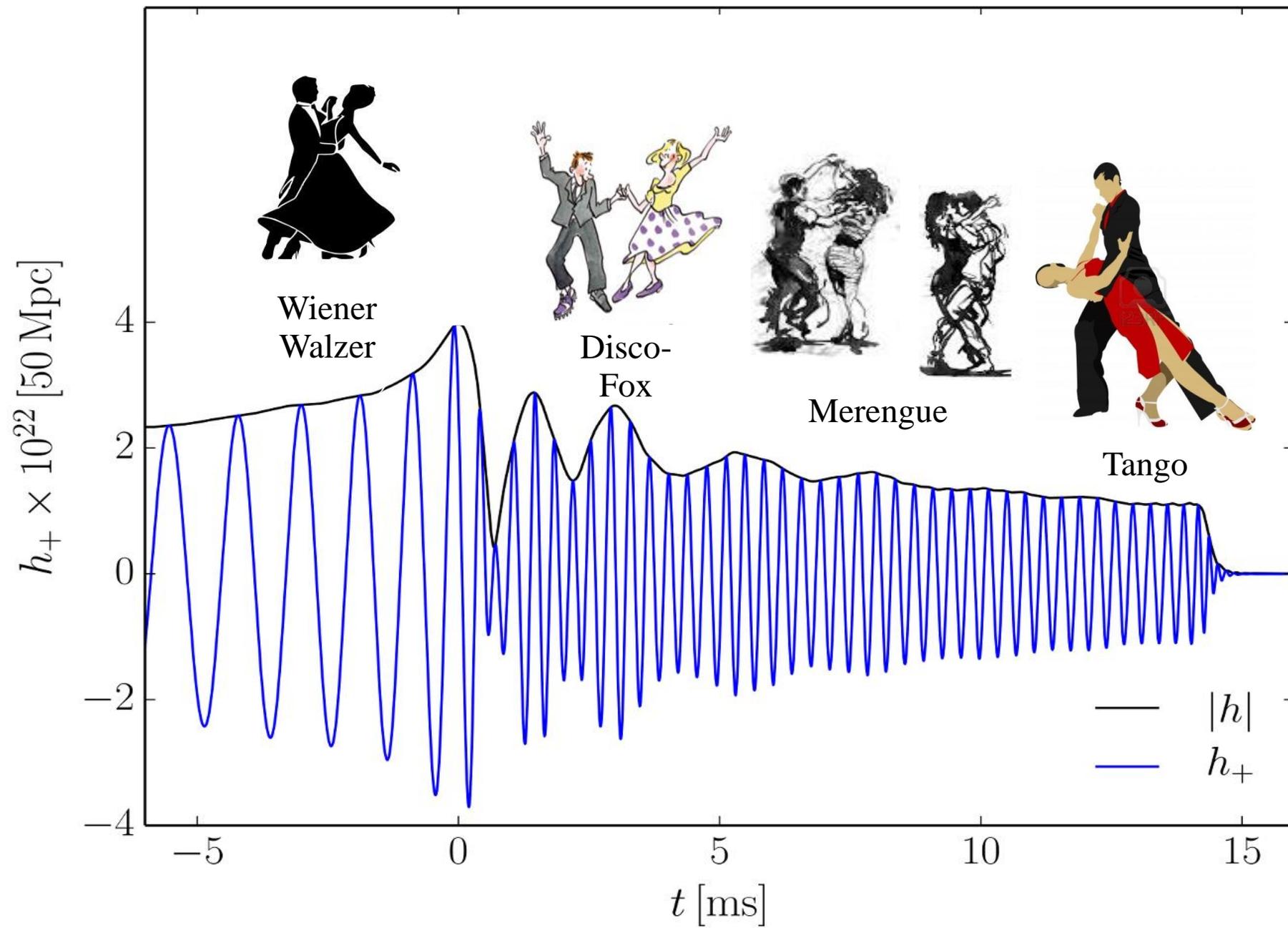


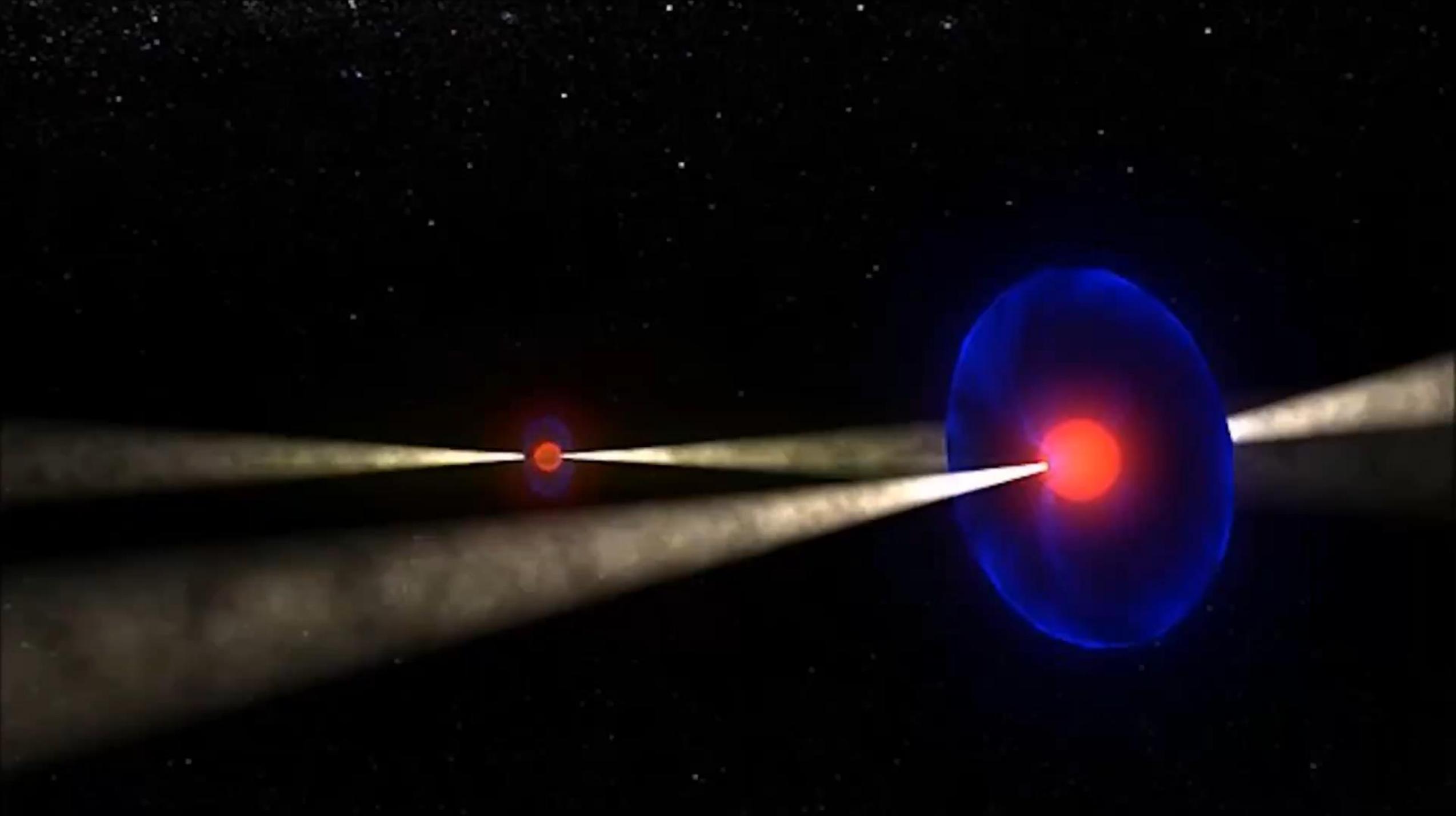
Amplitude der emittierten Gravitationswelle

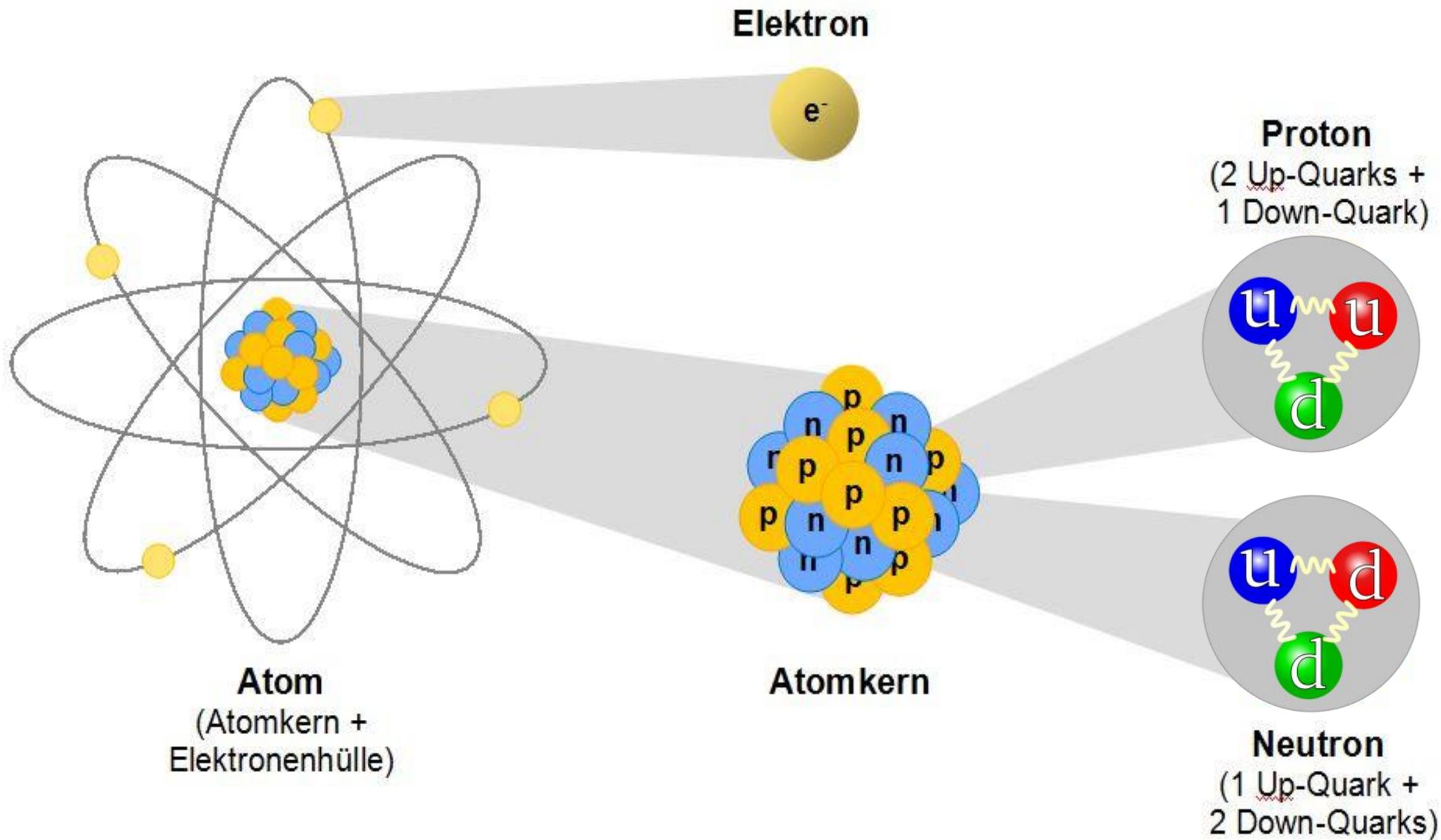


Dichteprofil in der äquatorialen Ebene

Tanz der Neutronensterne







The Einstein Equation and the EOS of Compact Stars

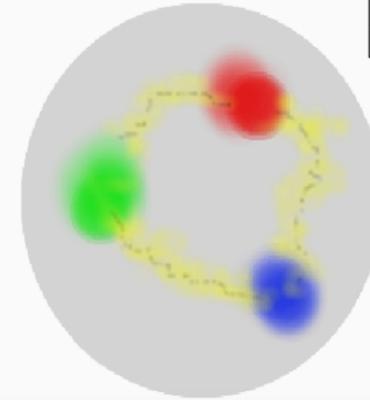
ART	<u>Yang-Mills-Theories</u>
$D_\beta v^\alpha = \partial_\beta v^\alpha + \Gamma_{\sigma\beta}^\alpha v^\sigma$	$D_{\beta a}{}^b = \partial_\beta 1_a{}^b + ig A_{\beta a}{}^b$
$R^\delta{}_{\mu\alpha\beta} v^\mu = [D_\alpha, D_\beta] v^\delta$	$F_{\alpha\beta a}{}^b = \frac{1}{ig} [D_{\alpha a}{}^c, D_{\beta c}{}^b]$
$R^\delta{}_{\mu\alpha\beta} = \Gamma_{\mu\alpha \beta}^\delta - \Gamma_{\mu\beta \alpha}^\delta$ $+ \Gamma_{\nu\beta}^\delta \Gamma_{\mu\alpha}^\nu + \Gamma_{\nu\alpha}^\delta \Gamma_{\mu\beta}^\nu$	$= A_{\beta a}{}^b _\alpha - A_{\alpha a}{}^b _\beta$ $+ \frac{1}{ig} [A_{\alpha a}{}^c, A_{\beta c}{}^b]$
$\mathcal{L}_G = R + \underbrace{(c_1 R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + \dots)}_{\equiv 0 \text{ for ART}}$	$\mathcal{L}_{YM} = \frac{1}{4} F_{\mu\nu a}{}^b F^{\mu\nu}{}_a{}^b$

Quantum ChromoDynamic:

($SU(3)_{(c)}$ - Color Yang-Mills-Gauge Theory)

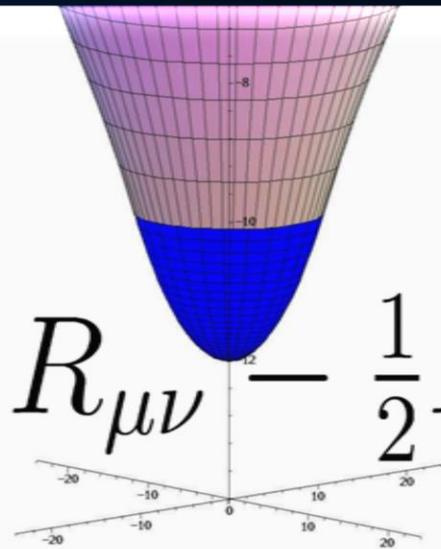
$$D_{\beta A}{}^B = \partial_\beta 1_A{}^B + ig G_{\beta A}{}^B$$

$A, B = \text{red, green, blue}$



$$\psi_A^f = \begin{pmatrix} \psi_r^f \\ \psi_g^f \\ \psi_b^f \end{pmatrix}$$

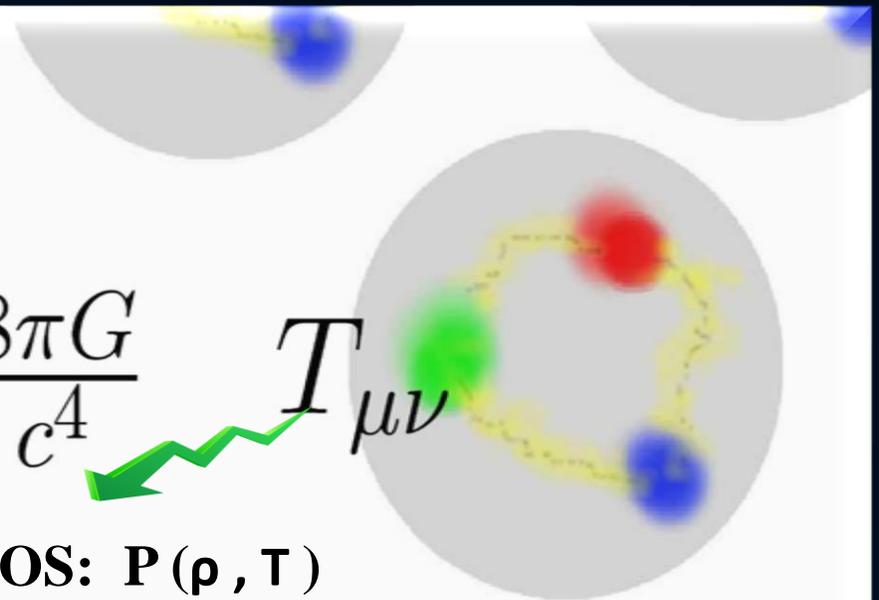
Confinement
chiral symmetry, ...



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} =$$

$$\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

EOS: $P(\rho, T)$

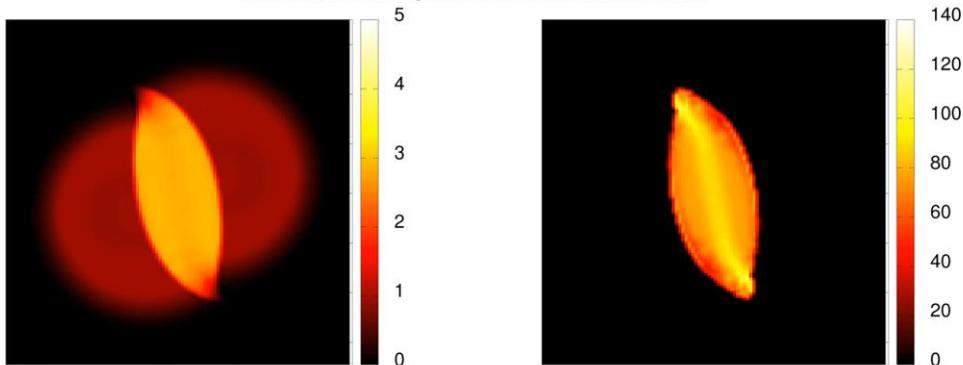




Die experimentelle Untersuchung der Eigenschaften der elementaren Materie



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



Dichte als Vielfache der normalen Kerndichte

Zeit= 8.88 fm/c

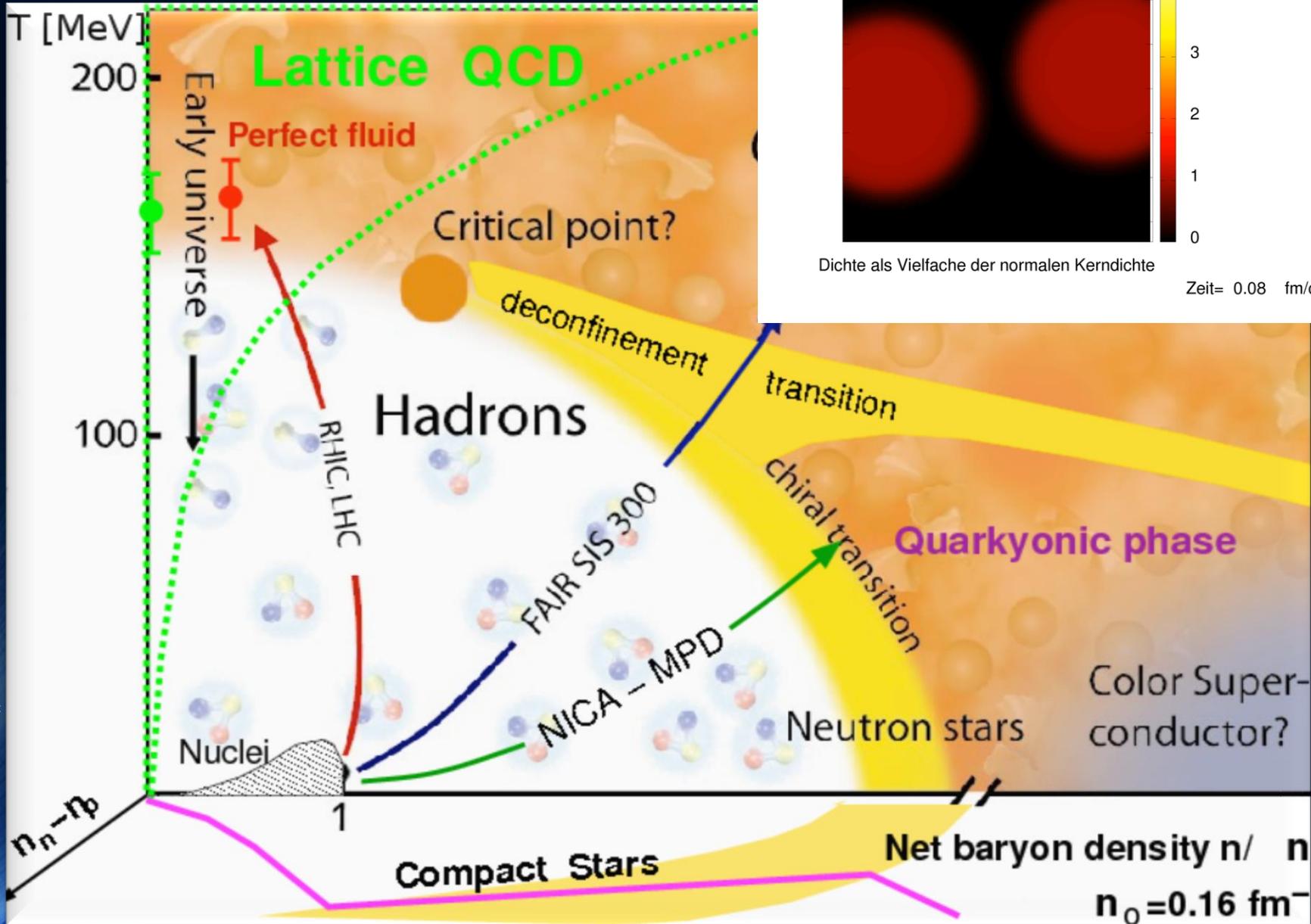
Temperatur in MeV

FAIR - Das Universum im Labor
Zurzeit entsteht in Darmstadt
das neue internationale
Beschleunigerzentrum FAIR,
eines der größten
Forschungsvorhaben weltweit

Mit FAIR wird Materie im Labor erzeugt und
erforscht werden, wie sie sonst nur im
Universum vorkommt

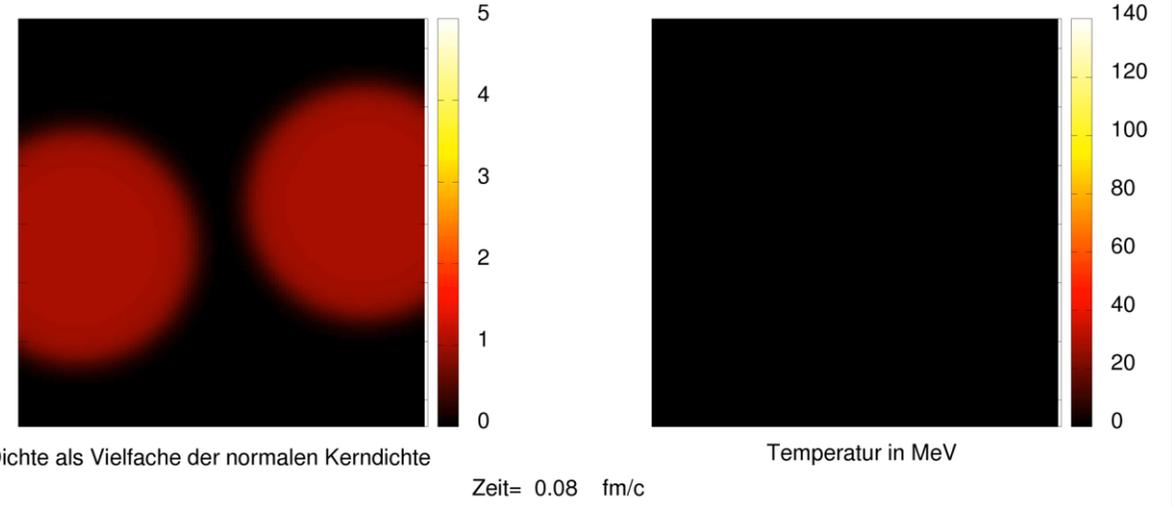
Der Hadron-Quark Phasenübergang

Temperatur vs. Dichte



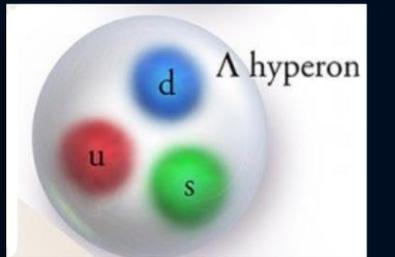
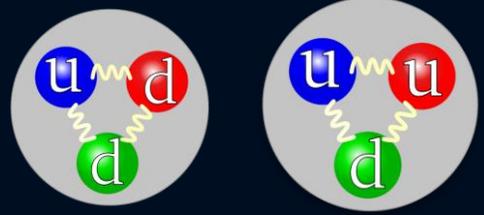
1 MeV \approx
 10^{10} Grad \approx
 10000
 heißer als
 im Inneren
 der Sonne

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

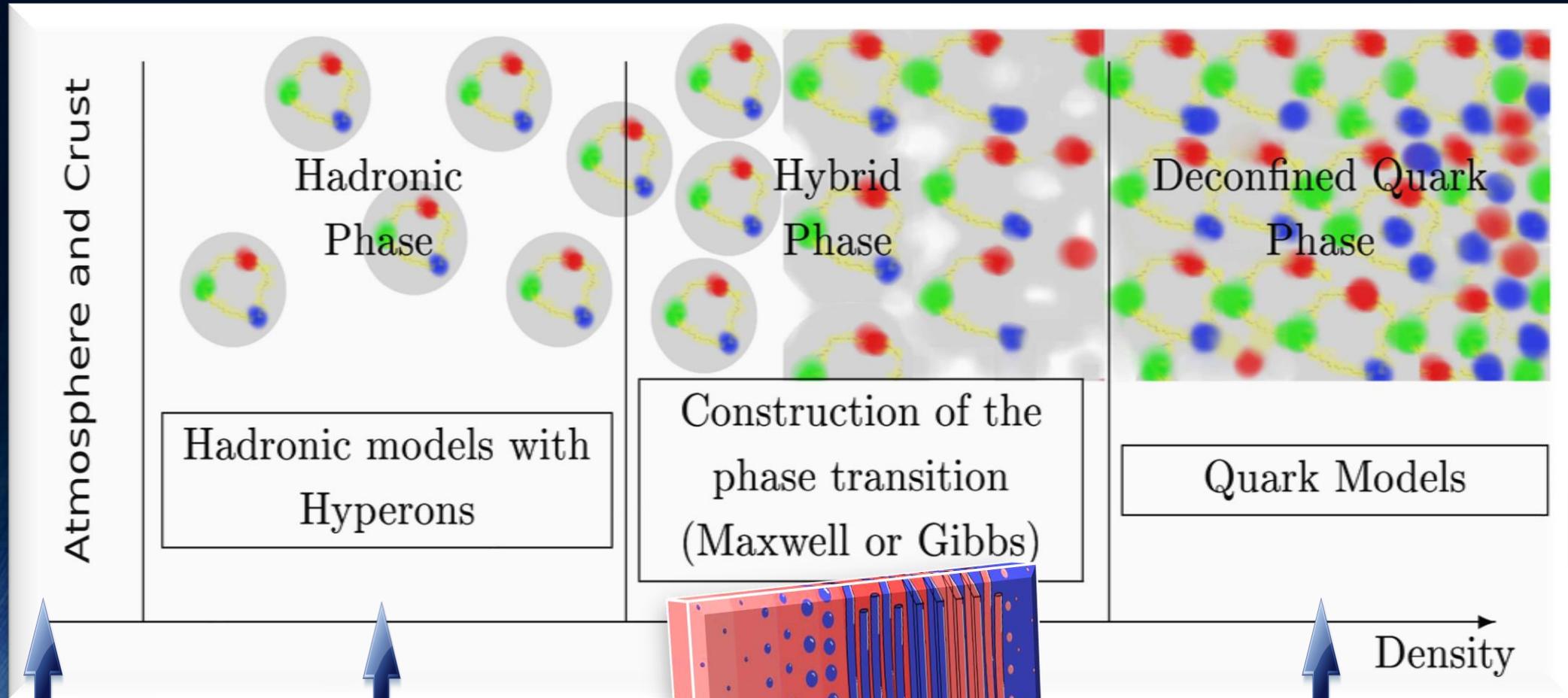


Hadronische Teilchen

Neutron Proton

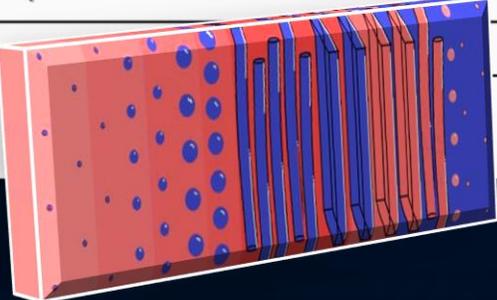


Das Innere von hybriden Sternen



Äußere Eisenkruste

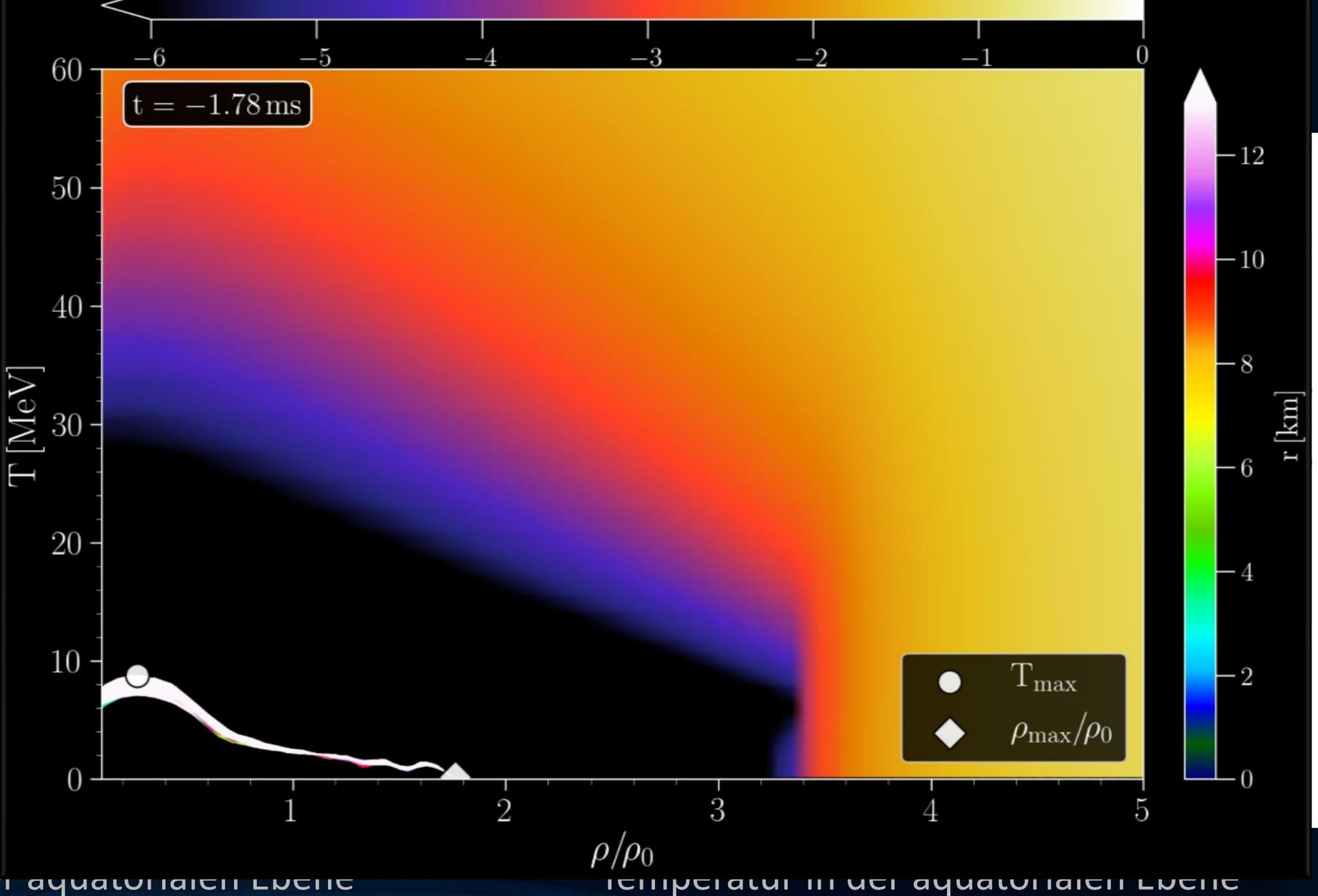
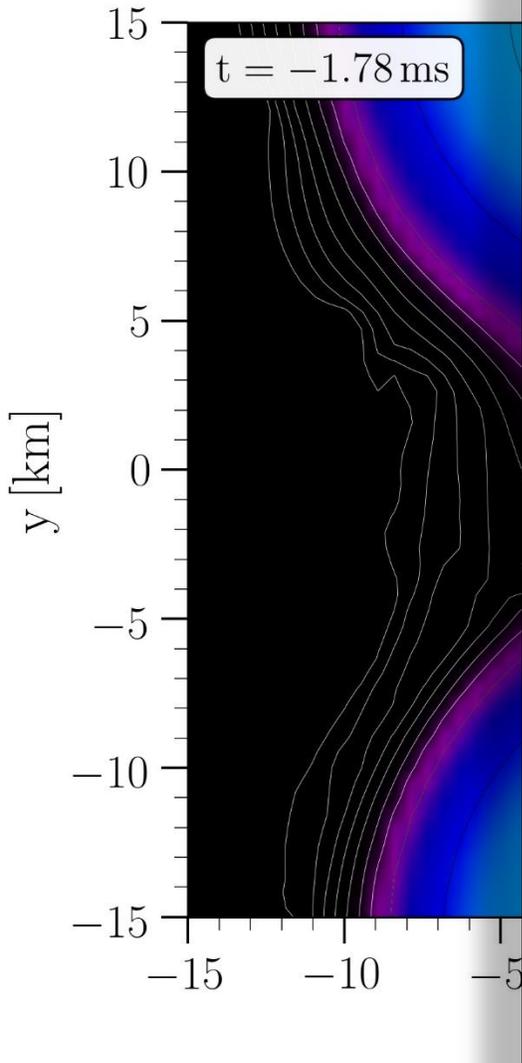
Neutronen und einige Protonen, Elektronen vielleicht auch Hyperonen



Phasenübergang vielleicht Pasta-Struktur

Befreite reine Quarkphase

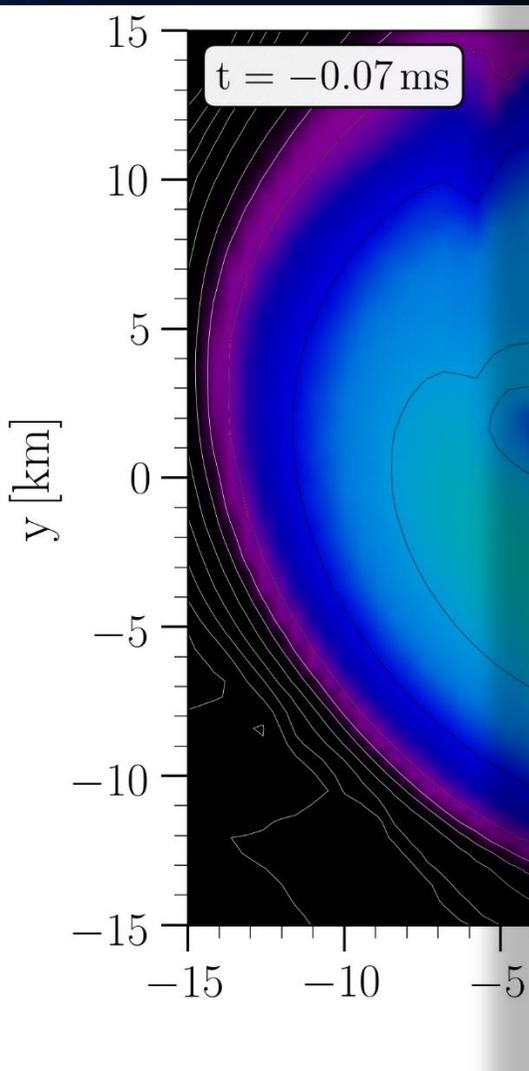
Kurz bei Neutronensterne



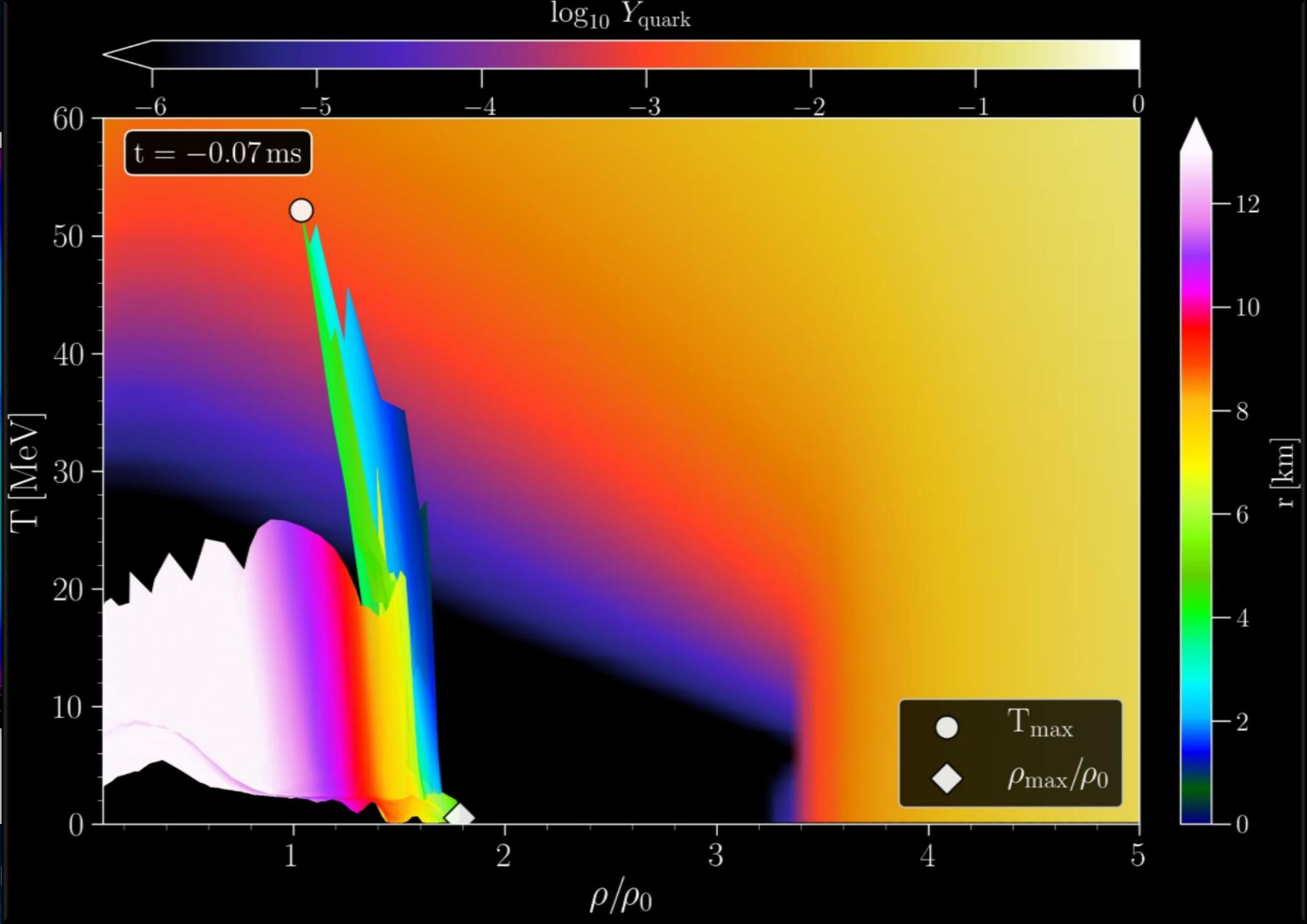
Dichte in der äquatorialen Ebene

Temperatur in der äquatorialen Ebene

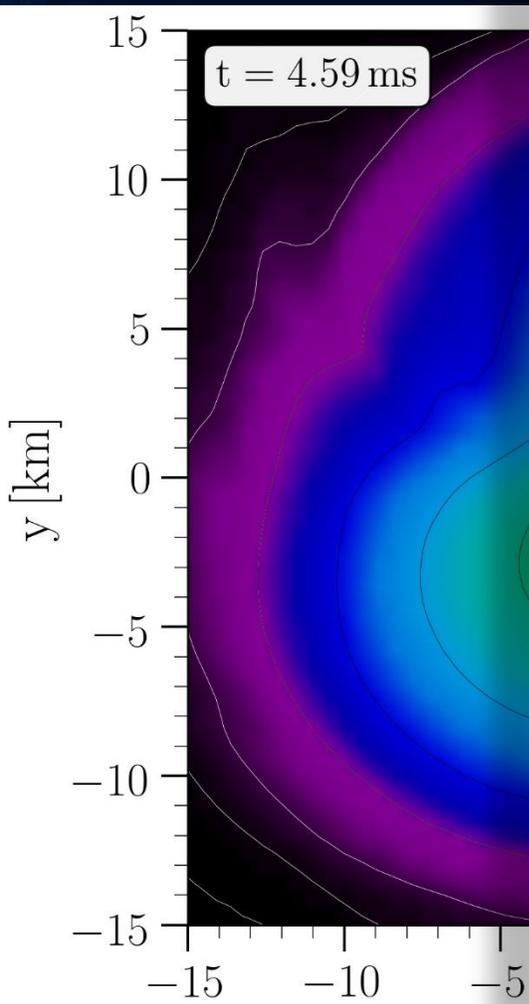
Zeitpunkt der Kollision



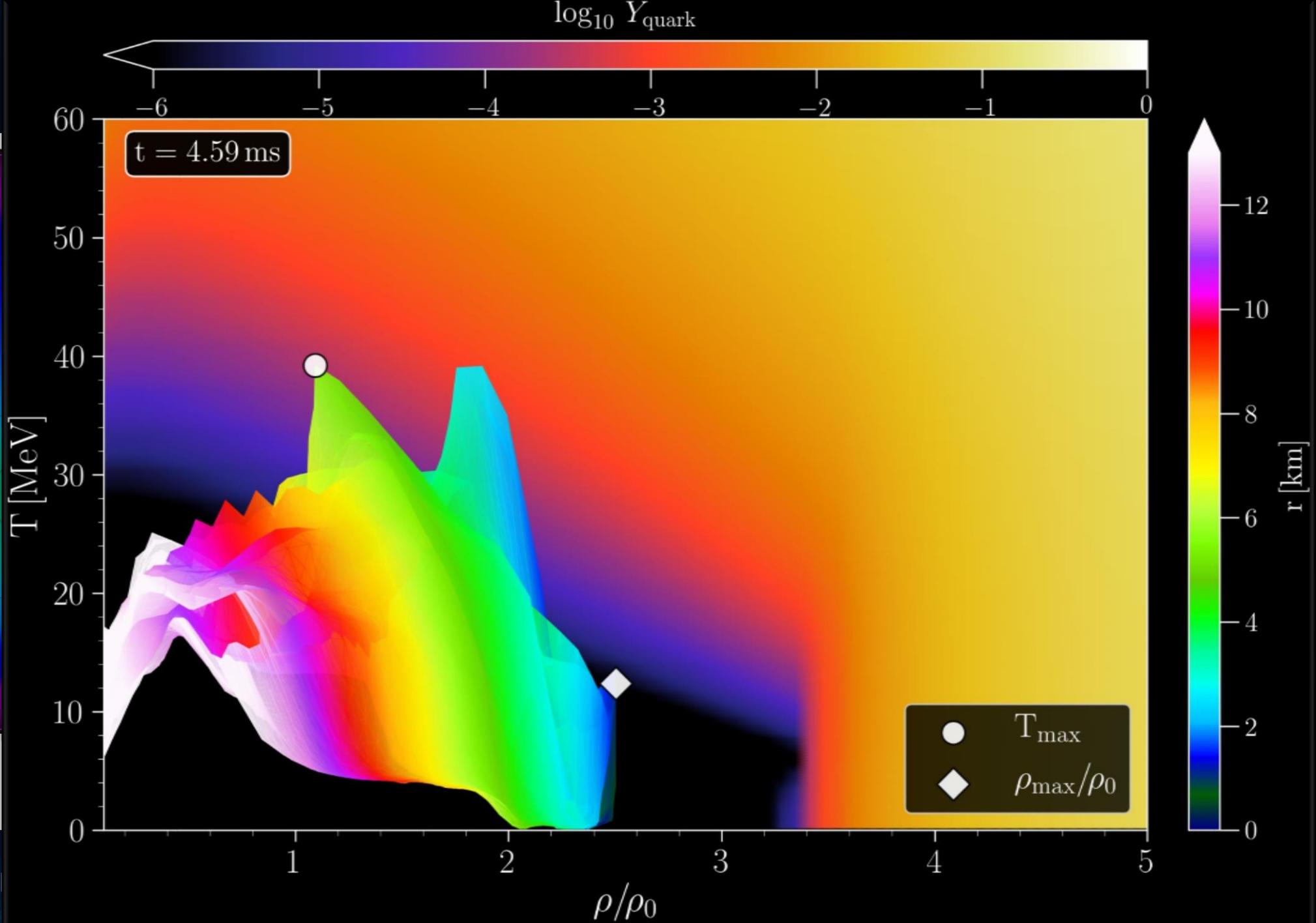
Dichte in de



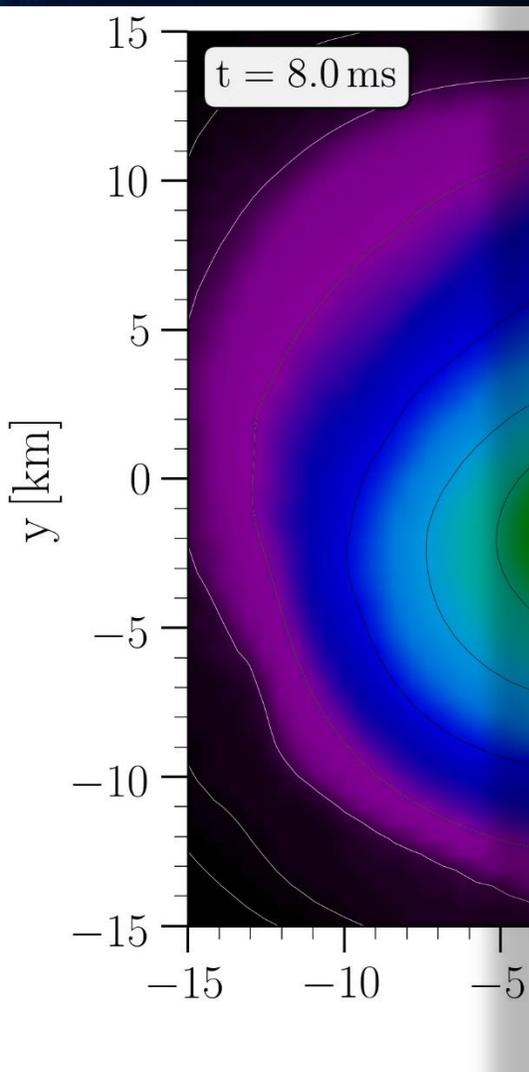
Post Merger Phase



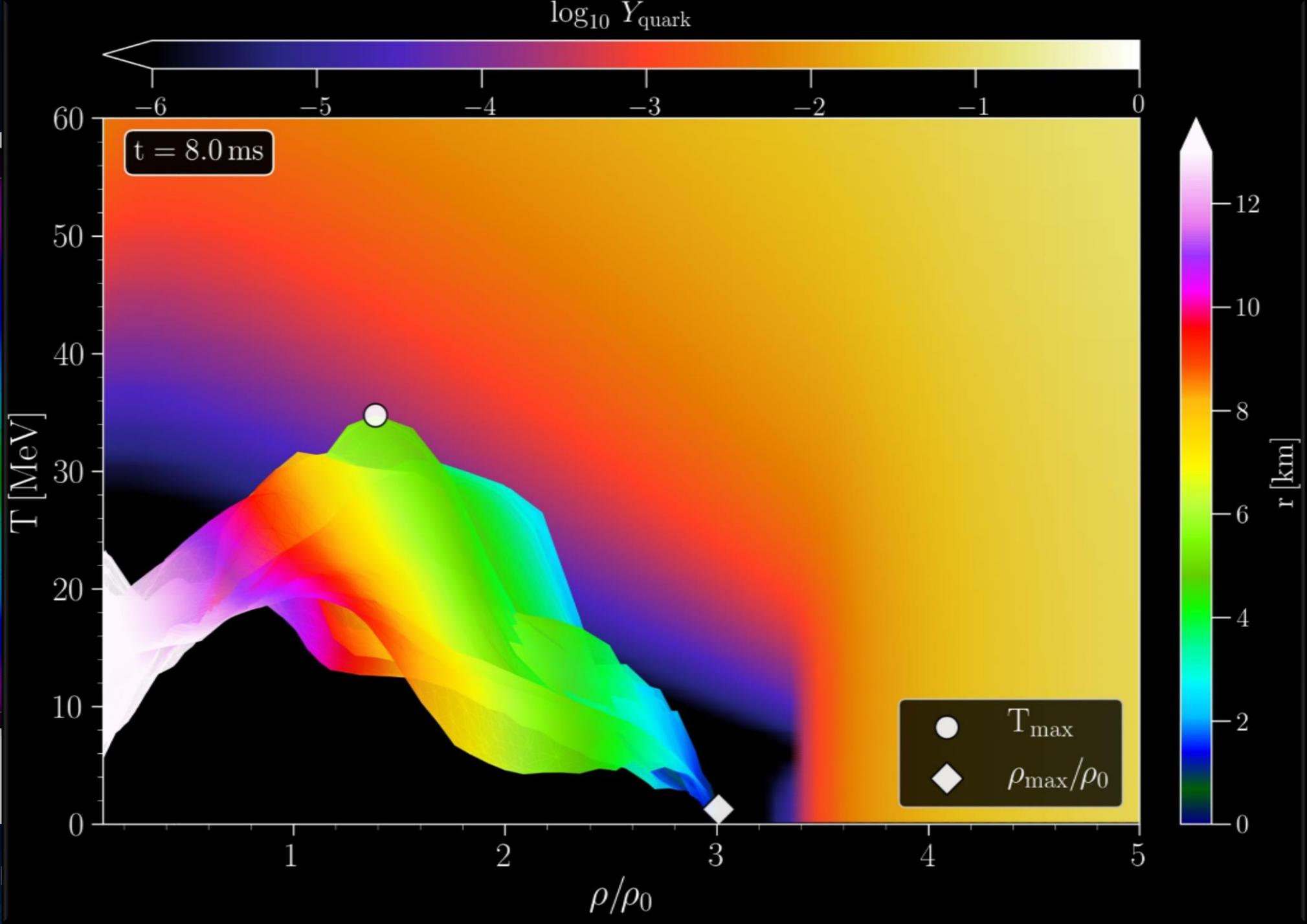
Dichte in de



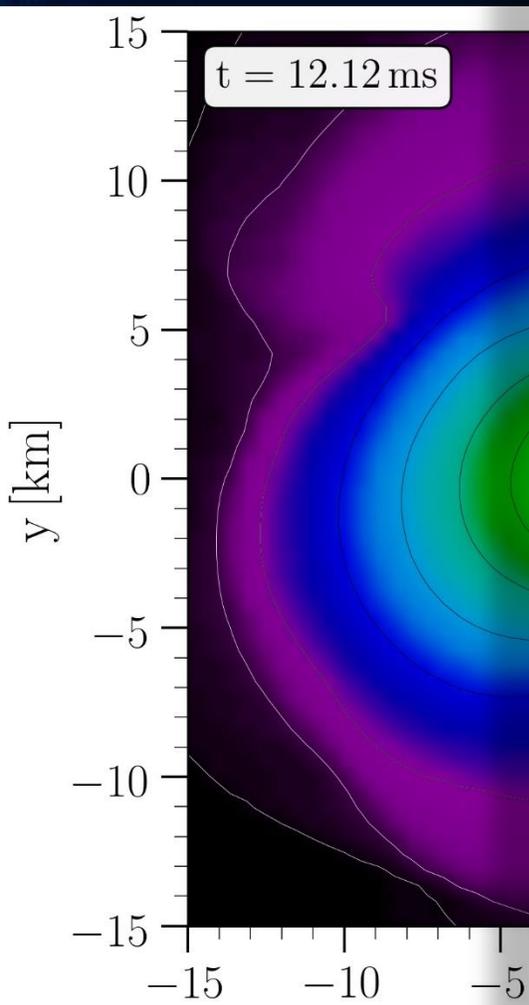
Post Merger Phase



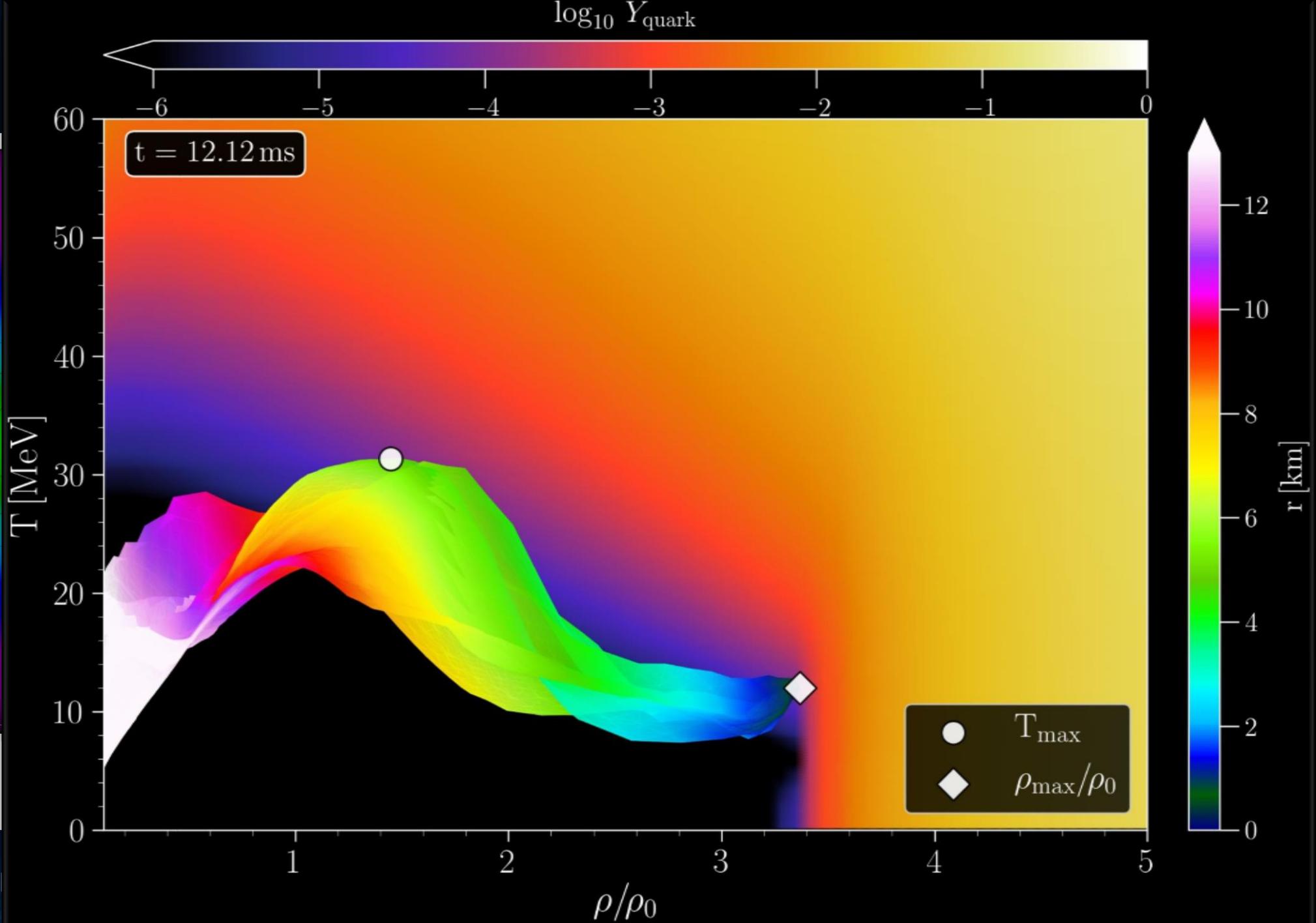
Dichte in de



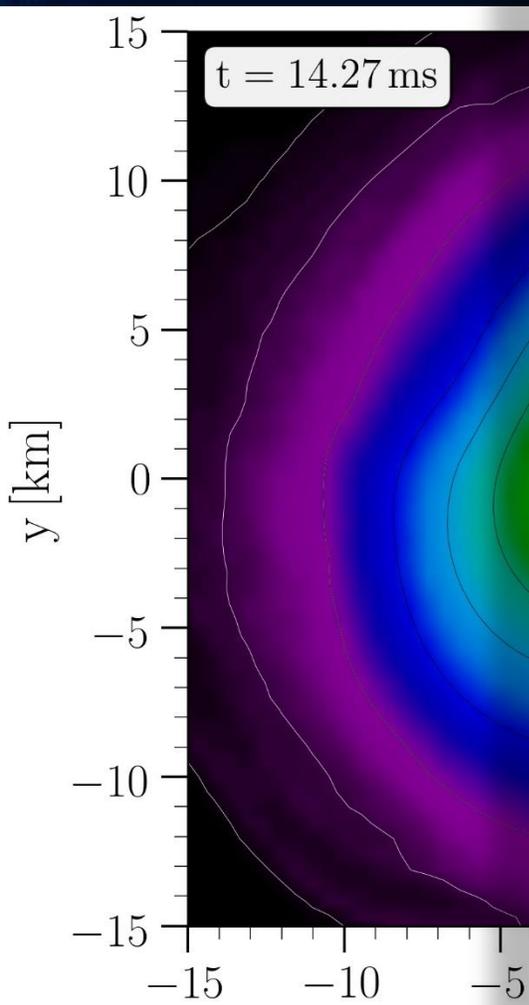
Post Merger Phase



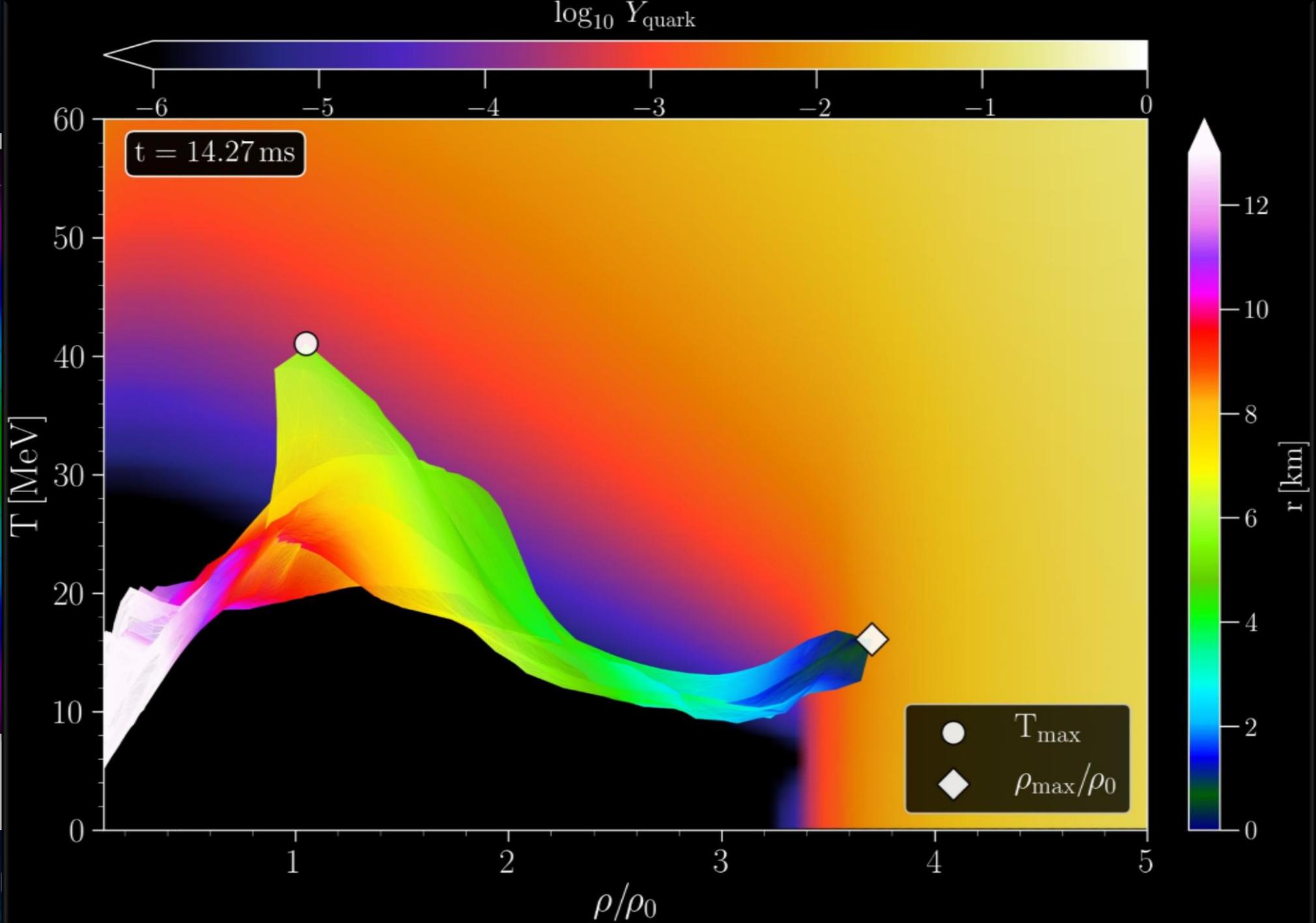
Dichte in de



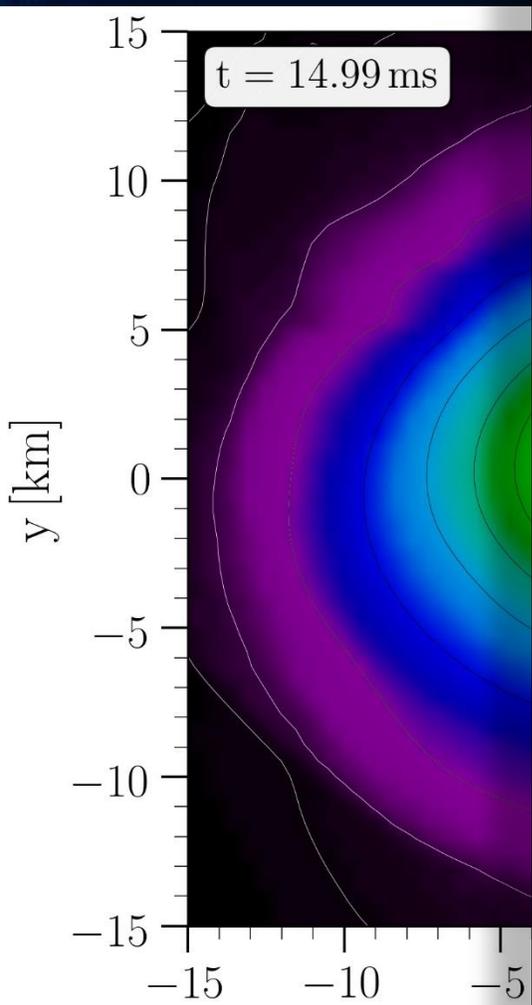
Post Merger Phase



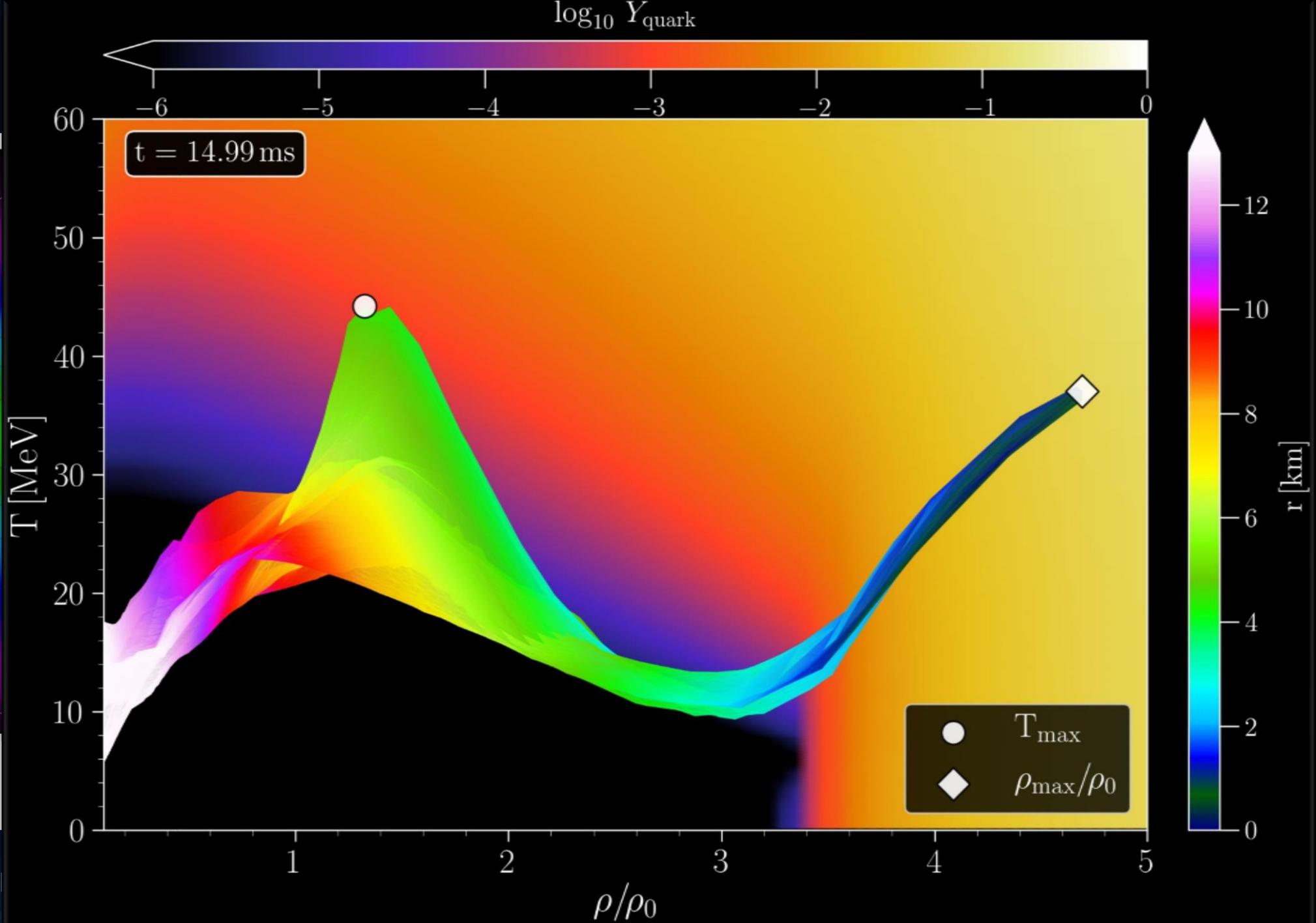
Dichte in de



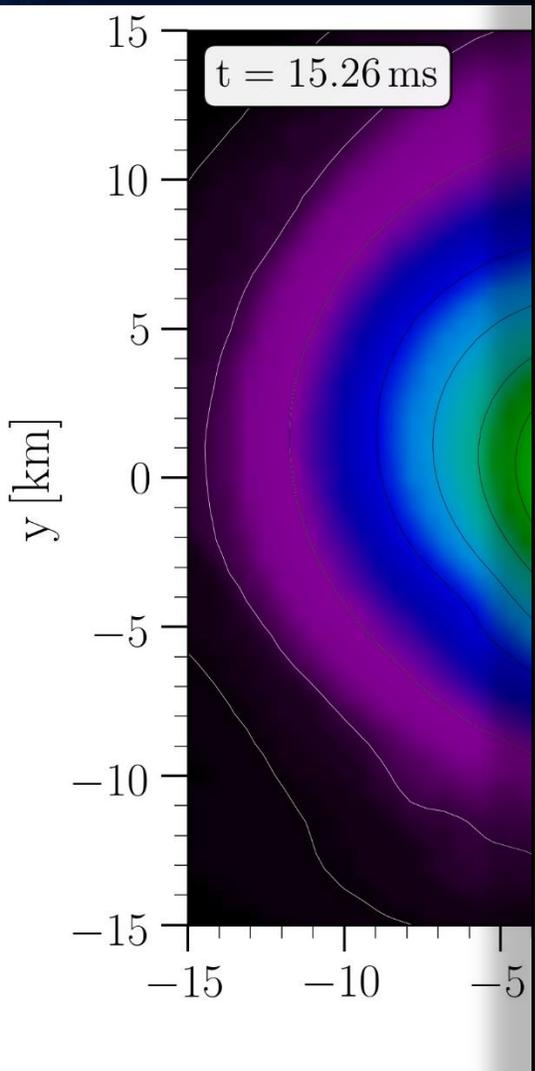
Post Merger Phase



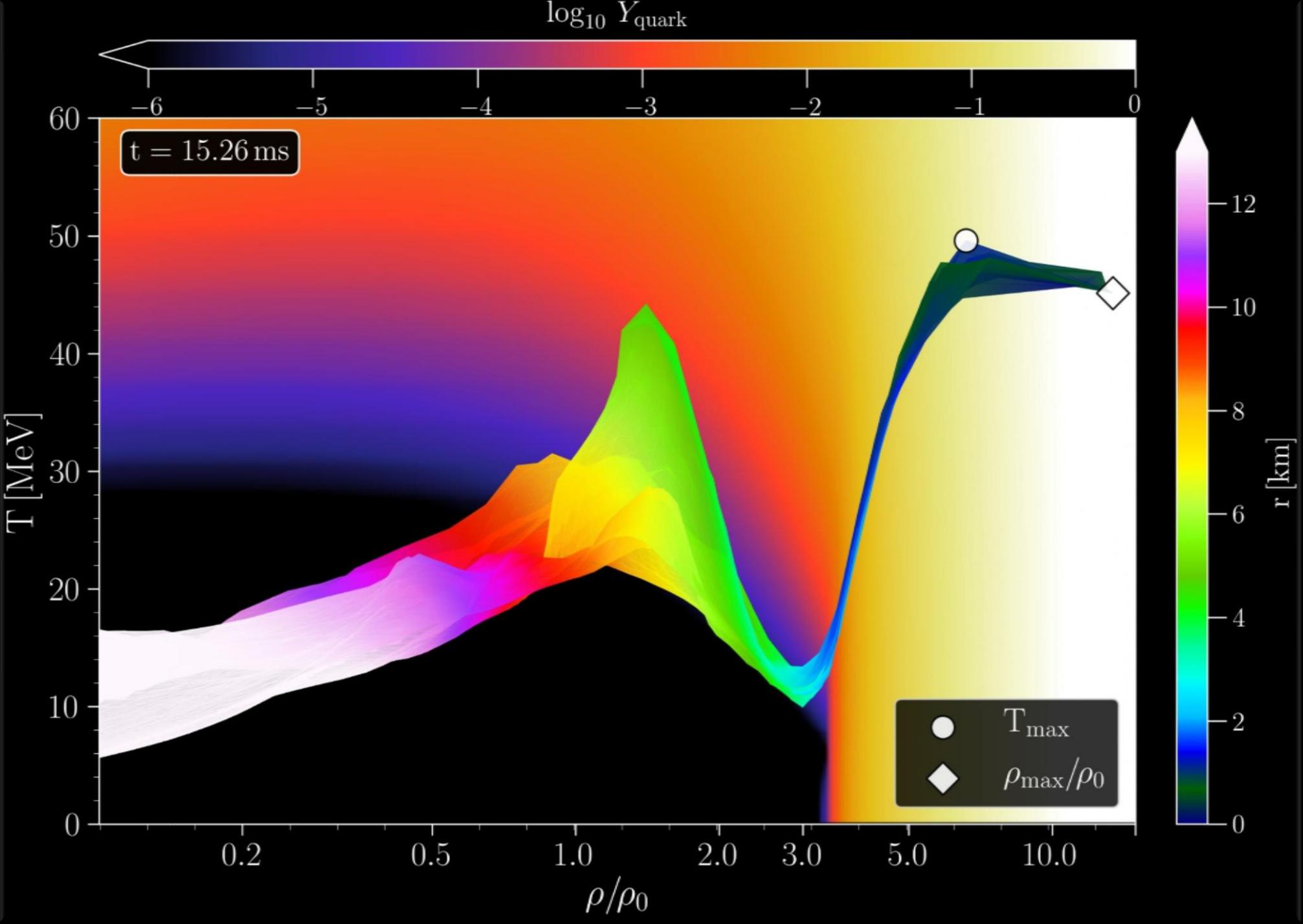
Dichte in de



Entstehung des schwarzen Lochs



Dichte in de

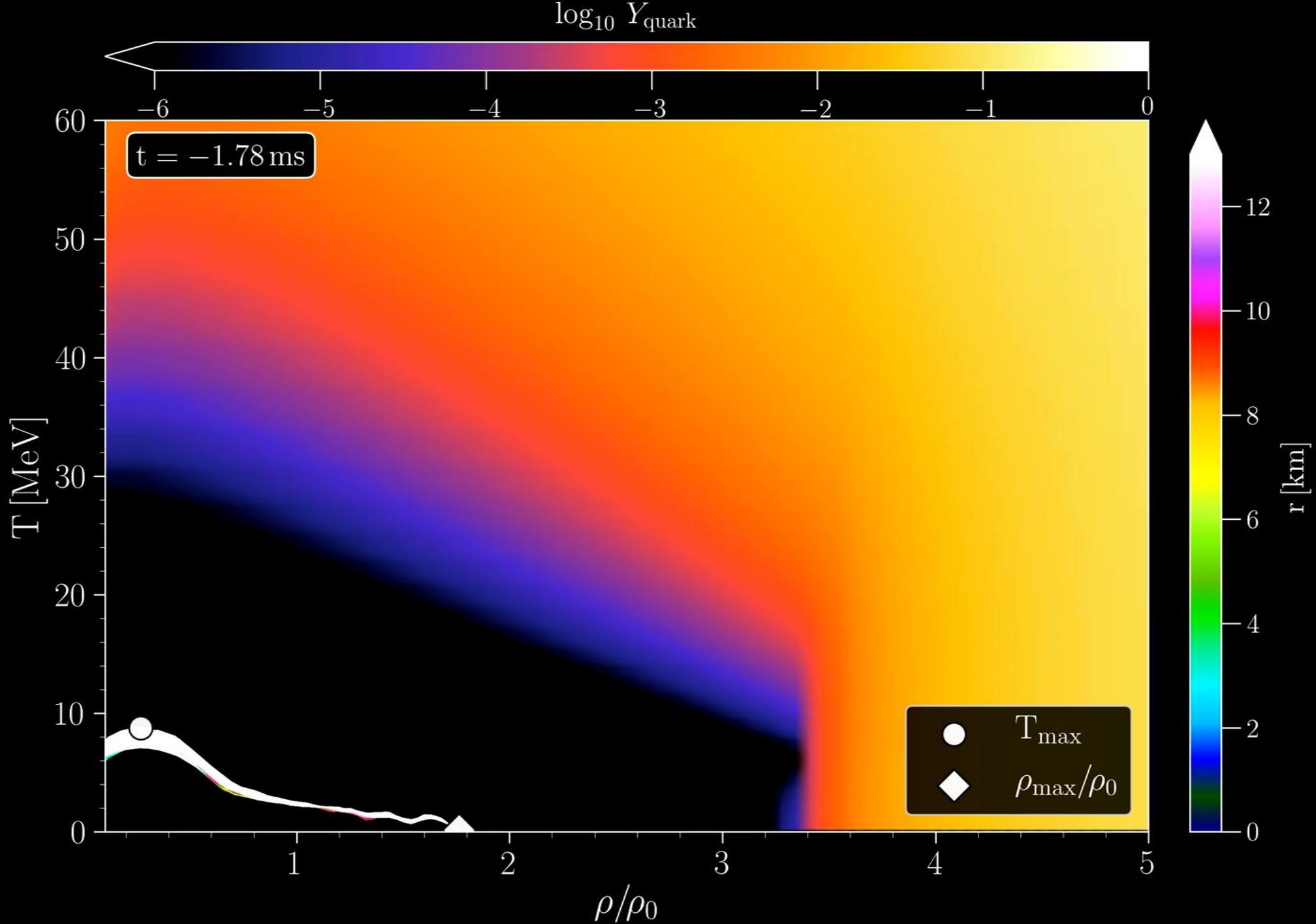


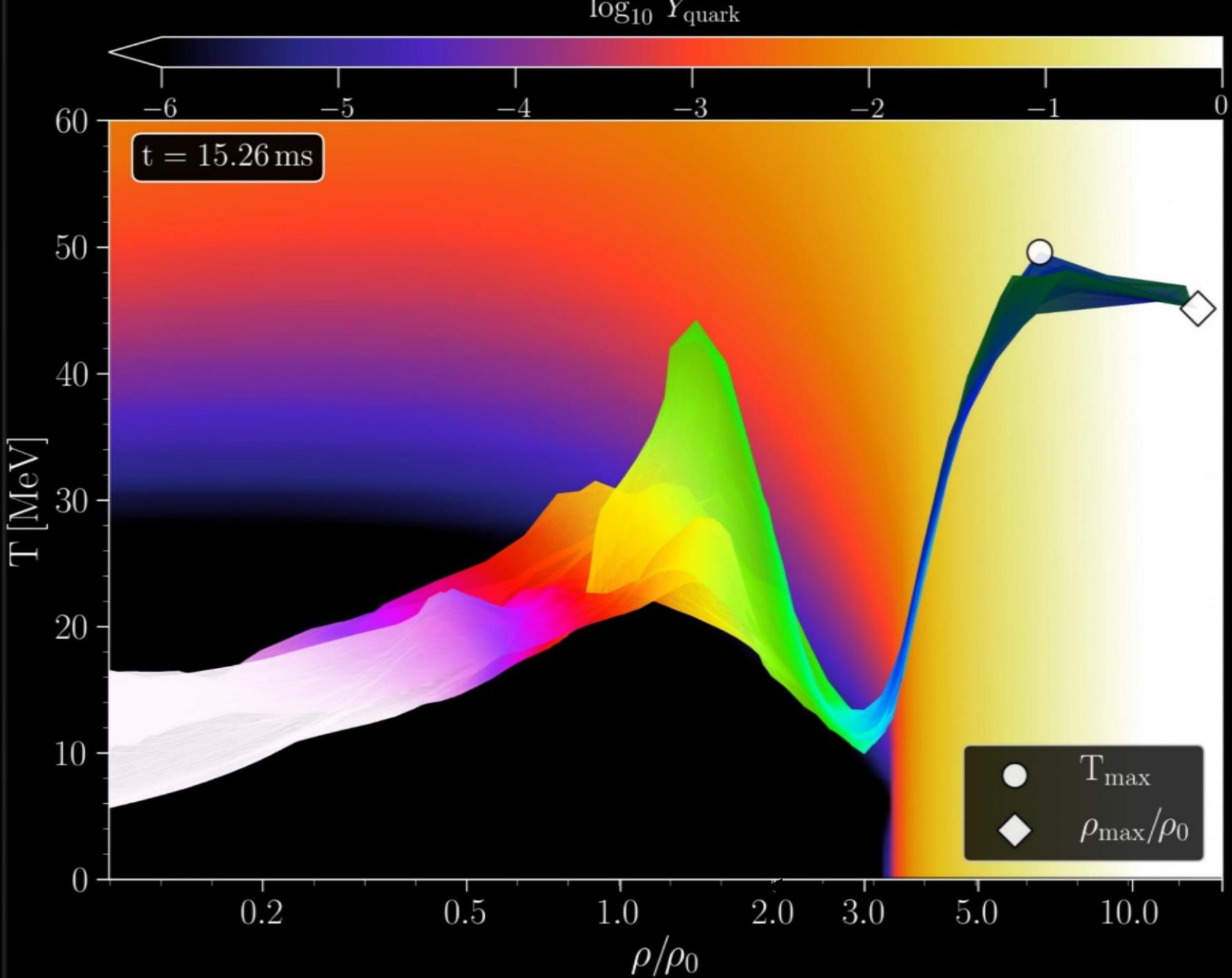
Phase-transition triggered collapse scenario

Signatures of quark-hadron phase transitions in general-relativistic neutron-star mergers

ER Most, LJ Papanfort, V Dexheimer, M Hanauske, S Schramm, H Stöcker and L. Rezzolla

Physical review letters 122 (6), 061101 (2019)

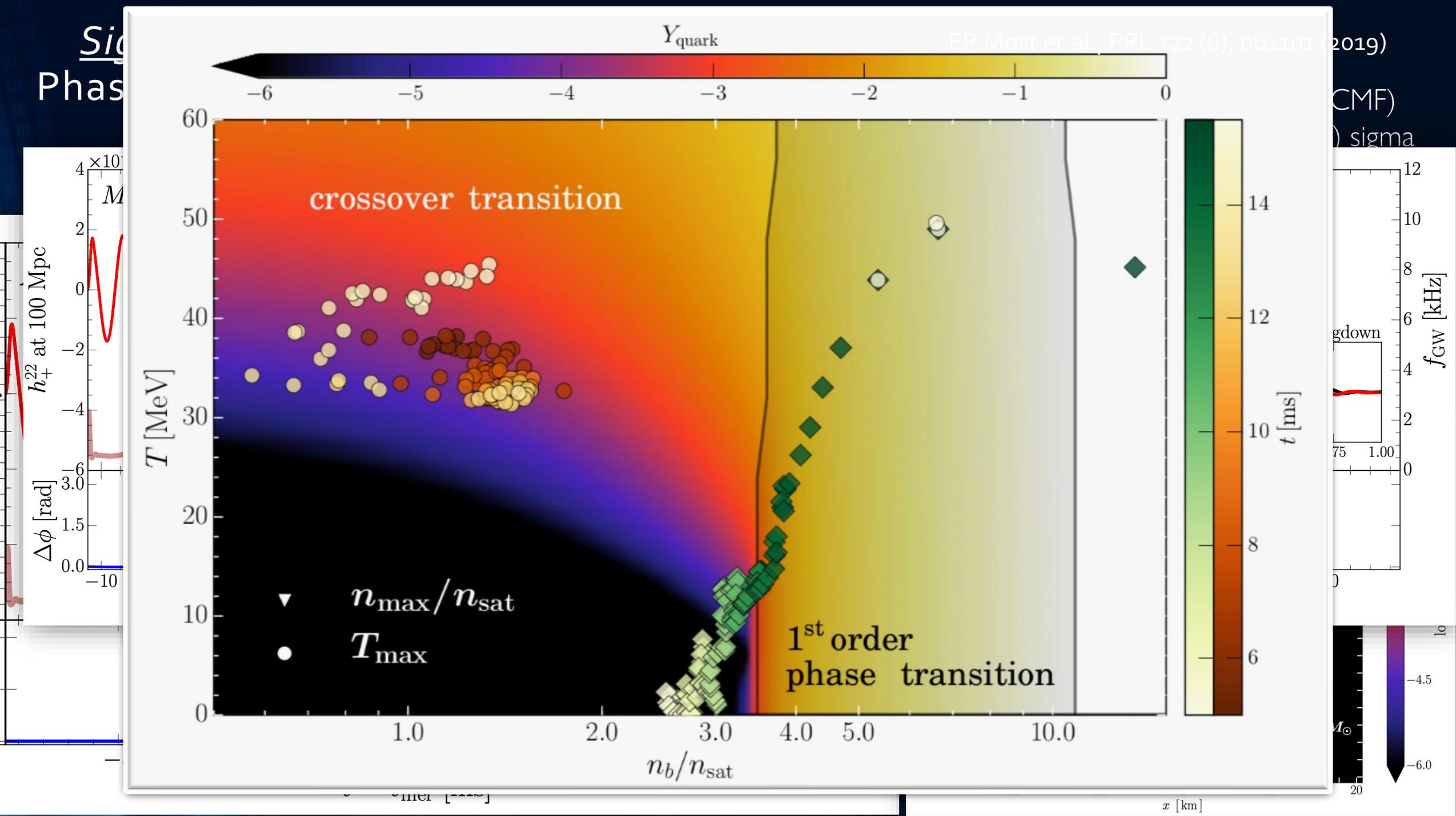




The Strange Bird Plot

Während sich im Kopf
 des seltsamen Vogels
 die Quarks bereits aus
 ihrem Confinement
 Käfig befreit haben,
 besteht sein Körper
 noch maßgeblich aus
 hadronischen Teilchen.

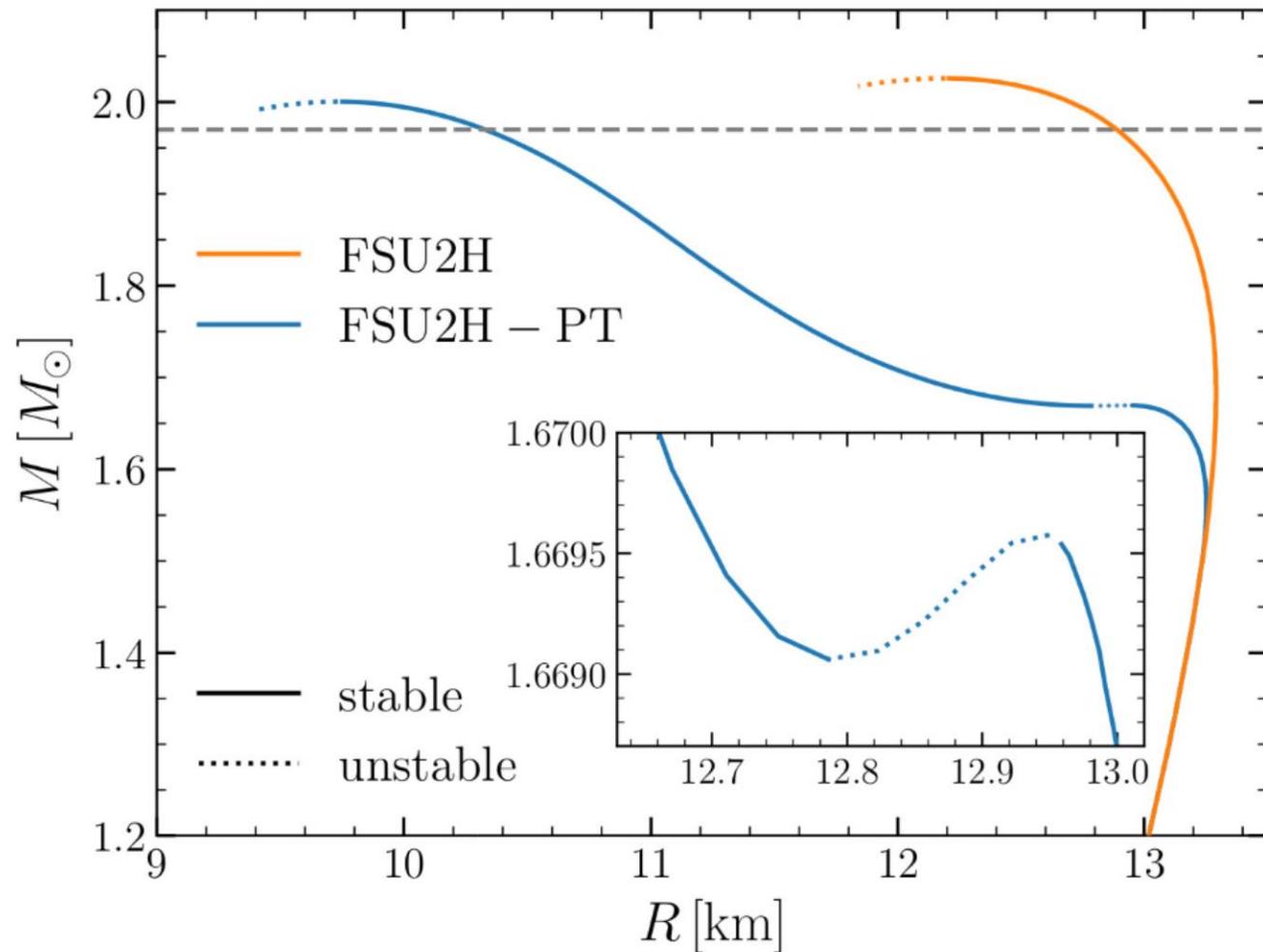
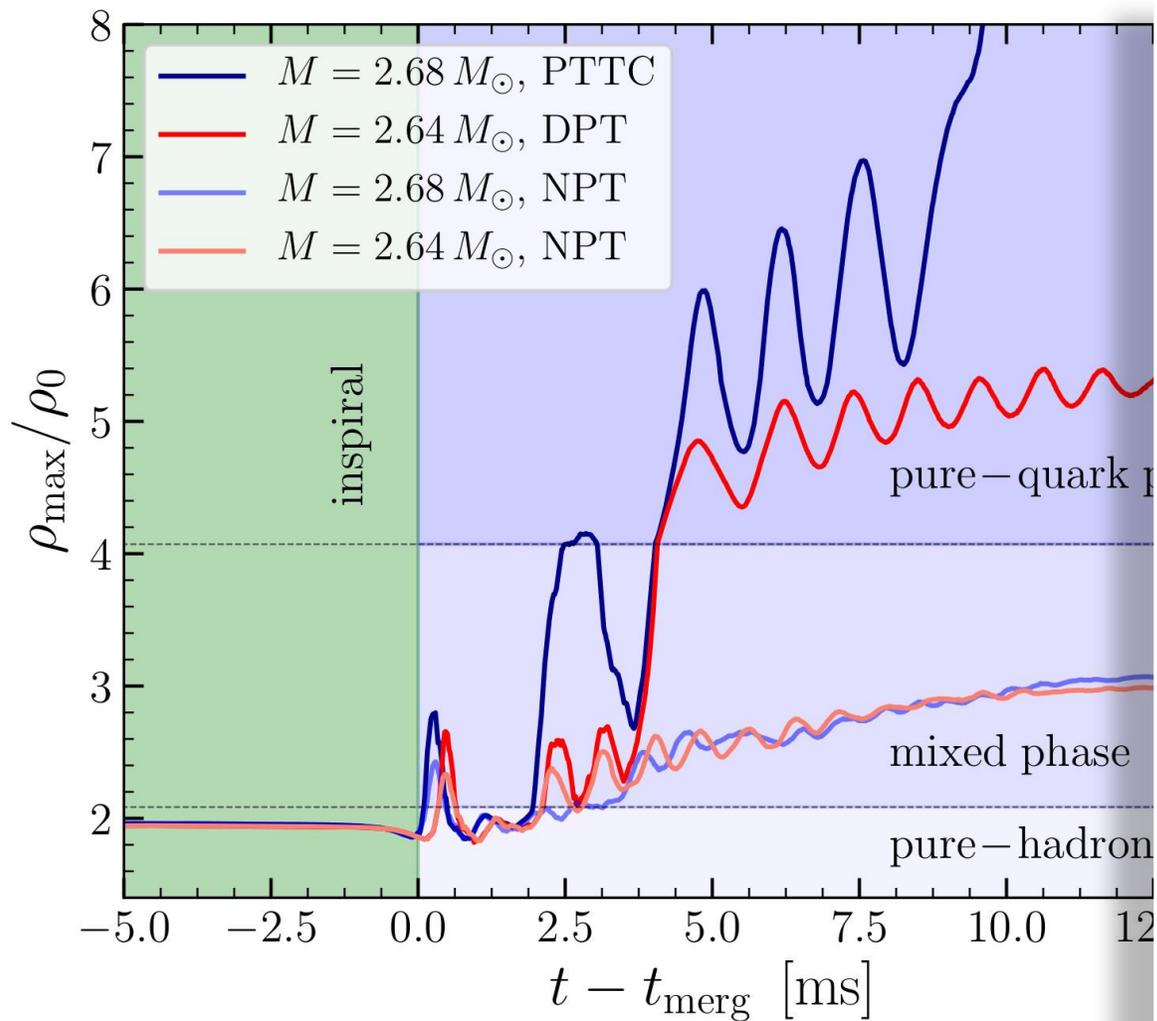
Gerade zu diesem
 Zeitpunkt bildet sich
 der Ereignishorizont
 um den dichten und
 heißen Vogelkopf und
 die befreite, seltsame
 Quarkmaterie wird
 durch die Bildung des
 schwarzen Loches
 makroskopisch
 confined.



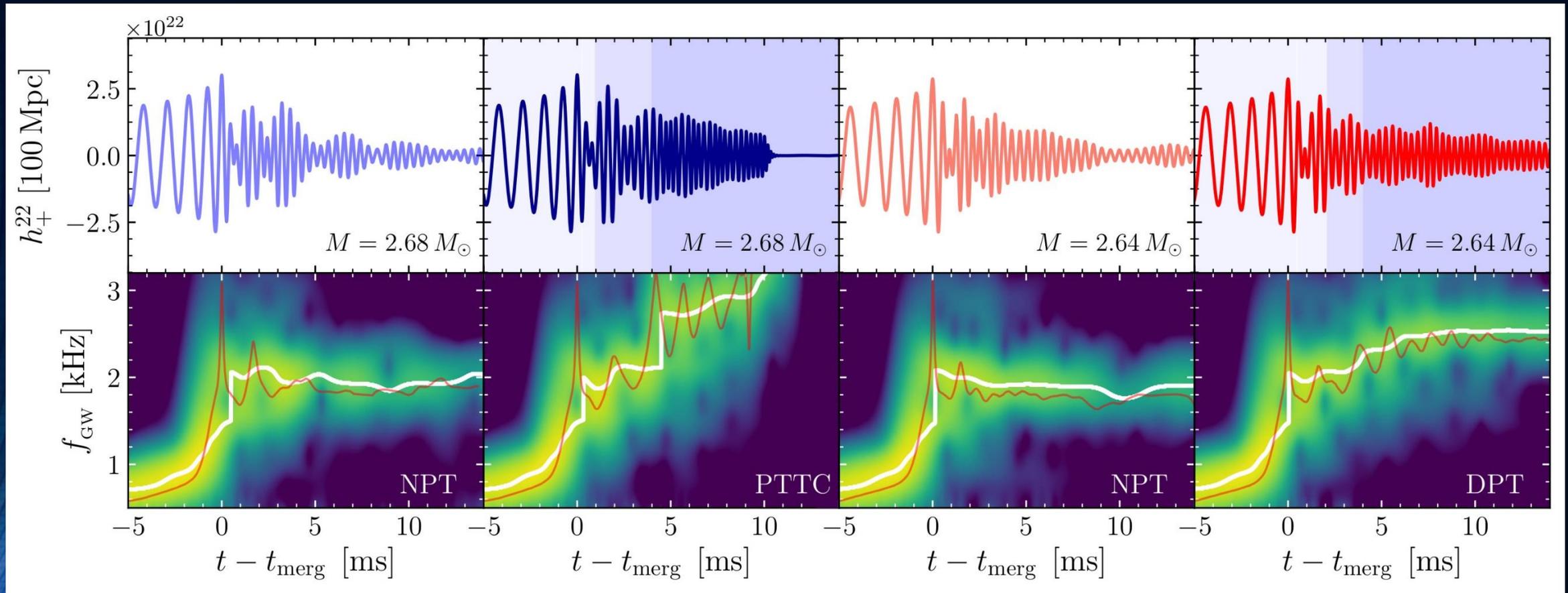
Signatures within the post-merger phase evolution

Delayed phase transition scenario

Postmerger Gravitational-Wave Signatures of Phase Transitions in Binary Mergers; LR Weih, M Hanauske, L Rezzolla; Physical Review Letters 124 (17), 171103 (2020)

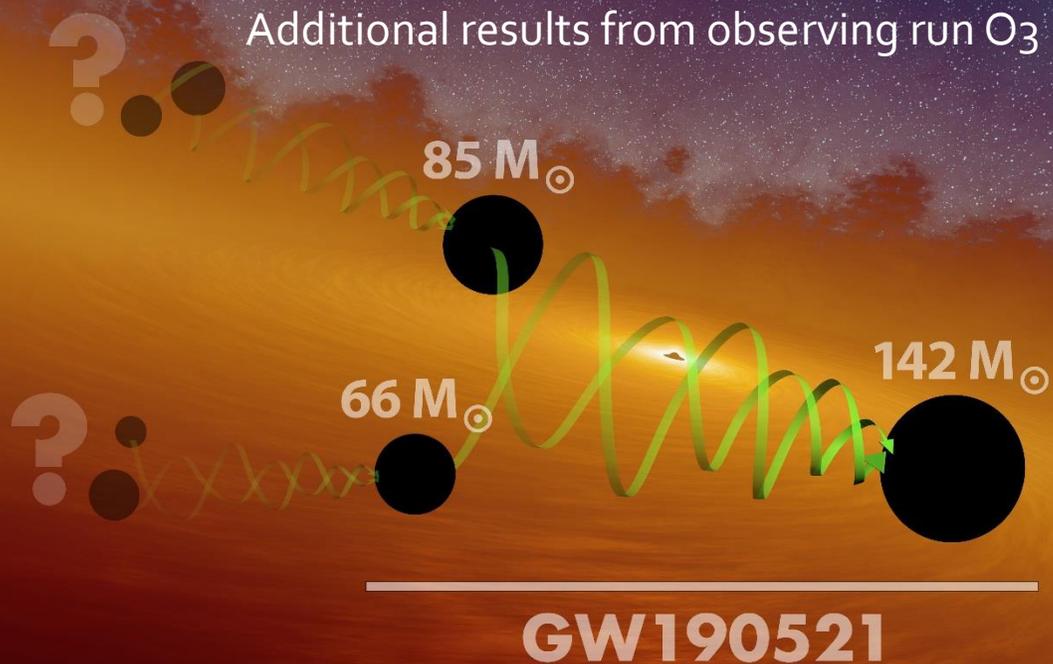


Postmerger Gravitational-Wave Signatures of Phase Transitions in Binary Mergers; LR Weih, M Hanauske, L Rezzolla; Physical Review Letters 124 (17), 171103 (2020)

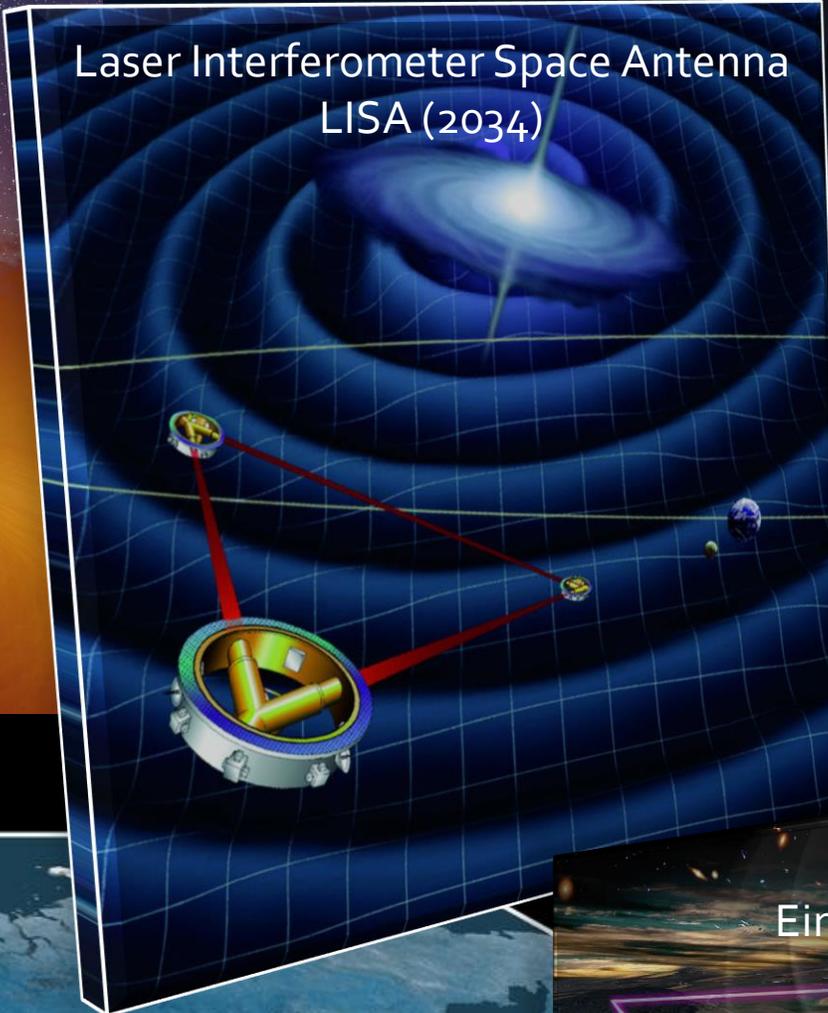


Strain h_+ (top) and its spectrogram (bottom) for the four BNSs considered. In the top panels the different shadings mark the times when the HMNS core enters the mixed and quark phases the NPT models are always purely hadronic. In the bottom panels, the white lines trace the maximum of the spectrograms, while the red lines show the instantaneous gravitational-wave frequency.

Additional results from observing run O₃



Laser Interferometer Space Antenna
LISA (2034)



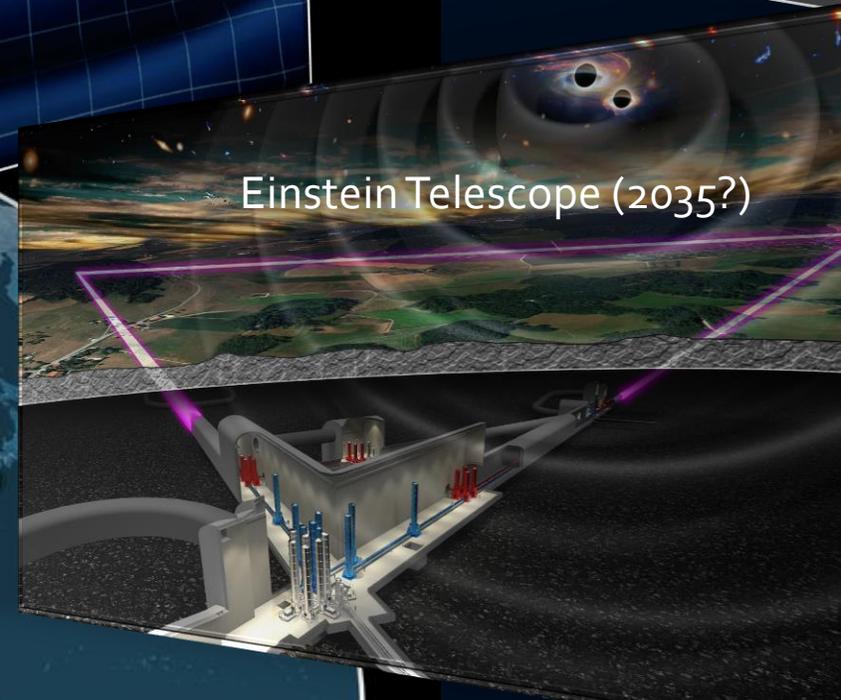
Cosmic Explorer (2035?)



The next observing runs (O₄, O₅, ..)

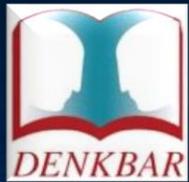


Einstein Telescope (2035?)



Gravitationswellen und Quantenspieltheorie erweitern den Horizont menschlicher Erkenntnis

DENKBAR-ONLINE



FRANKFURT AM MAIN

MATTHIAS HANAUSKE

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

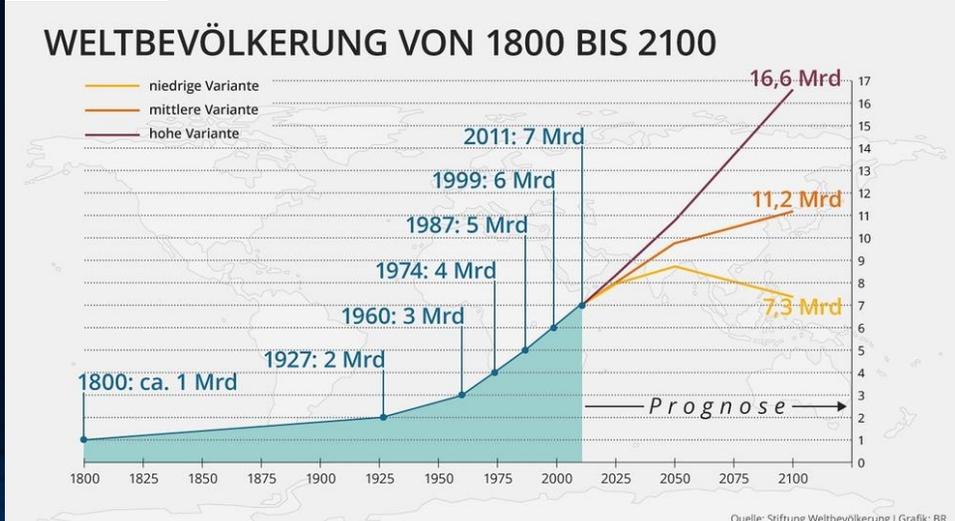
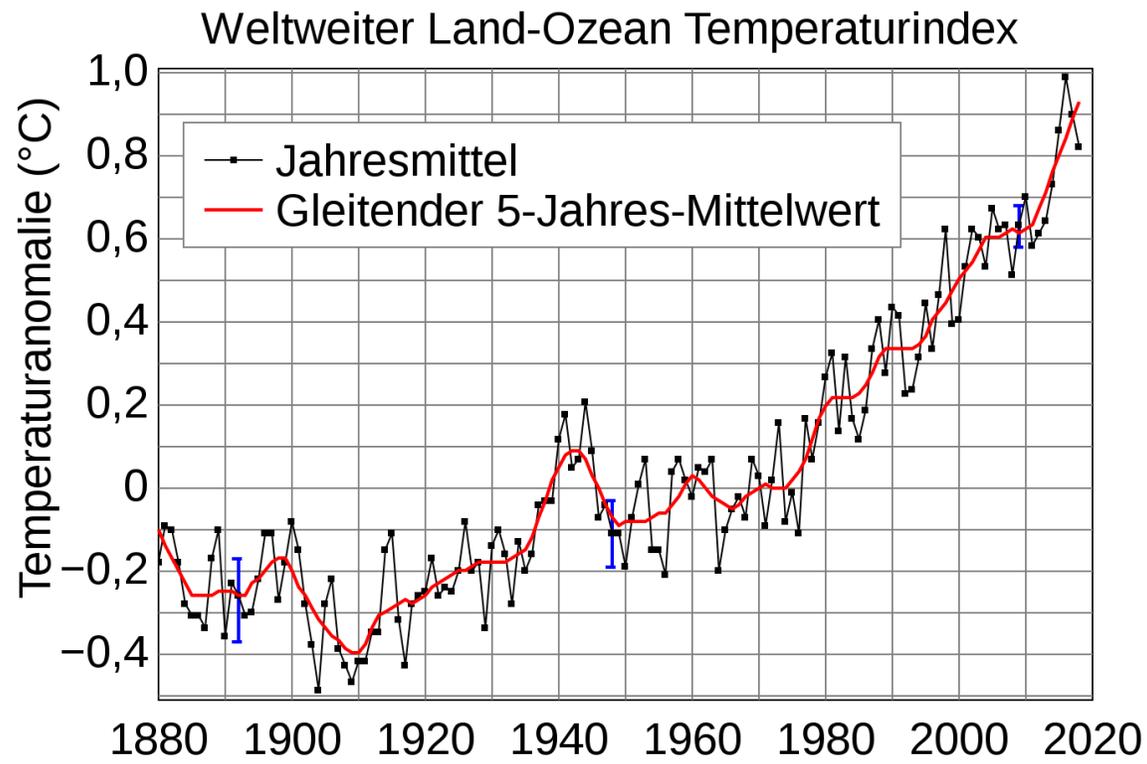
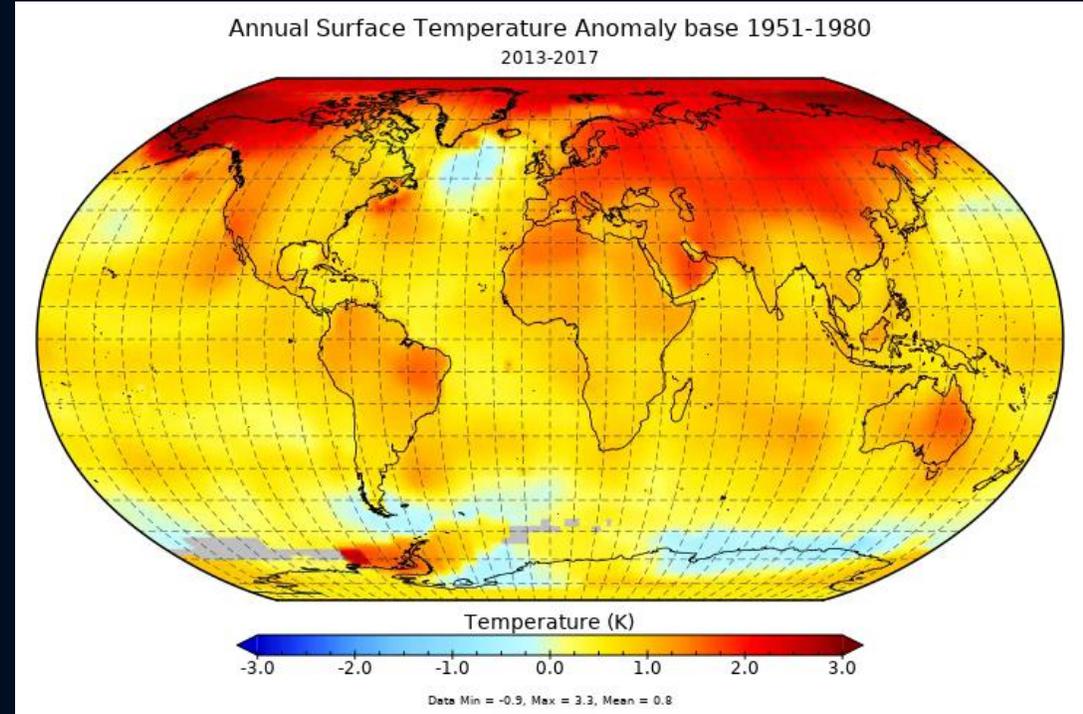
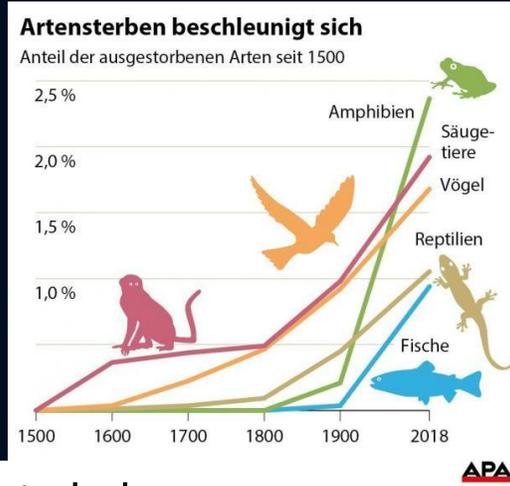
Verein für Philosophie und Naturwissenschaft
Hinter der Natur



Die Menschheit ist widersprüchlicher Natur
Einerseits sind Menschen in der Lage, die Entwicklung des gesamten Universums zu verstehen und zu analysieren, und brillante Ideen wie die Vorhersage von Gravitationswellen und schwarzen Löchern durch Albert Einstein wurden kürzlich beobachtet. In Bezug auf diese Fähigkeit triumphiert die menschliche Natur über alle anderen Spezies, die auf unserem Planeten leben. Auf der anderen Seite ist gerade diese dominierende Natur des Menschen verantwortlich für die Menschheit bedrohende Krisen .

Evolutionäre Irrwege einer Population

Es gibt Spielkonstellationen in denen eine Population von Akteuren zu einem Dilemma-artigen Verhalten tendiert, welches global betrachtet nicht-optimal und unter Umständen sogar, für die eigene und andere Spezies, existenziell bedrohend sein kann.



Spielbaum eines simultanen (2 Personen)-(2 Strategien) Spiels

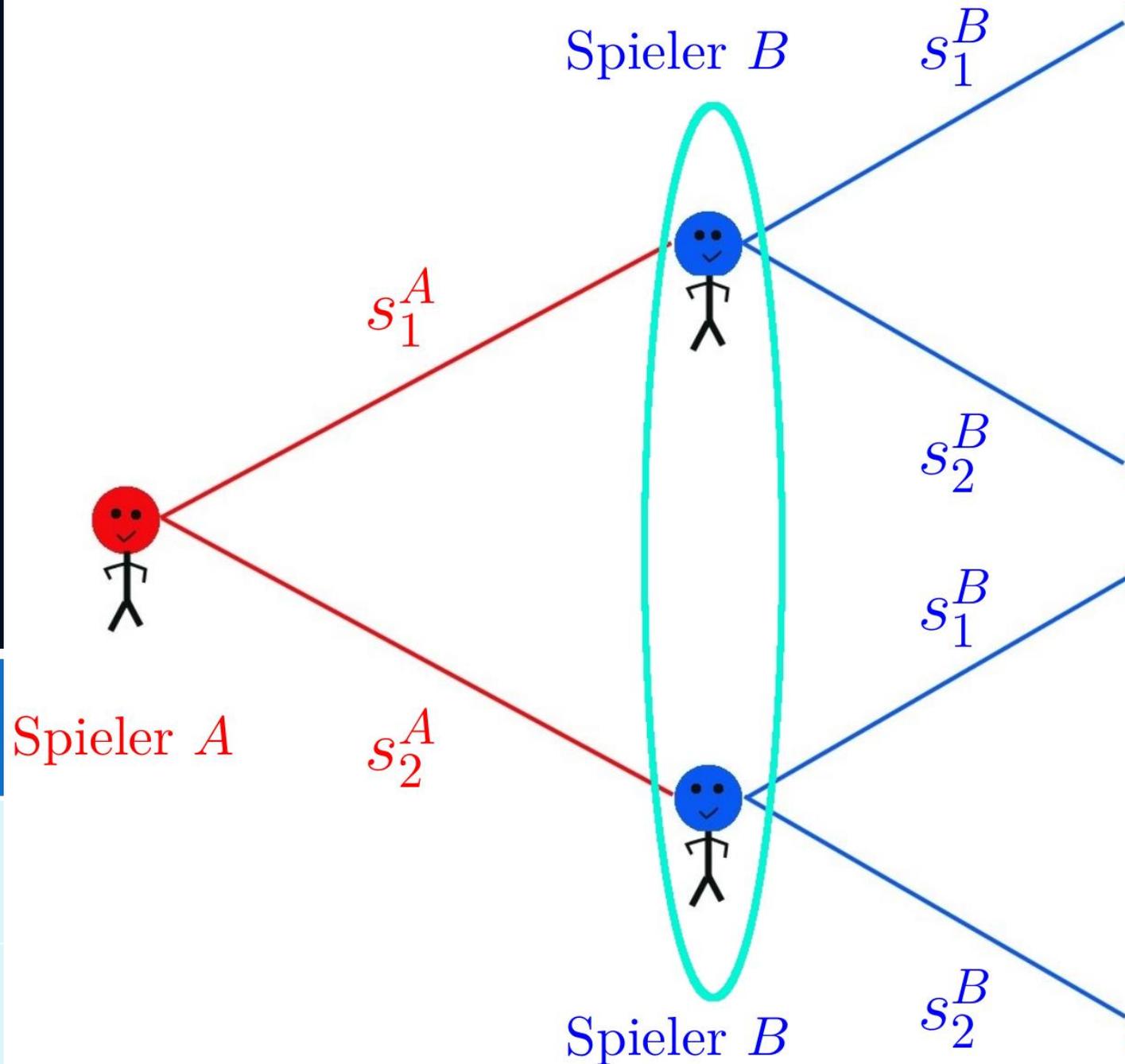
Definition des Spiels:

Menge der Spieler: A und B

Menge der Strategien: 1 und 2

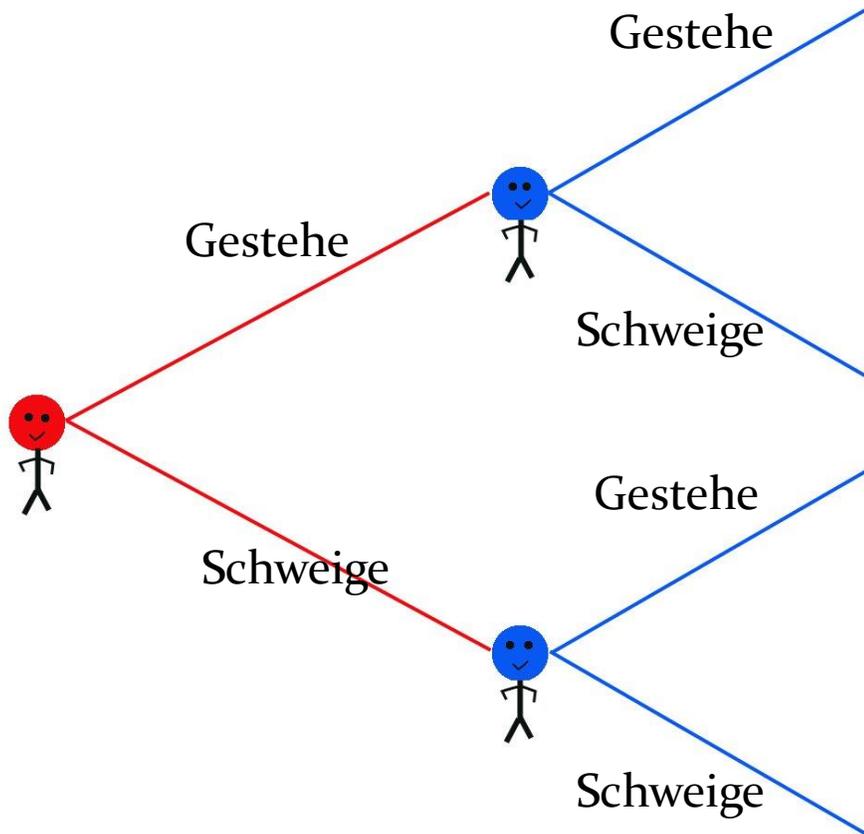
Auszahlungstabelle:

	Spieler B wählt Strategie 1	Spieler B wählt Strategie 2
Spieler A wählt Strategie 1	$(\$_{11}^A, \$_{11}^B)$	$(\$_{12}^A, \$_{12}^B)$
Spieler A wählt Strategie 2	$(\$_{21}^A, \$_{21}^B)$	$(\$_{22}^A, \$_{22}^B)$



Das Gefangenendilemma

	G	S
G	$(-7, -7)$	$(-1, -9)$
S	$(-9, -1)$	$(-3, -3)$



Bonnie und Clyde werden nach einem missglückten Banküberfall geschnappt und in verschiedenen Zellen untergebracht. Wenn beide schweigen kann der Staatsanwalt sie nur wegen verbotenen Waffenbesitzes für drei Jahre hinter Gitter bringen. Verrät jedoch einer den anderen, dann bekommt der Geständige als Zeuge der Anklage nur für ein Jahr hinter Gitter – der Nichtgeständige muss dann aber für neun Jahre ins Gefängnis. Gestehen beide, so müssen sie sieben Jahre absitzen.

Das Nash-Gleichgewicht im Gefangenendilemma

Ein Nash-Gleichgewicht ist eine Strategienkombination, von der aus kein Spieler einen Vorteil erhalten würde, wenn er von seiner Strategie abweicht. Die Spieler würden keine größere Auszahlung erhalten.

	Spieler B Gestehe	Spieler B Gestehe nicht
Spieler A Gestehe	$(-7, -7)$	$(-1, -9)$
Spieler A Gestehe nicht	$(-9, -1)$	$(-3, -3)$

Die Strategien-Kombination (Gestehe, Gestehe) ist das einzige Nash-Gleichgewicht des Spiels – die sogenannte dominante Strategie

Einfache Beispiele von Spielen mit Dilemmastrukturen

Dominantes Spiel

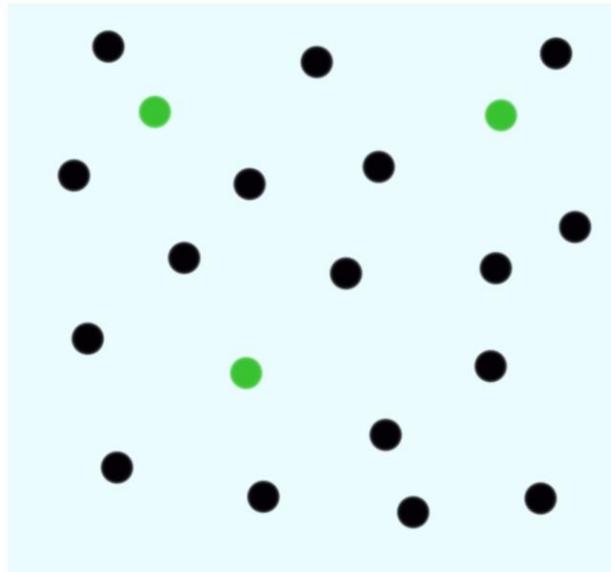
	Hoch	Runter
Hoch	$(-1, -1)$	$(2, -2)$
Runter	$(-2, 2)$	$(1, 1)$

Anti-Koordinationspiel

	Hoch	Runter
Hoch	$(-1, -1)$	$(2, 0)$
Runter	$(0, 2)$	$(1, 1)$

Evolutionäre Spieltheorie (I)

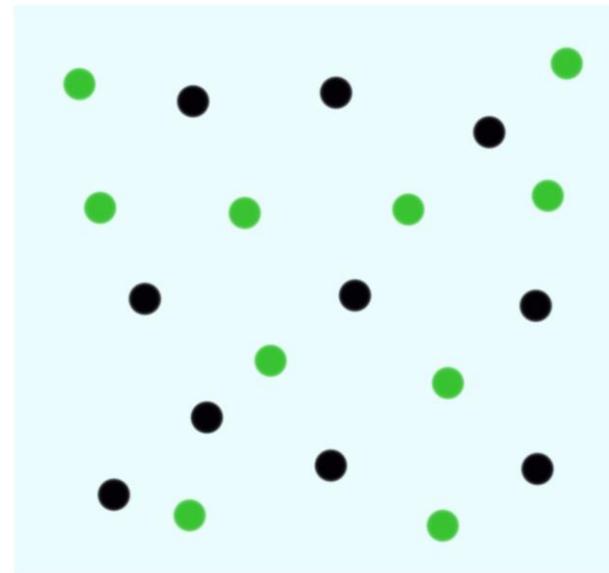
Die evolutionäre Spieltheorie betrachtet die zeitliche Entwicklung des strategischen Verhaltens einer gesamten Spielerpopulation.



$$x(0)=0.15$$



zeitliche
Entwicklung
der
Population



$$x(10)=0.5$$

Mögliche Strategien: (grün, schwarz), Parameter t stellt die „Zeit“ dar.
 $x(t)$: Anteil der Spieler, die im Zeitpunkt t die Strategie „grün“ spielen.

Evolutionär stabile Strategien (ESS)

- Evolutionär stabile Strategien sind die stabilen Endzustände der Häufigkeitsverteilung $x(t)$:

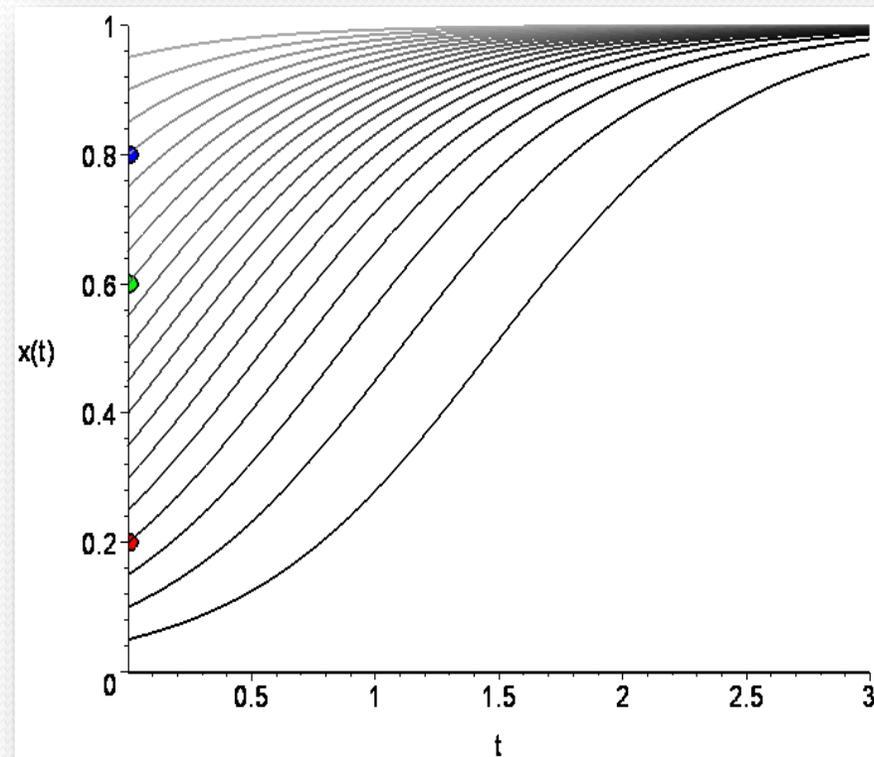
$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t))$$

Eine notwendige (aber nicht hinreichende) Bedingung für die Existenz einer ESS ist, dass diese ein Nash – Gleichgewicht des zugrundeliegenden Spiels ist.

Beispiel:

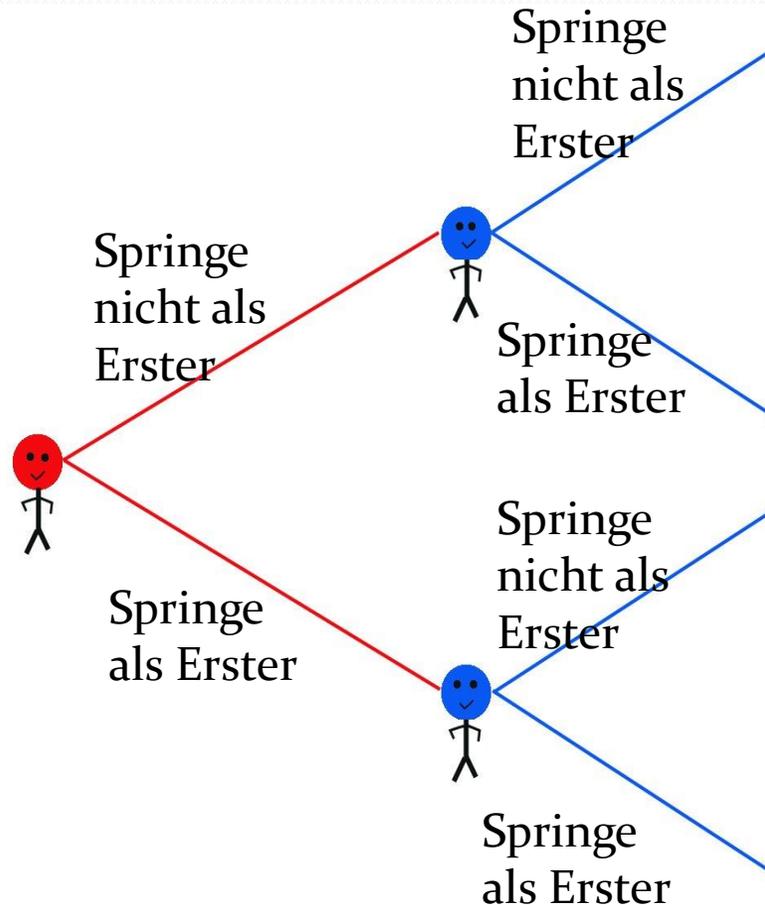
Gefangenendilemma ähnliche Spiele
Für die ESS des evolutionären Gefangenendilemma – Spiels ergibt sich:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t)) = 1 \Rightarrow \text{alle "gestehen"}$$



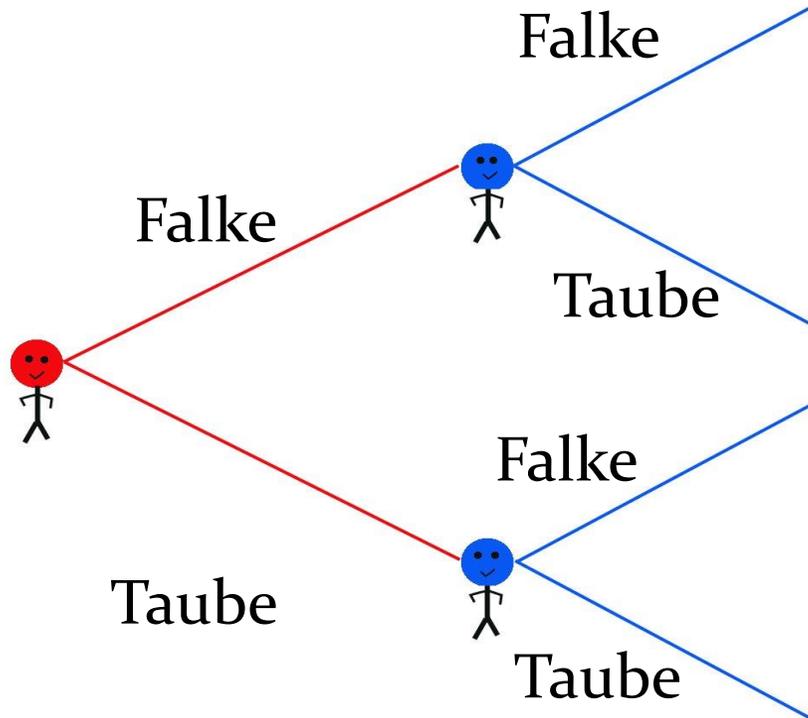
Das Spiel mit dem Untergang

	Springe nicht	Springe
Springe nicht	$(-1, -1)$	$(2, 0)$
Springe	$(0, 2)$	$(1, 1)$



Basierend auf dem Film von Nicholas Ray „Denn sie wissen nicht was sie tun“ aus dem Jahre 1955 (Hauptdarsteller „James Dean“): Jimbo und sein Erzfeind Buzz machen eine Mutprobe und rasen in ihren Autos auf eine Klippe zu. Derjenige ist der Angsthase, der als erster aus seinem Auto rausspringt. Der erzielte Nutzen kann zum Beispiel wie oben angegeben quantifiziert werden.

Das Falke-Taube Spiel



	Falke	Taube
Falke	$((p_h - d)/2, (p_h - d)/2)$	$(p_h, 0)$
Taube	$(0, p_h)$	$(p_m/2, p_m/2)$

Das Falke-Taube-Spiel modelliert ursprünglich den Wettkampf um eine Ressource (z.B. Nistplatz). Das Spiel wird jedoch oft auch auf andere Systeme angewendet, wobei die Taube-Strategie eine friedliche Verhaltensweise symbolisiert und die Falke-Strategie ein aggressives Verhalten. Im oben angegebenen Artikel wird das Falke-Taube-Spiel auf den Immobilien-Investmentmarkt angewendet (Spieler-Population: Investmentbanker).

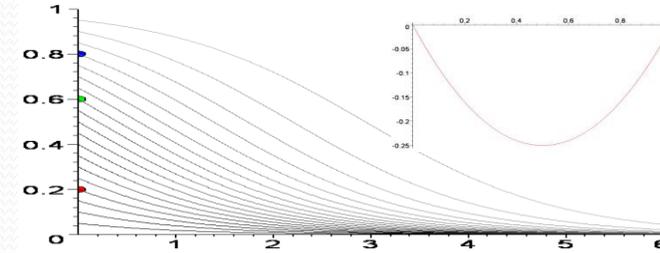
Parameter setting	Risk of destabilisation	d	p_h	p_m
P1	LOW	6	5	3
P2	MEDIUM	10	5	3
P3	HIGH	20	5	3

TABLE II: Parameters of the three different sets of the underlying payoff matrix used to model the investment market of the Hawk-Dove game.

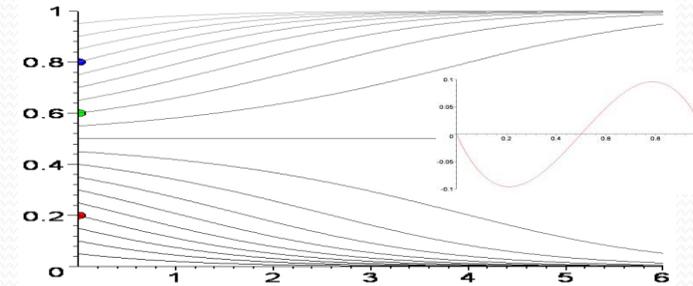
TABLE I: Payoff matrix for investment bankers A and B within the Hawk-Dove game. The parameters are defined as follows: p_h : high selling premium, d : disutility resulting from fighting and p_m : moderate selling premium.

Klassifizierung von evolutionären, symmetrischen (2x2)-Spielen

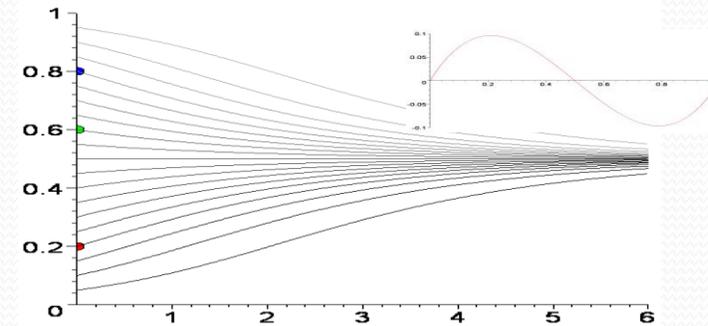
- **Dominante Spiele**
(2. Strategie dominiert 1.Strategie)
Es existiert ein Nash - Gleichgewicht, welches die anderen Strategien dominiert. ESS bei $x=0$.



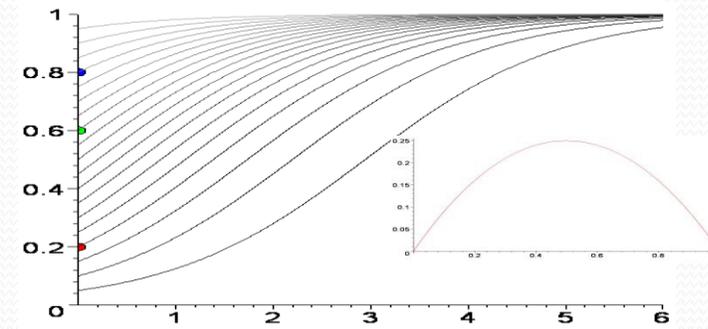
- **Koordinationsspiele**
Es existieren drei Nash - Gleichgewichte und zwei reine ESS, die abhängig von der Anfangsbedingung realisiert werden.



- **Anti - Koordinationsspiele**
Es existieren drei Nash - Gleichgewichte aber nur eine gemischte ESS, die unabhängig von der Anfangsbedingung realisiert wird.



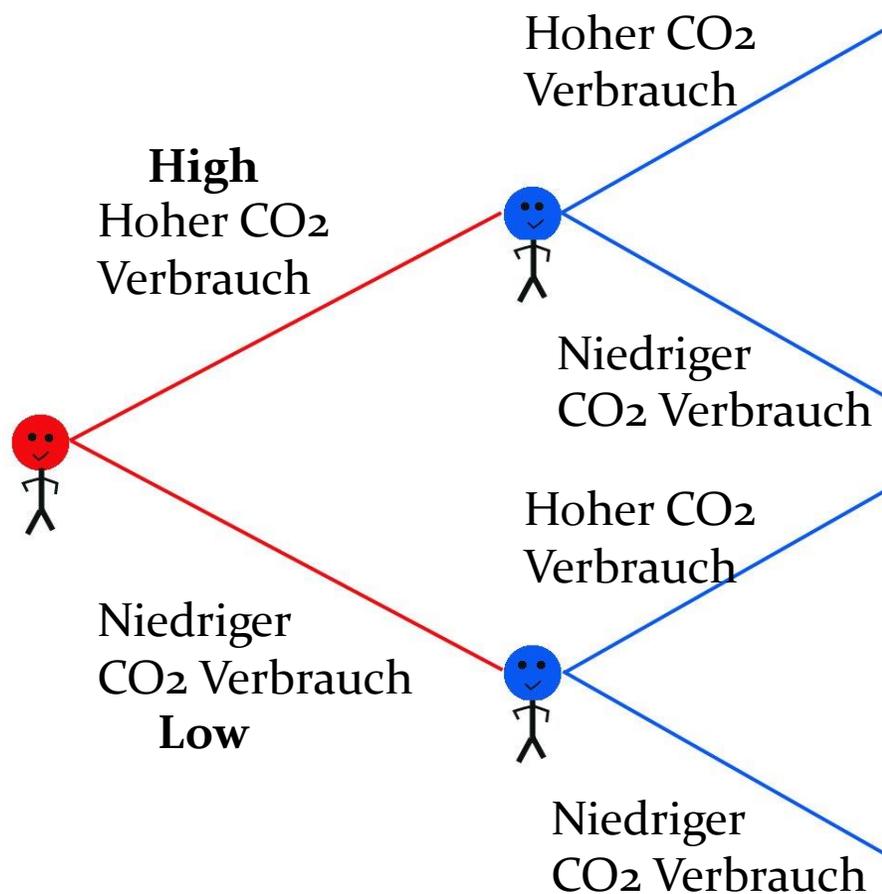
- **Dominante Spiele**
(1. Strategie dominiert 2.Strategie)
Es existiert ein Nash - Gleichgewicht, welches die anderen Strategien dominiert. ESS bei $x=1$.



Das CO₂ – Spiel

Ein einfaches Beispiel
in der Struktur des Falke-Taube-Spiels

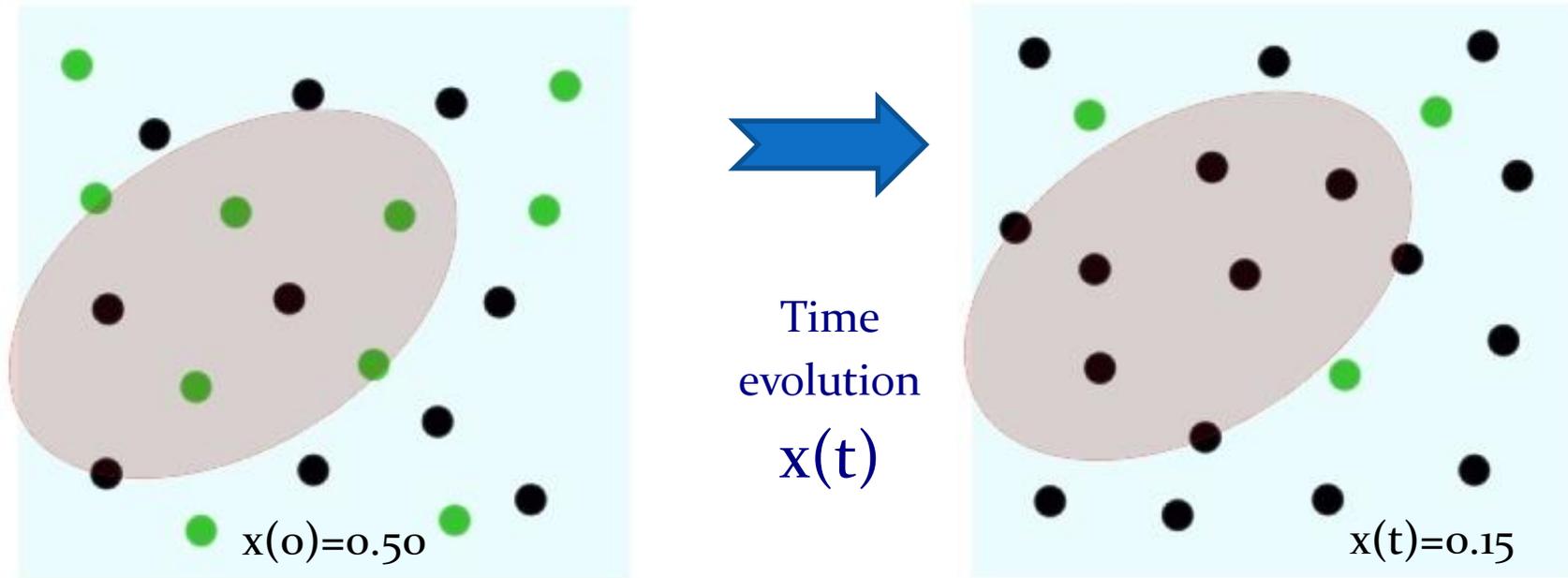
	High	Low
High	(2-d , 2-d)	(4 , 0)
Low	(0 , 4)	(1 , 1)



Die Dominanz des Menschen in Verbindung mit unserem wirtschaftlichen und sozialen Wertesystem führt zu anhaltenden Krisen. Die Klimakrise ist eines der wichtigsten Beispiele dafür - eine Situation, in der die Menschheit in einer Dilemma-ähnlichen Situation gefangen ist. Das Verhalten jedes Menschen und sein ungehemmter Konsum haben zu gefährlichen Umweltbedingungen und zur globalen Erwärmung geführt und die entstandene Situation könnte unsere Spezies existenziell bedrohen. Jeden Tag wird jeder Mensch mehrmals mit klima-relevanten Entscheidungen konfrontiert, wobei er oft zwischen zwei alternativen Wegen entscheiden kann: Ein hoher oder niedriger CO₂ – Verbrauch; die Strategien (H , L). Der angenehme Nutzen der Strategie H spiegelt sich in dem höheren Auszahlungswert wider und der Mensch ist hier oft in ein gewisses Abhängigkeitsverhältnis hineingeraten. Das negativen Folgen der H-Strategie und das Risiko der Destabilisierung des gesamten Systems wird lediglich indirekt durch einen sozialen/moralischen Druck (hier Parameter d) wahrgenommen.

Introduction

Die Quanten-Spieltheorie stellt eine mathematische und konzeptuelle Erweiterung der klassischen Spieltheorie dar. Der Raum aller denkbaren Entscheidungswege der Akteure wird vom rein reellen, messbaren Raum in den Raum der komplexen Zahlen (reelle und imaginäre Zahlen) ausgedehnt. Durch das Konzept der möglichen quantentheoretischen Verschränkung der Entscheidungswege im imaginären Raum aller denkbaren Quantenstrategien können gemeinsame, durch kulturelle oder moralische Normen entstandene Denkrichtungen in die evolutionäre Dynamik mit einbezogen werden.



Strategies of each node (of each player): (green , black), $x(t)$: Fraction of player with strategy „green“ as a function of time t
 Grey region: Group dependent collective cultural or moral standard

Einführung in die Quanten-Spieltheorie

Komplexe Zahlen

G.W. Leibniz (1702)

“...sind eine feine und wunderbare
Zuflucht des menschlichen
Geistes, beinahe ein Zwitterwesen
zwischen Sein und Nichtsein”

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$



Denkwege im Gefangenendilemma

If A betrays me it is better if I also betray A.

If A is silent, it is better if I betray A

Complex space of all possible ways of thinking

If B betrays me it is better if I also betray B

If B is silent, it is better if I betray B



be silent

betray B

be silent

betray A

A\B	C	D
C	$(-1, -1)$	$(-5, 0)$
D	$(0, -5)$	$(-4, -4)$

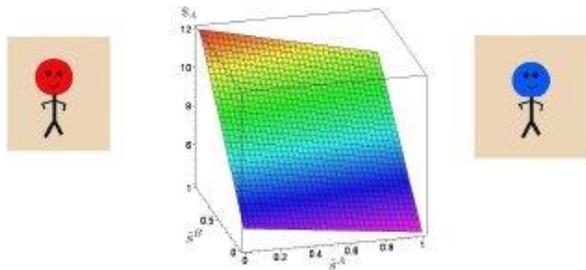
Beyond Homo Economicus

Quantum Game Theory
Entanglement Quantum Strategies
Homo Sociologicus Homo Transcendentalis

$|\Psi\rangle$

Extended models of classical evolutionary game theory (e.g. [10, 9])

Homo Economicus
Classical Game Theory



Homo Afectualis

The final 2-player quantum state:

$$|\Psi\rangle = \hat{\mathcal{J}}^\dagger (\hat{U}_A \otimes \hat{U}_B) \hat{\mathcal{J}} |s_1^A s_1^B\rangle$$

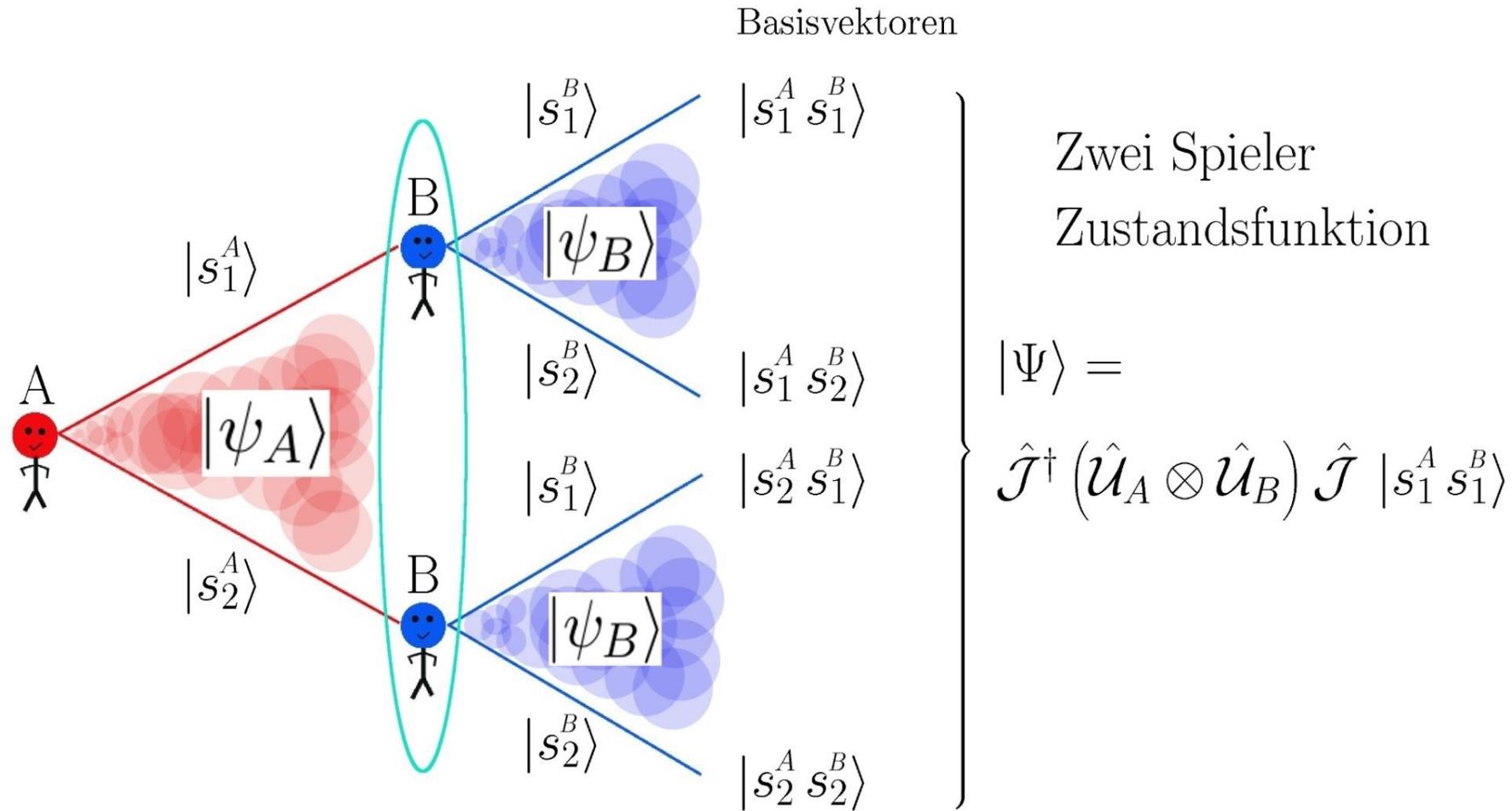
$\hat{\mathcal{J}}(\gamma)$: Entangling operator

$\hat{\mathcal{J}}^\dagger(\gamma)$: Disentangling operator

$\gamma \in [0, \pi]$: Strength of entanglement

\hat{U}_A : Decision Operator for player A

\hat{U}_B : Decision Operator for player B



Das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon

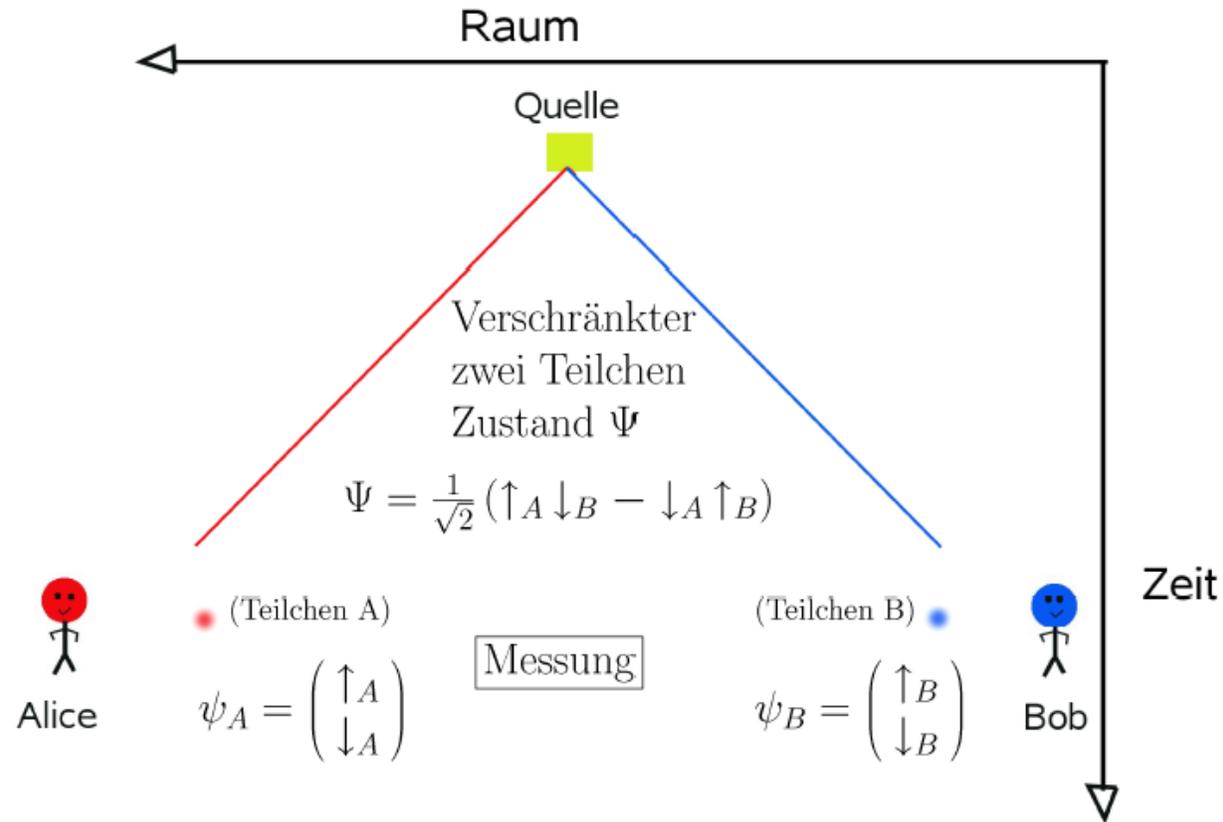


Figure: EPR Gedankenexperiment: Obwohl es keine messbare Wechselwirkung zwischen den Teilchen A und B gibt, sind diese dennoch mittel einer Quantenverschränkung verbunden.

Superpositionen von Eigenzuständen

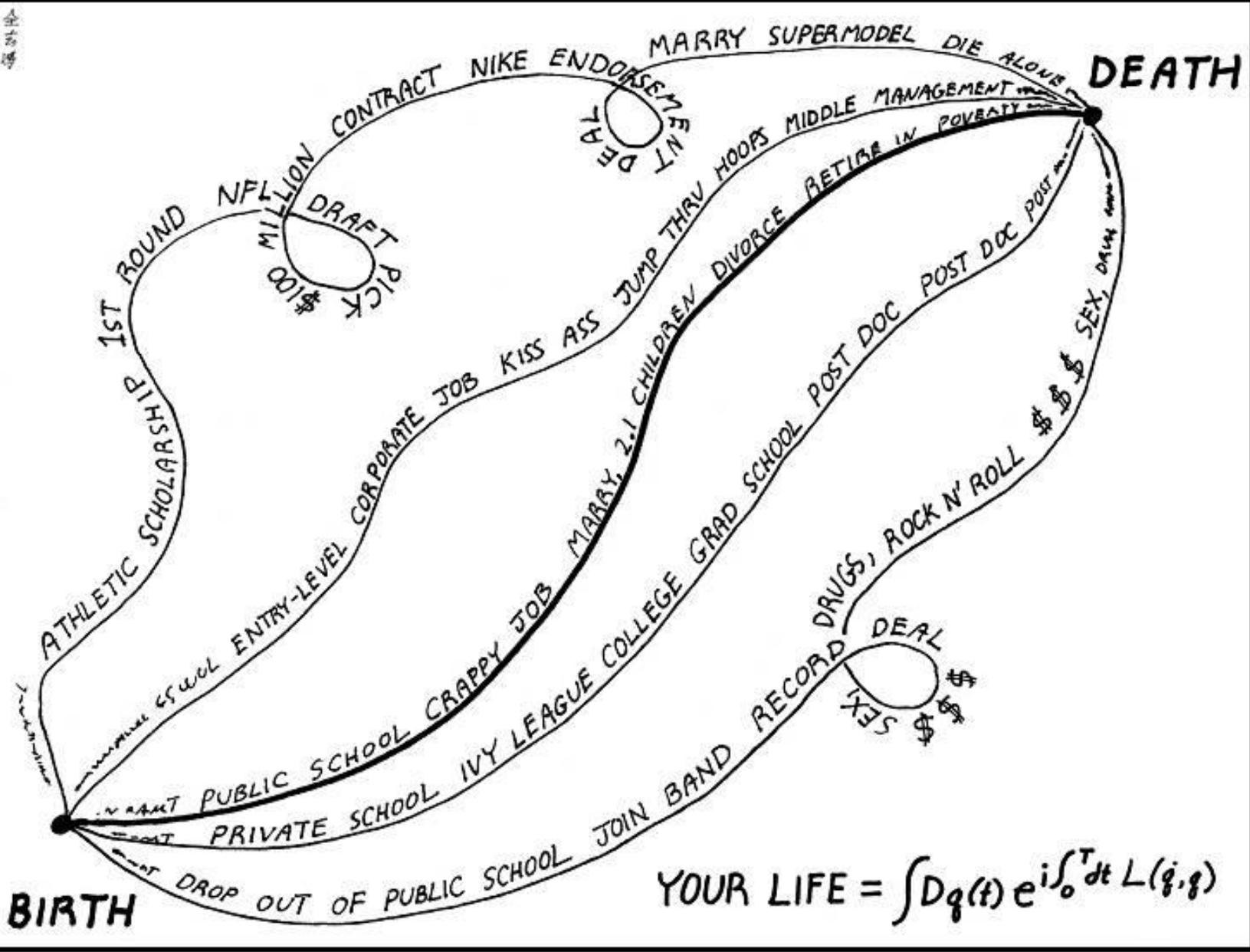
Schrödingers Katze



Figure: Theoretische Versuchsanordnung des Gedankenexperiments.



The quantum-mechanical "[Schrödinger's cat](#)" paradox according to the Many-Worlds interpretation. In this interpretation, every quantum event is a branch point; the cat is both alive and dead, even before the box is opened, but the "alive" and "dead" cats are in different branches of the universe, both of which are equally real, but which do not interact with each other.^[a]



Parallelwelten Interpretation (H.Everett)

$|s_1^A s_1^B\rangle$



Universum 1

$|s_1^A s_2^B\rangle$



Universum 2

$|s_2^A s_1^B\rangle$



Universum 3

$|s_2^A s_2^B\rangle$

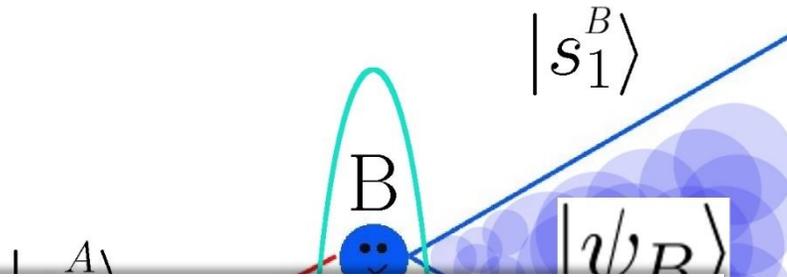


Universum 4

The Path Integral Formulation of Your Life

Die verschränkte Spezies-Zustandsfunktion

$$|\Psi\rangle$$



the Wheeler-DeWitt equation says

$$\hat{H}(x)|\psi\rangle = 0$$

where $\hat{H}(x)$ is the Hamiltonian constraint in quantized general relativity and $|\psi\rangle$ stands for the wave function of the universe.

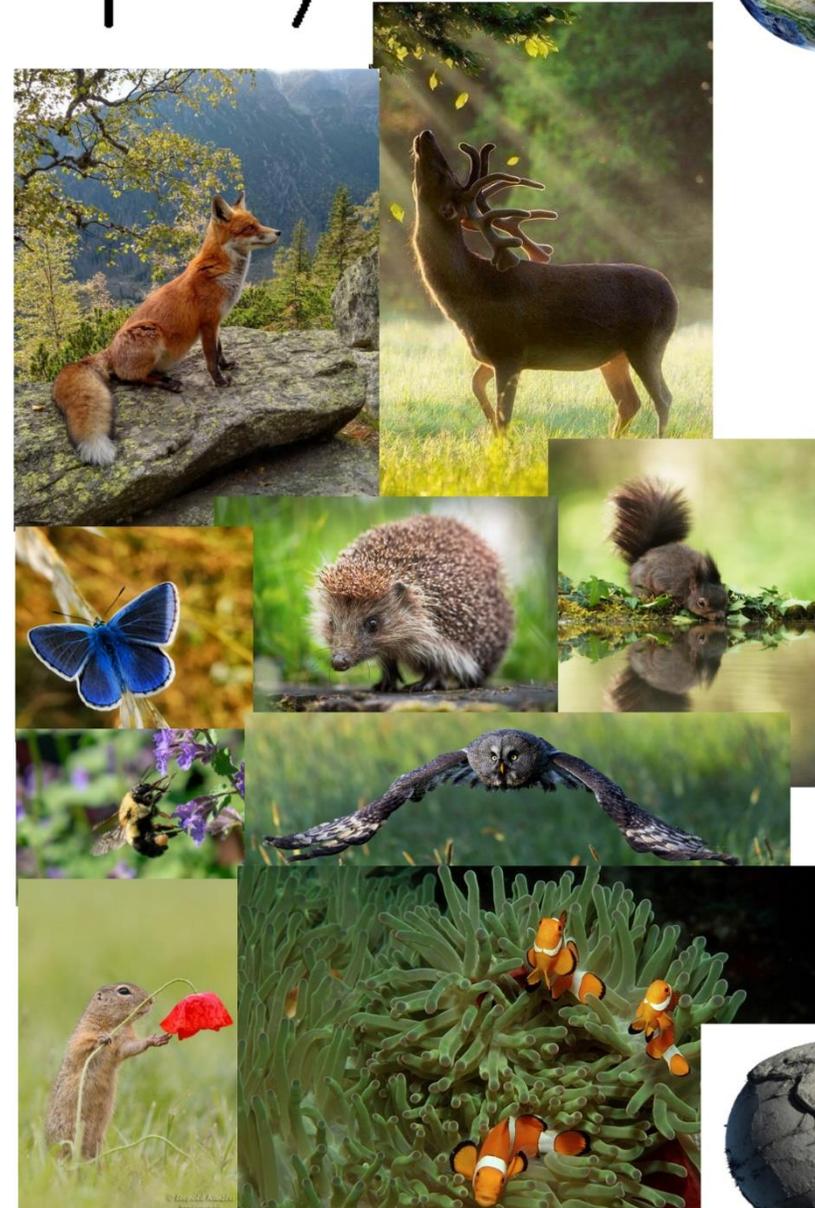
Universal wavefunction

From Wikipedia, the free encyclopedia

The **universal wavefunction** (or **wave function**), a term introduced by Hugh Everett in his PhD thesis^[1] *The Theory of the Universal Wave Function*, informs a core concept in the relative state interpretation^{[2][3]} or many-worlds interpretation^{[4][5]} of quantum mechanics.

$$|\psi_B\rangle$$

$$|s_2^B\rangle$$





Symmetric (2x2) quantum games

For vanishing values of entanglement ($\gamma=0$) quantum games are identical to classical games.

Dominant Class:

Games with a dilemma: The dilemma resolves if the value of entanglement is above a defined γ -barrier.

Games without a dilemma: No further Nash-equilibria, dominant strategy remains.

Class of coordination games:

The coordination problem resolves if the value of entanglement is above a defined γ -barrier.

Class of anti-coordination games:

An additional Nash-Equilibrium appears if the value of entanglement is above a defined γ -barrier.

In General: If the strategy entanglement is large enough, then additional Nash equilibria can occur, previously present, not favorable dominant or evolutionary stable strategies could become nonexistent and new, favorable evolutionary stable strategies do appear for some game classes.