

Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer

*PC-POOL RAUM 01.120
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT
26. APRIL, 2019*

MATTHIAS HANAUSKE

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

1. Vorlesung

Allgemeines zur Vorlesung

- Ort und Zeit:
PC-Pool Raum 01.120, immer freitags von 15.00 bis 17.00 Uhr
- Übungstermine:
Zusätzlich zur Vorlesung werden ab dem 03.05.2019 freiwillige Übungstermine eingerichtet, die jeweils freitags, eine Stunde vor der Vorlesung im PC-Pool 01.120 stattfinden (Fr. 14-15.00 Uhr).
- Vorlesungs-Materialien:
<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~halauske/VARTC/>
- Kurs auf der Online-Lernplattform Lon Capa:
<http://lon-capa.server.uni-frankfurt.de/>
- Plan für die heutige Vorlesung:
Motivation, Kurzer Überblick der Inhalte der Vorlesung, Vergabe der Login-Accounts für den PC-Pool, kleine Einführung in Maple

Vorlesung besteht aus drei Teilen

Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer von Dr.phil.nat.Dr.rer.pol. Matthias Hanauske

[Home](#) [Research](#) [Contact](#)

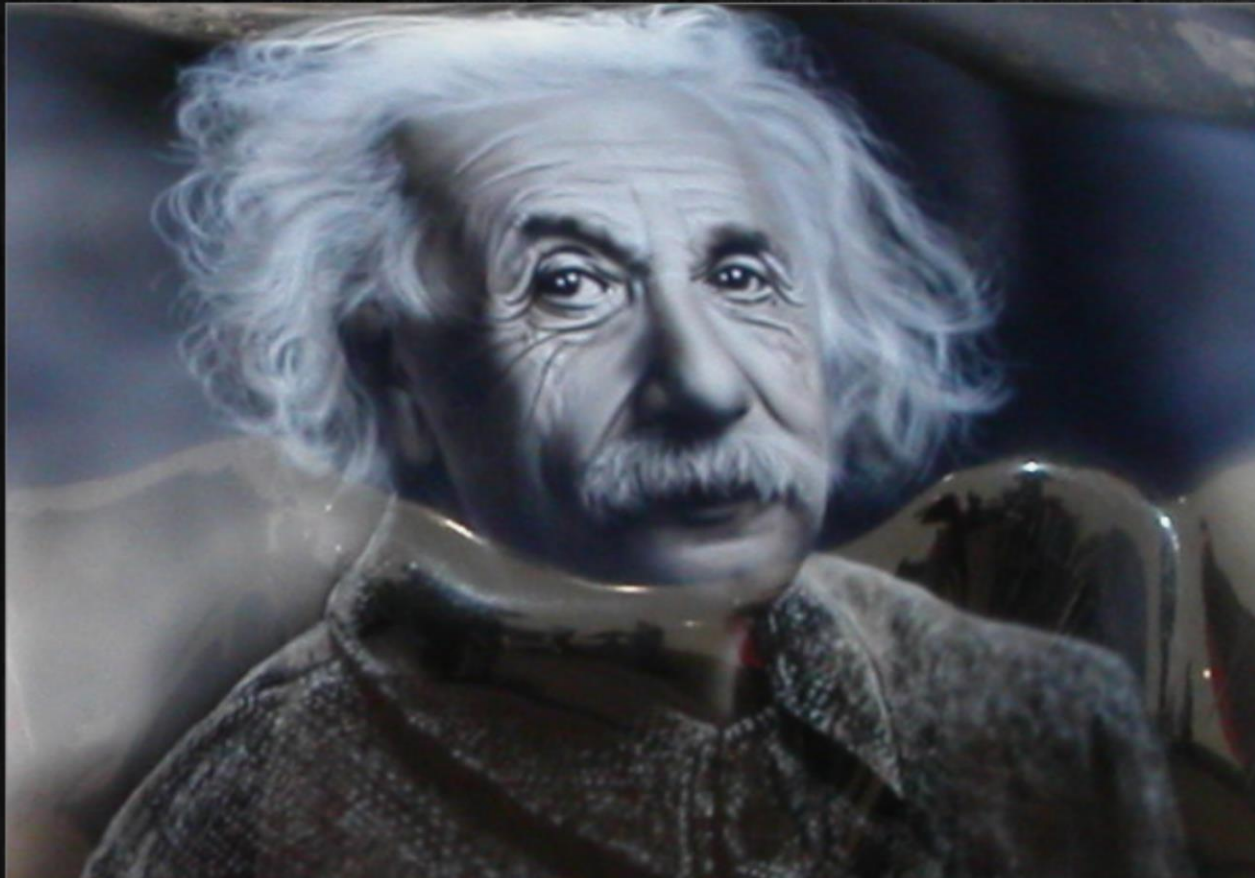
[Einführung](#)

[Teil I](#)

[Teil II](#)

[Teil III](#)

[E-Learning](#)



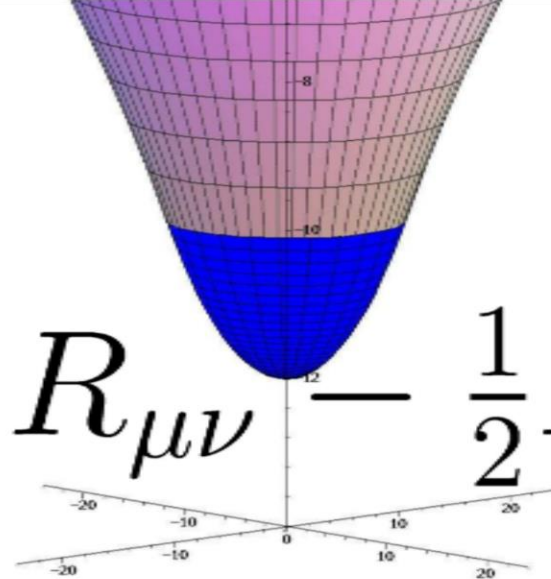
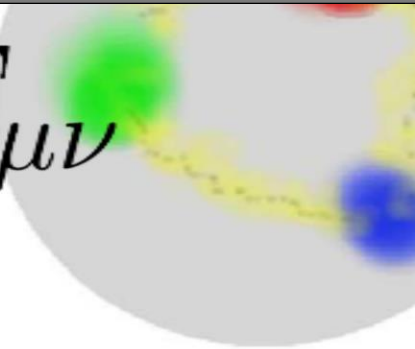
www.fias.uni-frankfurt/~hanauske/VARTC/

Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer (General Theory of Relativity on the Computer) Vorlesung SS 2016, Mo. 16-18.00 Uhr, PC-Pool 01.120

In dieser Vorlesung werden die mathematisch anspruchsvollen Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) in diversen Programmierumgebungen analysiert. Im ersten Teil des Kurses erlernen die Studierenden die Verwendung von Computeralgebra-Systemen (Maple und Mathematica). Die oft komplizierten und zeitaufwendigen Berechnungen der tensoriellen Gleichungen der ART können mit Hilfe dieser Programme erleichtert werden. Diverse Anwendungen der Einstein- und Geodätengleichung werden in Maple implementiert, quasi analytische Berechnungen durchgeführt und entsprechende Lösungen berechnet und visualisiert. Der zweite Teil des Kurses befasst sich mit der numerischen Berechnung von Neutronensternen und Weißen Zwergen mittels eines C/C++ Programms. Nach einer kurzen Auffrischung der grundlegenden Programmierkenntnisse, erstellen die Studierenden, gemeinsam mit dem Betreuer, ein Programm, das die Tolman-Oppenheimer-Volkov-Gleichung numerisch löst und visualisieren die Ergebnisse. Zusätzlich wird hierbei in die Grundkonzepte der parallelen Programmierung eingeführt und eine MPI- und OpenMP-Version des C/C++ Programms erstellt. Im dritten Teil des Kurses werden zeitabhängige numerische Simulationen der ART mittels des Einstein Toolkit durchgeführt und deren Ergebnisse mittels Python/Matplotlib visualisiert. Inhaltlich wird hierbei ebenfalls auf den, dem Programm zugrunde liegenden (3+1)-Split der ART eingegangen und, abhängig von den Vorkenntnissen der Studierenden, mehrere fortgeschrittene, astrophysikalisch relevante Probleme simuliert. Mögliche Themen dieses abschließenden Teils könnten die folgenden Systeme

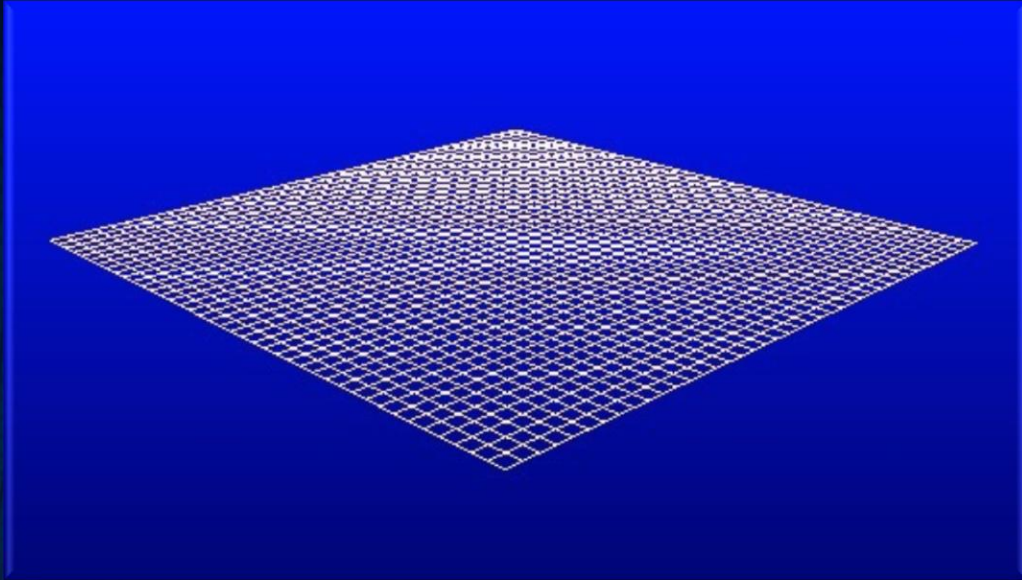
Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie

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


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


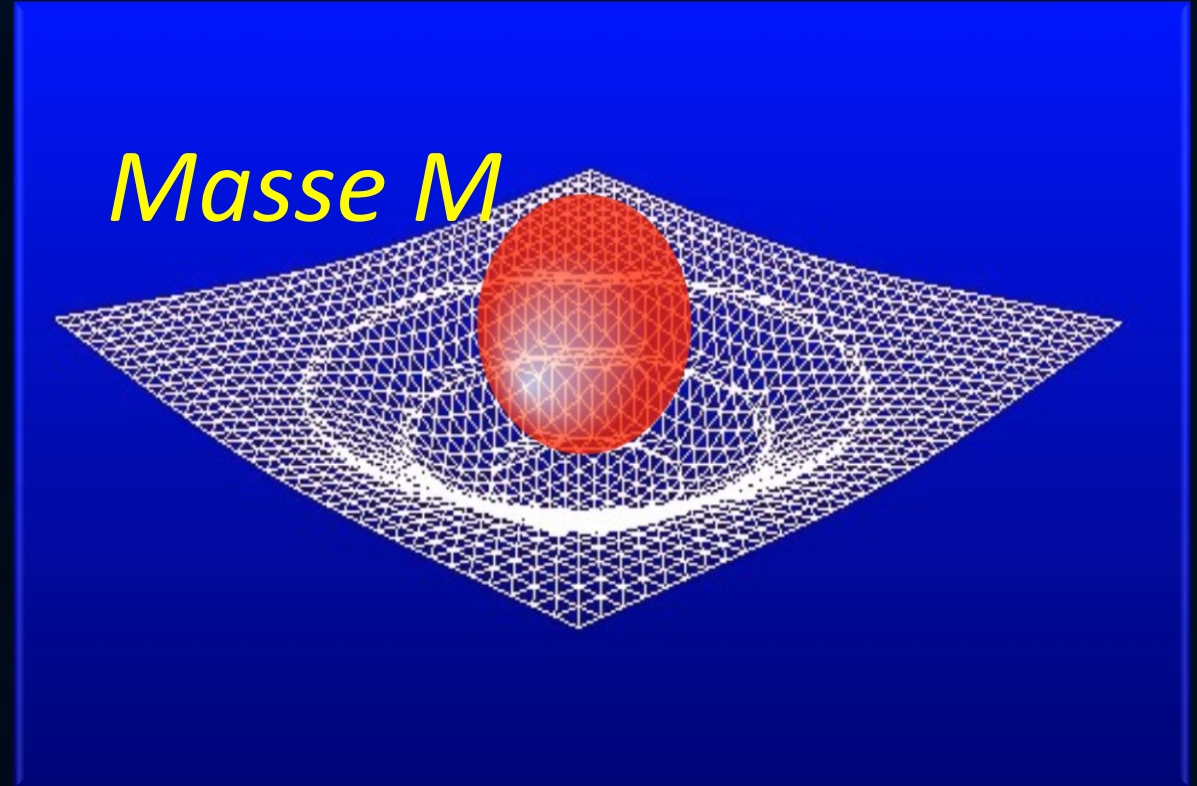
Die ART ist eine sehr revolutionäre Theorie. Sie besagt, dass jegliche Energieformen (z.B. Masse eines Körpers) die „Raumzeit“ verbiegen und durch diese Krümmung des Raumes und der Zeit die Gravitation (Schwerkraft) resultiert. -> Raumzeit-Krümmung = Energie

Was ist Raumzeit-Krümmung?



Flache Raumzeit

Raumzeit ohne Materie und Energie hat keine Krümmung



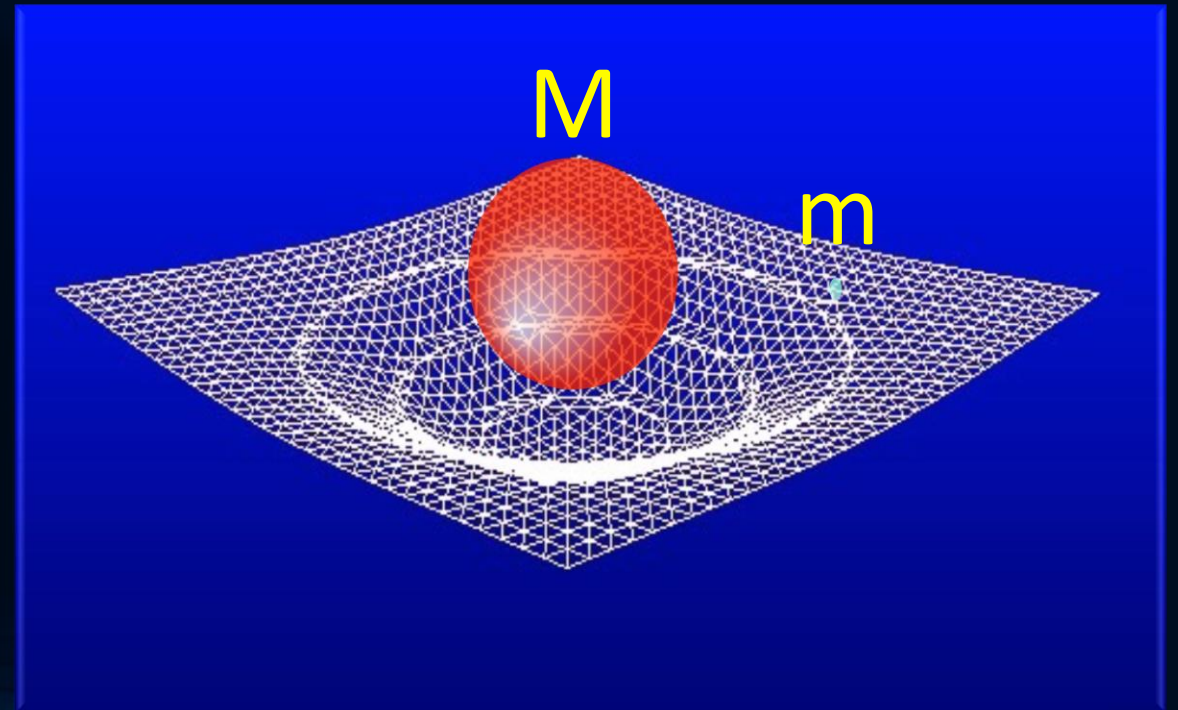
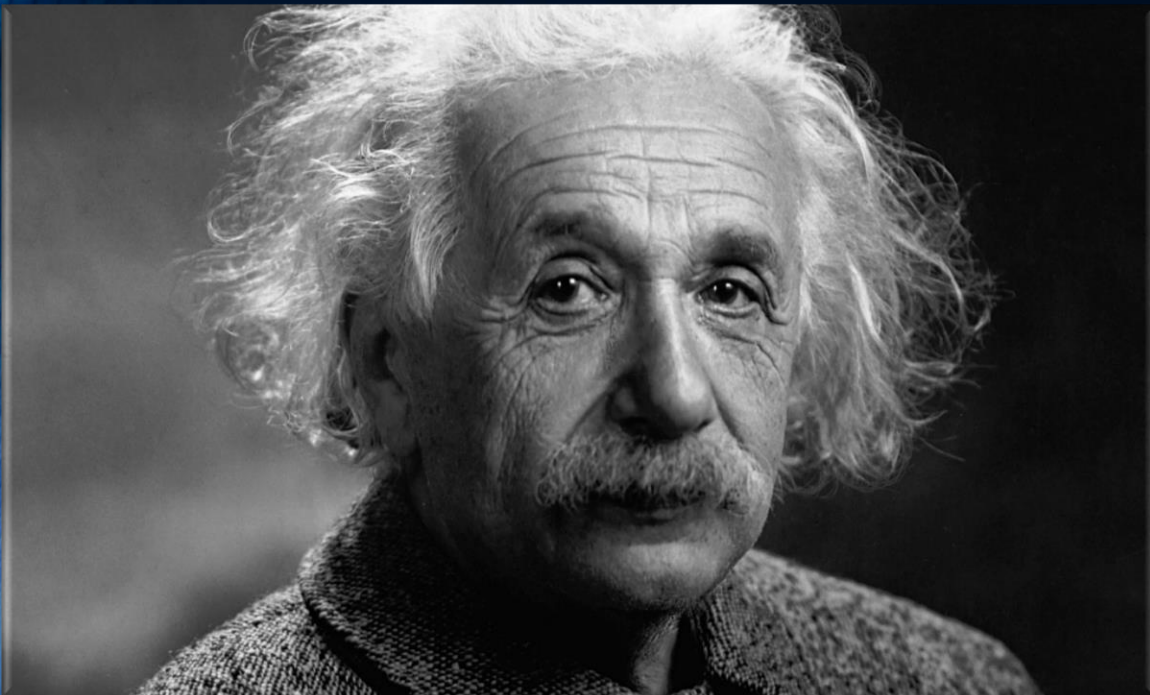
Gekrümmte Raumzeit

Raumzeit mit Materie verbiegt sich

Raumzeit-Krümmung ist Gravitation?

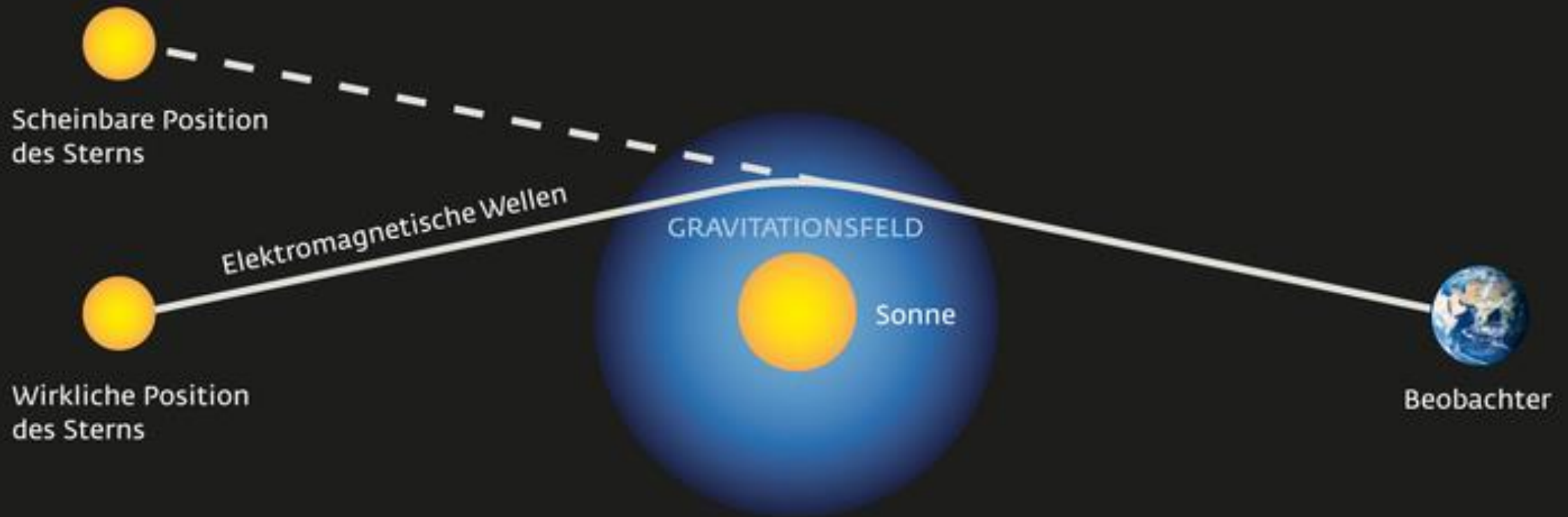
Betrachten wir einen Objekt kleiner Masse m das um ein Objekt großer Masse M kreist (z.B. Erde um die Sonne)

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

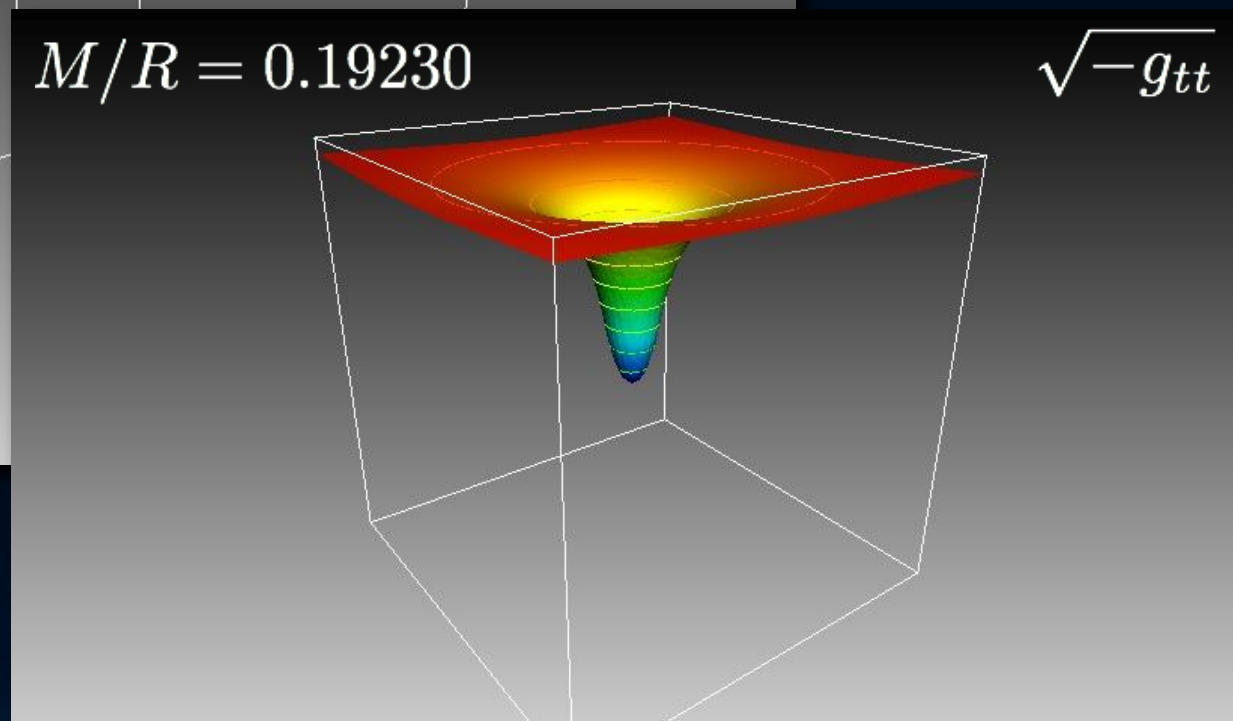
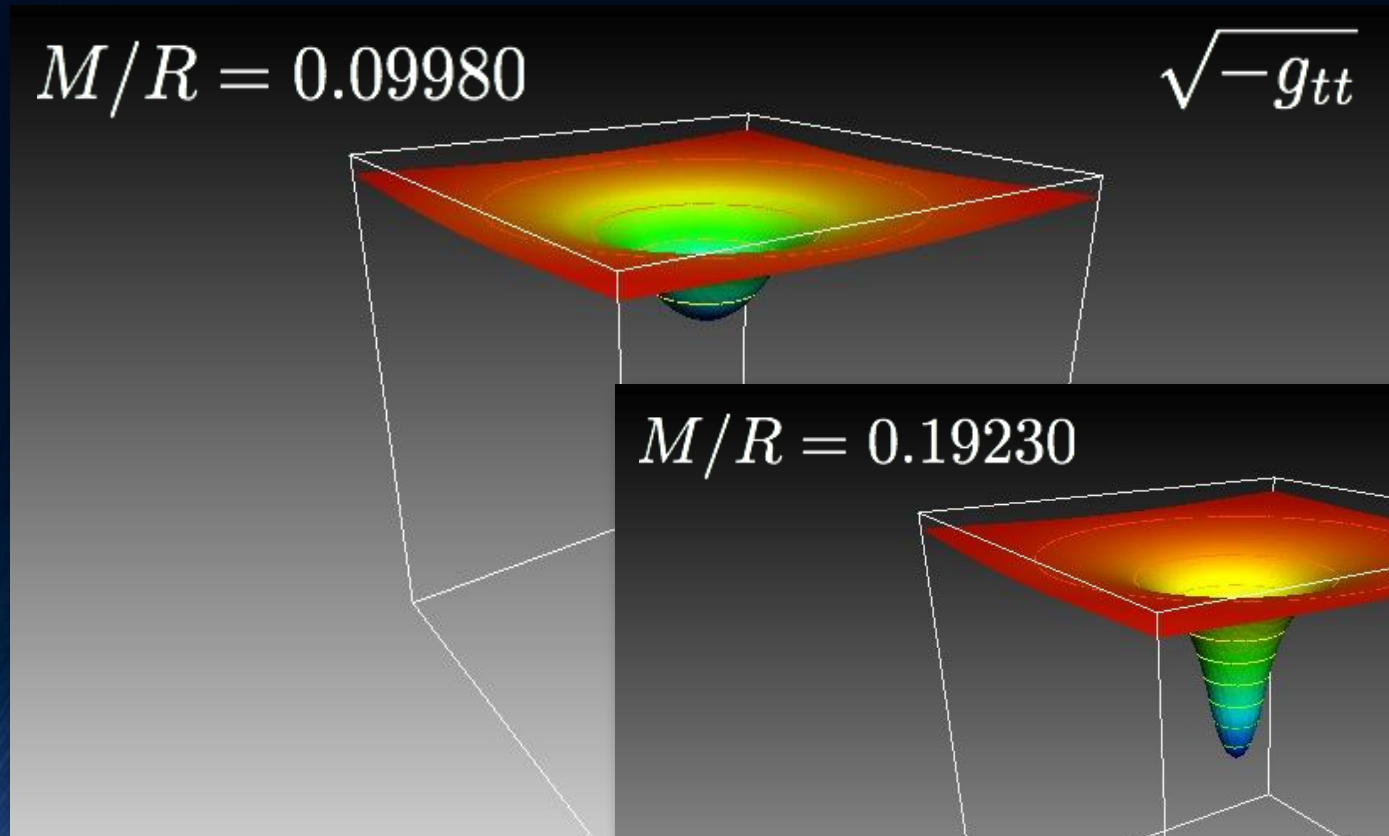


Erste Bestätigung der ART: Sonnenfinsternis 1919

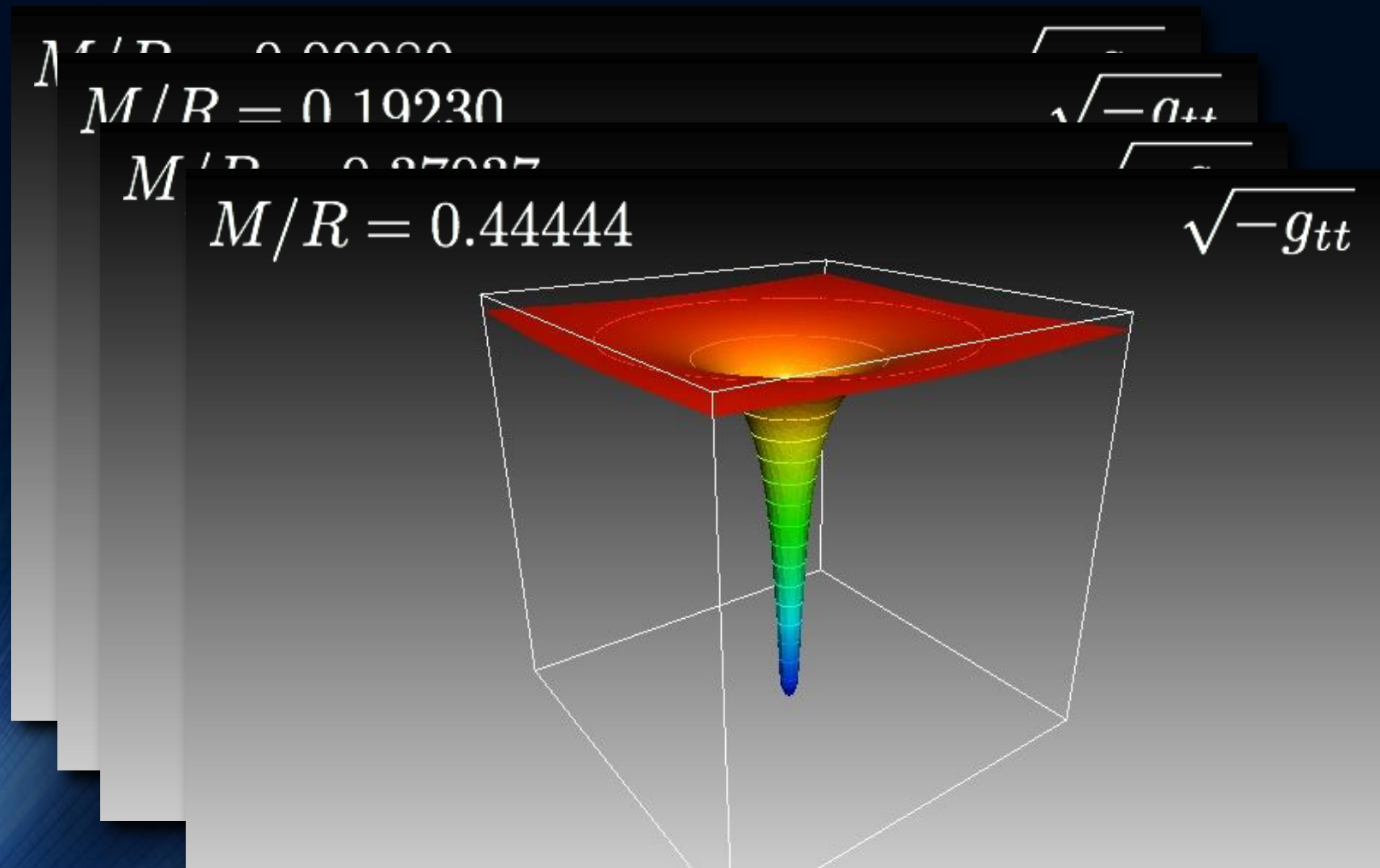
Aufgrund des extrem revolutionären Charakters der ART glaubten viele Physiker zunächst nicht an Einsteins Theorie. Das änderte sich schlagartig im Jahre 1919:



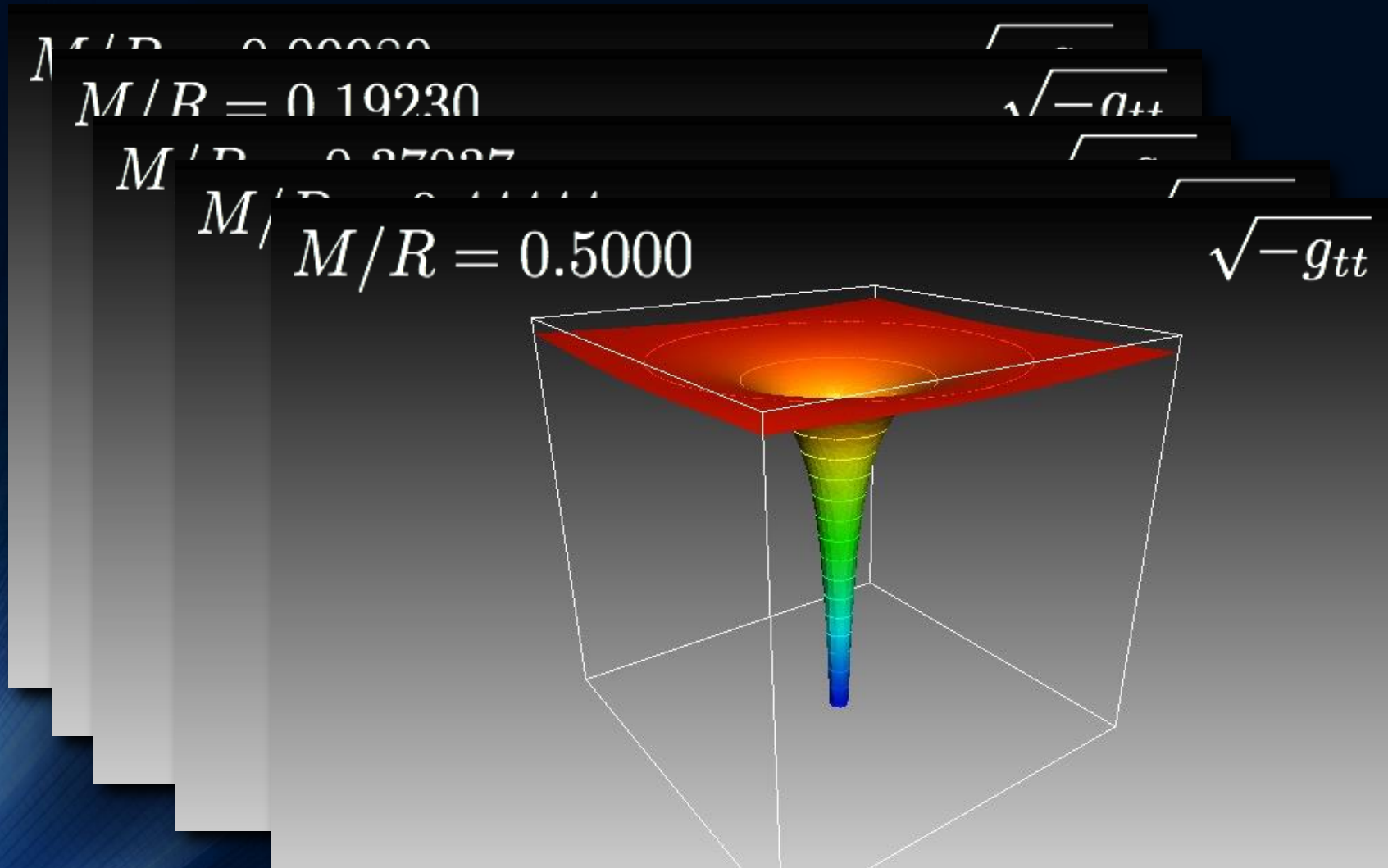
Was sind schwarze Löcher?



Was sind schwarze Löcher?



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

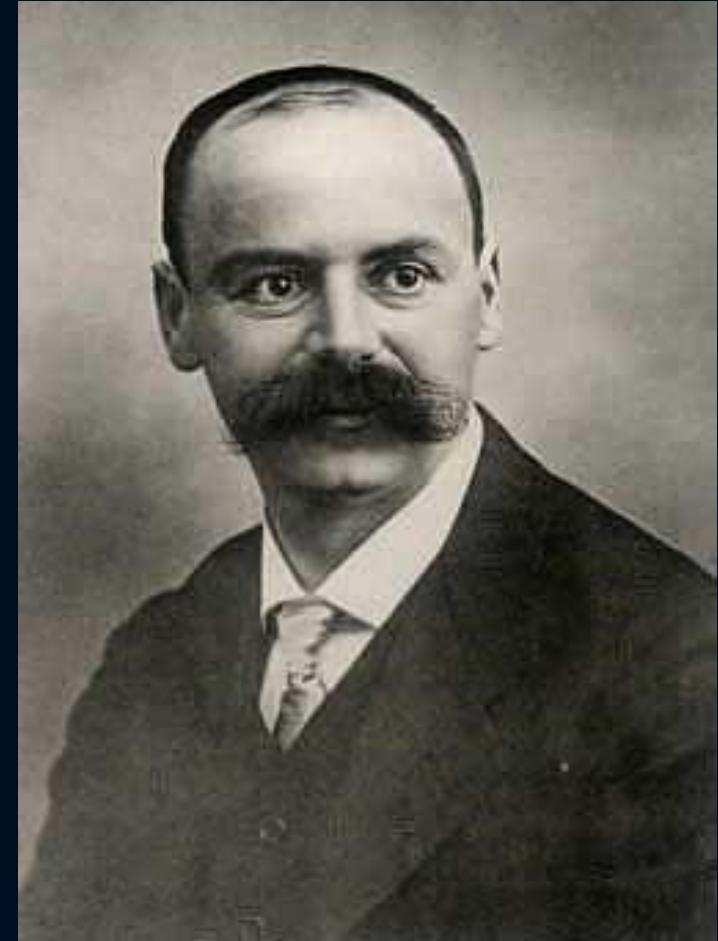
Die Schwarzschild Lösung

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...



Herleitung der Schwarzschild Metrik

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} e^{\nu(r,t)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -e^{\lambda(r,t)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

$$ds^2 = c^2 e^{\nu(r,t)} dt^2 - e^{\lambda(r,t)} dr^2 - r^2 (\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2) \quad (2.27)$$

Die Masse eines kugelsymmetrischen schwarzen Loches befindet sich (wie wir im folgenden sehen werden) konzentriert im Ursprungspunkt bei $r = 0$, so dass der gesamte Raum (ohne den Punkt $r = 0$) materiefrei ist. Der Energieimpulstensor verschwindet demnach im Außenraum identisch $T_{\mu\nu} \equiv 0$, so dass sich die Einsteingleichung (Gl. 2.23) wie folgt vereinfacht:

$$\begin{aligned} R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g^{\mu\nu} &= 8\pi\kappa T^{\mu\nu} = 0 \\ \Rightarrow R^{\mu\nu} &= 0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Herleitung der Schwarzschild Metrik

wird als Schwarzschildradius bezeichnet

$$R_S = \frac{2G M}{c^2} . \quad (2.36)$$

Die Schwarzschildmetrik und das zugehörige Weglängenelement nimmt nun die folgende Form an

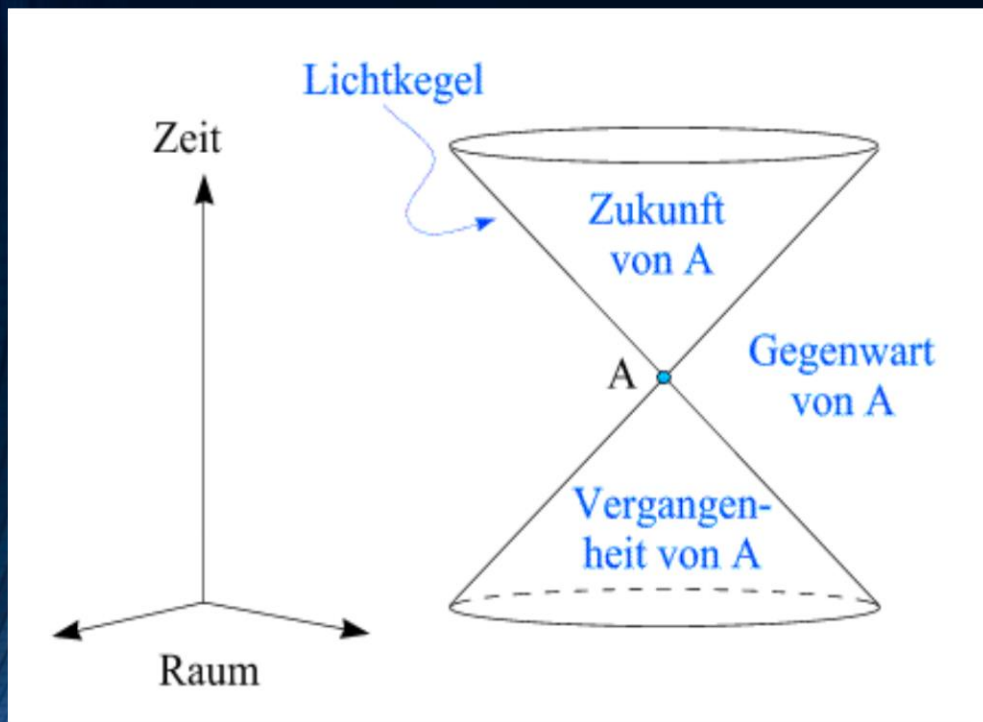
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{R_S}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(1 - \frac{R_S}{r}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$$ds^2 = c^2 \left(1 - \frac{R_S}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{R_S}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2) .$$

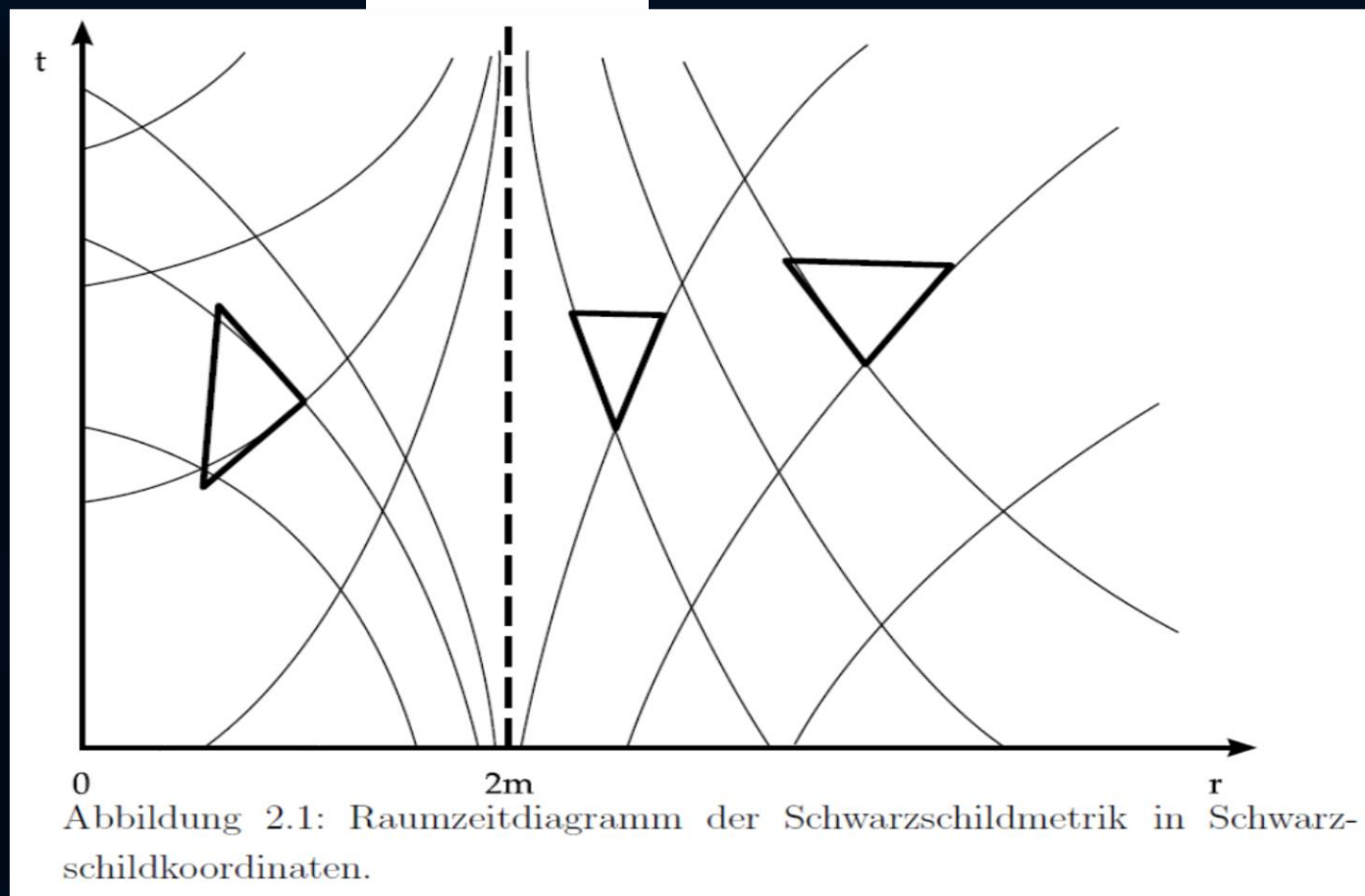
Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

Sichtweise ruhender Beobachter im Unendlichen

Ereignis-
horizont



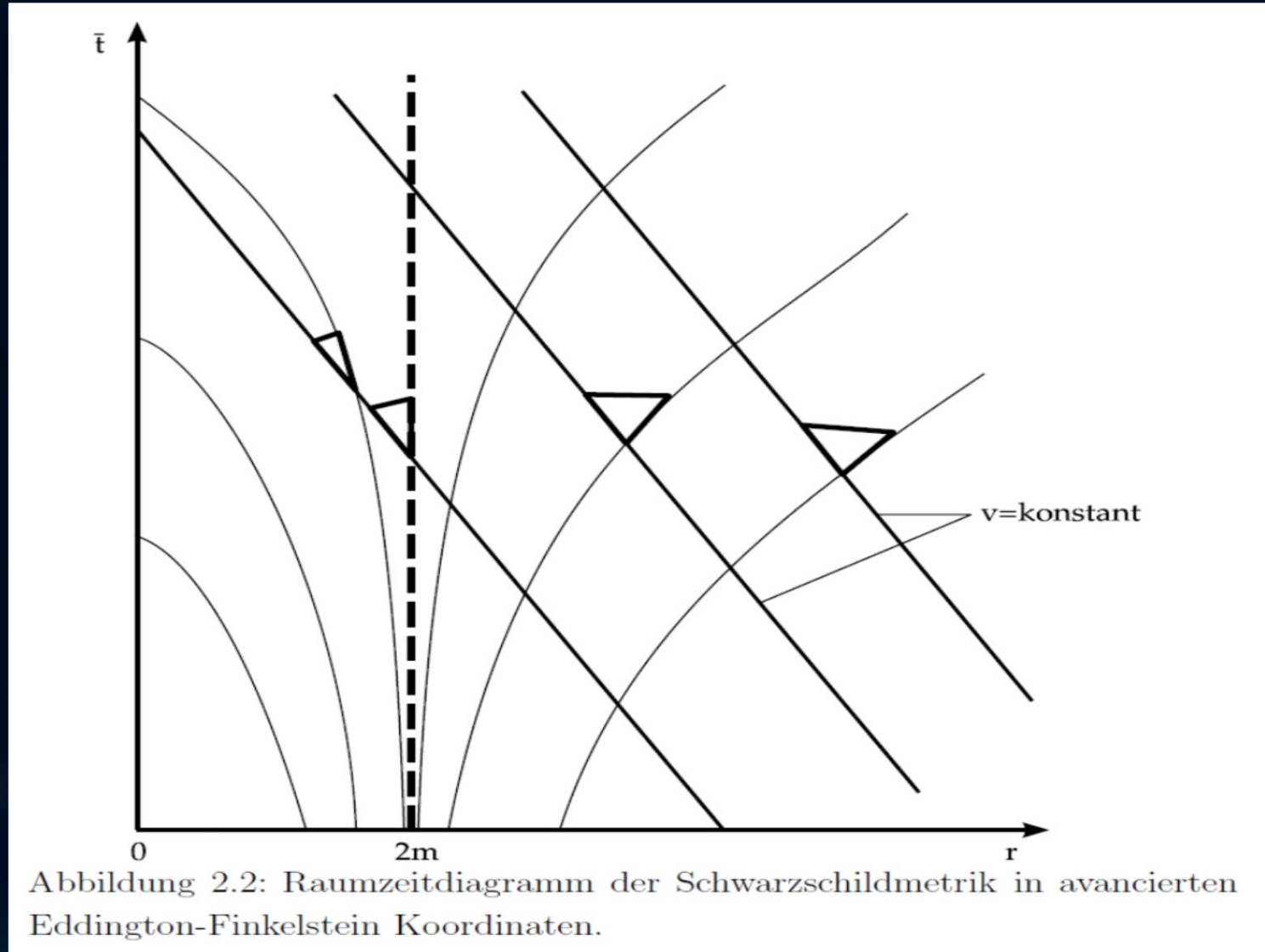
Raumzeit-Struktur
im flachen Raum



Raumzeit-Struktur um ein schwarzes Loch

Raumzeit-Diagramm eines schwarzen Loches

Sichtweise eines in das schwarze Loch fallenden Beobachters



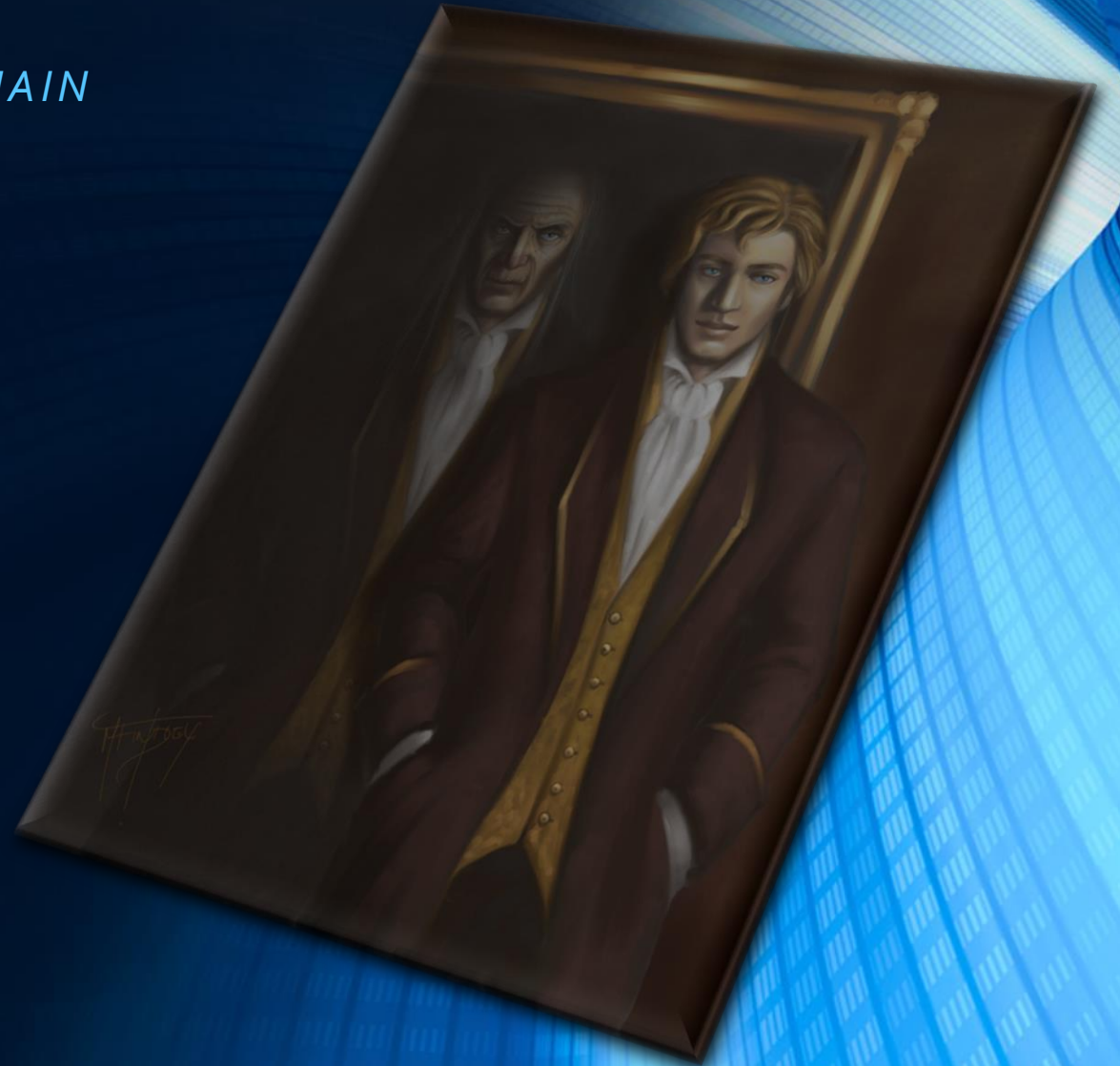
Das Bildnis des schwarzen Lochs

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

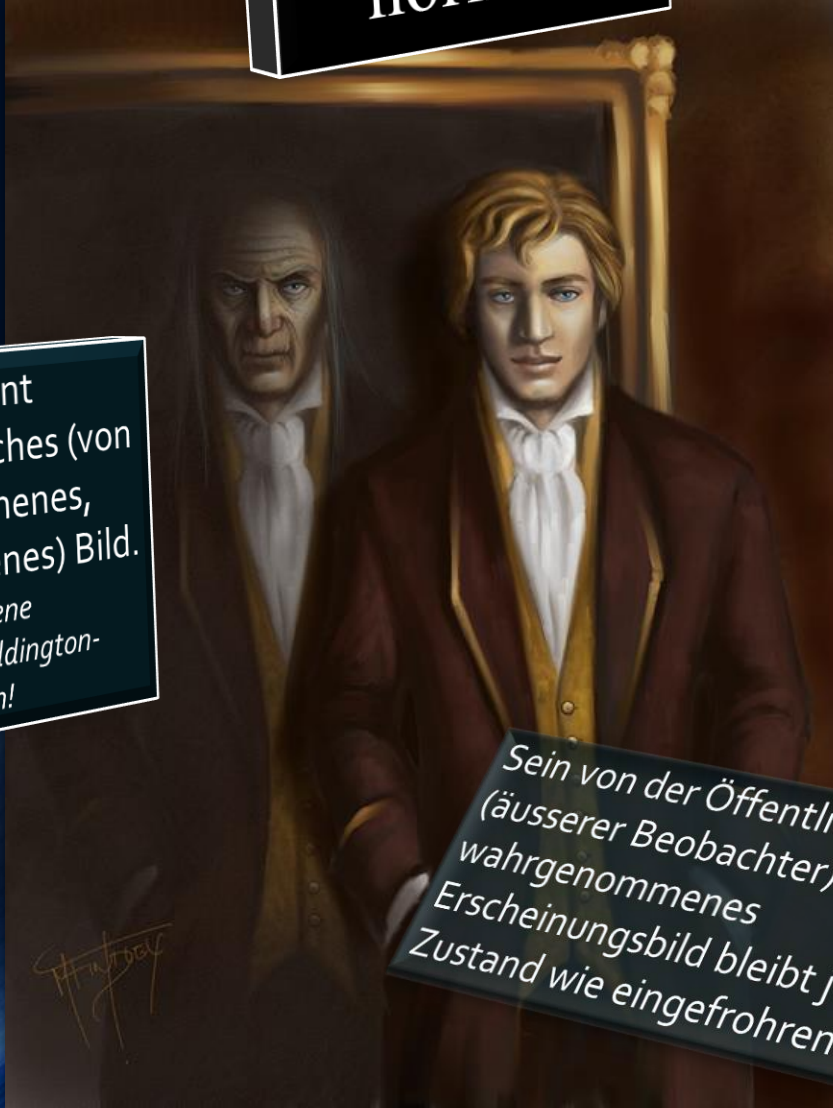


Oscar Wilde

Das Bildnis des
Dorian Gray



Ereignis- horizont



Im Spiegel erscheint jedoch sein wirkliches (von ihm wahrgenommenes, moralisch verfallenes) Bild.
Transformation ins eigene Koordinatensystem, Eddington-Finkelstein Koordinaten!

Sein von der Öffentlichkeit (äusserer Beobachter) wahrgenommenes Erscheinungsbild bleibt jungen Zustand wie eingefrohren.

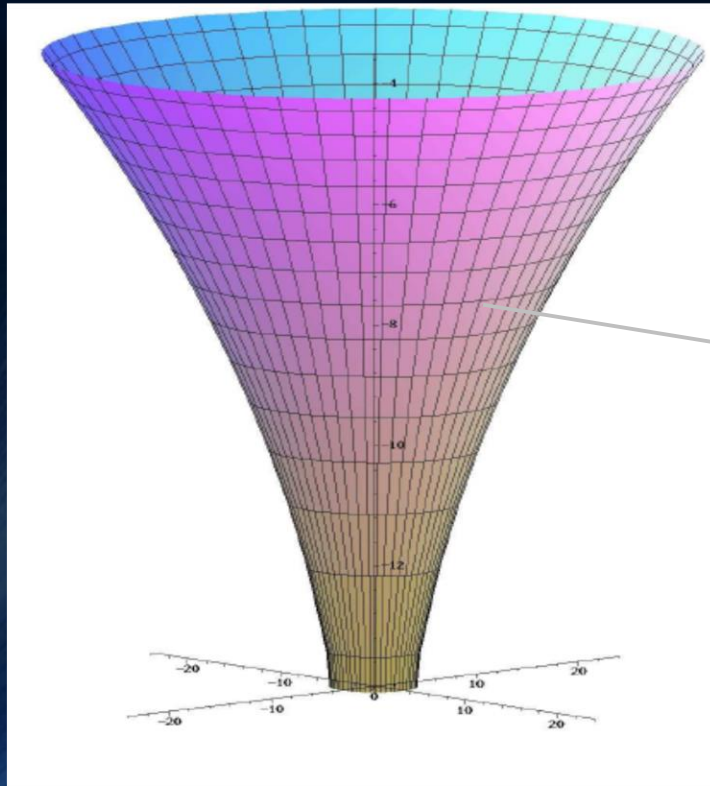
Für den äusseren Beobachter friert das Bild des Körpers, der in das schwarze Loch fällt, am Ereignishorizont ein. Der Körper selbst übertritt jedoch die Grenze und fällt weiter in die echte Singularität im Ursprung.

Dorian Gray wird in das schwarze Loch der moralischen Abgründe 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)



Ereignishorizont

Ereignishorizont

Echte Singularität

Das Bildnis des schwarzen Loches

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



Photonen-
Sphäre

Der Aufzug im Reichstagtagsgebäude befindet sich ca. bei $3/2 * R_s$

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

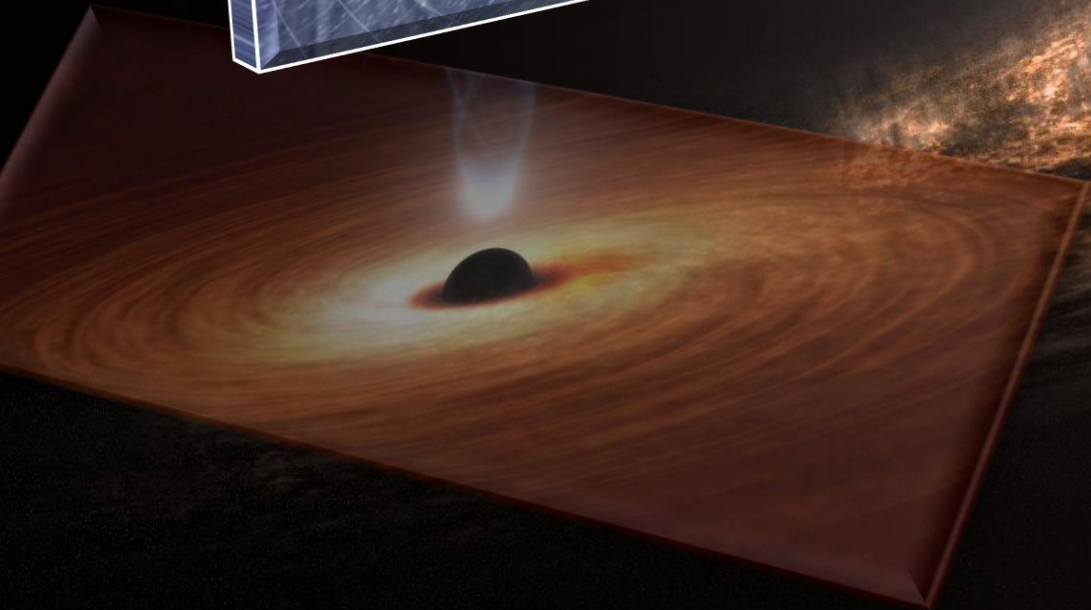
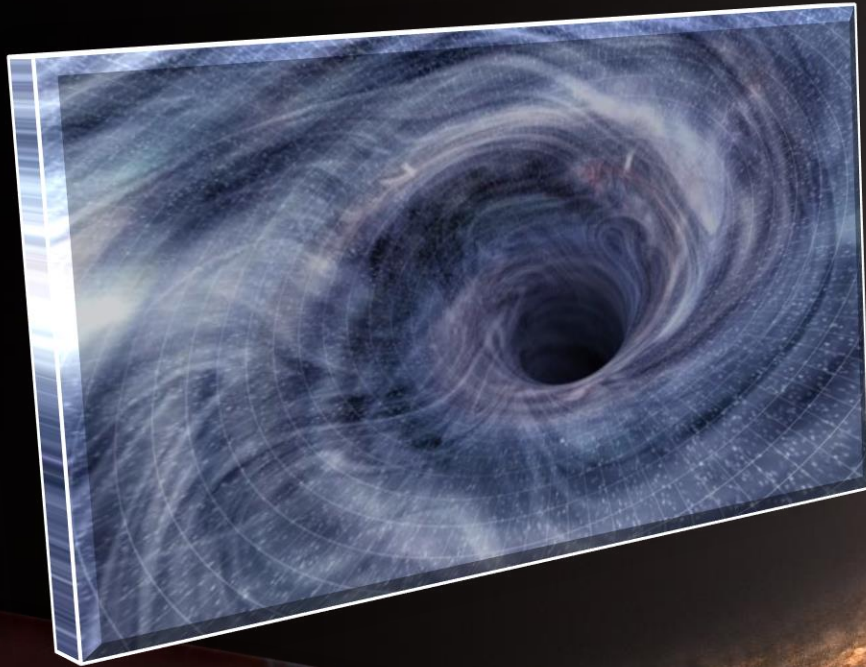
Was sind schwarze Löcher?

... und wie können wir sie wahrnehmen?



HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

Wie sieht ein schwarzes Loch aus?



Wie sieht das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie aus?





2009

Gaswolke G2 fällt in das Schwarze Loch



PHYSIKALISCHES KOLLOQUTUM

des Fachbereichs Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt

Mittwoch, den 11.04.2018, 16 Uhr c.t.
Großer Hörsaal, Raum_0.111,
Max-von-Laue-Str. 1




Dr. Stefan Gillessen

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik,
Garching

"The Galactic Center: A unique astrophysical laboratory"

Located at a distance of 8kpc only, the Galactic Center allows studying a galactic nucleus in unparalleled detail. With the advent of high-resolution, near-infrared instrumentation in the last decade it became possible to follow individual stellar orbits around the radio source Sgr A* with orbital periods as short as 12 years. The orbits provide compelling evidence for the massive black hole paradigm. The next generation near-infrared instrument GRAVITY aims at interferometrically combining the light of the four telescopes of ESO's VLT. The higher resolution will allow monitoring stellar orbits with orbital periods of 1 year only, and the relativistic prograde periastron precession gets accessible. The astrometric accuracy of GRAVITY is of order of the event horizon size of Sgr A*. This means that we might have access to measuring the spin of Sgr A*. In the past few years the small gas cloud G2 has been approaching Sgr A*. We were able to follow the tidal evolution of G2 for a decade, beautifully showing how the object got stretched ever more and how it passed the point of closest approach in 2014. The cloud is a unique probe of Sgr A*'s atmosphere.



*3D-Movie erstellt von
Dr. Ziri Younsi*

Für das Foto eines Schwarzen Lochs: Ein Teleskop so groß wie die Erde

Bonn. Die Theorie ist 100 Jahre alt, der Begriff genau 50: Schwarze Löcher. Gesehen hat sie noch keiner. Nun sollen Fotos gemacht werden. Vor allem vom Schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße, genannt Sagittarius A*, und einigen Artgenossen in fernerer Galaxien. Federführend mit dabei ist das Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR). In diesen Stunden beginnen die Beobachtungen.

Event Horizon Telescope



1 von 13

Das internationale ALMA-Teleskop (oben) steht in 5000 Meter Höhe in den chilenischen Anden. Es besteht aus 66 „Schüsseln“ zwischen 7 und 12 Metern Durchmesser. Sie empfangen Wellen im Millimeter- und Submillimeterbereich.

Schmahl
Gartengeräte * Werkzeuge
www.schmahl-koblenz.de


Katholisches Klinikum
Koblenz - Montabaur

Ihre Fragen, Hinweise oder Kritik



Onliner vom Dienst:
Marcus Schwarze
Anzeigen:
0261/98362003
Abo: 0261/9836 2000
Red.: 0160/97829699
Mail | Twitter | Brief

 **E-Paper**

Die Lokalausgaben
der Rhein-Zeitung



News aus Ihrer Region - Lokalteil wählen



Bilder von zwei schwarzen Löchern werden erwartet

(Stand 04.2017)

	M87	Sgr A*
Mass (M_{sun})	$3-6 \times 10^9$ (?)	4×10^6
Distance	16 Mpc	8.5 kpc
Luminosity	10^{44} erg/s	10^{36} erg/s
Mdot (M_{edd})	10^{-4}	10^{-8}
BH Spin Axis	Gal disk?	10-25 deg los
@ the BH?	Maybe	Yes
B field @ BH	60-130 G	10-100 G
Scattered?	No	yes
Shadow Size	640 AU	0.5 AU
Shadow Angle	20-40 μas	52 μas
GM/c ³	8 hrs	20 sec
Jet Power	$10^{42}-10^{43}$ erg/s	?

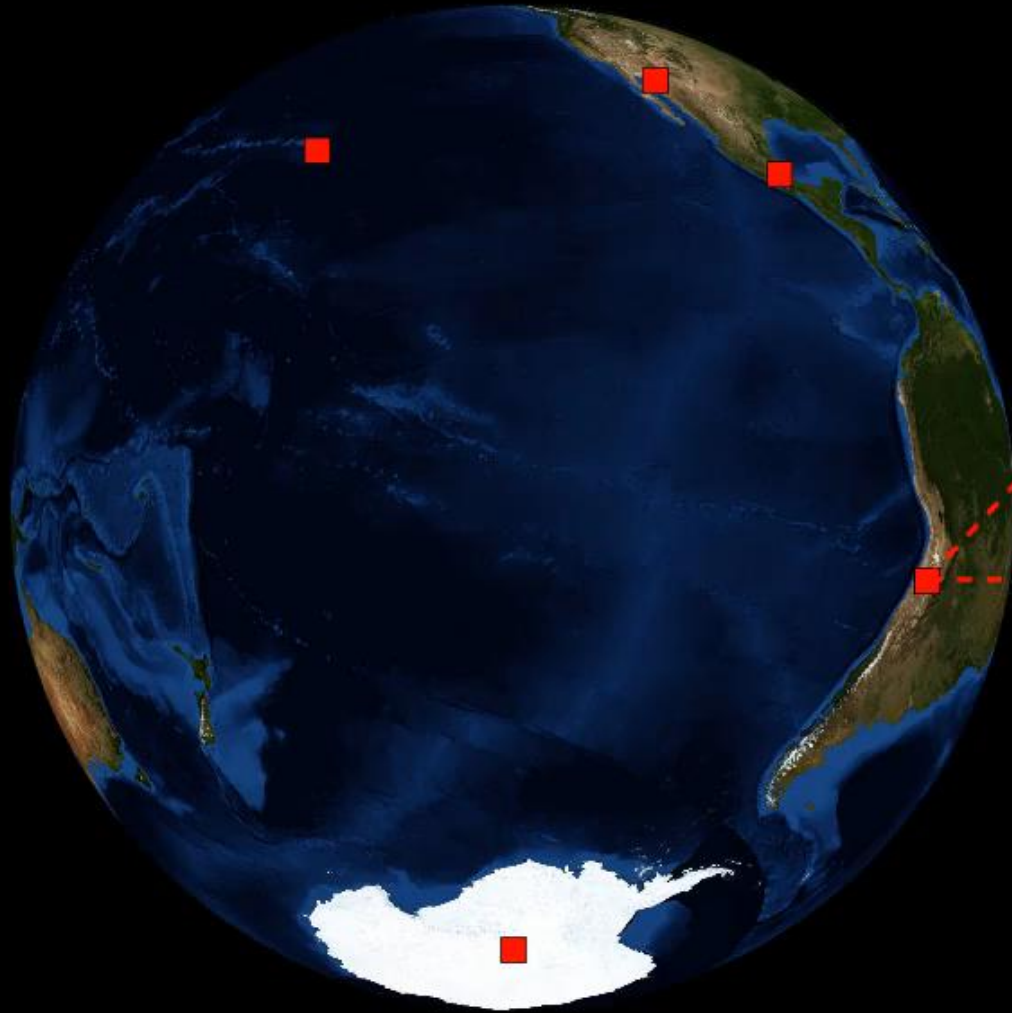
Wie sieht das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie aus?



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

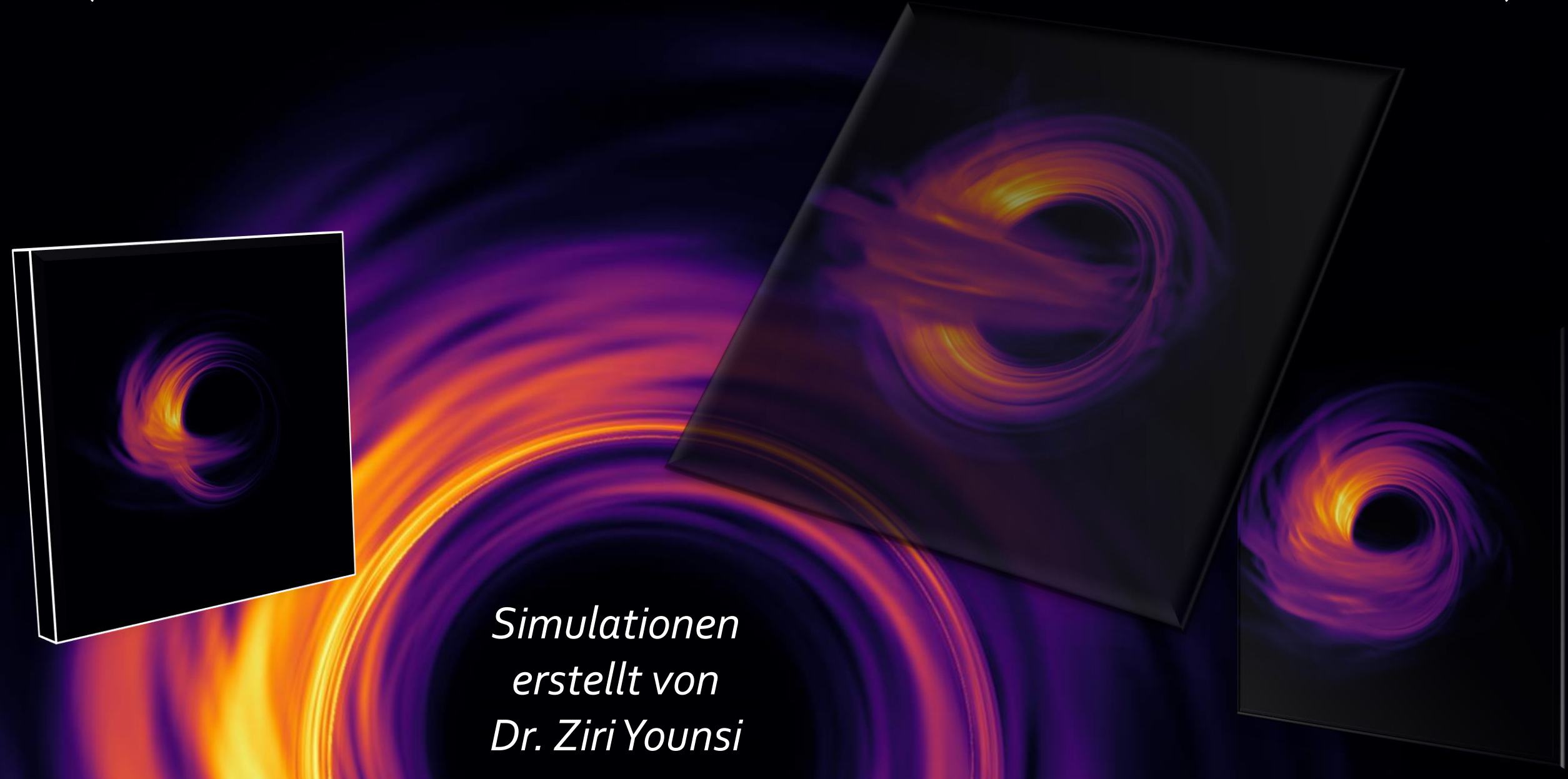
Create a virtual radio telescope
the size of the earth, using the
shortest wavelength

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

*Python-Animation erstellt
von Dr. Christian Fromm*

Das Bildnis des schwarzen Loches

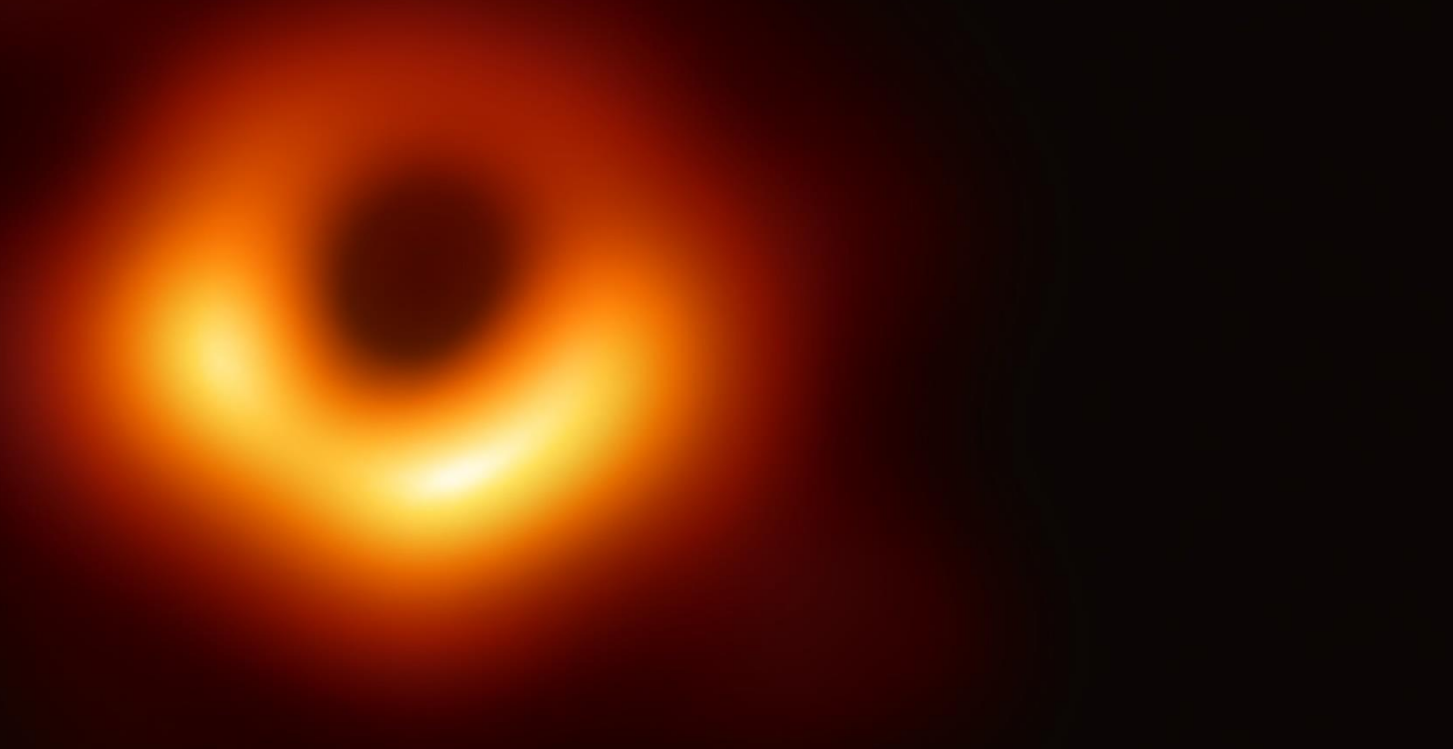
(wie wird das wirkliche Bildnis des schwarzen Loches im Zentrum der Milchstrasse aussehen?)



*Simulationen
erstellt von
Dr. Ziri Younsi*

Die ersten Bilder eines Schwarzen Lochs

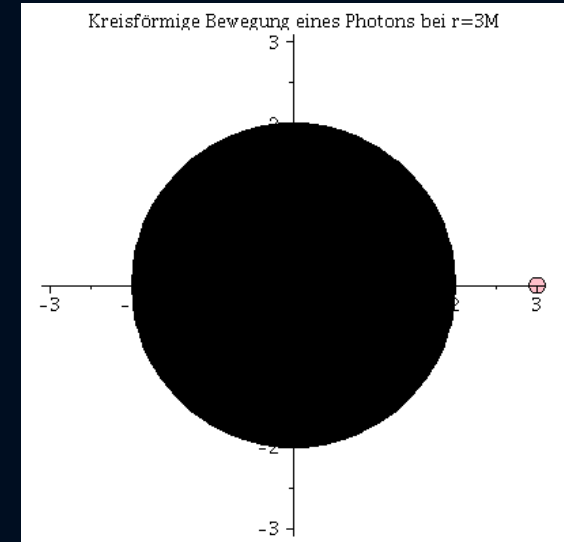
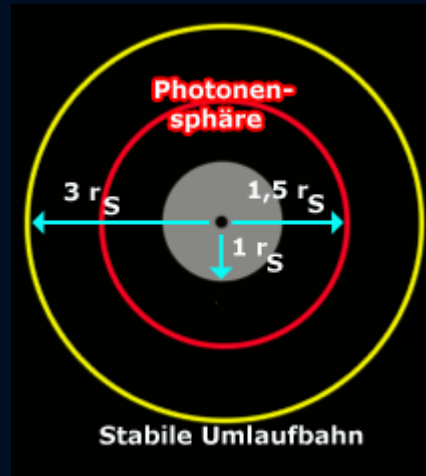
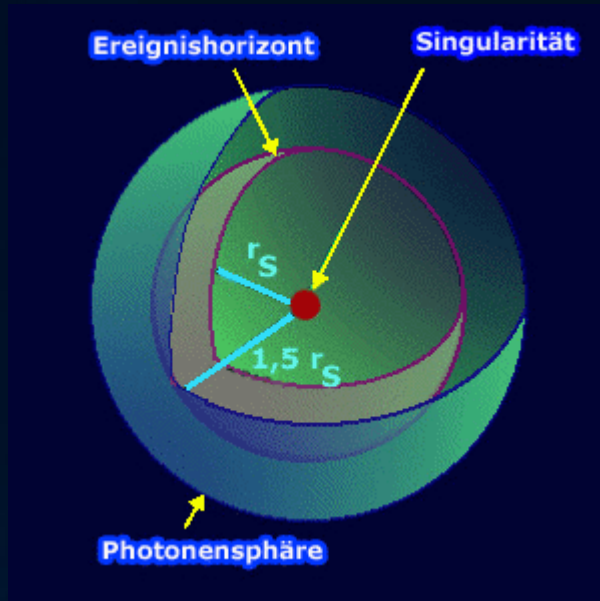
Ein wenig mehr als hundert Jahre nachdem Albert Einstein seine Feldgleichungen der *Allgemeine Relativitätstheorie* der Öffentlichkeit präsentierte, und er damit die Grundlage für Gravitationswellen und schwarzer Löcher formulierte, ist seit einigen Wochen ein Meilenstein in der Geschichte der Astronomie in aller Munde (erstes Bild eines schwarzen Lochs, siehe rechte Abbildung).



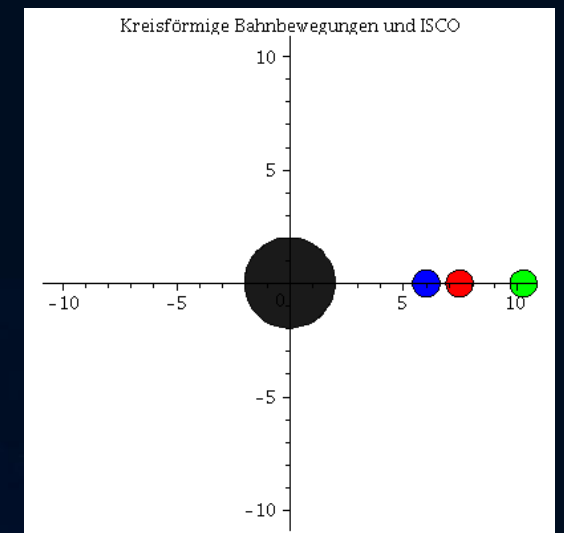
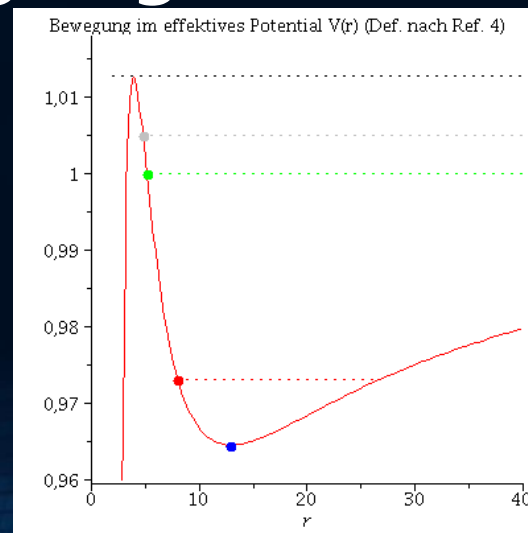
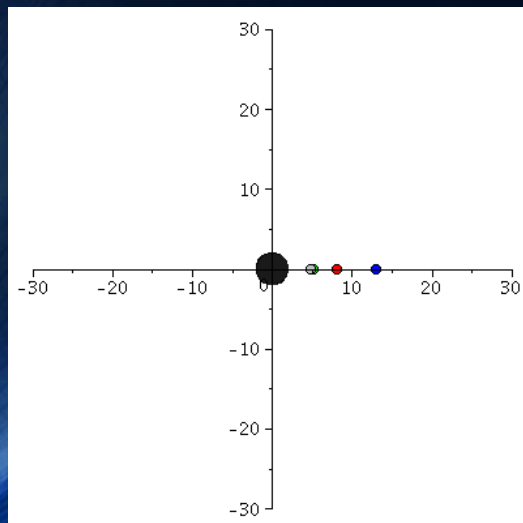
YouTube Video: https://www.youtube.com/watch?v=Zh5p9Sro_VU&list=PLn5gYfEKlag8nps1GKLqUW35AOgQY7aM2

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).

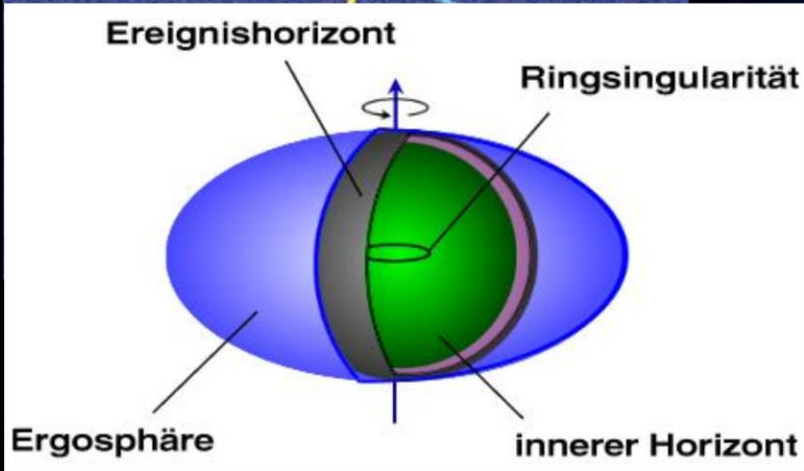
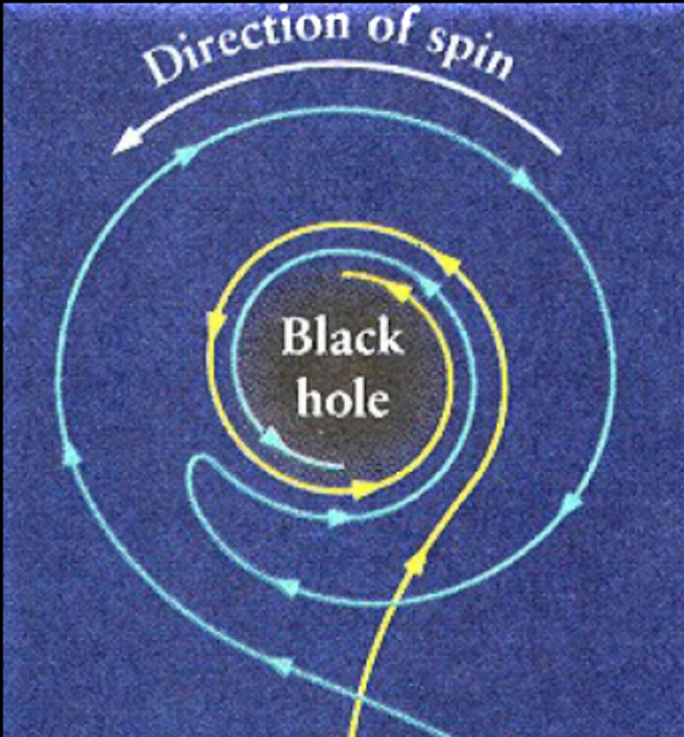
Die Photonen-Sphäre eines schwarzen Loches



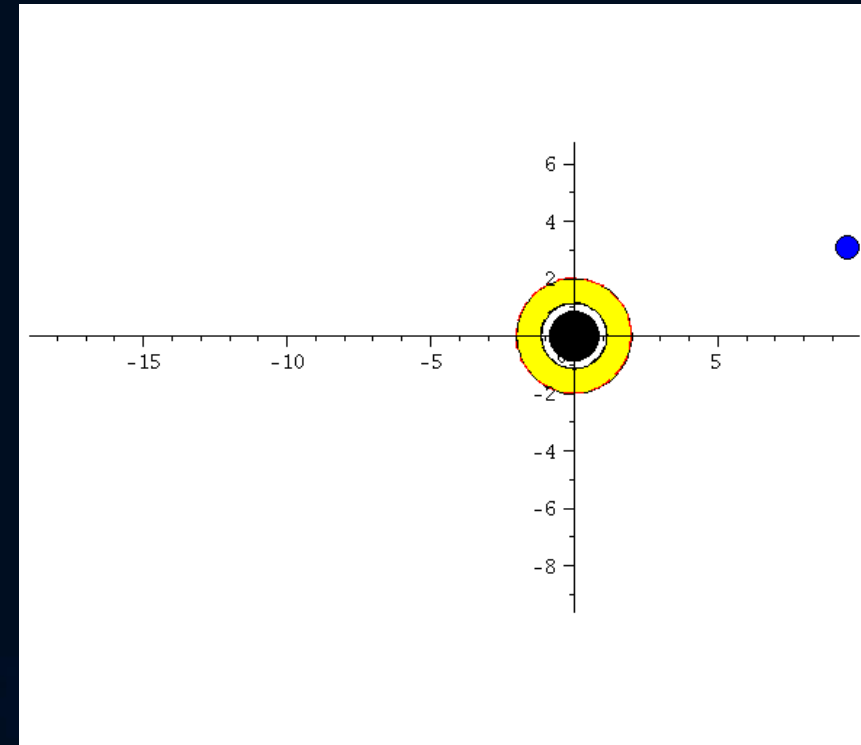
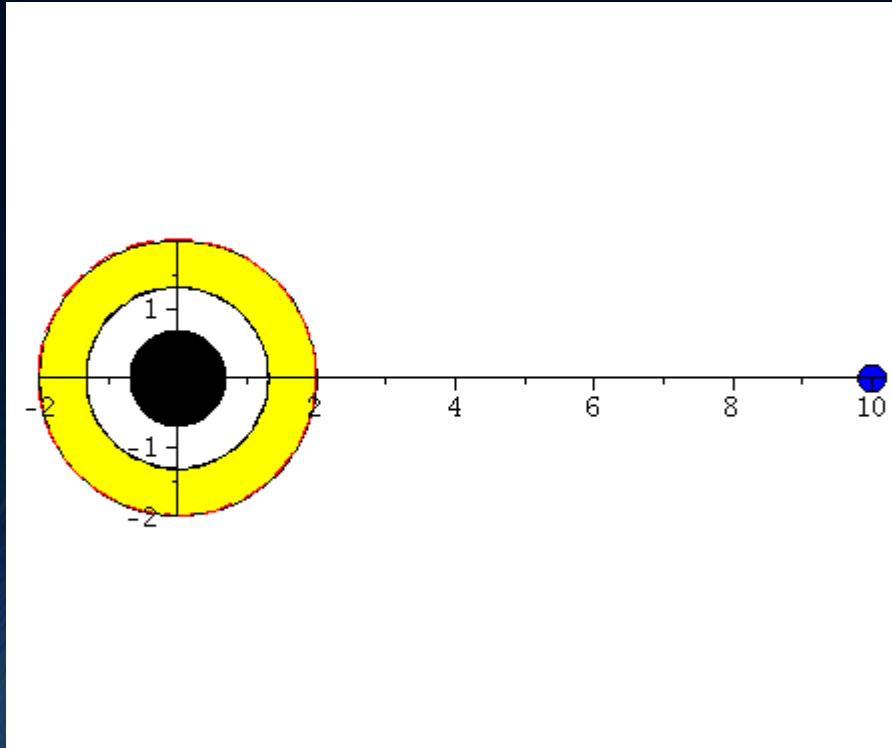
Geodätische Bewegungen um ein schwarzen Loch



Rotierende schwarze Löcher



Rotierende schwarze Löcher



Teil I

Analytische Berechnungen und numerische Simulationen in Maple

Basierend auf der Einstein- und Geodätengleichung, werden im ersten Teil der Vorlesung unterschiedliche Probleme der allgemeinen Relativitätstheorie analysiert.

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

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\nu\rho}^\mu \frac{dx^\nu}{d\tau} \frac{dx^\rho}{d\tau} = 0$$

Nichtrotierende schwarze Löcher

Ereignishorizonte, was geschieht wenn ein Teilchen in ein schwarzes Loch fällt, Bewegung von Probekörpern und Lichtteilchen um ein schwarzes Loch,..

Eigenschaften von Neutronensternen

Verlauf der Dichte innerhalb eines NS, Masse-Radius Beziehung, Raumzeitkrümmung innerhalb und ausserhalb eines NS,..

Rotierende schwarzen Löchern

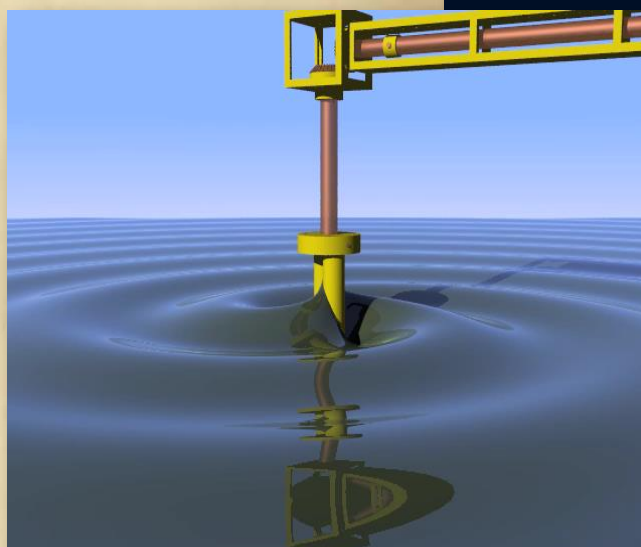
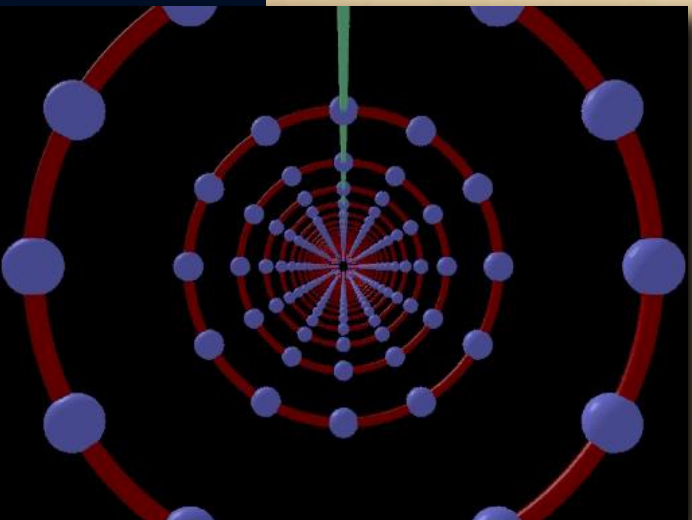
Mitführungseffekt der Raumzeit (frame-dragging),...

Vielleicht: Zeitliche Entwicklung des Universums
(Robertson-Walker-Metrik, Friedmann-Gleichung)

Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

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

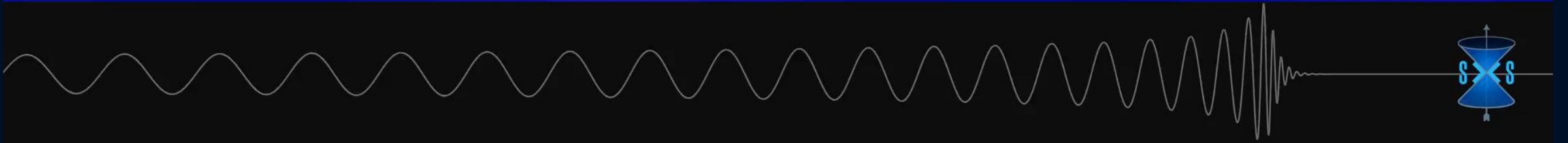
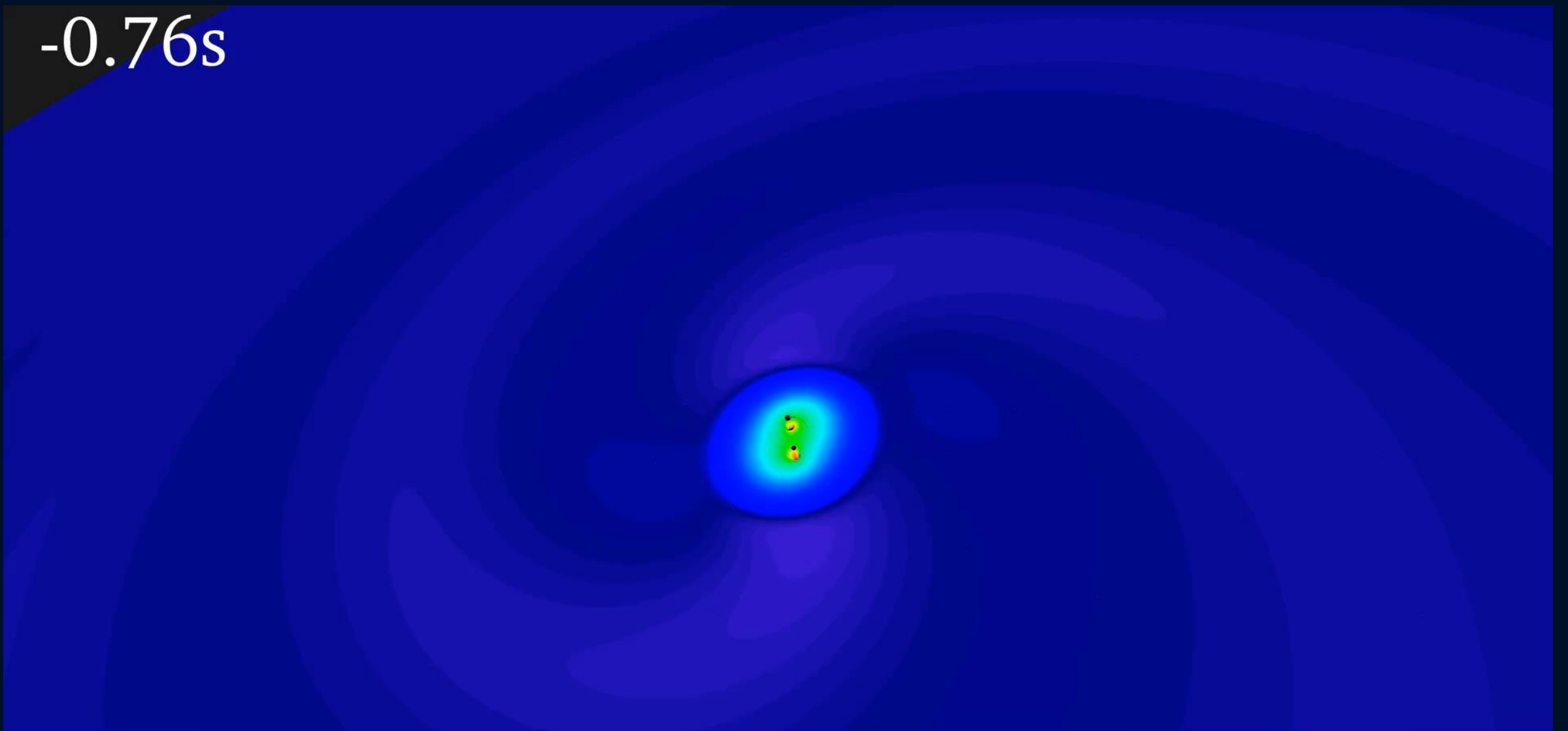


Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist,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



100 Jahre später LIGO:

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

PRL **116**, 061102 (2016)

 Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.



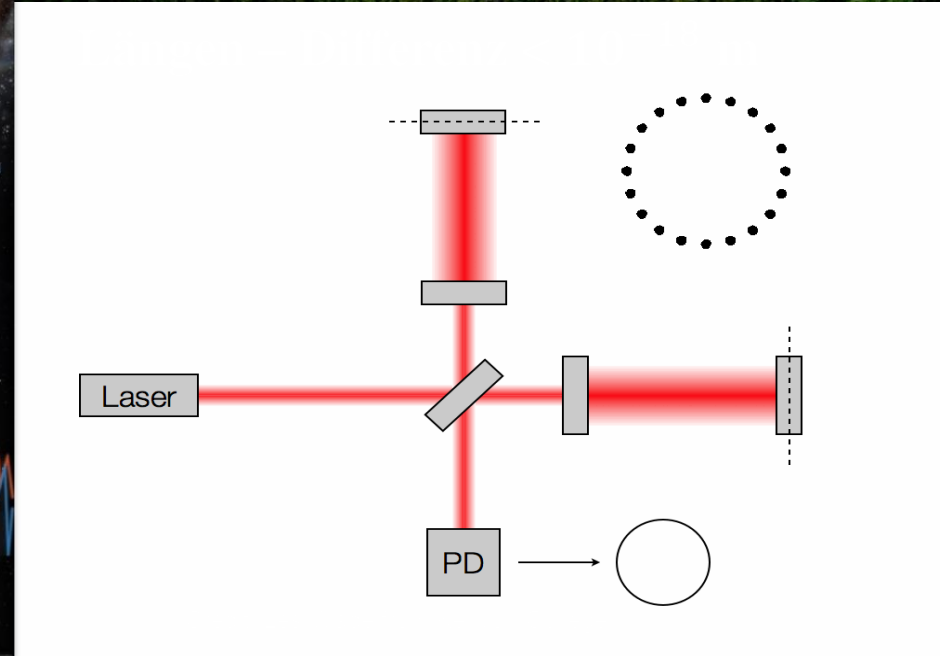
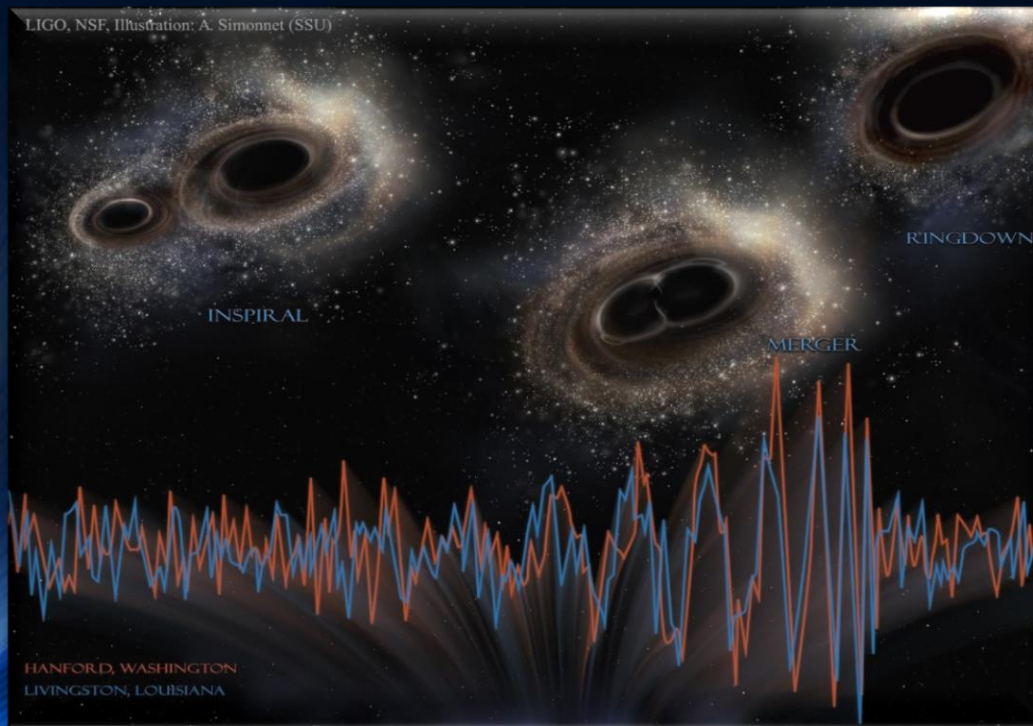
1. Direkter Nachweis von Gravitationswellen
Signalform: Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern

Gravitationswellen gefunden: LIGO!!!

Kollision zweier Schwarzer Löcher GW150914

Massen: 36 & 29 Sonnenmassen

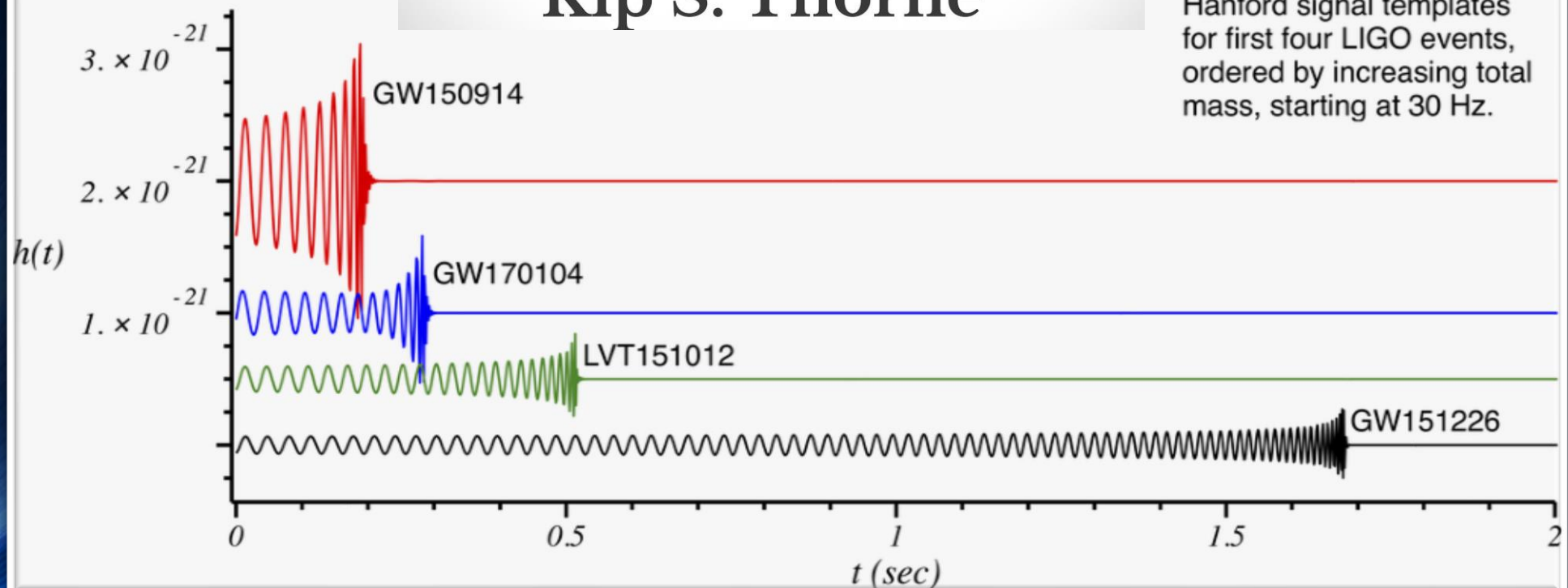
Abstand zur Erde 410 Mpc
(1.34 Milliarden Lichtjahre)



2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



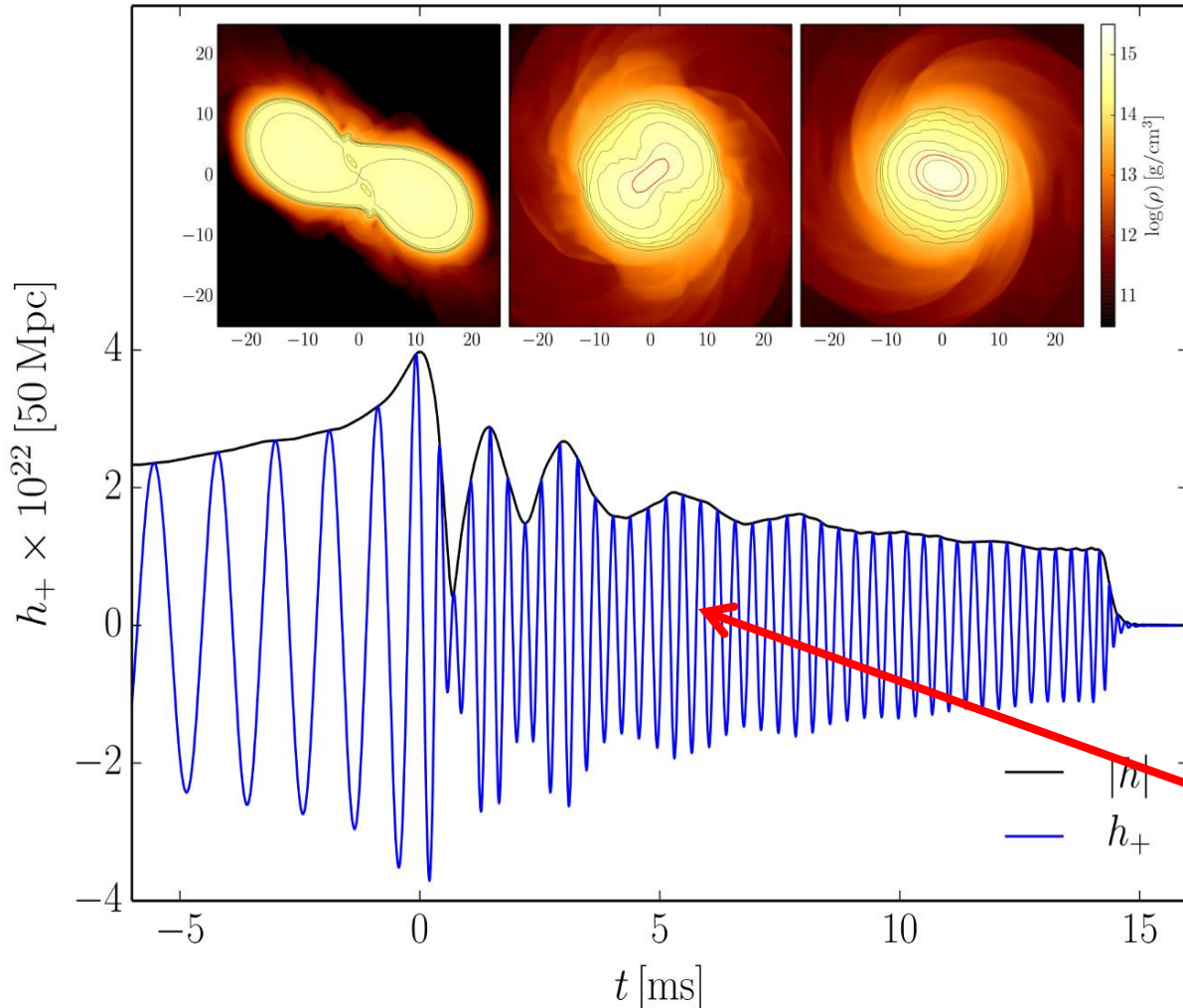
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



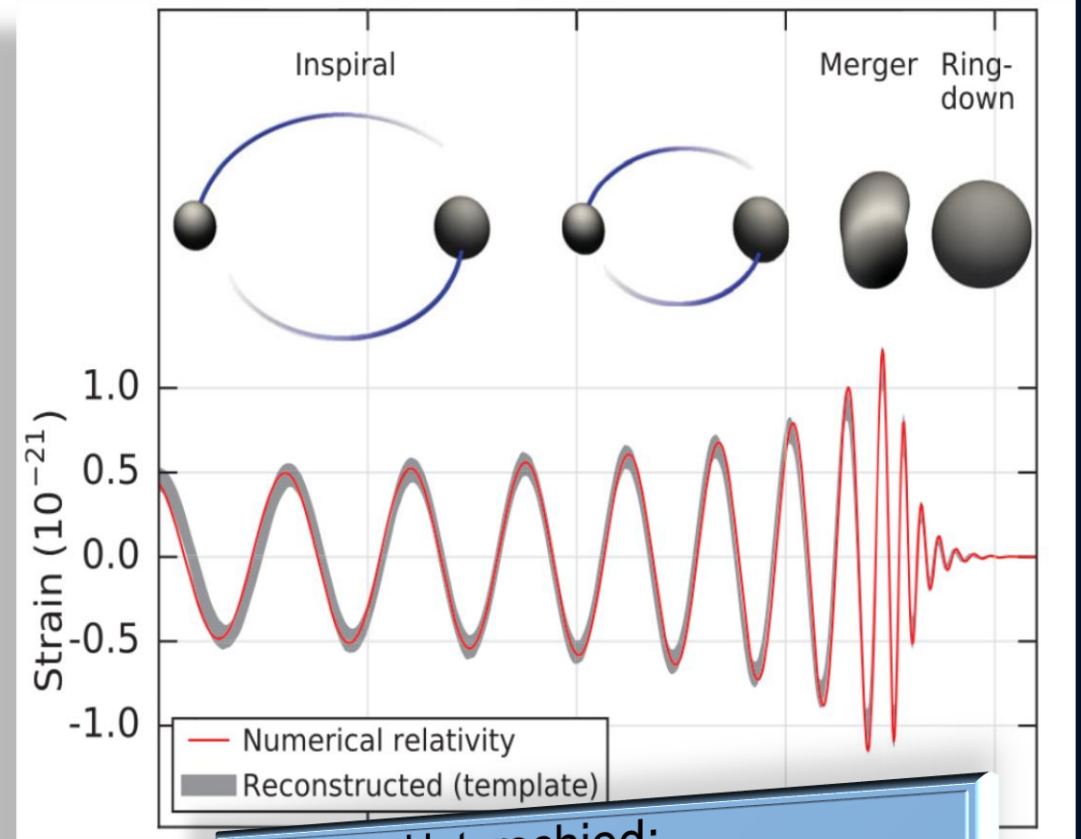
Hanford signal templates
for first four LIGO events,
ordered by increasing total
mass, starting at 30 Hz.

Gravitationswellen von Neutronenstern Kollisionen

Neutronenstern Kollision (Simulation)



Kollision zweier schwarzer Löcher

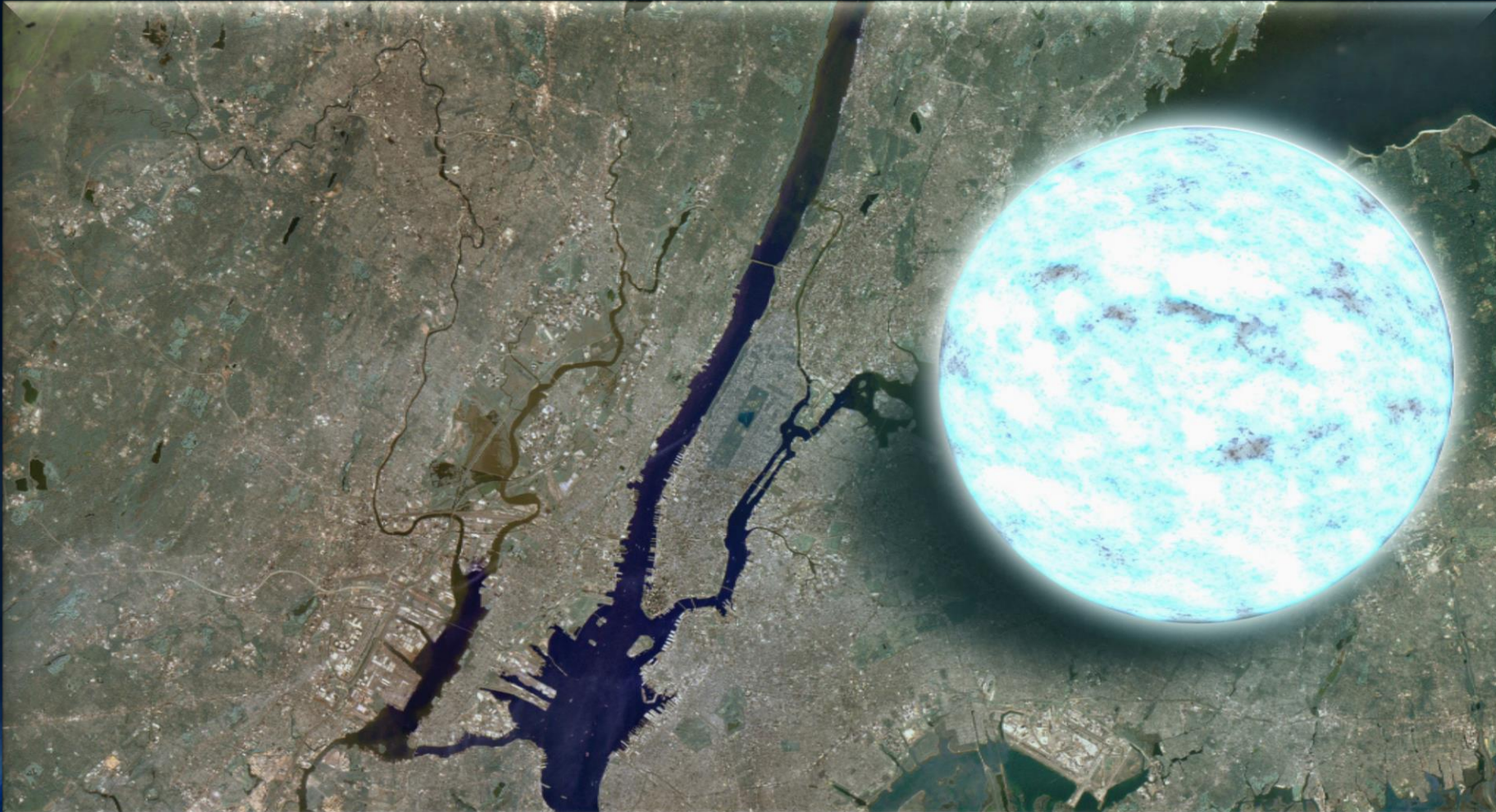


Unterschied:

Bei Neutronenstern Kollisionen
gibt es meistens eine
Post-Kollisionsphase

Properties of Neutron Stars

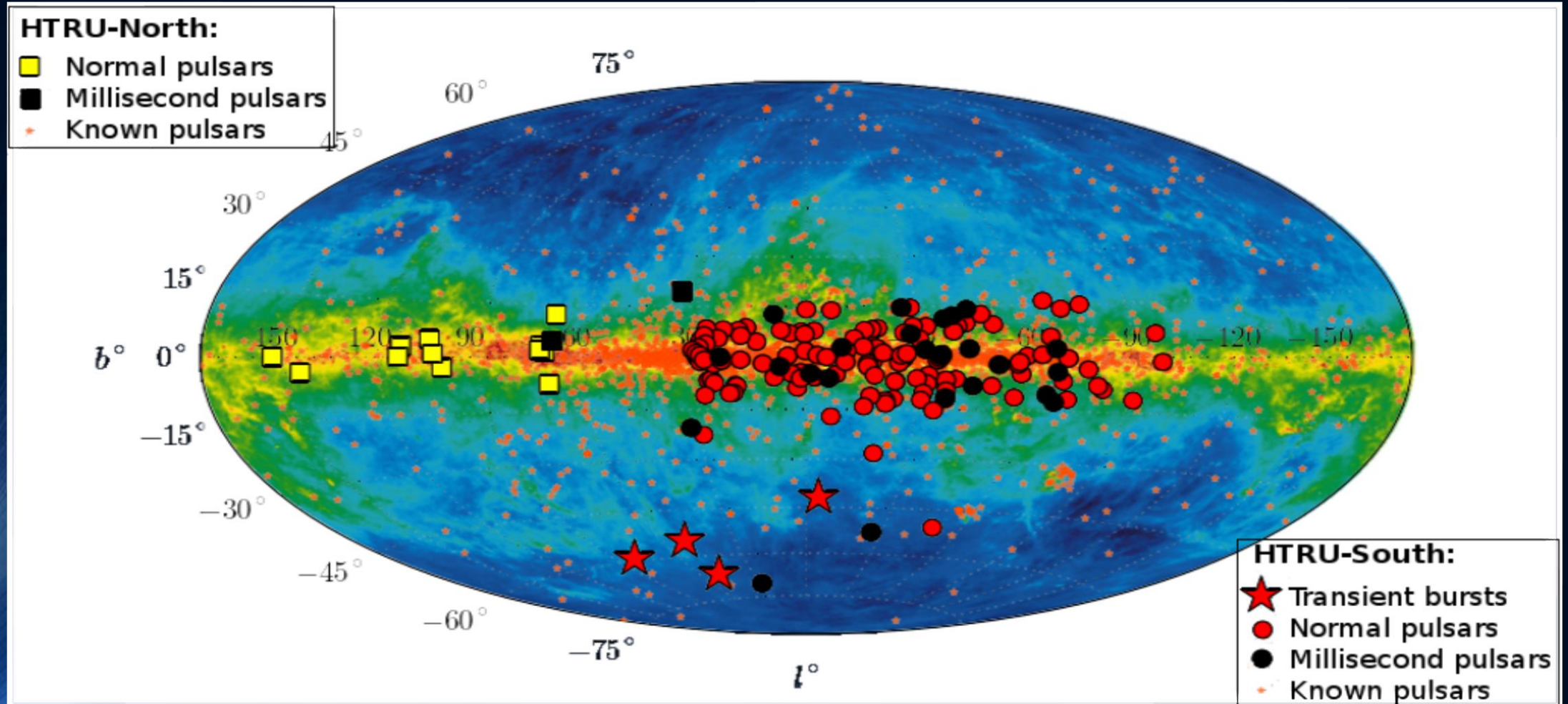
radius ~ 10 km, mass ~ 1-2 sun masses
large magnetic fields ~ 10^{11} Tesla, high rotation (up to 716 Hz)



Pulsars are Rotating Neutron Stars

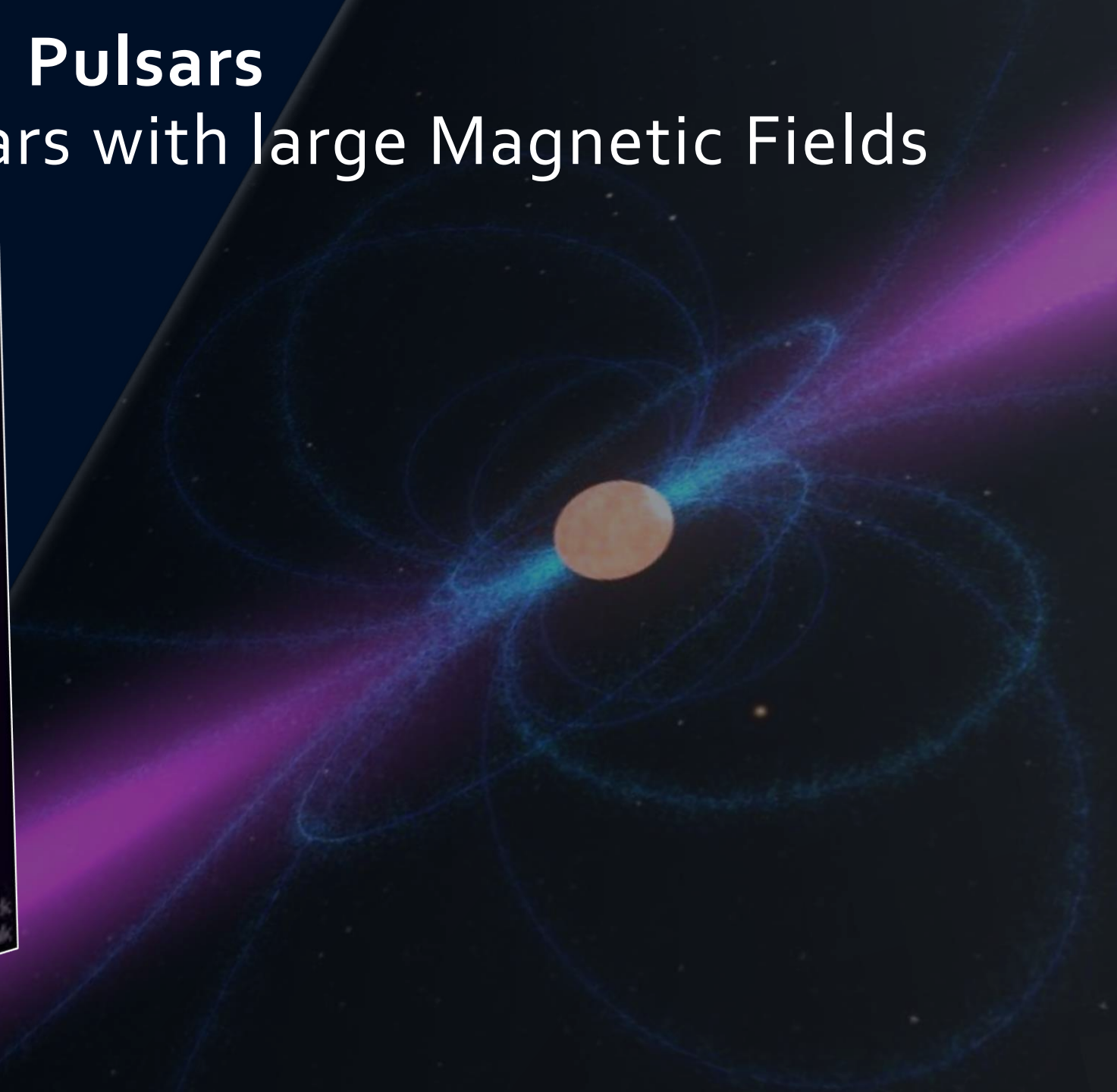
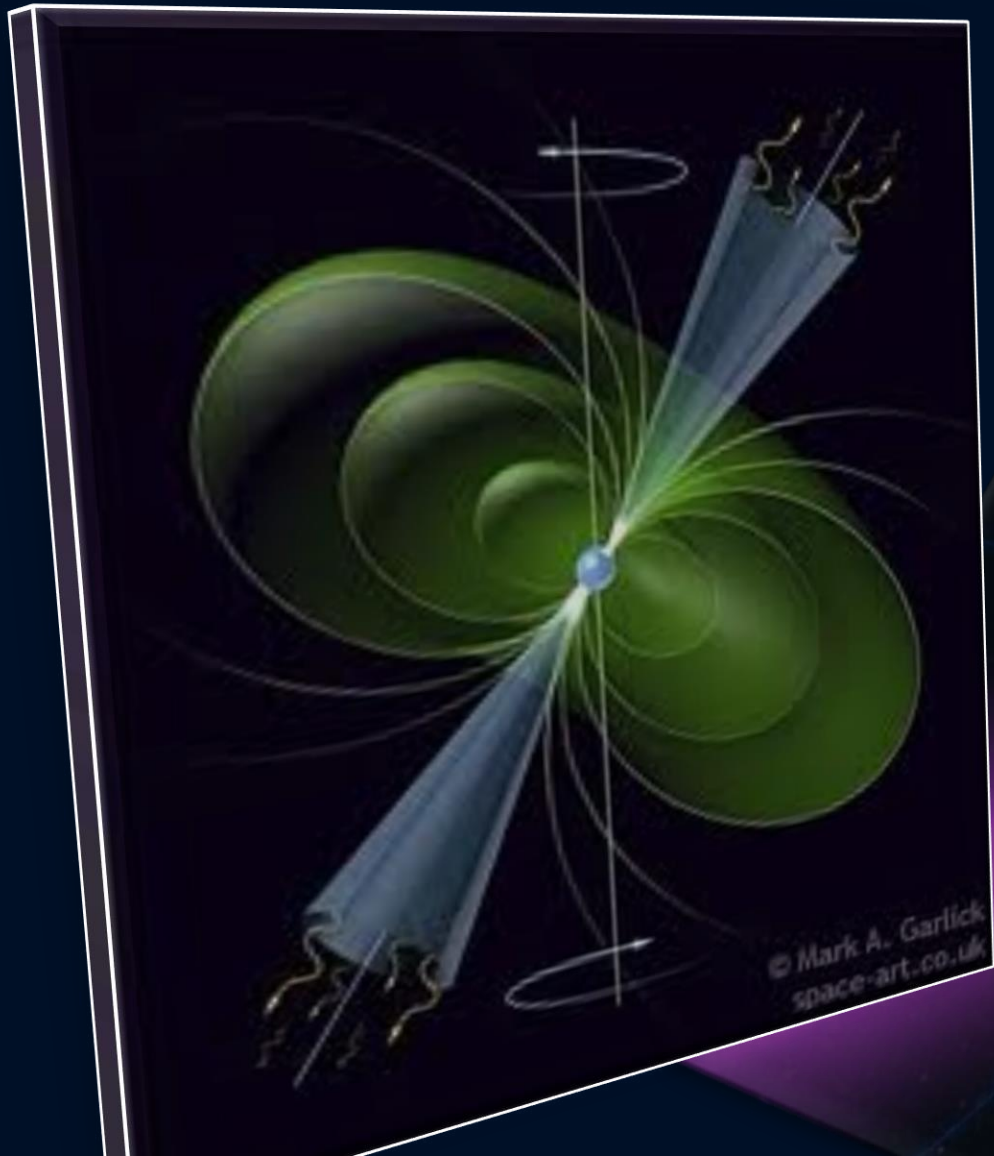
First Pulsar found in 1967 (PSR 1919+21, Bell)

Currently we know about 2800 neutron stars



Pulsars

Rotating Neutronstars with large Magnetic Fields



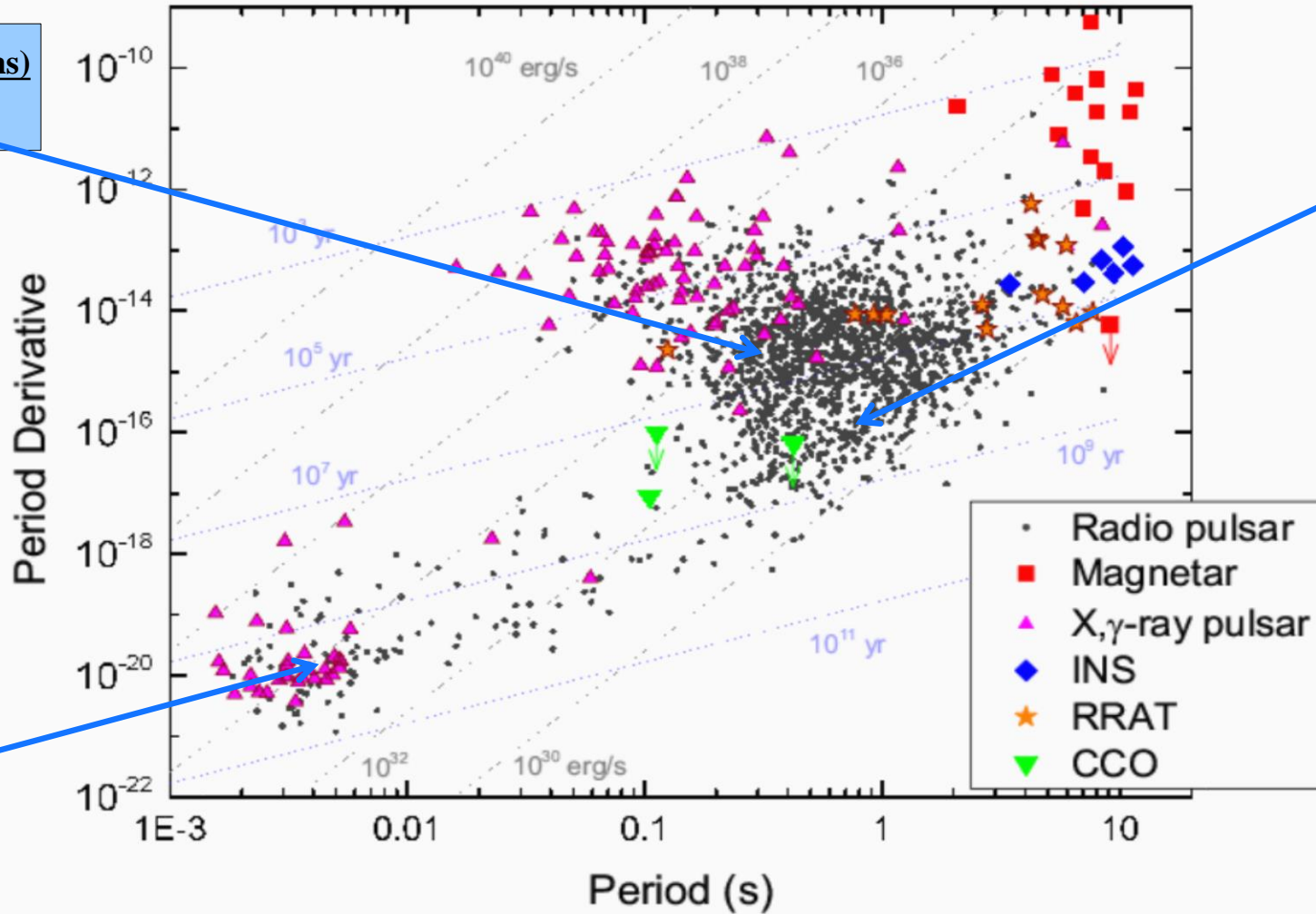
Millisecond and Second Pulsars



PSR B0531+21 (33.5 ms)
Crab Pulsar



PSR B0329+54 (0.715 s)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

Teil II

Paralleles Programmieren mit C/C++ und OpenMP/MPI

Die Eigenschaften von Neutronensternen werden in diesem Teil der Vorlesung numerisch mittels der Programmiersprache C++ berechnet. Ausgehend von der, im ersten Teil hergeleiteten Tolmann-Oppenheimer-Volkoff Gleichung, wird mittels des einfachen Euler-Verfahrens die Differentialgleichung in C++ implementiert.

```
#include <iostream> //Ein-/Ausgabe (Include-Dateien)
#include <math.h> //Mathematisches
using namespace std; //Fuer cout

//Definition der Zustandsgleichung
double eos(double p)
{
    double e;
    e=pow(p/10,3.0/5);
    return e;
}

main(void) //Hauptprogramm
{
    //Variablendeklarationen
    double M,p,e,r,dM,dp,de,dr;
    double eos(double);

    //Variableninitialisierung
    M=0;
    r=pow(10,-14);
    p=10*pow(0.0005,5.0/3);
    dr=0.000001;

    //do-while Schleife (Numerische Lösung der TOV-Gleichung)
    do
    {
        e=eos(p); //Wert der Energiedichte bei momentanem Druck
        dM=4*M_PI*e*r*r*dr; //Massenzunahme bei momentanem r und Schrittweite dr
        dp=- (p+e)*(M+4*M_PI*r*r*p)/(r*(r-2*M))*dr; //Druckzunahme bei momentanem r und Schrittweite dr (TOV-Gleichung)
        r=r+dr; //momentaner Radius des Neutronensterns
        M=M+dM; //momentane Masse des Neutronensterns innerhalb des Radius r
        p=p+dp; //momentaner Druck des Neutronensterns innerhalb des Radius r
    }
    while(p>0);

    //Ausgabe der Masse und des Radius auf dem Bildschirm
    cout<<"Neutronensternradius [km] = "<<r<<"\n";
    cout<<"Neutronensternmasse [Sonnenmassen] = "<<M/1.4766<<"\n";

    return 0; //main beenden (Programmende)
}
```

Observed Masses in Binary Neutron Star Systems

Some of the known Neutron Stars (NS) are in binary systems:
NS-Planet, NS-(white dwarf) or NS-NS binary

PSR J1906+0746

144-ms Pulsar, observed in 2004

Orbital Period: 3.98 hours,

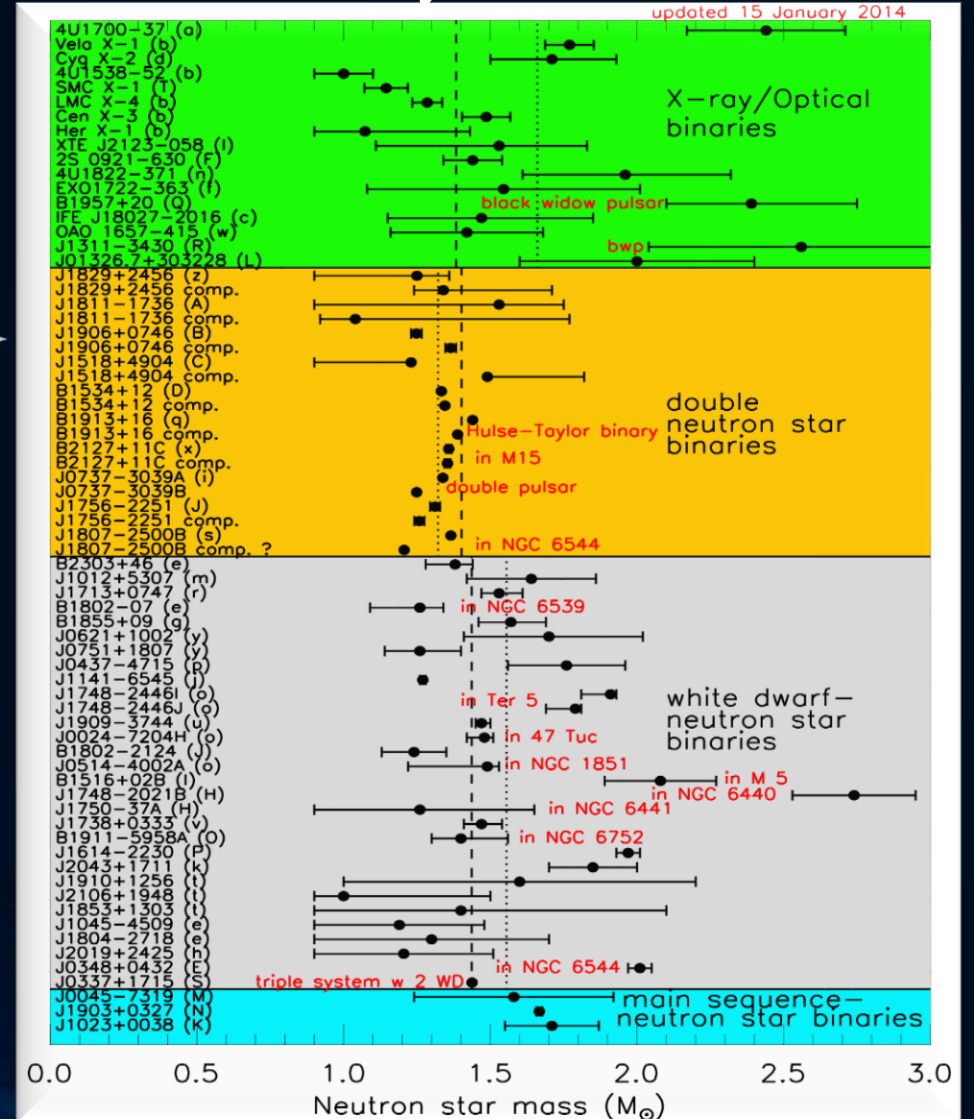
Eccentricity: 0.085

Pulsar Mass: 1.291(11)

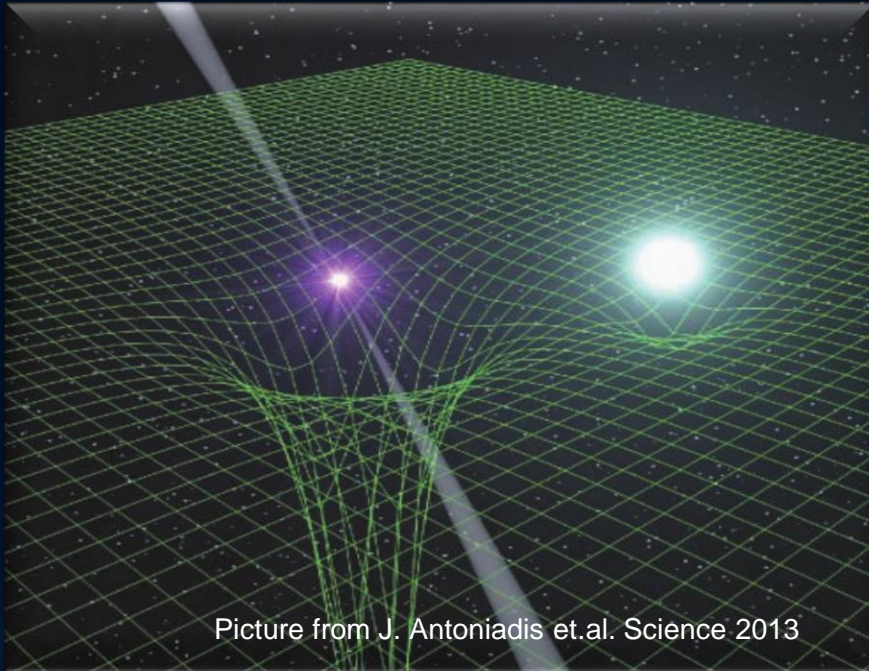
Mass Companion: 1.322(1)

Observed between 1998-2009,
after 2009, the pulsar disappeared
because of spin precession

Van Leeuwen et al, arXiv:1411.1518



A Two Solarmass Neutron Star



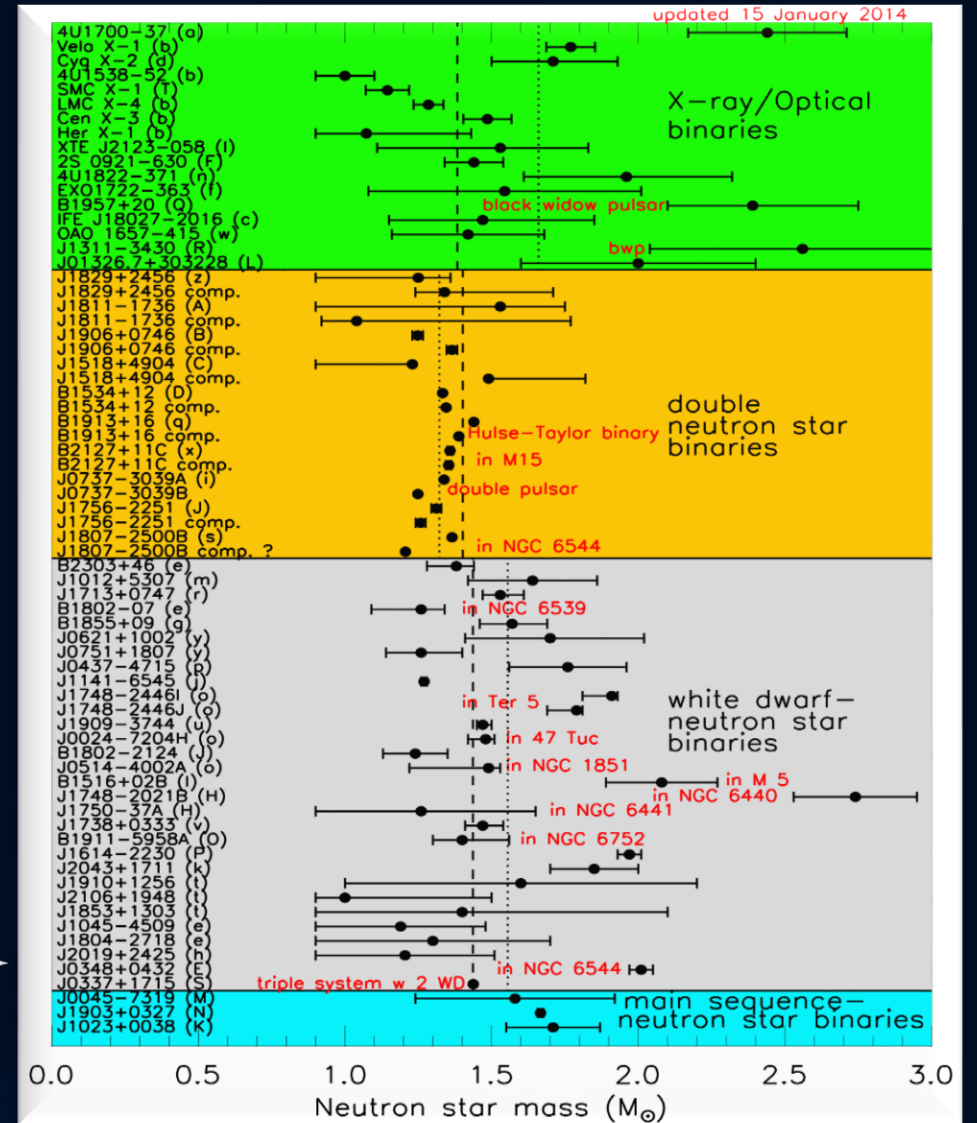
PSR J0348+0432

Orbital Period: 2.46 hours

Pulsar mass: 2.01 ± 0.04

Mass of the white dwarf:

$M = 0.172 \pm 0.003$

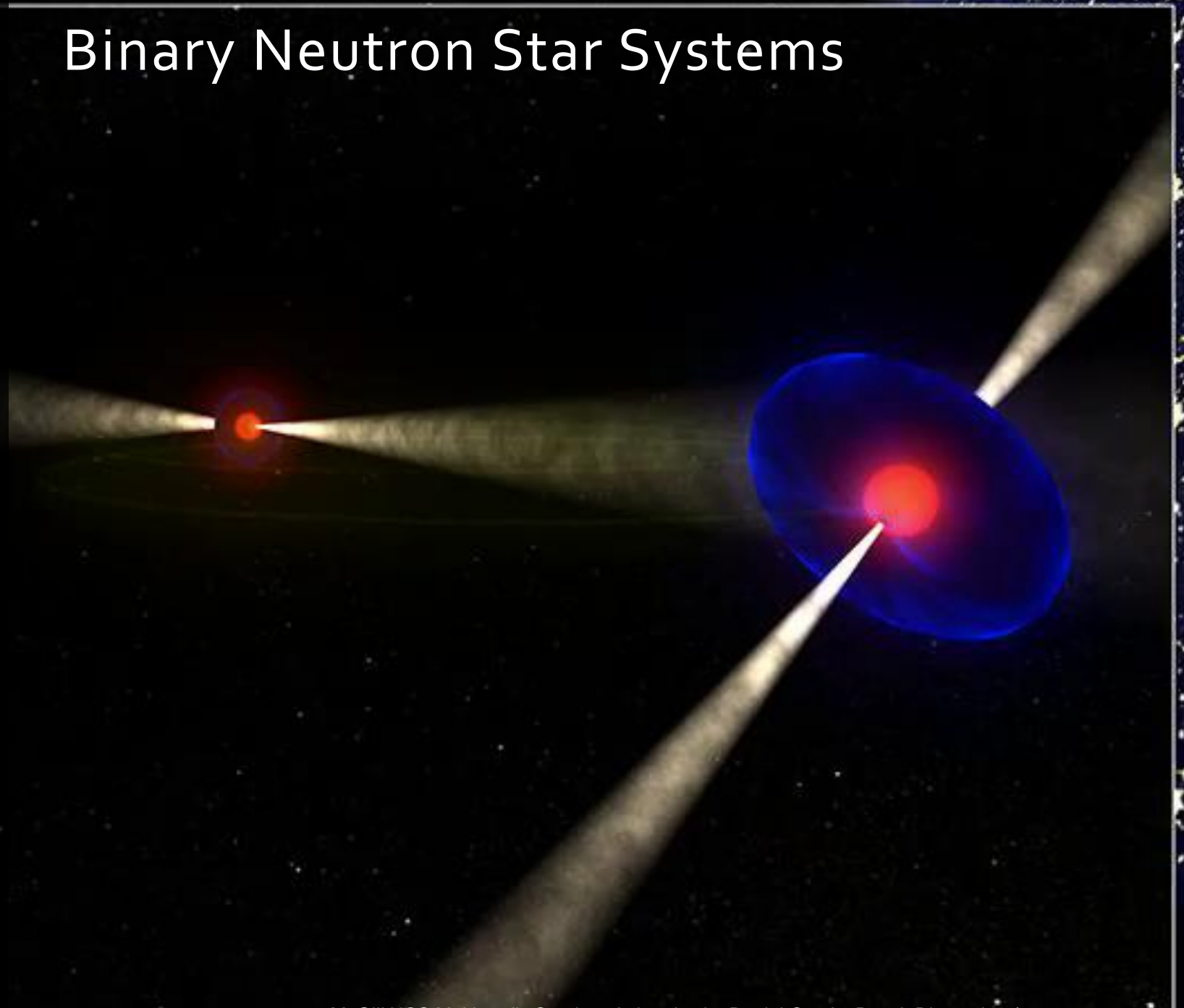


Binary Neutron Star Systems

Kramer, Wex, Class. Quantum Grav. 2009

The Double Pulsar (PSR J0737-3039A/B):
Observed in 2003
Eccentricity: 0.088
Pulsar A: $P=23$ ms, $M=1.3381(7)$
Pulsar B: $P=2.7$ s, $M=1.2489(7)$
Only separated 800,000 km from each other
Orbital period: 147 Minuten
Pulsar A is eclipsed by Pulsar B
(30 s for each orbit)

Distance shrinks
due to Gravitational Wave emission
→ They will collide in 85 Million Years!



Binary Neutron Star Systems

Recently some new interesting Neutron Star Binary Systems has been found:

J0453+1559

$P = 17 \text{ ms}$

(similar to the Doublepulsar)

J1913+1102

$P = 27 \text{ ms}$

$P_b = 4.95 \text{ h}$

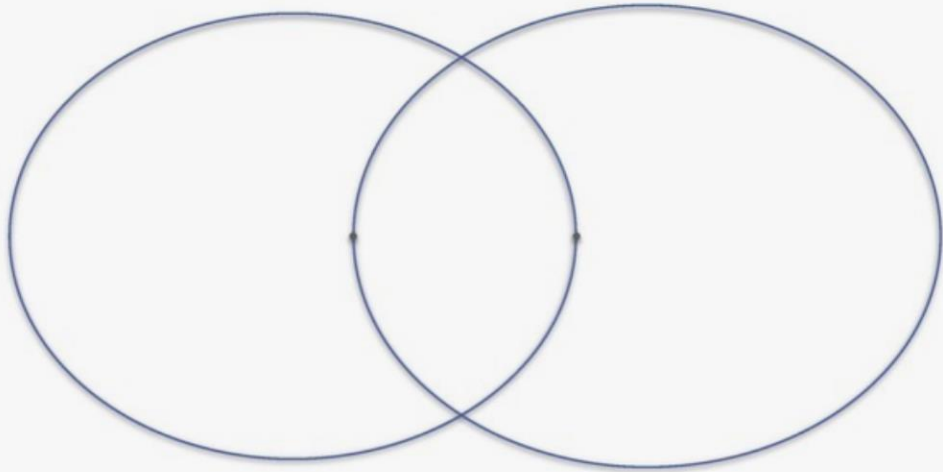
J1757-1854

$P = 215 \text{ ms}$

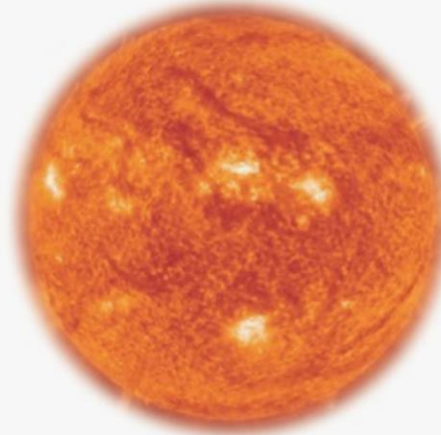
$P_b = 4.4 \text{ h}$

$E = 0.606$

Hulse-Taylor-Pulsar



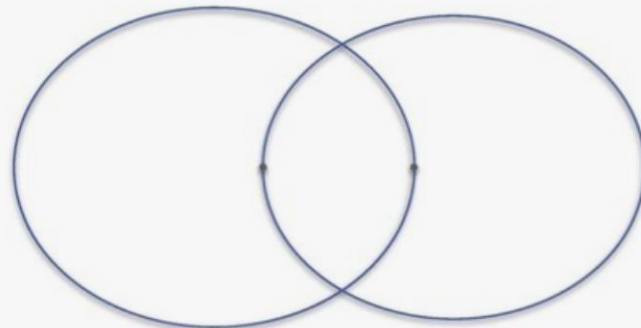
Sonne



Doppelpulsar



J1757-1854

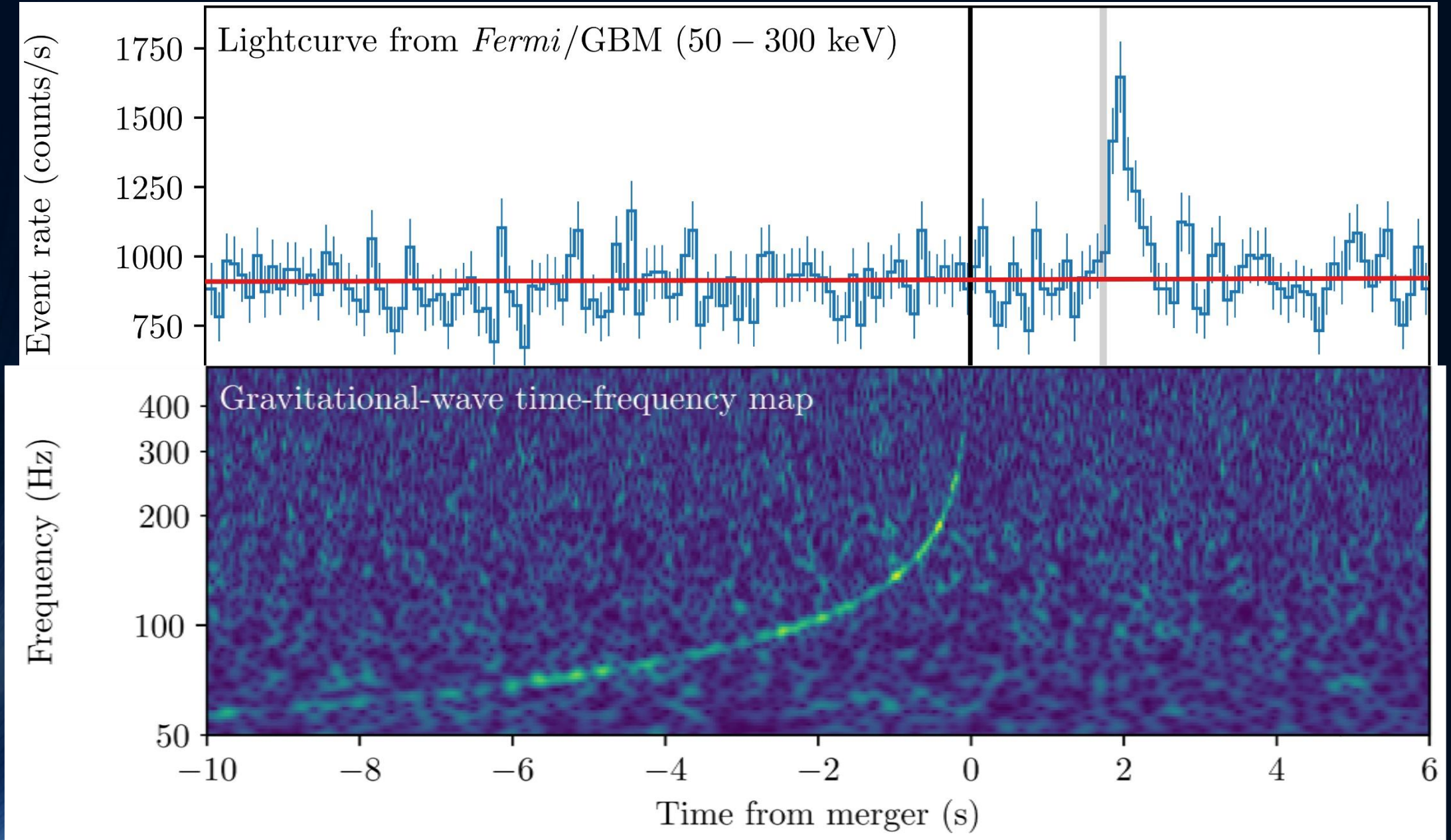


Currently we know ~25 Double-NS Systems and one triple System

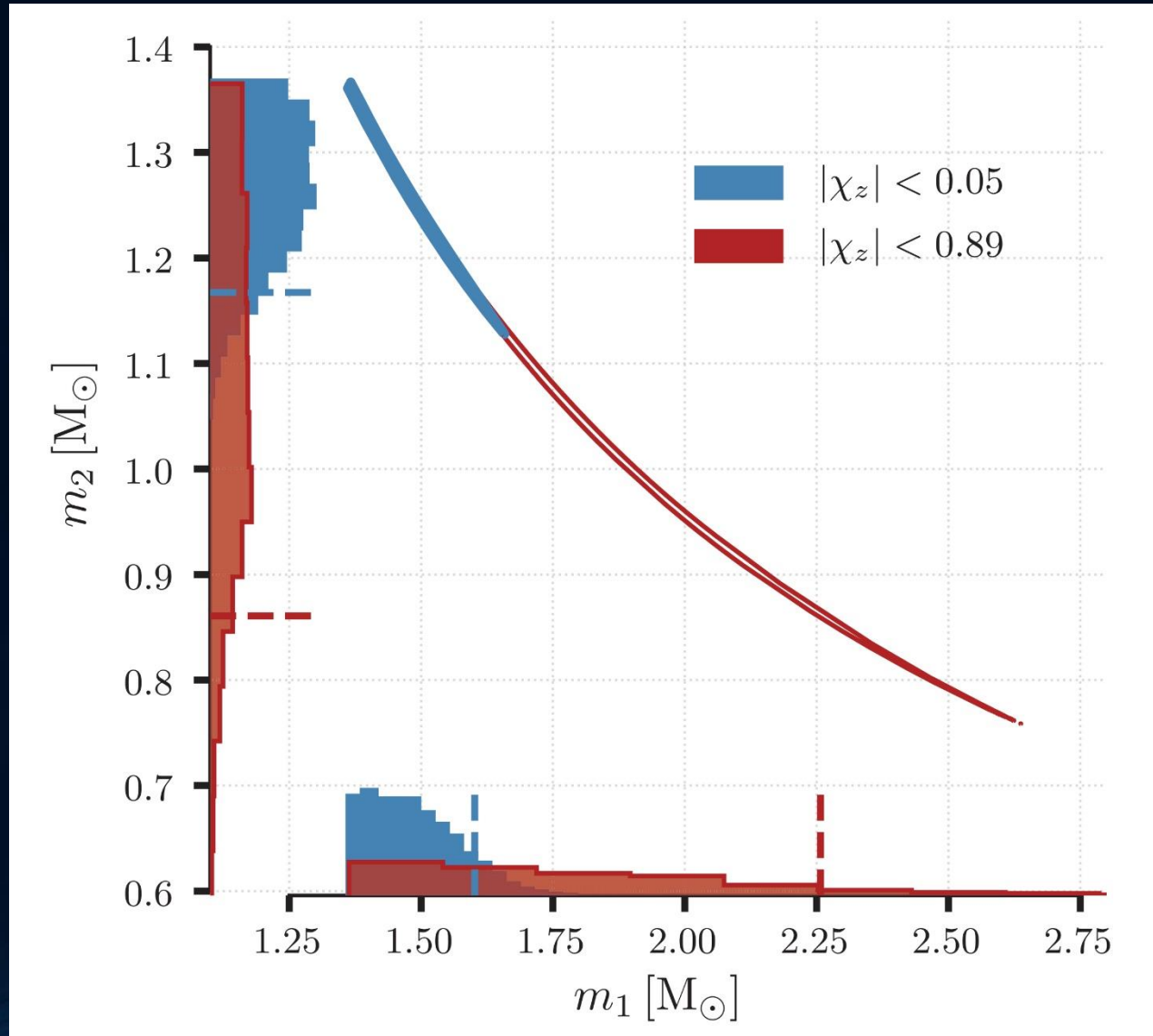
The long-awaited event GW170817

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

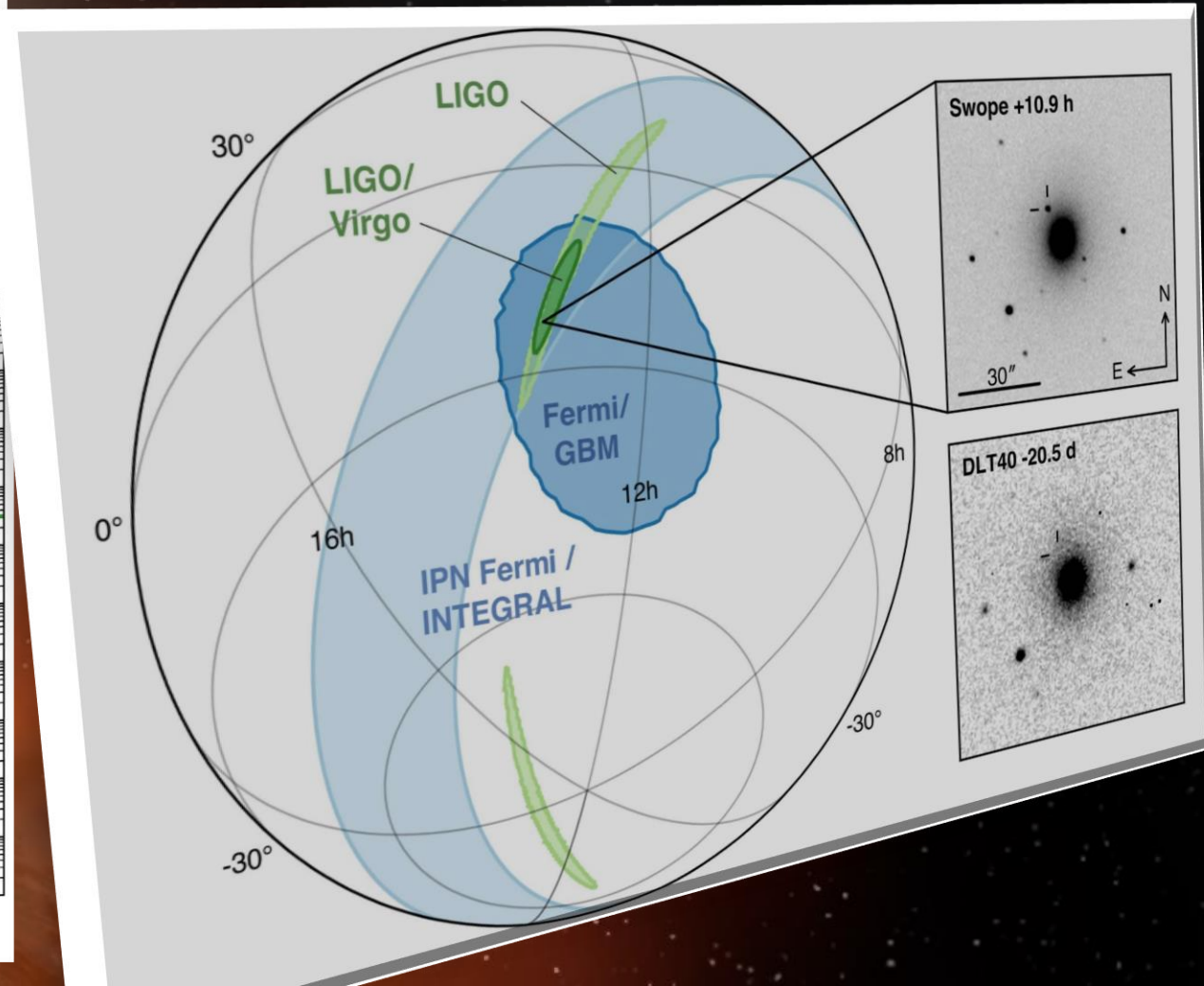
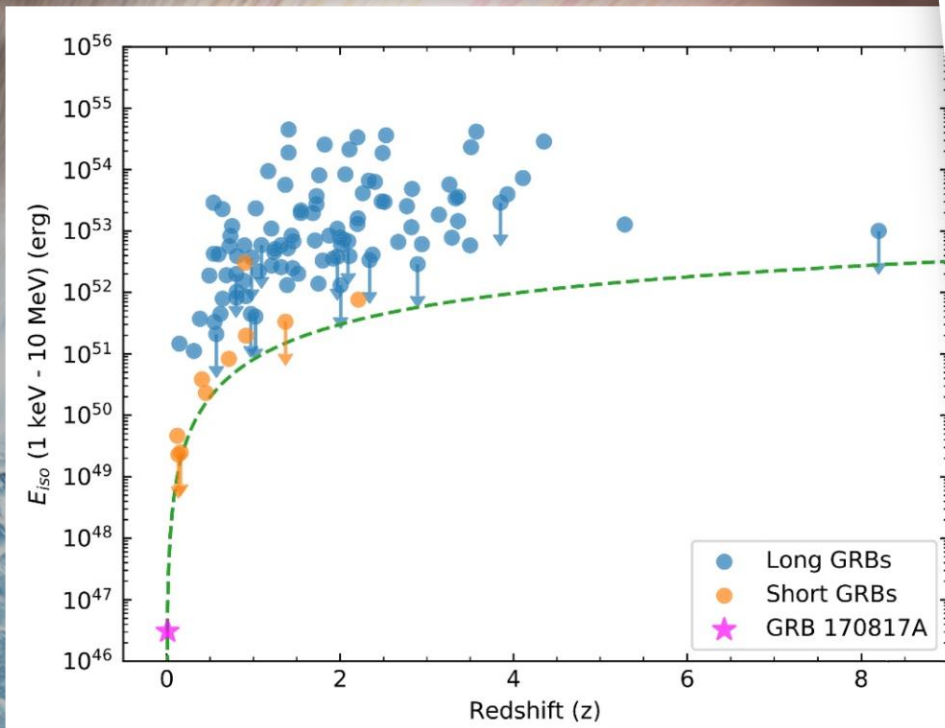
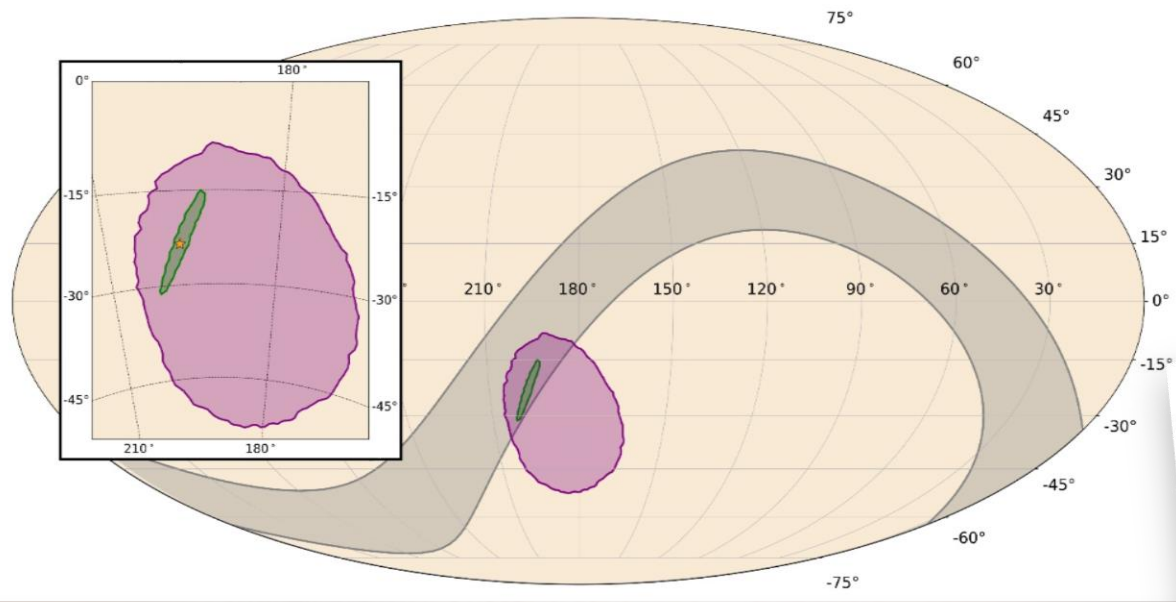
Gravitational Wave GW170817 and Gamma-Ray Emission GRB170817A



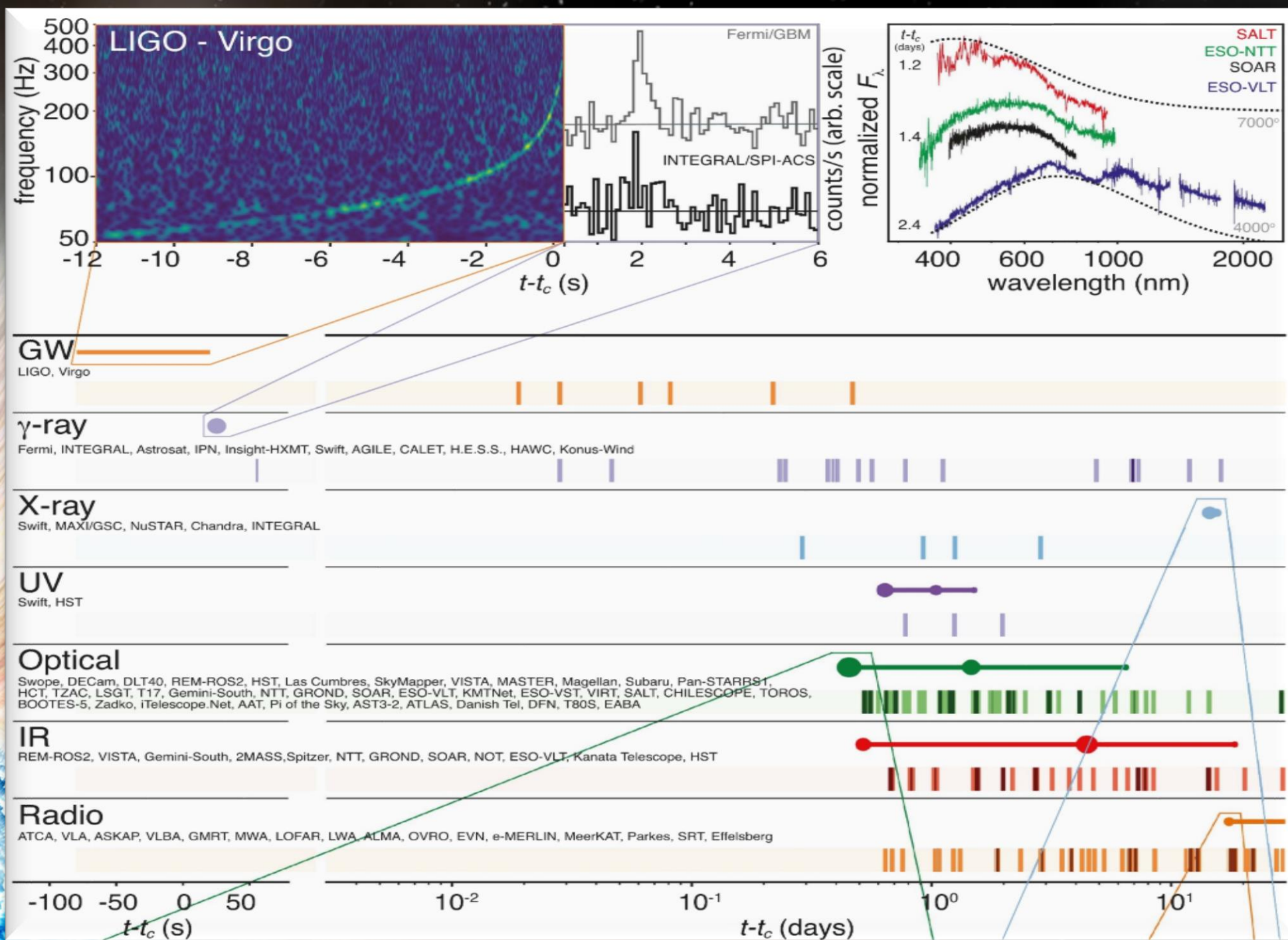
Measured Mass Ratio of GW₁₇₀₈₁₇ (for high and low spin assumption)



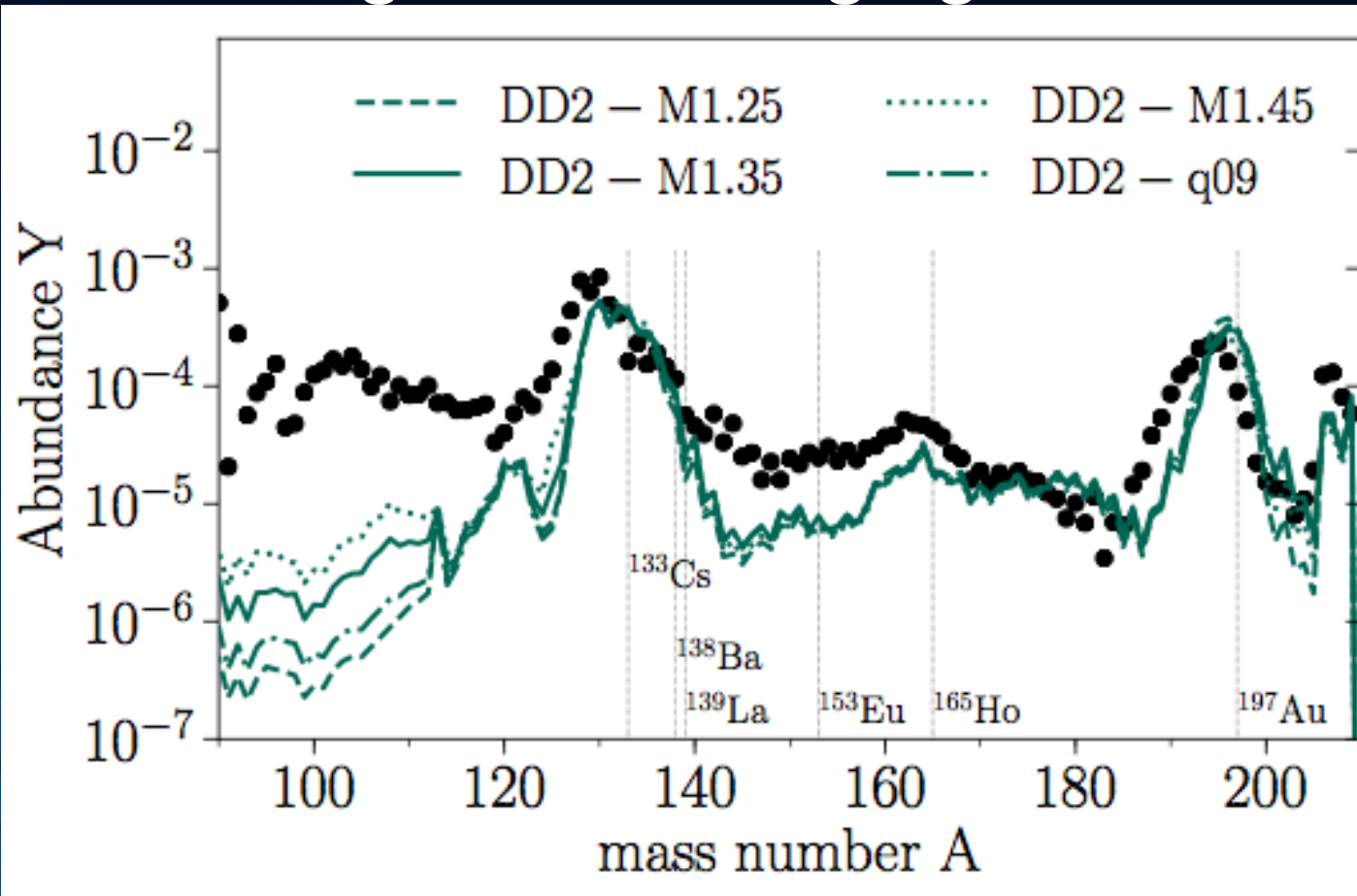
GW170817, GRB170817A Localisation and unusual dimness of GRB



GW170817



Lichtblitz signalisiert Erzeugung der Elemente



Relative Häufigkeit
der Elemente

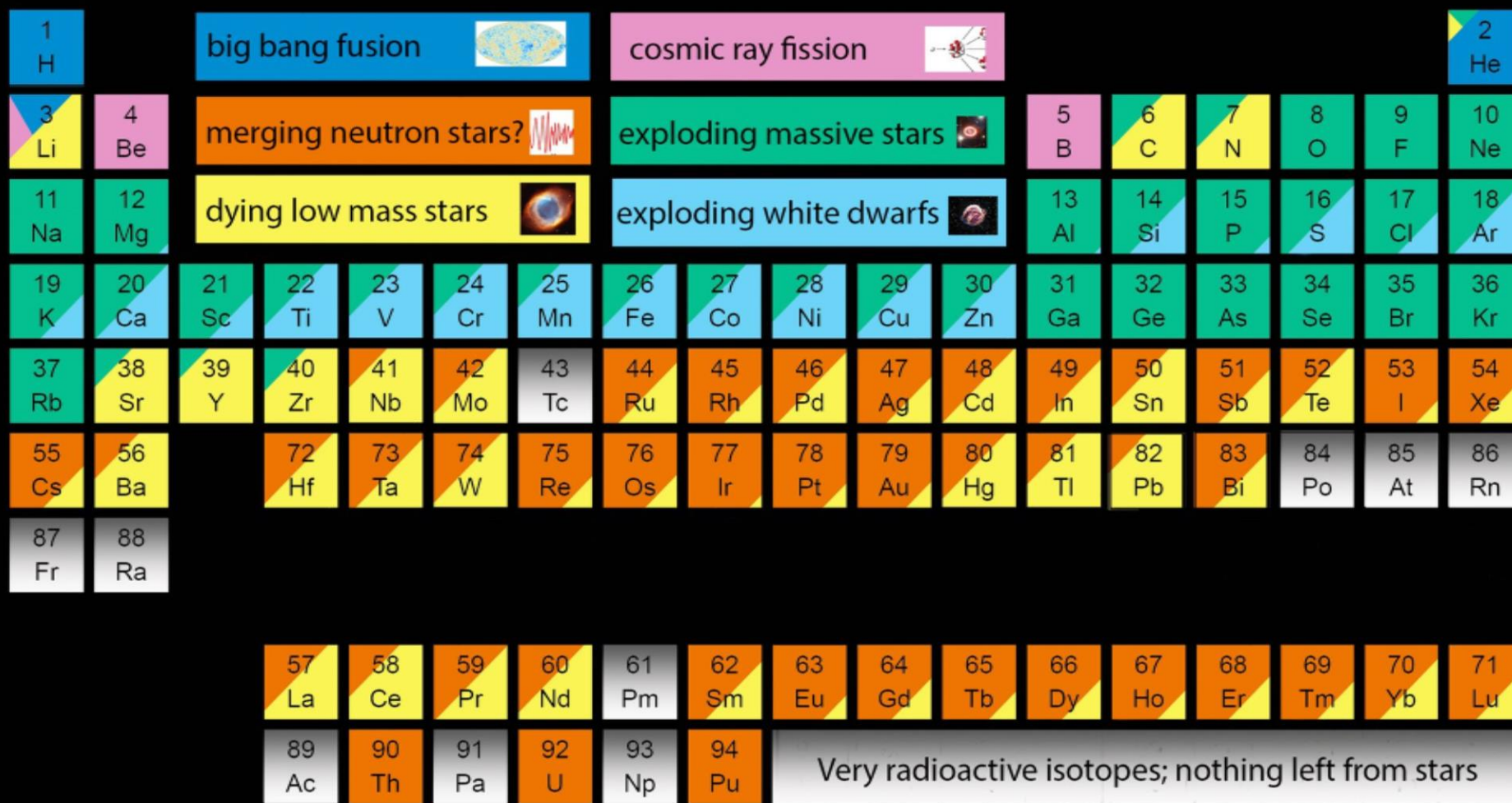
Simulation vs. Beobachtung

Bovard, et al. 2017

Die Neutronenstern Kollision
GW170817 erzeugte Gold & Platin :
10 mal die Masse der Erde!
Wir sind (Neutronen-) Sternen Staub !



The Origin of the Solar System Elements



Graphic created by Jennifer Johnson
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

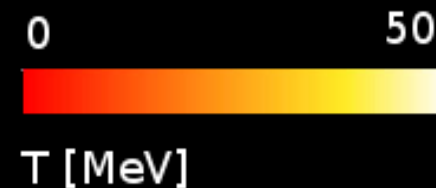
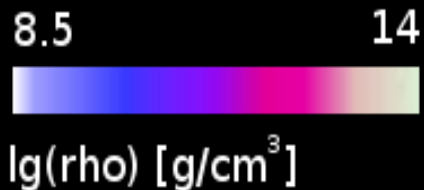
Astronomical Image Credits:
 ESA/NASA/AASNova

Simulation einer Neutronenstern Kollision

Credits: Cosima Breu, David Radice und Luciano Rezzolla

Dichte der Neutronenstern-
Materie

Temperatur der Neutronenstern
Materie

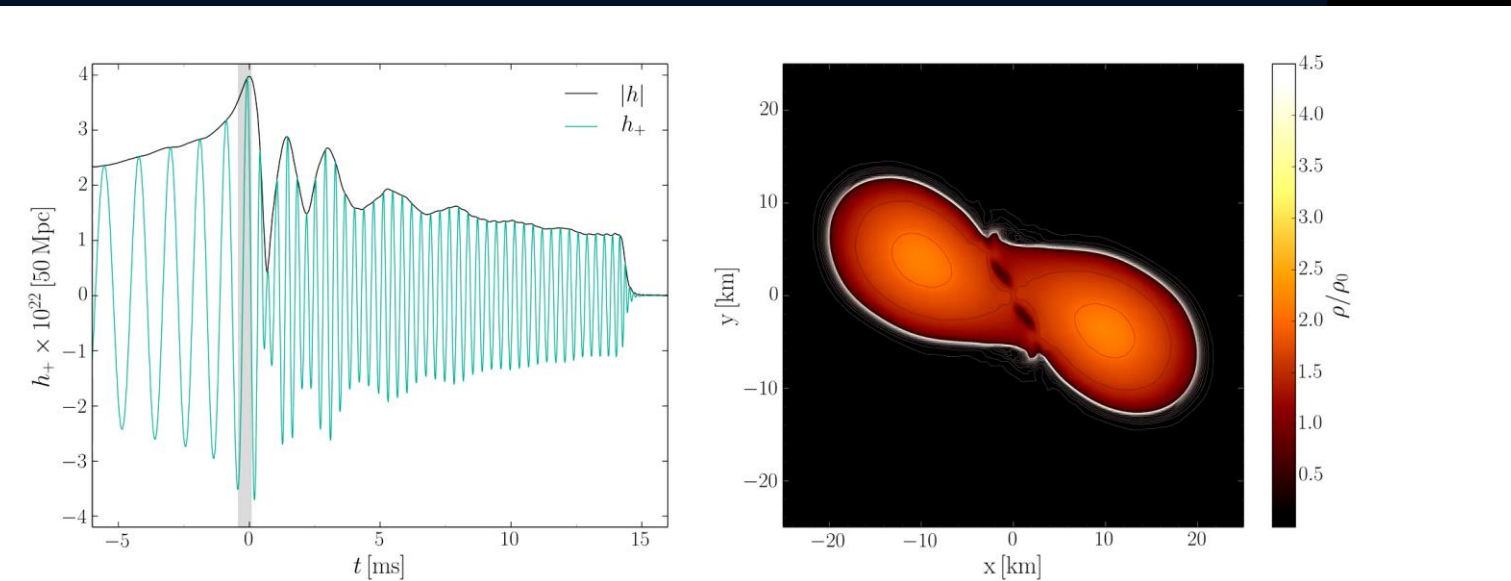


Teil III

Computersimulationen mit dem Einstein-Toolkit



In diesem Teil wird ein Einblick in die allgemeinrelativistische Simulation auf Supercomputern gegeben. Unter Zuhilfenahme des Einstein-Toolkits werden unterschiedliche, realistische Systeme betrachtet (z.B. Neutronenstern-Kollisionen mit Aussendung von Gravitationswellen)



Allgemeine Relativitätstheorie einfach dargestellt

In autumn 2016, the series of video portraits of Hessian scientists was launched by the "Hessisches Kompetenzzentrum für Hochleistungsrechnen". The video portrait by Prof. Dr. Luciano Rezzolla can be found on the following link:

https://www.hpc-hessen.de/fileadmin/hpc/red/video/hkhlr_ffm_rezzolla-1.mp4

Public lectures have been a matter for the Polytechnic Society in Frankfurt for almost 200 years. In the lecture series "Discovering the Future" Prof. Dr. H. Stöcker spoke about Neutronenstern Kollisionen. The presentation can be found on the following link:

<https://www.youtube.com/embed/gSPfTTTR3Io>

Allgemeine Relativitätstheorie einfach dargestellt

14. Mai 2018: Vortrag in der Denkbar

www.denkbar-frankfurt.de

Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins schönster Geniestreich auf dem Prüfstand

Als Albert Einstein im Jahre 1915 die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) an der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften vorstellte, glaubten noch wenige Physiker an seine neue, revolutionäre Theorie. Die ART besagt, dass die Ursache der Gravitationskraft in einer Verformung der raumzeitlichen Struktur begründet ist und heutzutage bezeichnen viele Physiker Einsteins mathematisch elegant formulierte Idee als "die schönste Gleichung der Physik". Während einer Sonnenfinsternis im Jahre 1919 gelang es die Ablenkung von Licht in der gekrümmten Raumzeit der Sonnenumgebung zu beobachten und Einstein wurde schlagartig berühmt. Weitere Vorhersagen der ART konnten in den folgenden Jahrzehnten überprüft und bestätigt werden, wobei eine der grundlegenden Folgerungen der ART, die Existenz von Raumzeit-Wellen (Gravitationswellen), lange Zeit nicht direkt nachgewiesen werden konnte. Schließlich, im Jahre 2015 konnte die erste Raumzeit-Welle mittels zweier hochempfindlicher Gravitationswellendetektoren nachgewiesen werden und im Jahre 2017 wurde diese Sensation mit dem Nobelpreis für Physik geehrt. Die grundlegenden Konzepte und Folgerungen der ART sollen in diesem Vortrag in allgemeinverständlicher, unterhaltsamer Weise illustriert werden. So werden z.B. die einzelnen Phasen einer Gravitationswellen erzeugende Neutronensterne-Kollision anhand eines Sammelsuriums einzelner Gesellschaftstänze veranschaulicht und die Eigenschaften von schwarzen Löchern mittels des Reichstagsgebäudes illustriert.

08. Juni 2018: Night of Science 2018
Tanz der Neutronensterne

21. März 2019: Deutschlandfunk 2019
Der Tanz der kosmischen
Schwergewichte
https://www.deutschlandfunk.de/neutronensterne-der-tanz-der-kosmischen-schwergewichte.676.de.html?dram:article_id=444237

Physik der sozio-ökonomischer Systeme mit dem Computer von Dr.phil.nat.Dr.rer.pol. Matthias Hanauske

[Home](#) [Research](#) [Contact](#)

[Einführung](#)

[Teil I](#)

[Teil II](#)

[Teil III](#)

[E-Learning](#)

Vorlesung auch wieder im nächsten Semester

Physik der sozio-ökonomischen Systeme mit dem Computer



Physik sozio-ökonomischer Systeme mit dem Computer (Physics of Socio-Economic Systems with the Computer)
Vorlesung WS 2017/2018, Fr. 15-17.00 Uhr, PC-Pool 01.120

Zusätzlich zur Vorlesung werden ab dem 27.10.2017 freiwillige Übungstermine eingerichtet, die jeweils freitags, eine Stunde vor der Vorlesung im PC-Pool 01.120 stattfinden (Fr. 14-15.00 Uhr).

Diese Vorlesung gibt eine Einführung in das interdisziplinäre Forschungsfeld der *Physik sozio-ökonomischer Systeme*. In sozio-ökonomischen Systemen, wie z.B. bei Finanzmärkten, sozialen Netzwerken, Verkehrssystemen oder wissenschaftliche Kooperationsnetzwerken, sind die dem System zugrunde liegenden Akteure ständigen Entscheidungssituationen ausgesetzt, wobei der Erfolg und die Auswirkung der individuell gewählten Strategie von den Entscheidungen der anderen beteiligten Akteuren abhängt. Die (evolutionäre) Spieltheorie und die Physik komplexer Netzwerke stellen die beiden Grundsäulen der theoretischen Beschreibung und mathematischen Formulierung solcher Systeme dar. Im ersten Teil des Kurses werden die grundlegenden Konzepte der Spieltheorie thematisiert und die Studierenden erlernen, unter Verwendung von Computeralgebra-Systemen (Maple und Mathematica) deren Anwendung auf diverse Spielklassen. Neben den endlichen Zweipersonen-Spielen und N-Personen-Spielen wird auch auf die evolutionäre Entwicklung ganzer Spieler-Populationen eingegangen.