

Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer

*ZOOM ONLINE MEETING
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT
21. MAI, 2021*

MATTHIAS HANAUSKE

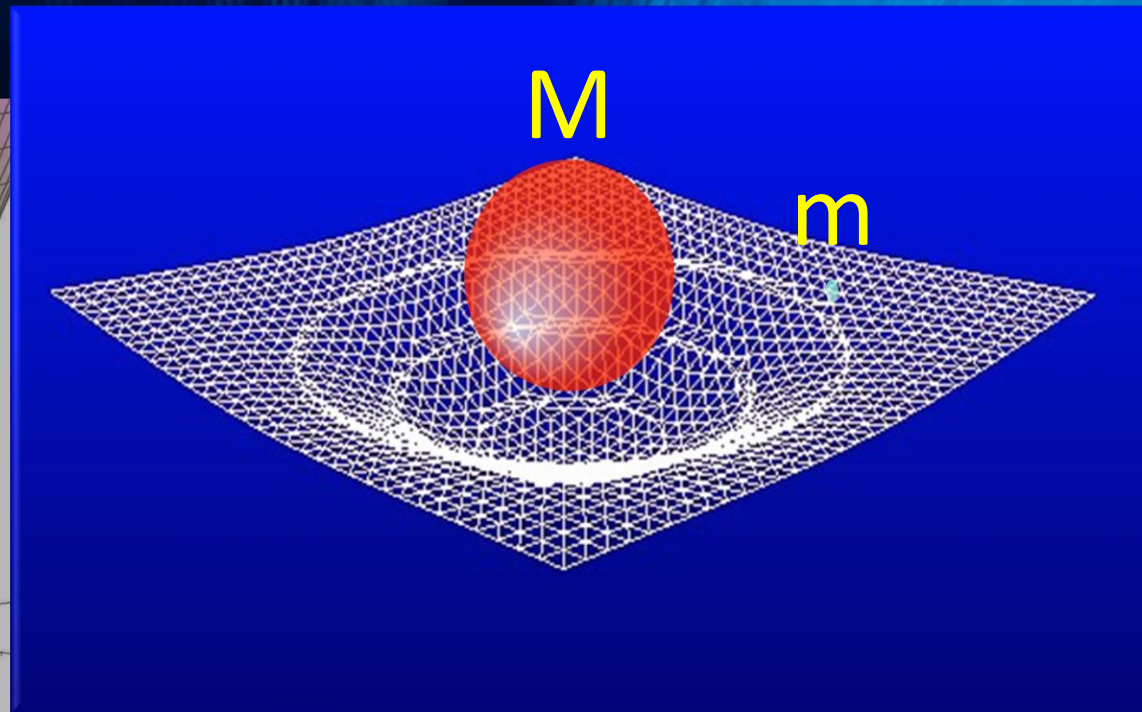
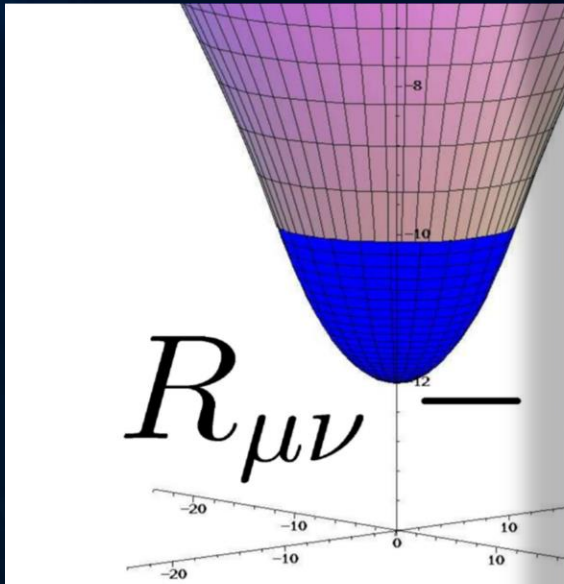
*FRANKFURT INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES
JOHANN WOLFGANG GOETHE UNIVERSITÄT
INSTITUT FÜR THEORETISCHE PHYSIK
ARBEITSGRUPPE RELATIVISTISCHE ASTROPHYSIK
D-60438 FRANKFURT AM MAIN
GERMANY*

Aufgrund der Corona Krise findet die Vorlesung und die Übungstermine auch in diesem Semester nur Online statt.

6. Vorlesung

Allgemeinen Relativitätstheorie

Die Einsteingleichung



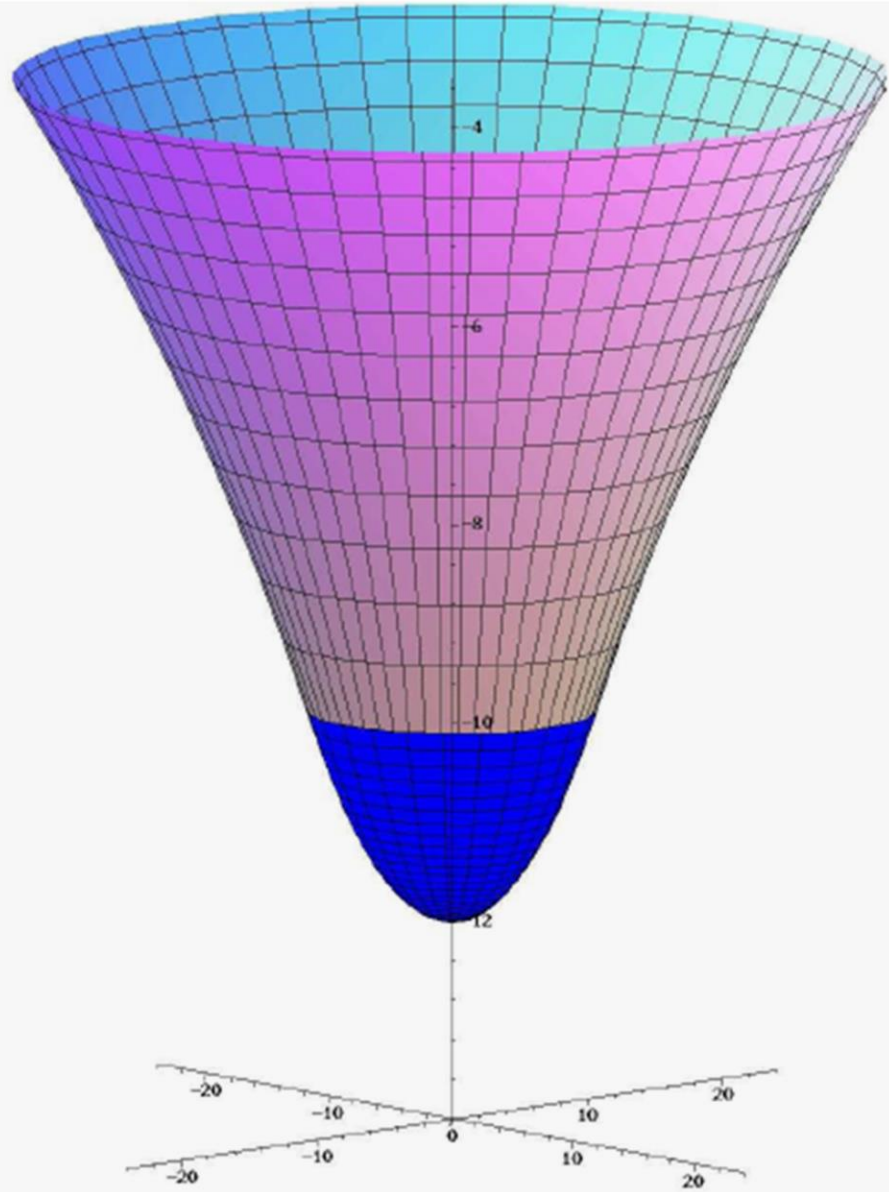
„Allgemeine Relativitätstheorie“ (ART) der

$$T_{\mu\nu}$$

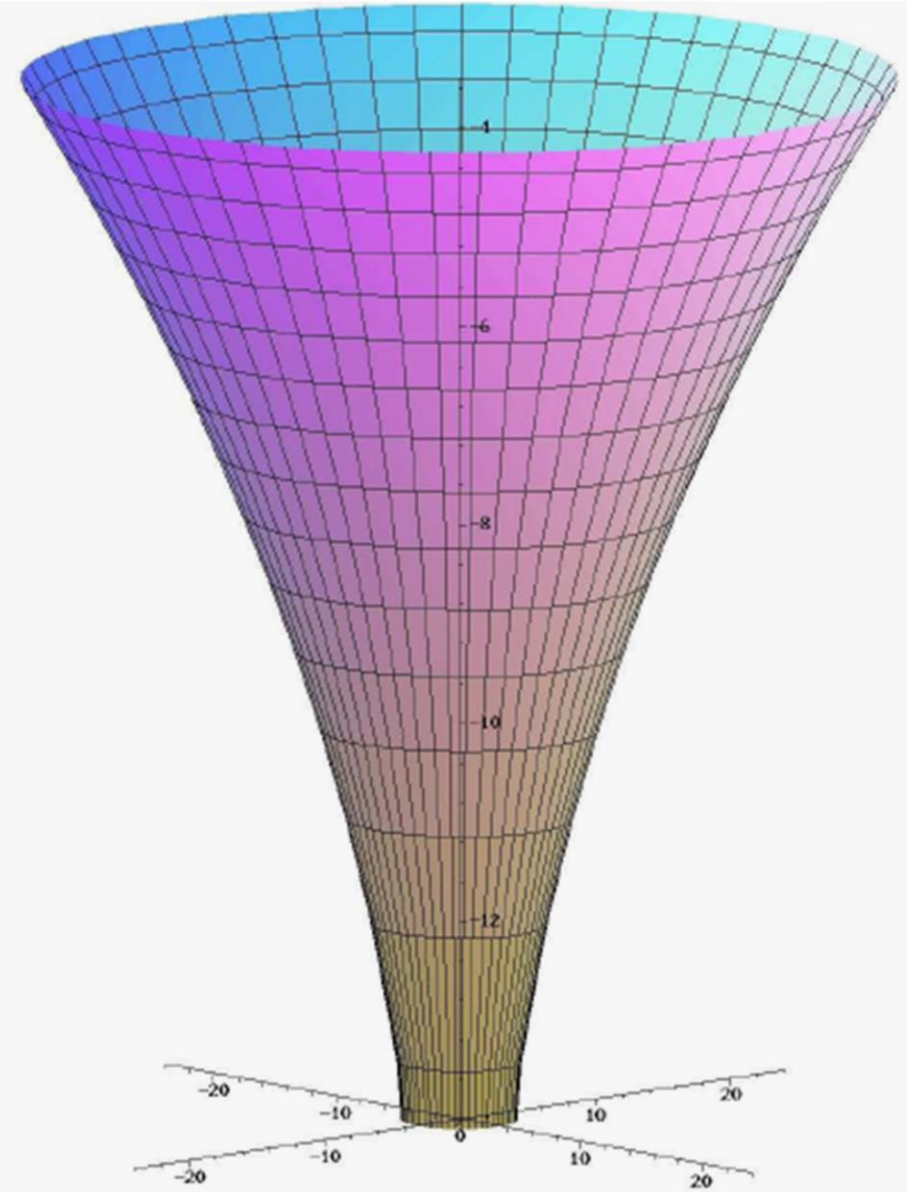
Raumzeit-Krümmung = Energie

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).

Neutronenstern



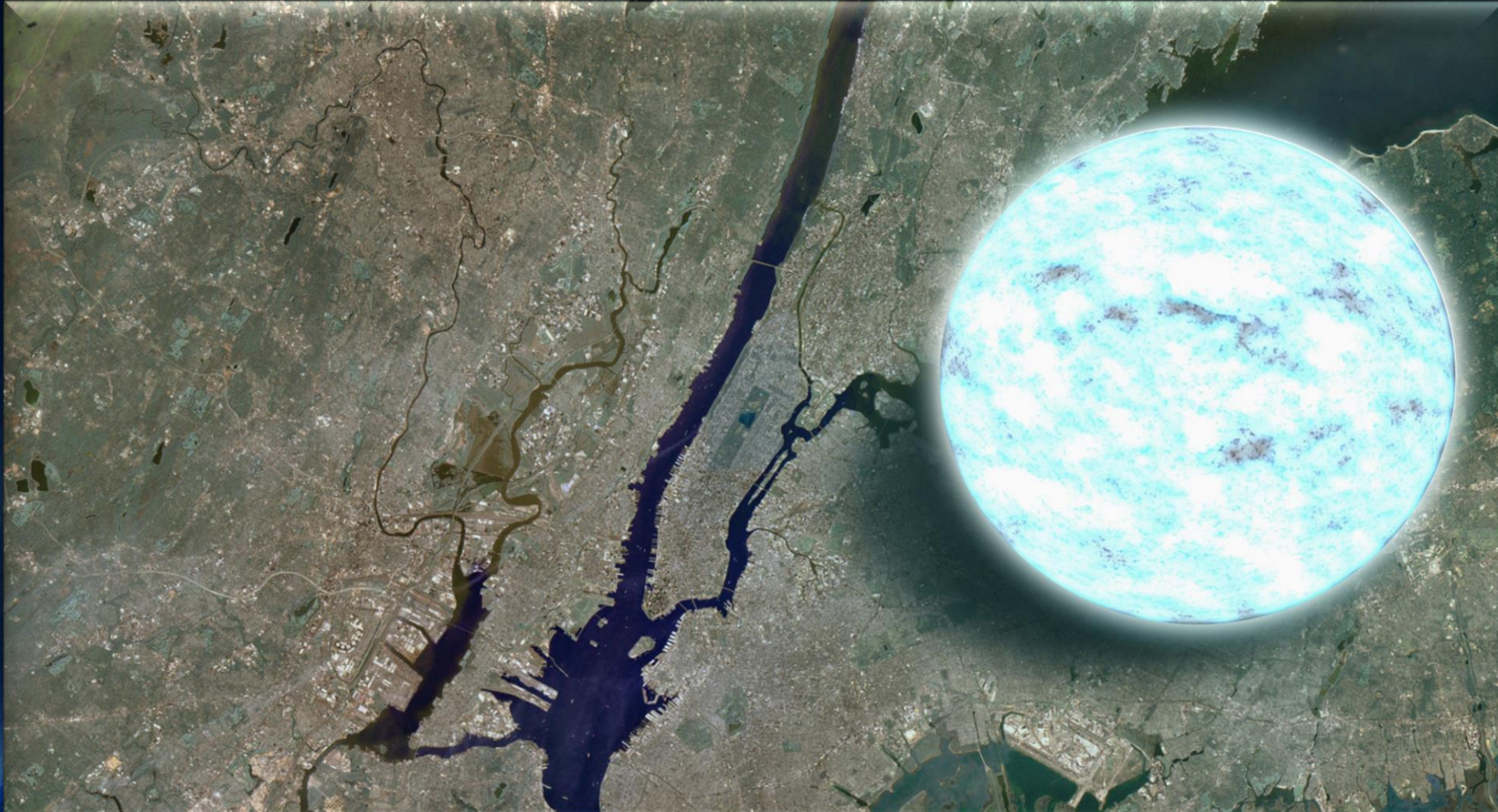
Schwarzes Loch



Neutronensterne: Sehr klein und sehr schwer

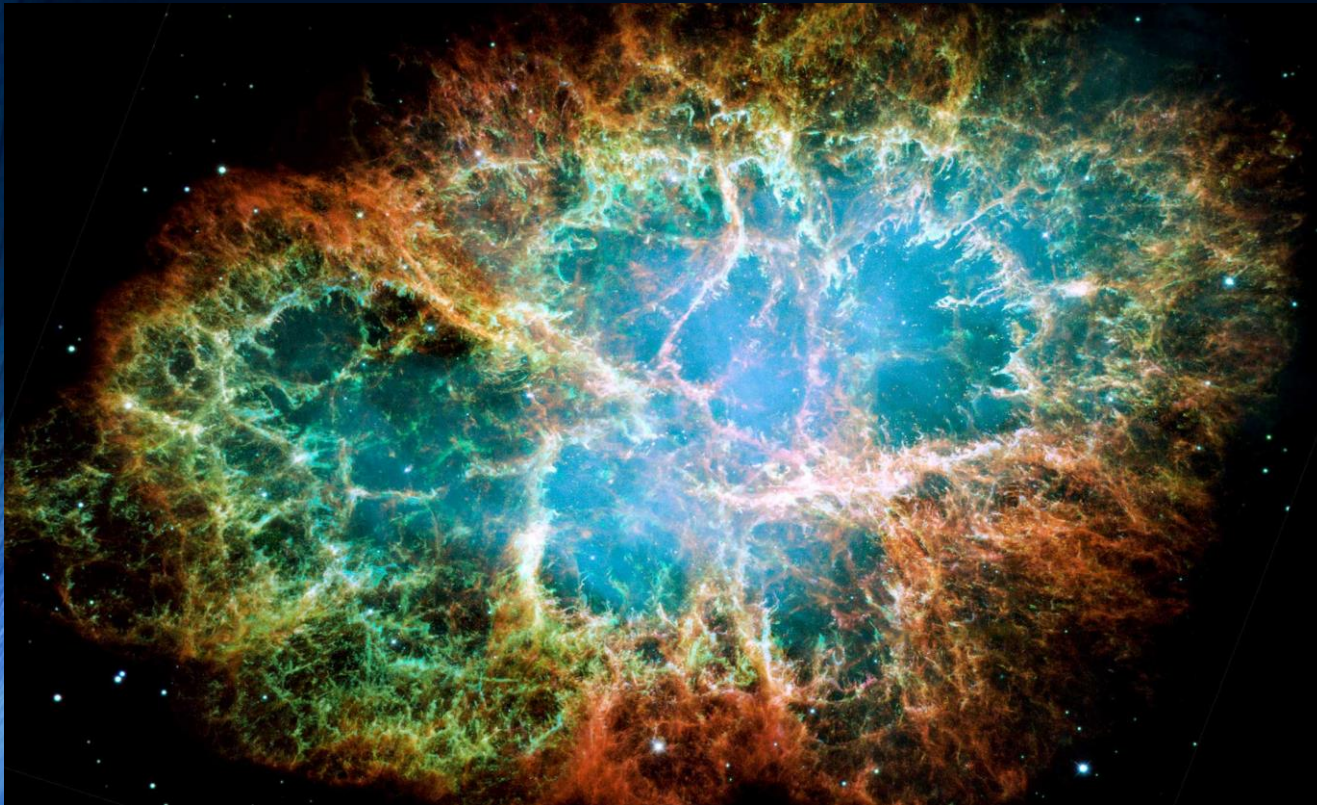
Radius ~ 10 km, Masse ~ 1 -2 Sonnenmassen

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



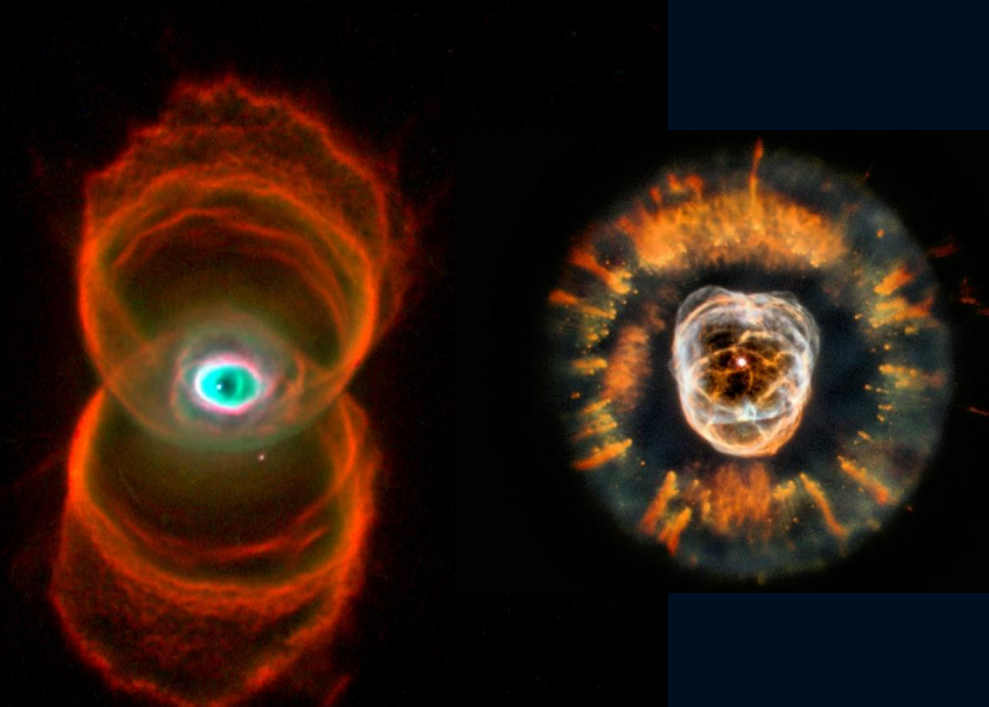
Was sind Neutronensterne?

Neutronensterne entstehen in einer Supernova Explosion.
Sonnensysteme, 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.



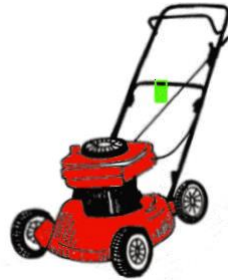
Supernova Explosion, Krabben-Nebel

Zwei planetarische Nebel
Endstadium leichter Sonnen (weißer Zwerg)

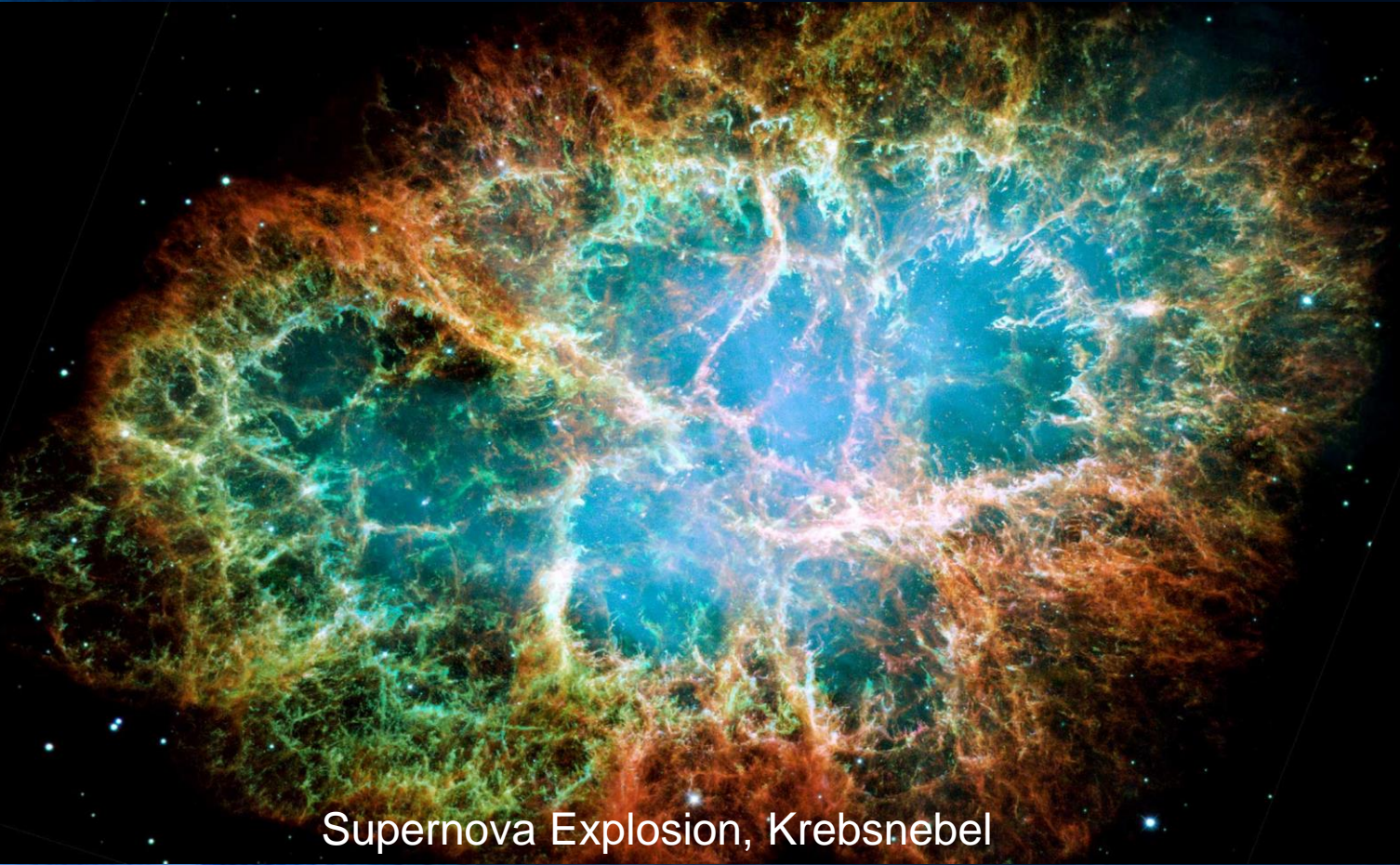


Wie entstehen Neutronensterne?

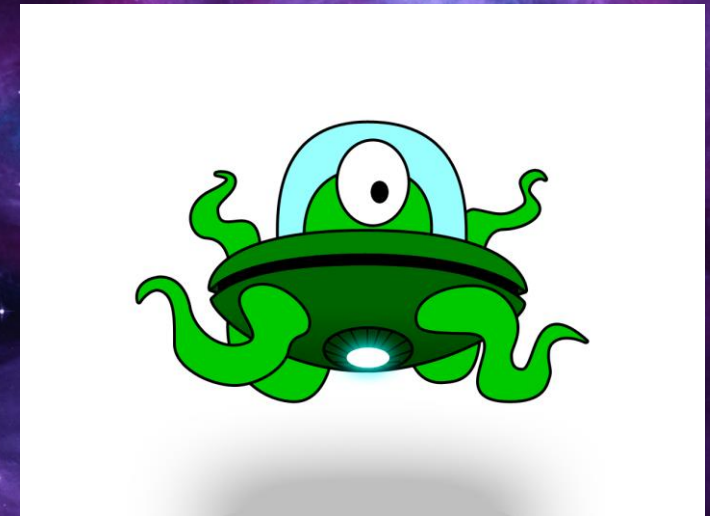
Neutronensterne entstehen in einer Supernova Explosion. Sonnen, die mindestens 8-mal schwerer als unsere Sonne sind explodieren am Ende ihrer Lebenszeit in einer Supernova Explosion – im Zentrum bleibt ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch zurück.



Im Zentrum des Nebels
ist ein Neutronenstern

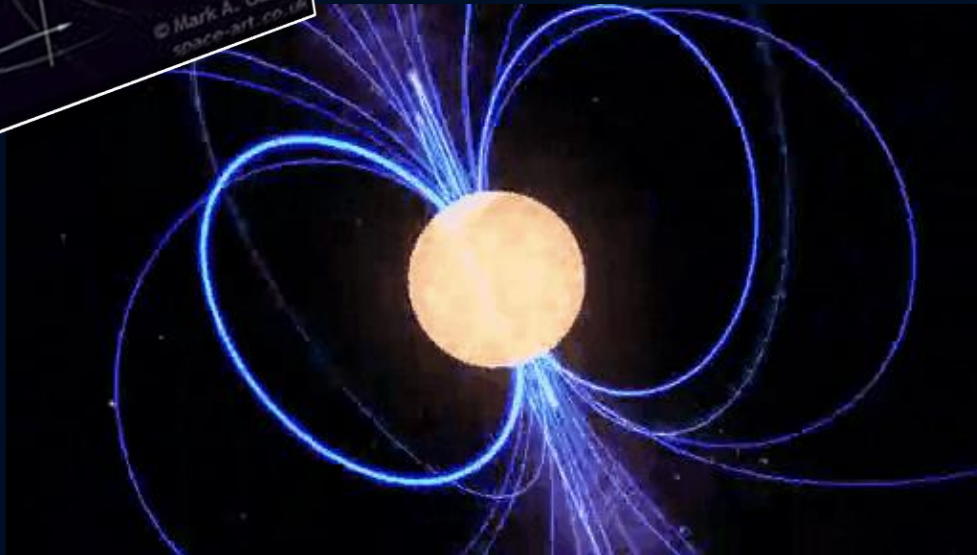
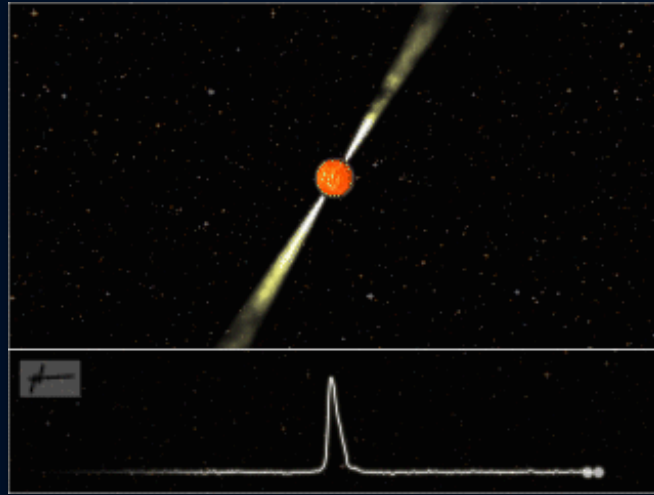
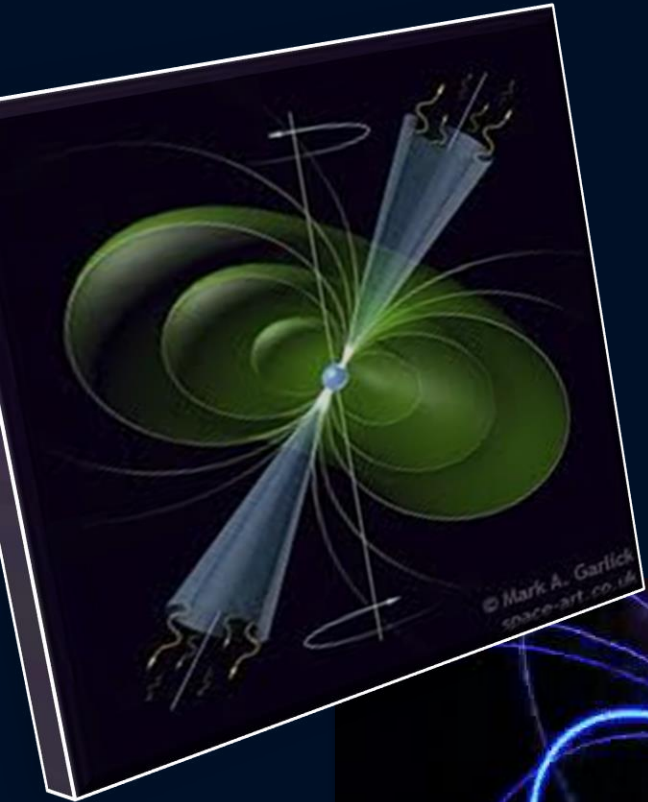


Supernova Explosion, Krebsnebel



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)

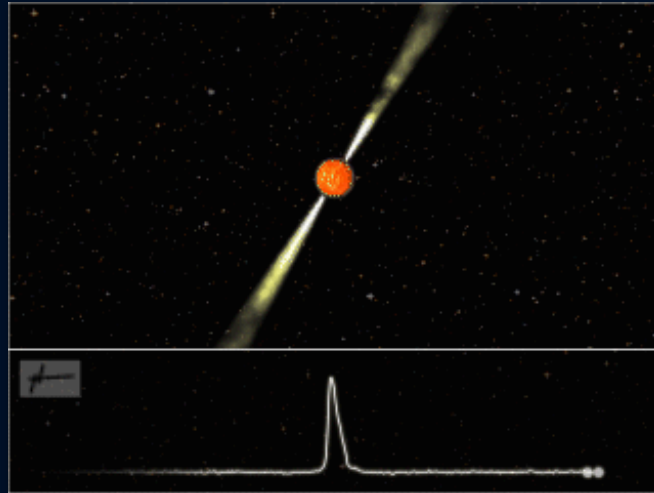
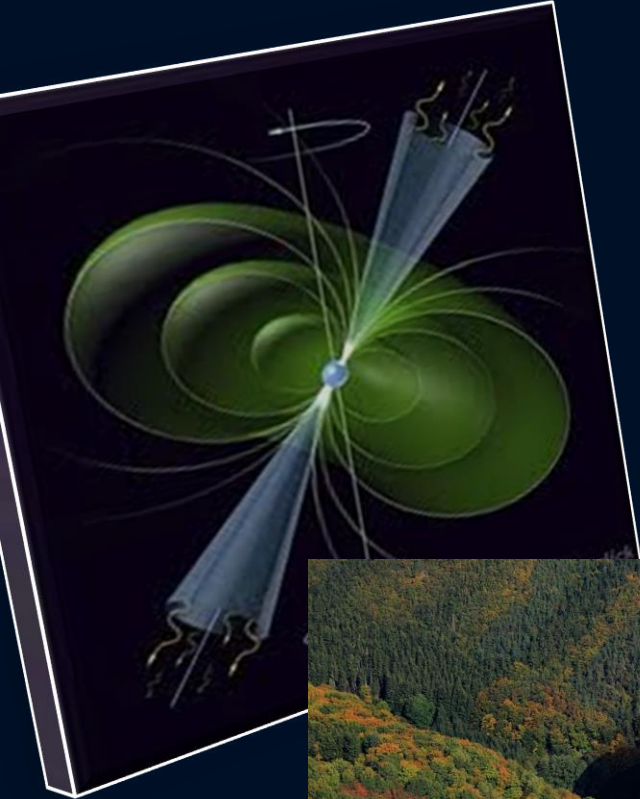


PSR B0531+21 (33.5 ms)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

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.



Radioteleskop in Effelsberg

Man unterscheidet
Sekundenpulsare
und
Millisekunden-Pulsare



PSR B0329+54 (0.715 s)



PSR B0531+21 (33.5 ms)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

Pulsare sind Rotierende Neutronensterne mit starkem Magnetfeld



Radioteleskop FAST in China



Radioteleskop in Effelsberg

Der erste Pulsar wurde im Jahre 1967 entdeckt (PSR 1919+21, Jocelyn Bell) und wurde zunächst LGM-1 genannt.

In den letzten 50 Jahren konnten mittels Radioteleskopen ca. 3000 rotierende Neutronensterne (Pulsare) gefunden werden.

Man unterscheidet
Sekundenpulsare
und
Millisekunden-Pulsare



PSR B0329+54 (0.715 s)



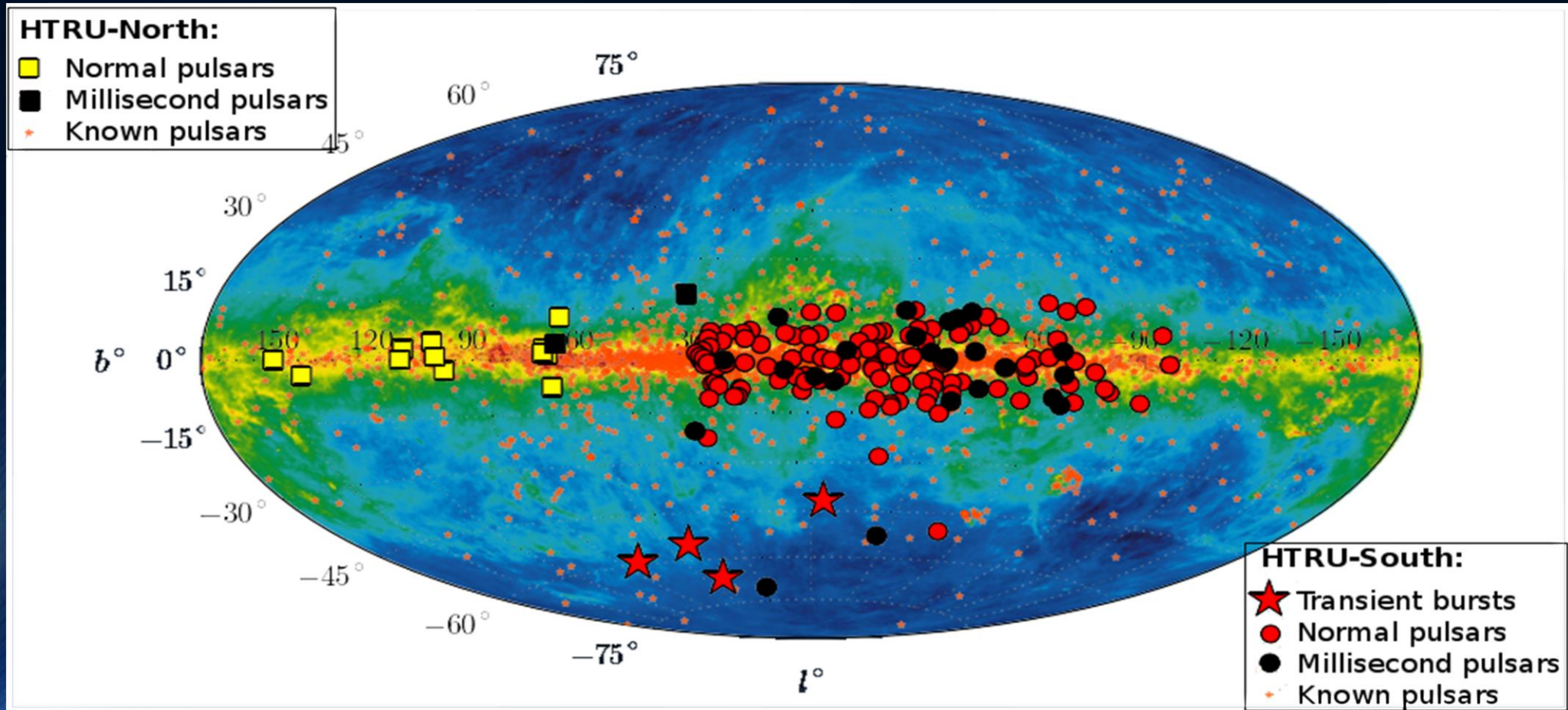
PSR B0531+21 (33.5 ms)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

Pulsare sind rotierende Neutronensterne

Zurzeit kennen wir ca. 3000 Neutronensterne



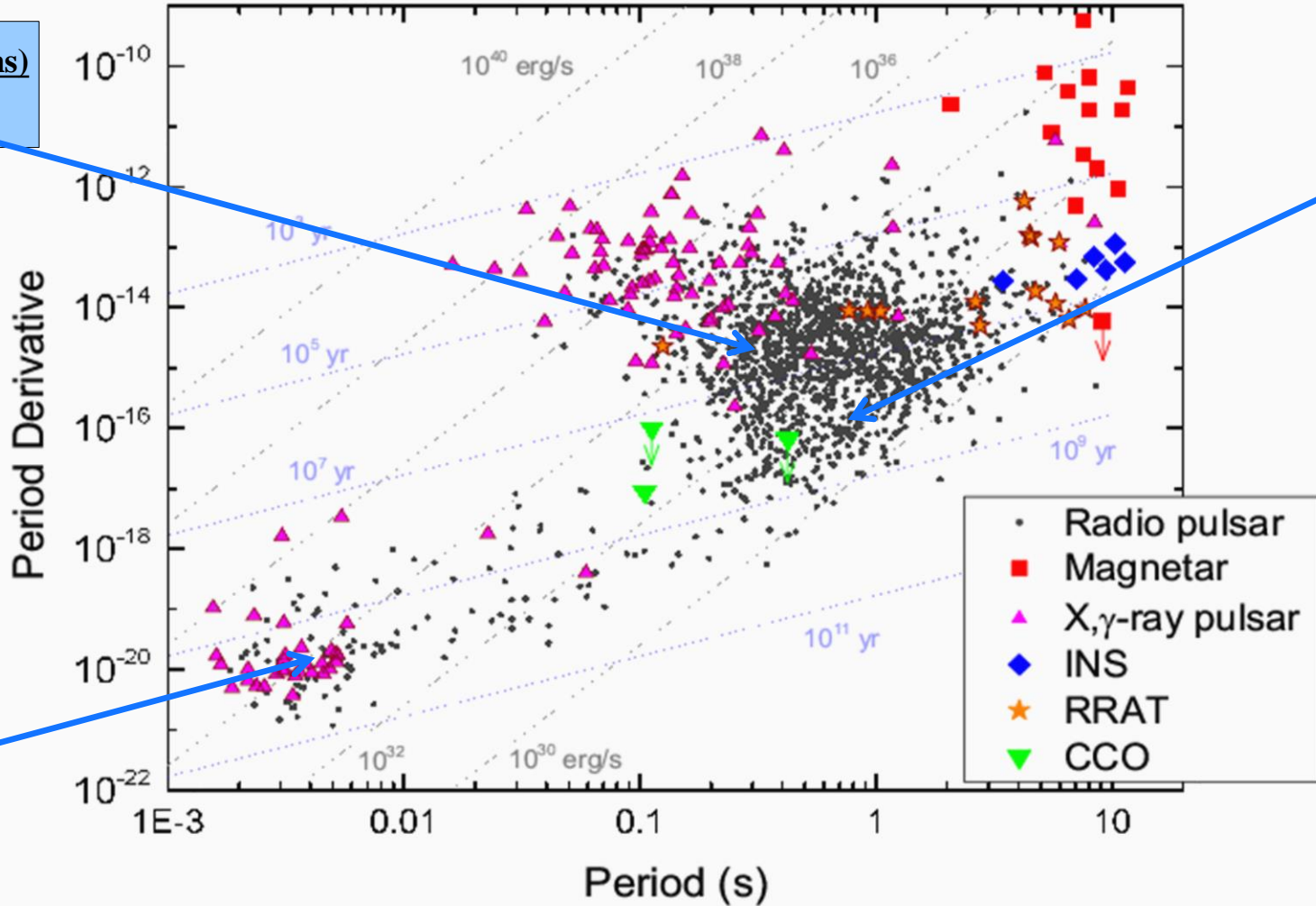
Millisekunden und Sekunden Pulsare



PSR B0531+21 (33.5 ms)
Crab Pulsar



PSR B0329+54 (0.715 s)



PSR B1937+21 (1.56 ms)

Beobachtete Massen von Neutronensternen in binären Systemen

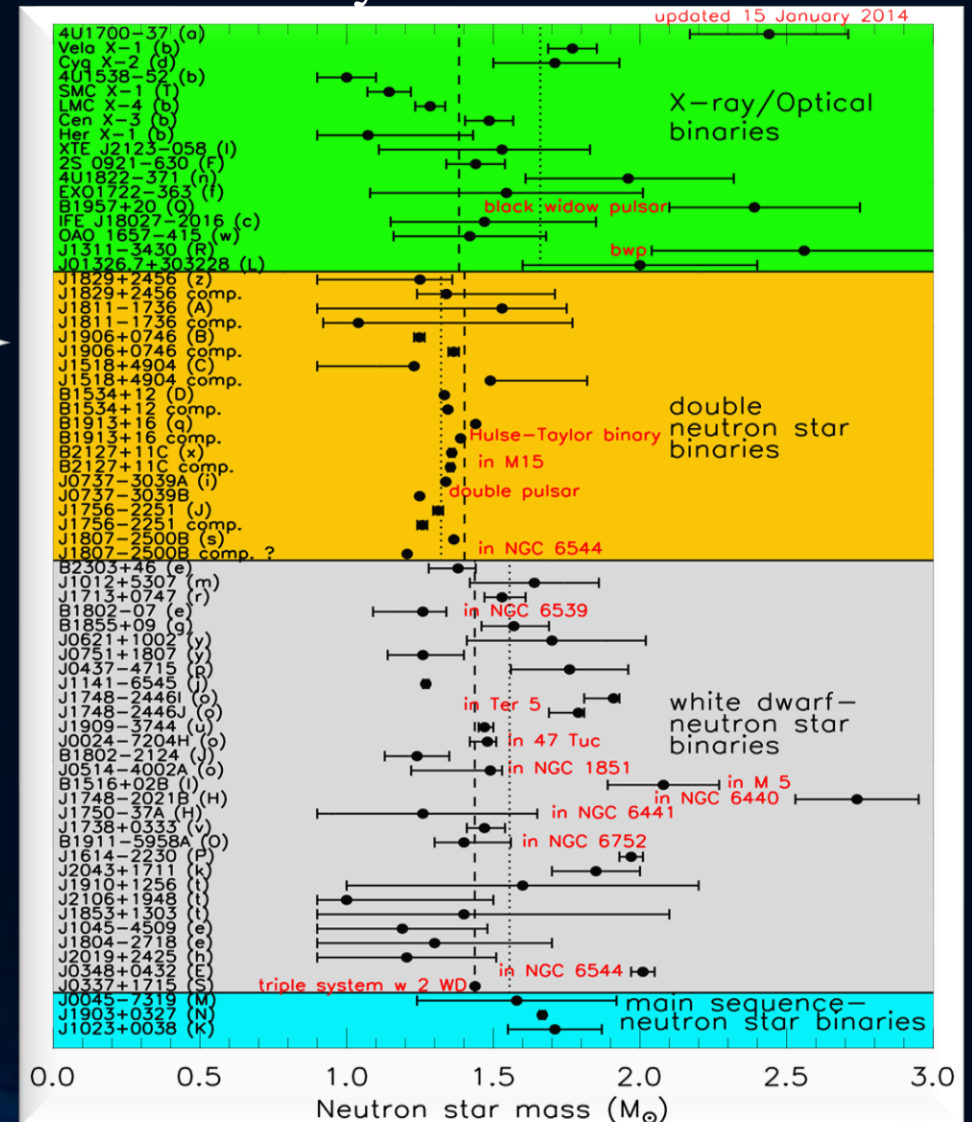
Einige der bekannten Neutronensterne befinden sich in Zweiersystemen:

NS-Planet, NS-(weißer Zwerg) oder NS-NS Systeme

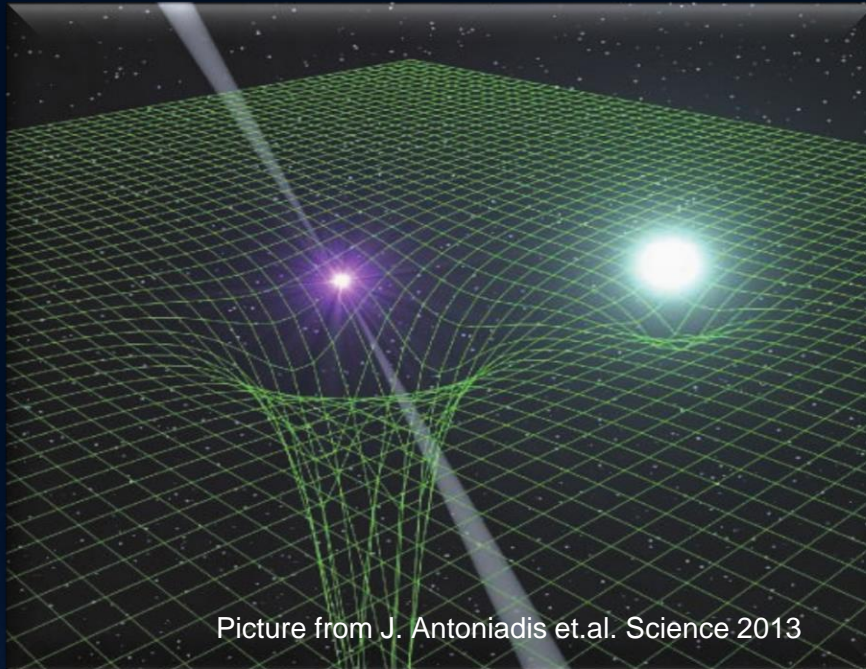
PSR J1906+0746

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

Van Leeuwen et al, arXiv:1411.1518



Beobachtete Massen von Neutronensternen in binären Systemen



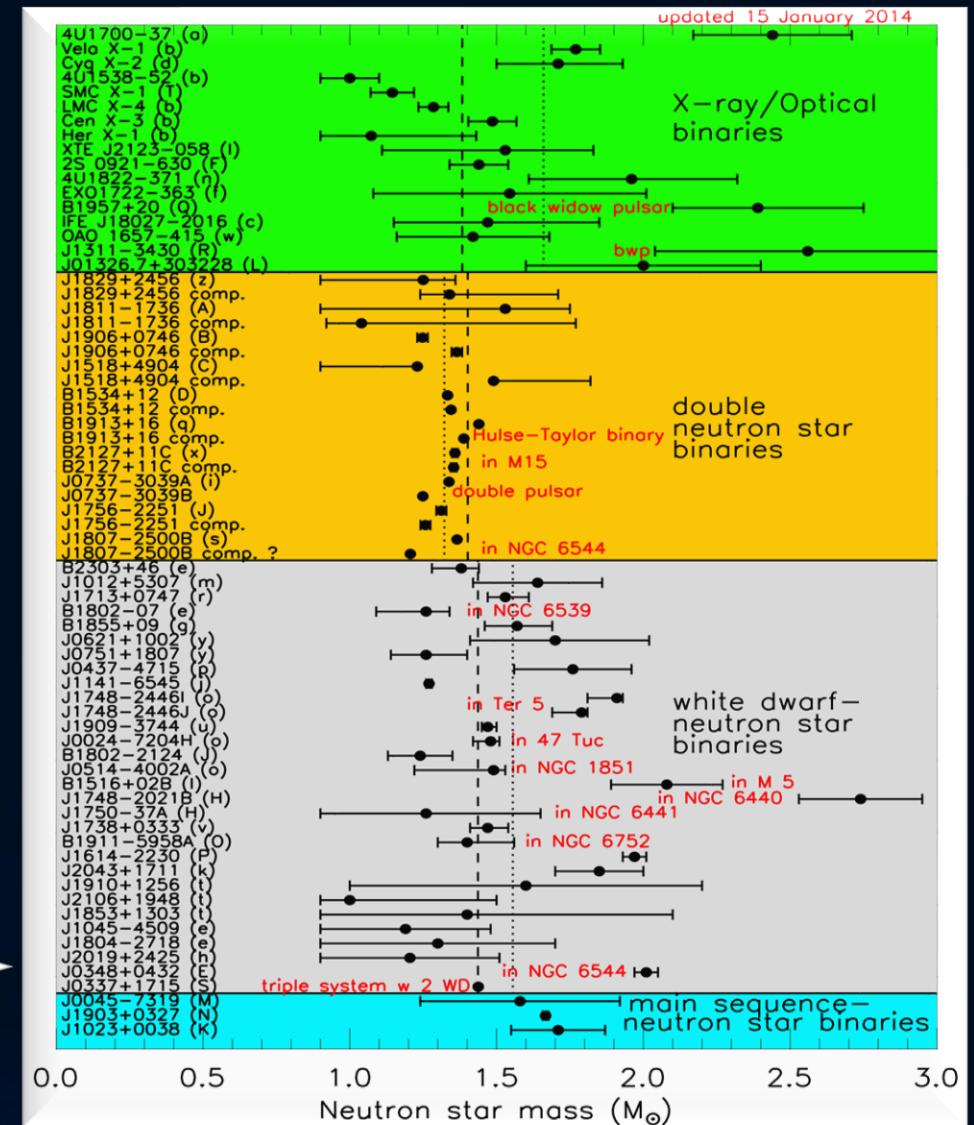
PSR J0348+0432

Orbitale Periode: 2.46 Stunden

Pulsar mass: 2.01 ± 0.04

Masse weißer Zwerg:

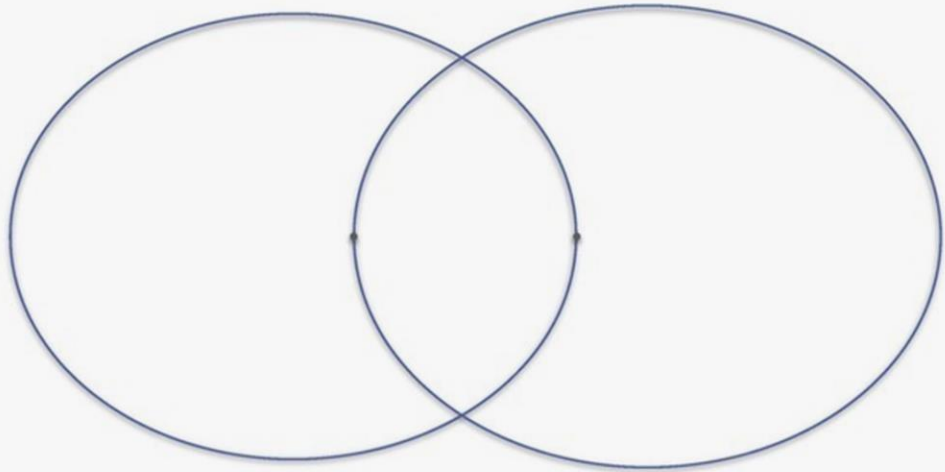
$M = 0.172 \pm 0.003$



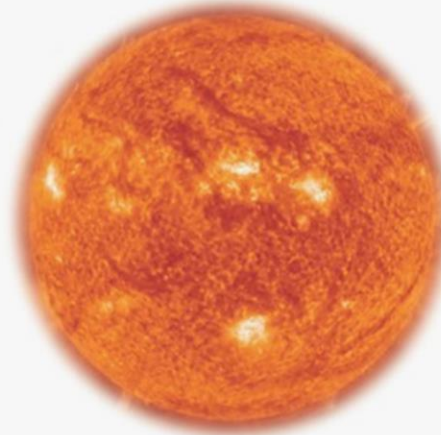
Binary Neutron Star Systems

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

Hulse-Taylor-Pulsar



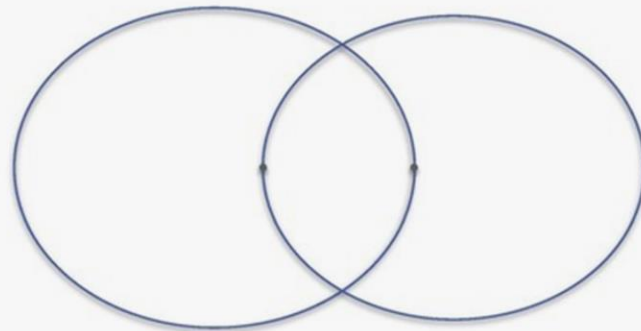
Sonne



Doppelpulsar



J1757-1854



J0453+1559

$P = 17 \text{ ms}$

(similar to the Doublepulsar)

J1913+1102

$P = 27 \text{ ms}$

$P_b = 4.95 \text{ h}$

J1757-1854

$P = 215 \text{ ms}$

$P_b = 4.4 \text{ h}$

$E = 0.606$

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

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, $M=1.3381(7)$

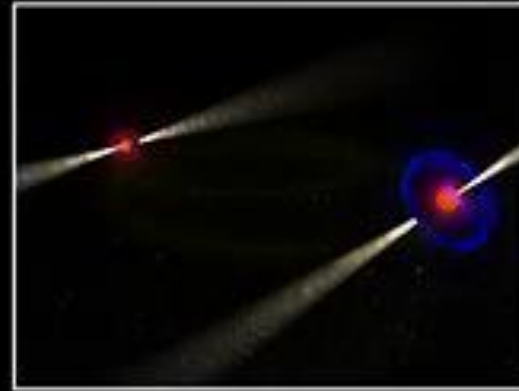
Pulsar B: $P=2.7$ s, $M=1.2489(7)$

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



The Einstein Equation

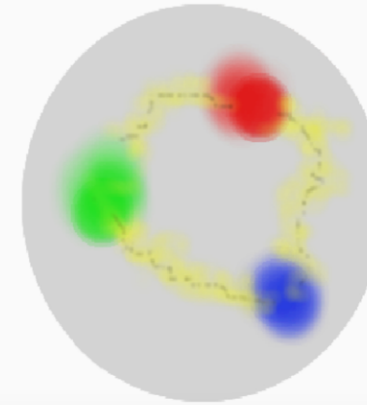
ART	<u>Yang-Mills-Theories</u>
$D_\beta v^\alpha = \partial_\beta v^\alpha + \Gamma_{\sigma\beta}^\alpha v^\sigma$	$D_{\beta a}{}^b = \partial_\beta 1_a{}^b + ig A_{\beta a}{}^b$
$R^\delta{}_{\mu\alpha\beta} v^\mu = [D_\alpha, D_\beta] v^\delta$	$F_{\alpha\beta a}{}^b = \frac{1}{ig} [D_{\alpha a}{}^c,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

Quantum ChromoDynamic:

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

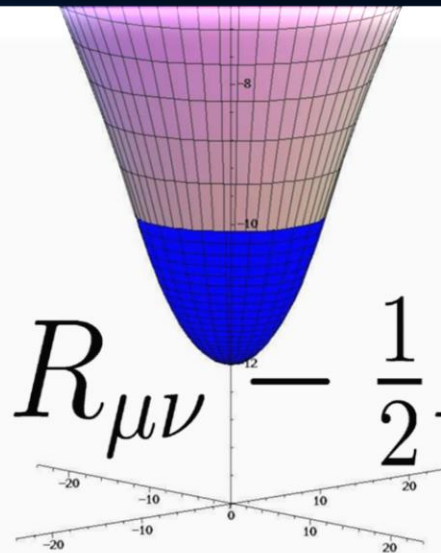
$$D_{\beta A}{}^B = \partial_\beta 1_A{}^B + ig G_{\beta A}{}^B$$

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



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

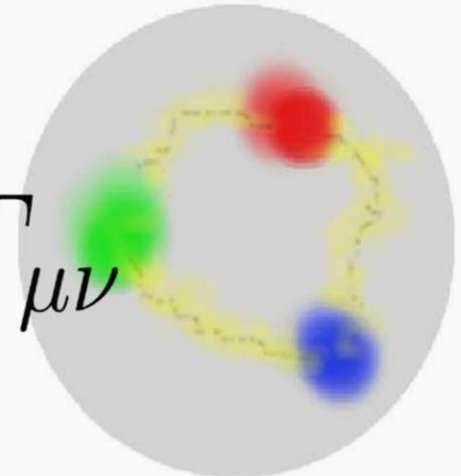
Confinement
chiral symmetry, ...



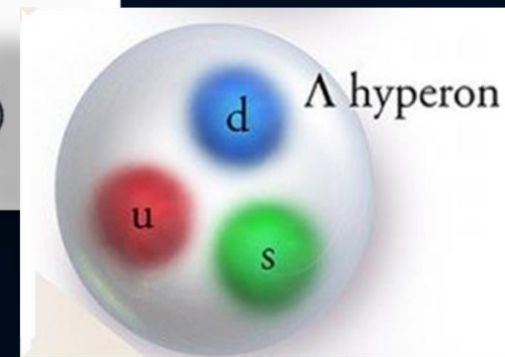
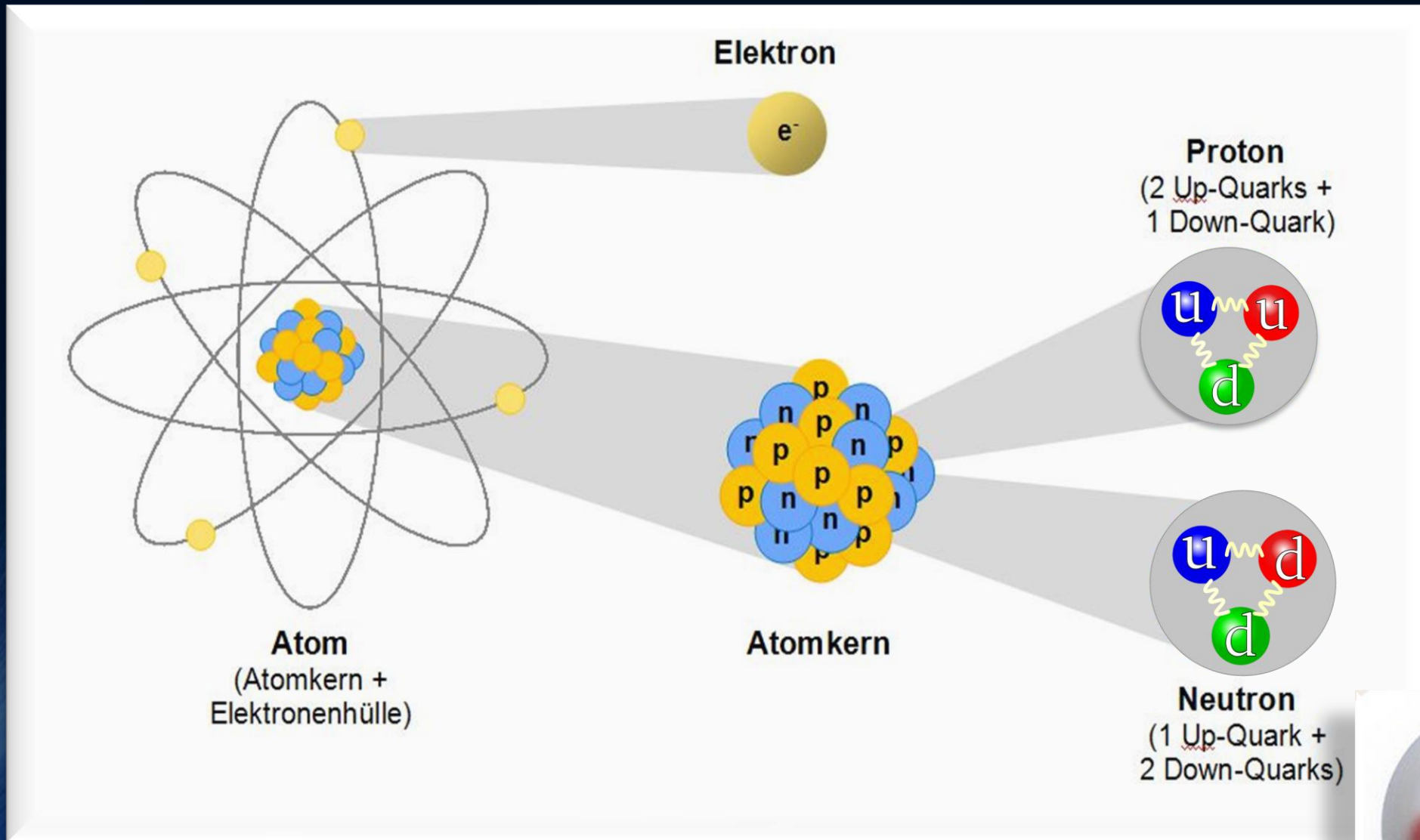
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} =$$

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

EOS: $P(\rho, T)$

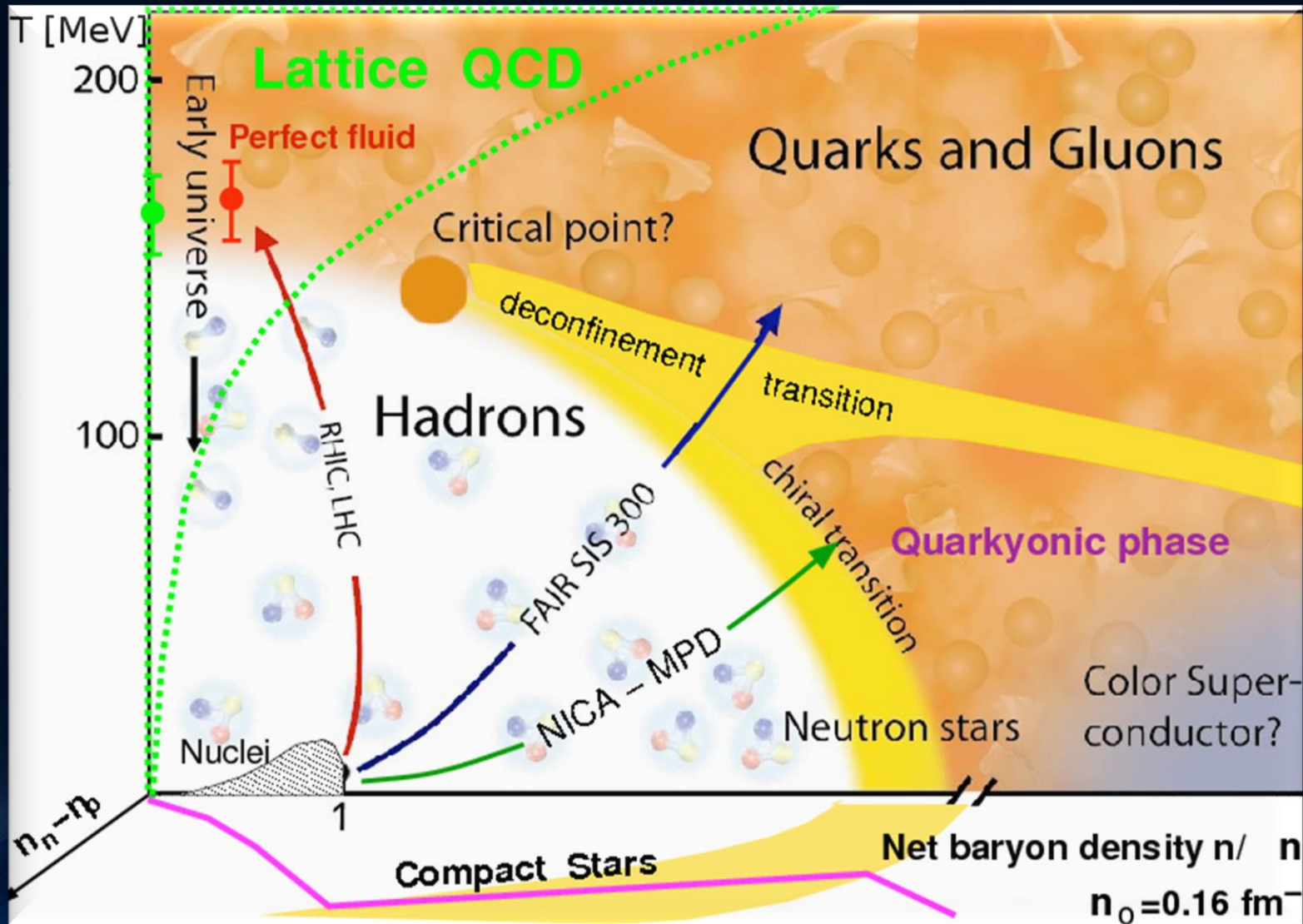


Elementare Materie

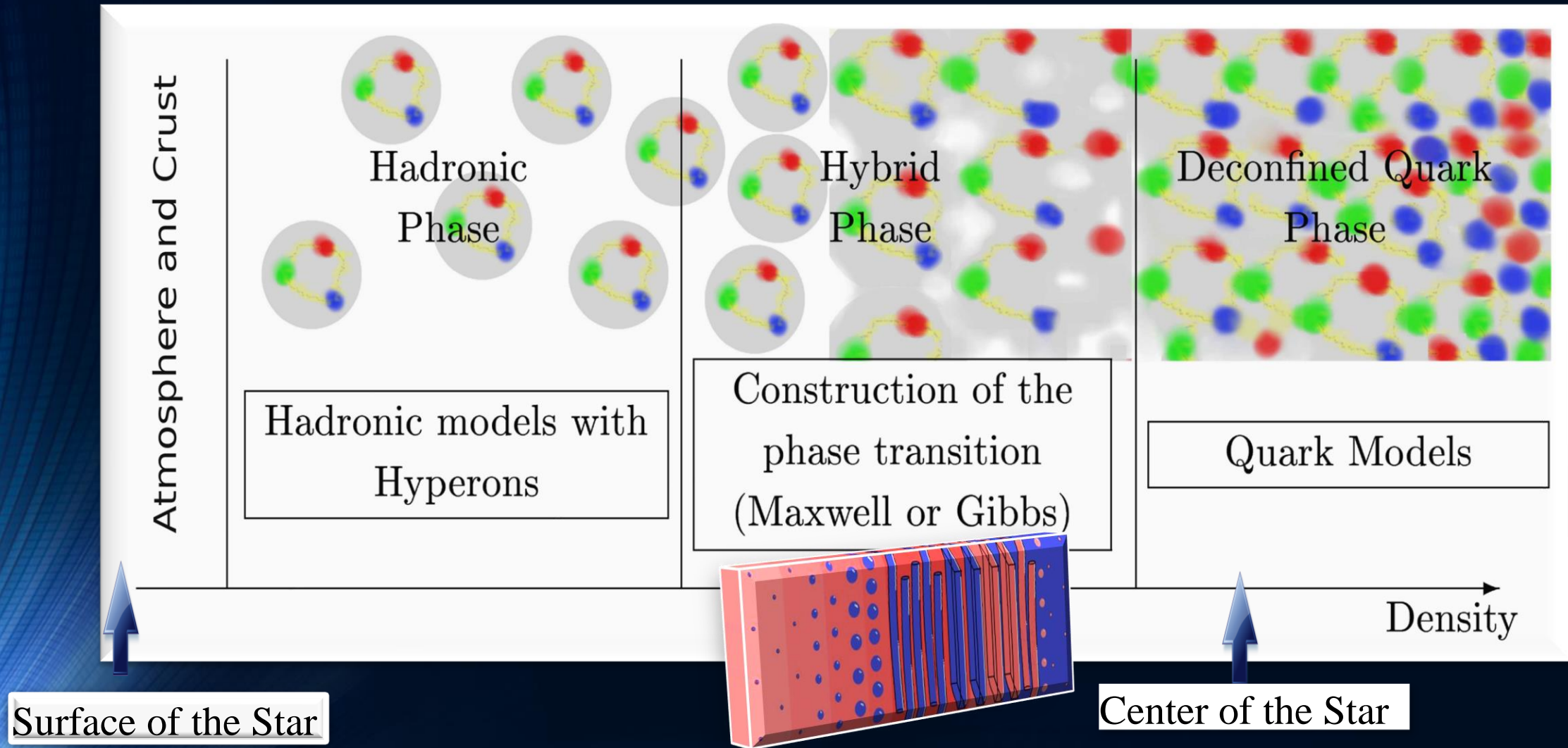


Bei sehr hohen Dichten oder Temperaturen können auch **Hyperonen** entstehen

Die Zustandsgleichung der Materie und das Quark-Gluon-Plasma



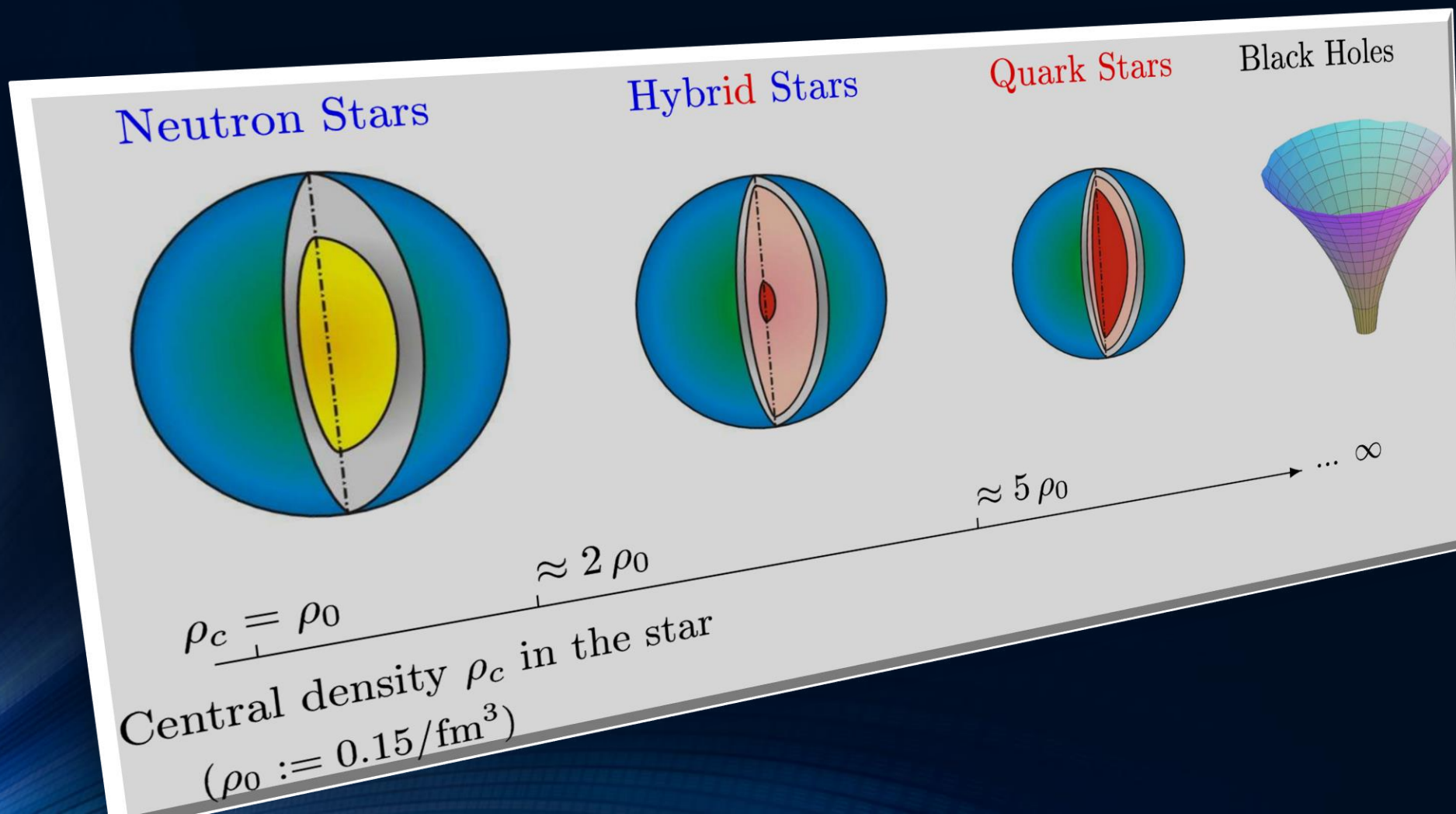
The QCD – Phase Transition and the Interior of a Hybrid Star



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

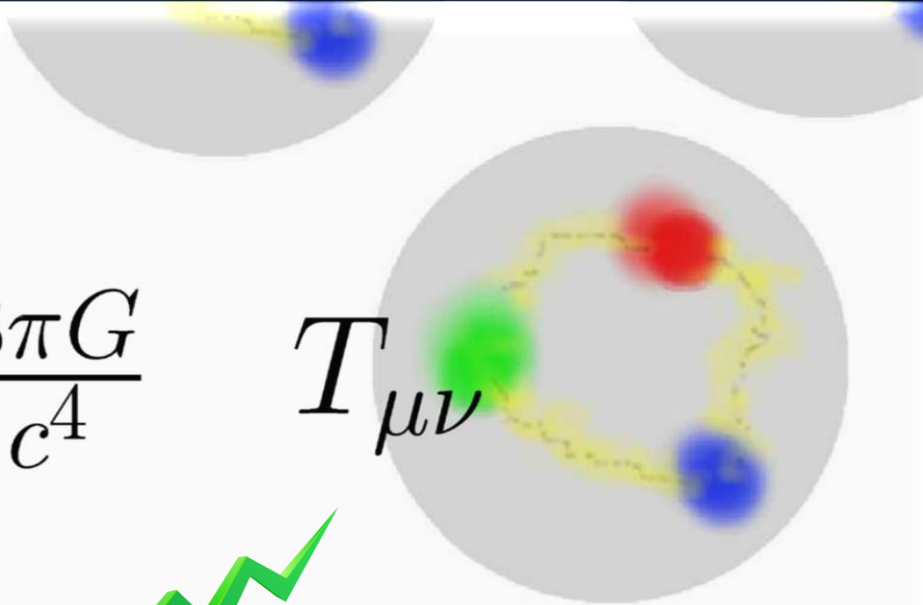
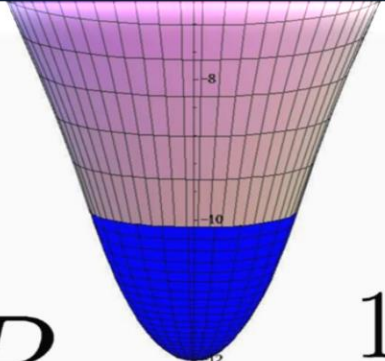
Neutronensterne, Quarksterne und schwarze Löcher

Bei welcher Dichte der Phasenübergang zum Quark-Gluon-Plasma einsetzt und welche Eigenschaften dieser Übergang im Detail hat ist weitgehend unbekannt. Theoretische Modellierung mittels unterschiedlicher effektiver Elementarteilchenmodelle.



Die Einstein Gleichung

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


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

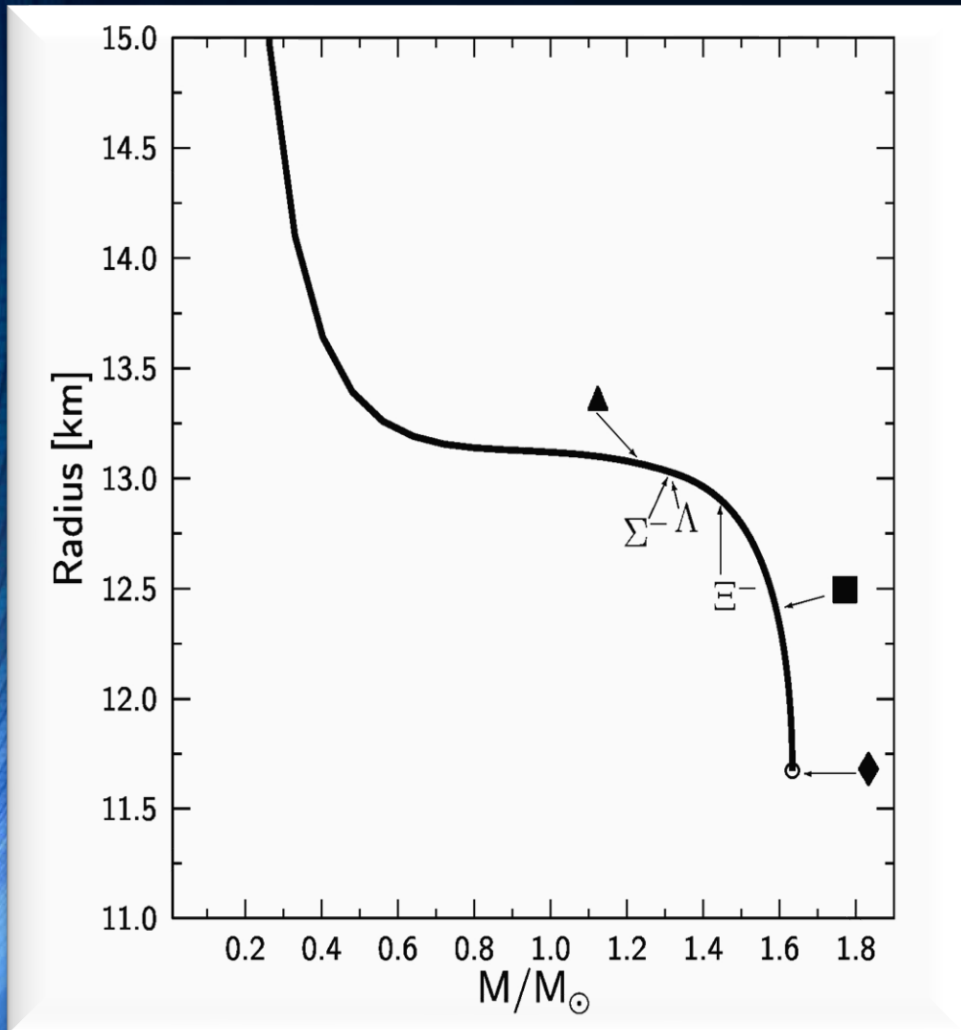
The diagram features two main visual elements. On the left, a 3D grid representing spacetime curvature is shown as a funnel-like shape, with a purple upper section and a blue lower section, set against a coordinate system with axes ranging from -20 to 20. On the right, a circular area contains several colored spots (red, green, blue) and a yellow dashed line, representing the distribution of matter and energy. The Einstein field equation is centered between these two diagrams.

Raumzeitkrümmung
Eigenschaften der Metrik
der Raumzeit

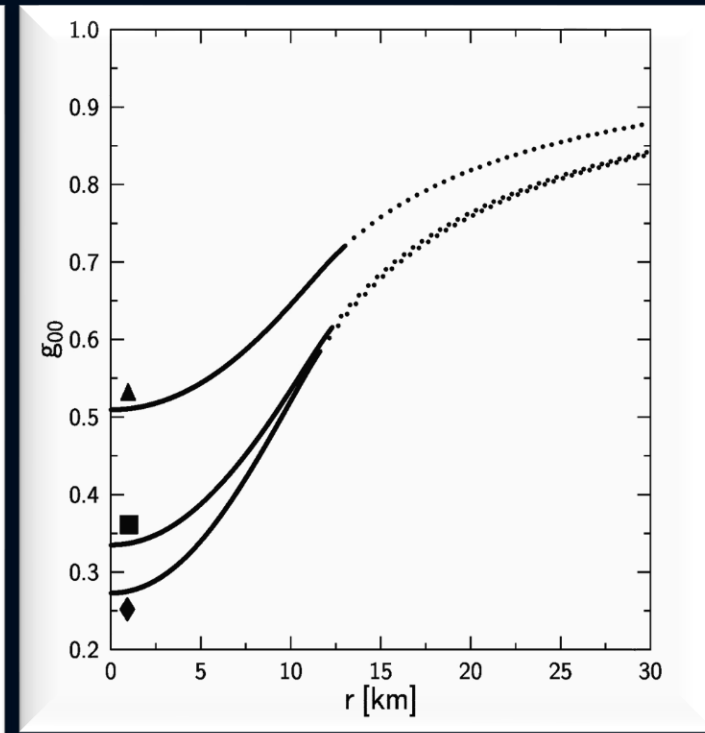
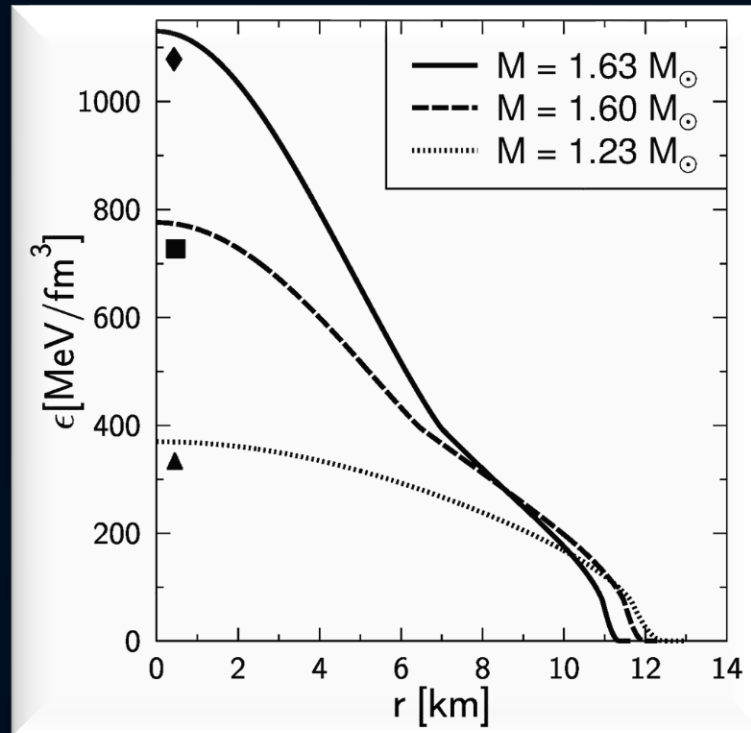
Masse, Energie und Impuls des Systems
Zustandsgleichung der Materie
Druck (Dichte , Temperatur)

Neutron Star Properties

Left: The neutron star radius as a function of its mass. A low, middle and high density star is displayed within the figure. Additionally the onset of hyperonic particles is visualized.



Middle: Energy density profiles of three neutron stars with different central densities and masses. The low density stars do not contain any hyperons, whereas the other two stars do have hyperons in their inner core.



Right: Time-time component of the metric tensor as a function of the radial coordinate. The solid line corresponds to the inner TOV-solution, whereas the dotted curve depicts the outer Schwarzschild part.

6. Vorlesung

Vorlesung 6

Die im rechten Panel dieser Vorlesung dargestellten TOV-Gleichungen beschreiben das Druck- und Energiedichte-Verhalten innerhalb eines sphärisch symmetrischen Objektes und geben außerdem die Innenraum-Metrik des Objektes an. Außerhalb des Objektes ist die Raumzeit durch die Schwarzschildmetrik definiert, welche aufgrund des Birkhoff-Theorems die einzige sphärisch symmetrische Lösung der Einsteingleichung im Vakuum ($T^{\mu\nu} \equiv 0$) ist. Mittels der TOV-Gleichungen können die unterschiedlichsten Objekte in guter Näherung beschrieben werden. So kann man mit ihnen sowohl das Innere der Sonne, als auch die Eigenschaften von Weißen Zwergen und Neutronensternen gut beschreiben. Nach einer kurzen Einführung in die Astrophysik der Weißen Zwerge, Neutronensternen und Quarksterne werden in einem Python Jupyter Notebook, die TOV-Gleichungen analytisch hergeleitet und ihre numerische Lösung, unter Verwendung einer polytropen Form der Zustandsgleichung der Neutronenstern-Materie behandelt.

Weiße Zwerge, Neutronensterne und Quarksterne

Neutronensterne sind neben weißen Zwergen und stellaren schwarzen Löchern die möglichen Endzustände des Evolutionsprozesses einer Sonne. Neutronensterne werden in gewaltigen Supernova-Explosionen geboren und sie stellen den letzten stabilen Zustand der Materie dar, bevor sie zu einem schwarzen Loch kollabiert. Diese faszinierenden stellaren Objekte besitzen lediglich einen Durchmesser von 20 Kilometern, vereinen dort jedoch auf engstem Raum eine Masse von 500 000 Erdmassen. Von den etwa 100 Millionen Neutronensternen die es in unserer Galaxie, der Milchstraße, vermutlich gibt, sind ca. 3000 als Pulsare bekannt. Pulsare sind schnell rotierende Neutronensterne mit einem starken Magnetfeld (bis zu 10^{11} Tesla), die bevorzugt entlang der Pole elektromagnetische Strahlung aussenden. Einige dieser Neutronensterne, die sogenannten Millisekunden-Pulsare rotieren so schnell, dass sie pro Sekunde mehrere hundert Umdrehungen schaffen. Für diese Millisekunden-Pulsare ist unser sphärisch symmetrische Ansatz der Metrik nicht mehr erfüllt. Unter den bekannten Neutronensternen gibt es auch einige, die sich in binären Systemen befinden, wobei ihr Begleiter entweder ein normaler Stern, ein Planet, ein weißer Zwerg oder auch wieder ein Neutronenstern sein kann. Diejenigen Neutronensterne, die in Zweiersystem umeinander kreisen, verringern ihren Abstand im Laufe der Zeit, da sie Energie durch Aussendung von Gravitationswellen abgeben. Das derzeit beeindruckendste Binärsystem ist der sogenannte Doppelpulsar: PSR J0737-3039A/B, welches im Jahre 2003 entdeckt wurde. Kollidieren zwei Neutronensterne miteinander wird eine enorme Energie in Form von Gravitationswellen frei gesetzt und eine solche Neutronenstern-Kollision konnte im Jahre 2017 mittels der Gravitationswellen-Detektoren beobachtet werden (siehe [GW170817](#)). Da die Dichte im inneren Bereich des Neutronensterns den mehrfachen Wert der normalen nuklearen Kerndichte erreichen kann, ist es wahrscheinlich, dass ein Phasenübergang zu Quarkmaterie stattfindet - diese Sterne werden als sogenannte hybride, bzw. Quarksterne bezeichnet

Vorlesung 6

Bis zu dieser Vorlesung hatten wir die raumzeitliche Struktur der Metrik als gegeben vorausgesetzt (Schwarzschild-Metrik bzw. Kerr-Metrik) und die Bewegungen von Probekörpern, im sonst materiefreien Raum, mittels der Geodätengleichung studiert. In dieser Vorlesung betrachten wir den umgekehrten Fall: Wie kann man anhand einer speziellen Materie/Energieverteilung im Raum zu der zugehörigen raumzeitliche Struktur gelangen. Wir betrachten im Folgenden ein statisches, sphärisch symmetrisches Objekt (in Näherung z.B. die Erde, Sonne oder ein Neutronenstern) und setzen die Metrik im Inneren wie folgt an:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} e^{2\Phi(r)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2(\theta) \end{pmatrix},$$

wobei die Funktionen $\phi(r)$ und $m(r)$ an dieser Stelle noch unbekannt sind, später aber eine physikalische Bedeutung erhalten. Die Materie setzen wir als eine ideale Flüssigkeit mit folgendem Energie-Impuls Tensor an:

$$T^{\mu}_{\nu} = \begin{pmatrix} e(r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p(r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p(r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p(r) \end{pmatrix},$$

wobei die Funktionen $e(r)$ und $p(r)$ die Energiedichte und den Druck der Materie darstellen. Die raumzeitliche Struktur im Inneren der Materie erhält man mittels der Einstein Gleichung

Allgemeine Relativitätstheorie

General Theory of Relativity

Vorlesung gehalten (Sommersemester 2021)

von Dr.phil.nat. Dr.rer.pol. Matthias Hanauske

Frankfurt am Main 04.04.2021

Erster Vorlesungsteil: Allgemeine Relativitätstheorie mit Python

Die Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) Gleichung

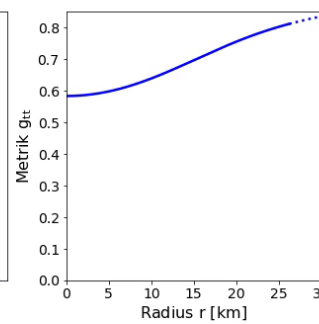
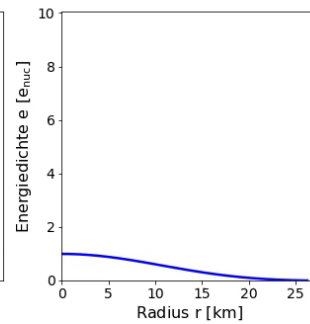
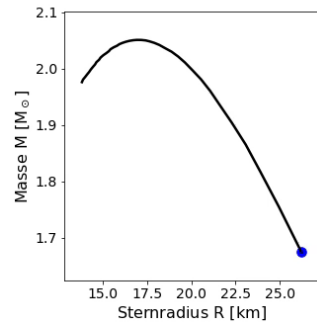
Innenraum-Lösung eines sphärisch symmetrischen, statischen Objektes (z.B. Erde, Neutronenstern)

Von der Einstein Gleichung zur TOV Gleichung

In den vorigen Vorlesungen wurde die Geodätengleichung in vorgegebener Schwarzschild und Kerr Raumzeit für unterschiedliche Anfangsbedingungen numerisch analysiert. Die raumzeitliche Struktur, die Metrik, wurde hierbei als gegeben vorausgesetzt. In der folgenden Vorlesung betrachten wir nun wie man die Metrik bei vorgegebener Materieverteilung berechnet. Die zugrundeliegende Gleichung, die es hier zu lösen gilt, ist die Einstein Gleichung (in kontravarianter Darstellung)

$$G^\mu_\nu = R^\mu_\nu - \frac{1}{2}g^\mu_\nu R = 8\pi T^\mu_\nu$$

Wir betrachten im Folgenden ein statisches, sphärisch symmetrisches Objekt (in Näherung z.B. die Erde, Sonne oder ein Neutronenstern) und setzen die Metrik im Inneren wie folgt an:



Jupyter Notebook

Die Die Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) Gleichung

GOETHE UNIVERSITÄT FRANKFURT AM MAIN

Startseite Lehren & Lernen Kursangebote Allgemeine Relativität...

Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer

- Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer
 - Literaturverzeichnis
 - Einschreibung
 - Kursinhalt
 - Vorlesungsaufzeichnung
 - Aufgaben
 - Programme
 - Einführung in Jupyter Notebooks
 - Allgemeine Relativitätstheorie mit Python
 - Eigenschaften der Schwarzschild-Metrik
 - Radialer Fall eines Probekörpers in ein schwarzes Loch
 - Klassifizierung unterschiedlicher Bahnbewegungen
 - Der ISCO und die Photonensphäre
 - Maple Worksheets I
 - Das rotierende schwarze Loch: Struktur der Horizonte
 - Das rotierende schwarze Loch: Klassifikation möglicher
 - Maple Worksheets II
 - Die Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) Gleichung
 - Jupyter Notebooks
 - Mitteilungen

Auf der OLAT Seite des Kurses finden Sie die Jupyter Notebooks zum Ansehen und zum Herunterladen

Shapiro delay measurement of a 2 solar mass neutron star

P. Demorest¹, T. Pennucci², S. Ransom¹, M. Roberts³ & J. W. T. Hessels^{4,5}

October 29, 2010

1. National Radio Astronomy Observatory, 520 Edgemont Road, Charlottesville, VA 22093 USA
2. Astronomy Department, University of Virginia, Charlottesville, VA 22094-4325 USA
3. Eureka Scientific, Inc., Oakland, CA 94602, USA
4. Netherlands Institute for Radio Astronomy (ASTRON), Postbus 2, 7990 AA Dwingeloo, The Netherlands
5. Astronomical Institute “Anton Pannekoek,” University of Amsterdam, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands

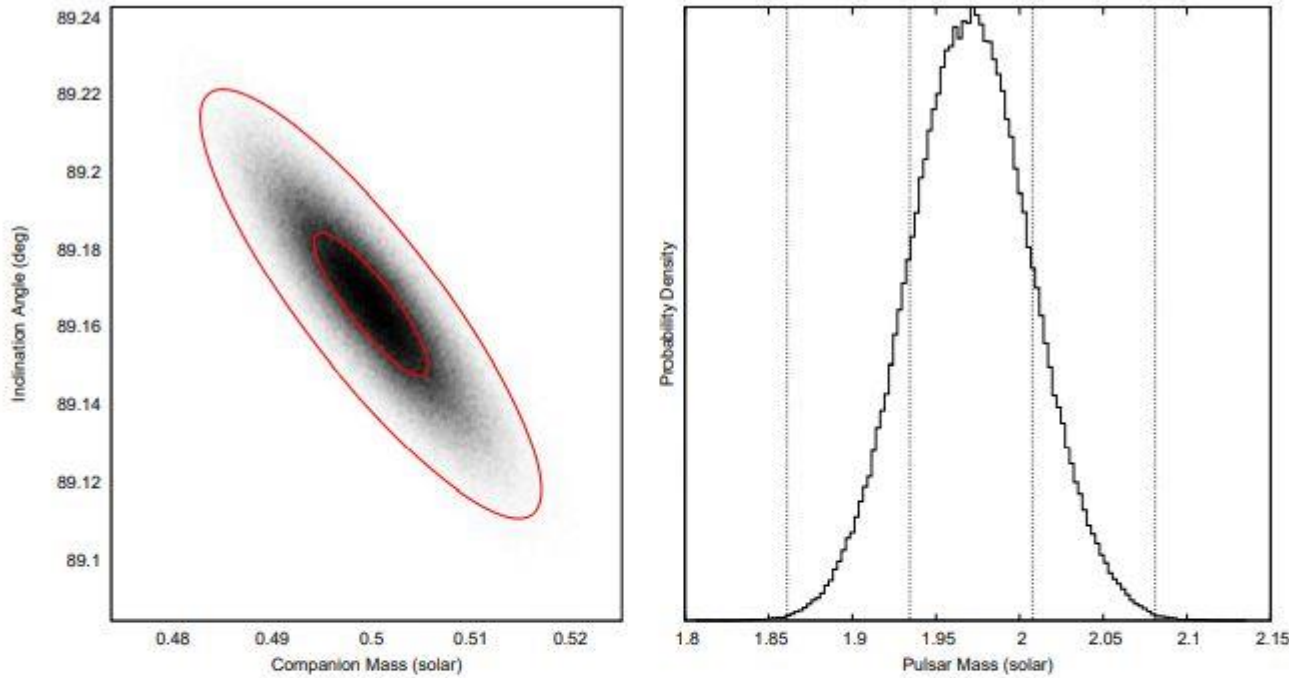


Figure 2: Results of the Markov chain Monte Carlo (MCMC) error analysis. The left panel grayscale shows the 2-D posterior probability density function (PDF) in the M_2 - i (companion mass versus orbital inclination) plane computed from a histogram of MCMC trial values. The ellipses show 1- and 3- σ contours based on a Gaussian approximation to the MCMC results. The right panel shows the PDF for pulsar mass derived from the MCMC trials. In both cases the results are very well described by normal distributions due to the extremely high signal-to-noise ratio of our Shapiro delay detection.

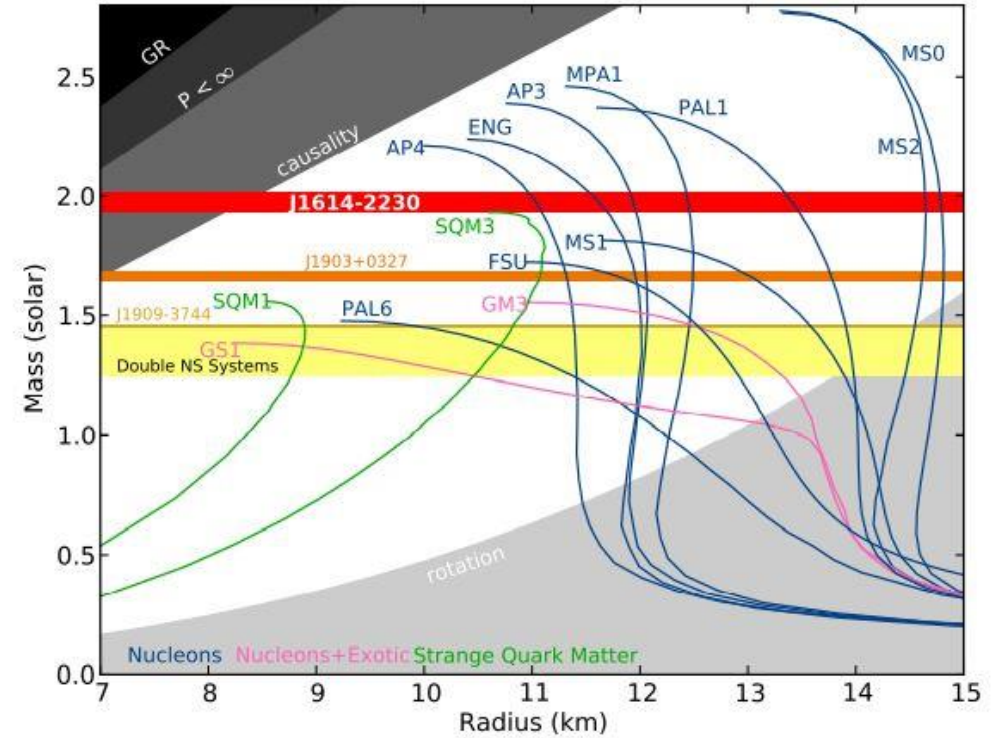


Figure 3: Neutron star (NS) mass-radius diagram. The plot shows non-rotating mass versus physical radius for several typical NS equations of state (EOS)[25]. The horizontal bands show the observational constraint from our J1614–2230 mass measurement of $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$, similar measurements for two other millisecond pulsars[3, 26], and the range of observed masses for double NS binaries[2]. Any EOS line that does not intersect the J1614–2230 band is ruled out by this measurement. In particular, most EOS curves involving exotic matter, such as kaon condensates or hyperons, tend to predict maximum NS masses well below $2.0 M_{\odot}$, and are therefore ruled out.

A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary*

John Antoniadis,¹ † Paulo C. C. Freire,¹ Norbert Wex,¹ Thomas M. Tauris,^{2,1}
Ryan S. Lynch,³ Marten H. van Kerkwijk,⁴ Michael Kramer,^{1,5} Cees Bassa,⁵
Vik S. Dhillon,⁶ Thomas Driebe,⁷ Jason W. T. Hessels,^{8,9} Victoria M. Kaspi,³
Vladislav I. Kondratiev,^{8,10} Norbert Langer,² Thomas R. Marsh,¹¹
Maura A. McLaughlin,¹² Timothy T. Pennucci,¹³ Scott M. Ransom,¹⁴
Ingrid H. Stairs,¹⁵ Joeri van Leeuwen,^{8,9}
Joris P. W. Verbiest,¹ David G. Whelan,¹³

¹Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53121 Bonn, Germany

²Argelander Institut für Astronomie, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn, Germany

³Department of Physics, McGill University, 3600 University Street, Montreal, QC H3A 2T8, Canada

⁴Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto,
50 St. George Street, Toronto, ON M5S 3H4, Canada

⁵Jodrell Bank Centre for Astrophysics, The University of Manchester,
Alan Turing Building, Manchester, M13 9PL, UK

⁶Department of Physics & Astronomy, University of Sheffield, Sheffield, S3 7RH, UK

⁷Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),

Raumfahrtmanagement, Königswinterer Str. 523, 524, 52227 Bonn, Germany

Many physically motivated extensions to general relativity (GR) predict significant deviations in the properties of spacetime surrounding massive neutron stars. We report the measurement of a 2.01 ± 0.04 solar mass (M_{\odot}) pulsar in a 2.46-hr orbit with a $0.172 \pm 0.003 M_{\odot}$ white dwarf. The high pulsar mass and the compact orbit make this system a sensitive laboratory of a previously untested strong-field gravity regime. Thus far, the observed orbital decay agrees with GR, supporting its validity even for the extreme conditions present in the system. The resulting constraints on deviations support the use of GR-based templates for ground-based gravitational wave detectors. Additionally, the system strengthens recent constraints on the properties of dense matter and provides insight to binary stellar astrophysics and pulsar recycling.

Γy^*

is,^{2,1}

ssa,⁵

ispi,³

4

PSR J0348+0432 & optical observations of its companion PSR J0348+0432, a pulsar spinning at 39 ms in a 2.46-hr orbit with a low-mass companion, was detected by a recent survey (6, 7) conducted with the Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT). Initial timing observations of the binary yielded an accurate astrometric position, which allowed us to identify its optical counterpart in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) archive (8). The colors and flux of the counterpart are consistent with a low-mass white dwarf (WD) with a helium core at a distance of $d \sim 2.1$ kpc. Its relatively high apparent brightness ($g' = 20.71 \pm 0.03$ mag) allowed us to resolve its spectrum using the Apache Point Optical Telescope. These observations revealed deep Hydrogen lines, typical of low-mass WDs, confirming our preliminary identification. The radial velocities of the WD mirrored that of PSR J0348+0432, also verifying that the two stars are gravitationally bound.

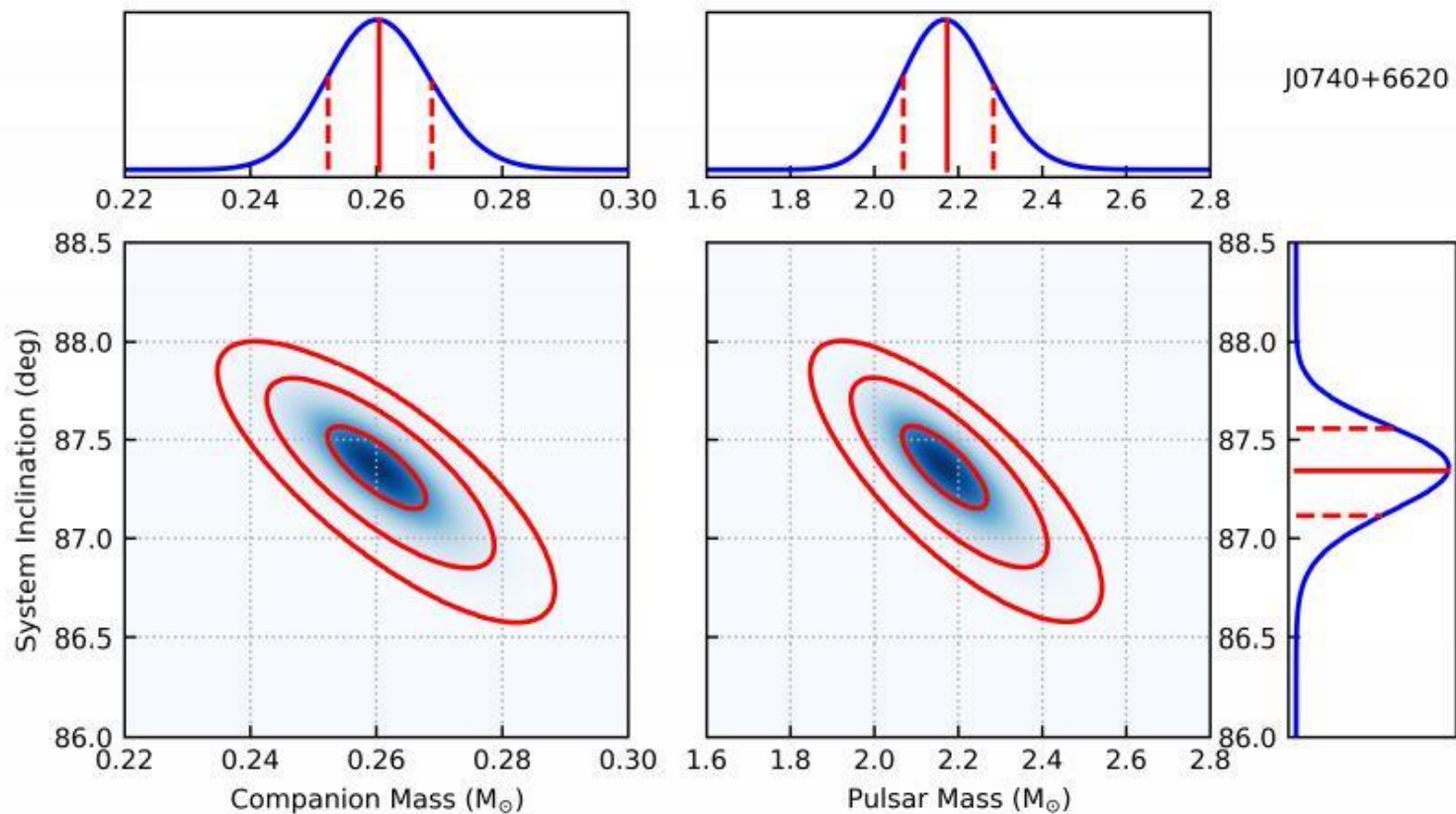
Relativistic Shapiro delay measurements of an extremely massive millisecond pulsar

H. T. Cromartie^{*1}, E. Fonseca², S. M. Ransom³, P. B. Demorest⁴, Z. Arzoumanian⁵, H. Blumer^{6,7}, P. R. Brook^{6,7}, M. E. DeCesar⁸, T. Dolch⁹, J. A. Ellis¹⁰, R. D. Ferdman¹¹, E. C. Ferrara^{12,13}, N. Garver-Daniels^{6,7}, P. A. Gentile^{6,7}, M. L. Jones^{6,7}, M. T. Lam^{6,7}, D. R. Lorimer^{6,7}, R. S. Lynch¹⁴, M. A. McLaughlin^{6,7}, C. Ng^{15,16}, D. J. Nice⁸, T. T. Pennucci¹⁷, R. Spiewak¹⁸, I. H. Stairs¹⁵, K. Stovall⁴, J. K. Swiggum¹⁹, & W. W. Zhu²⁰

1. *Department of Astronomy, University of Virginia, 530 McCormick Rd., Charlottesville, VA 22903, USA*
2. *Department of Physics, McGill University, 3600 University St., Montreal, QC H3A 2T8, Canada*
3. *National Radio Astronomy Observatory, 520 Edgemont Rd., Charlottesville, VA 22903, USA*
4. *National Radio Astronomy Observatory, 1003 Lopezville Rd., Socorro, NM 87801, USA*
5. *X-ray Astrophysics Laboratory, Code 662, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771*
6. *Department of Physics and Astronomy, West Virginia University, P.O. Box 6315, Morgantown, WV 26506, USA*
7. *Center for Gravitational Waves and Cosmology, West Virginia University, Chestnut Ridge Research Building, Morgantown, WV 26505, USA*
8. *Department of Physics, Lafayette College, Easton, PA 18042, USA*
9. *Department of Physics, Hillsdale College, 33 E. College Street, Hillsdale, Michigan 49242, USA*
10. *Infinia ML, 202 Rigsbee Avenue, Durham NC, 27701*
11. *School of Chemistry, University of East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, United Kingdom*
12. *NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA*
13. *Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD, USA*
14. *Green Bank Observatory, P.O. Box 2, Green Bank, WV 24944, USA*

Re
pu

H.
P.
N.
M.
K.



J0740+6620

second

imer^{6,7},
ara^{12,13},
ynch¹⁴,
stairs¹⁵,

USA

71
V 26506,

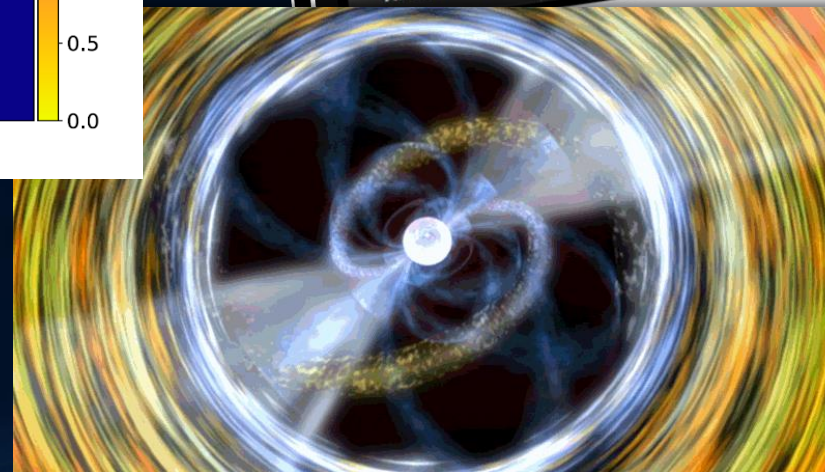
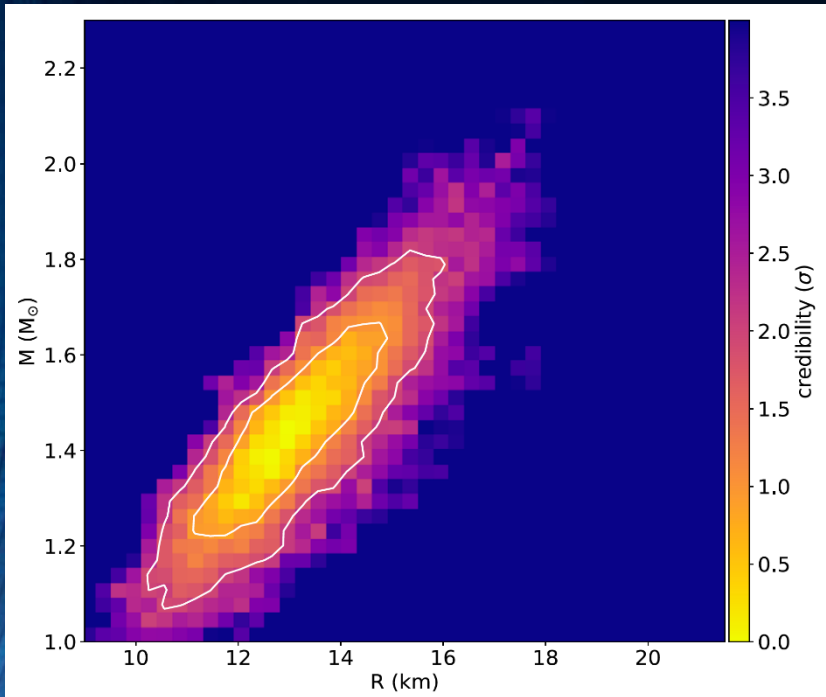
Building,

Figure 3: Map of fitted χ^2 distributions and corresponding probability density functions for m_p , m_c , and i . The left-hand heat map was generated by computing χ^2 values for different combinations of m_c and i ; the right-hand heat map was calculated by translating the $m_c - i$ probability density function to the $m_p - i$ phase space using the binary mass function. Darker blue regions correspond to lower χ^2 values. The three red circles correspond to 1, 2, and 3- σ significance cutoffs. Each of the three probability density functions (blue lines plotted on the tops and side of the heat maps) are projections of the χ^2 distributions. The solid red lines mark median values of each of the three parameters, while red dashed lines denote the upper and lower bounds of the 68.3% (1- σ) credibility interval.

10
11
12
13
14

NICER: Neutron Star Interior Composition Explorer

Der Neutronenstern Interior Composition Explorer (NICER) ist ein NASA-Teleskop, welches sich auf der Internationalen Raumstation befindet. Es wurde für das Studium der exotischen Zustände der Materie im Inneren von Neutronensternen entwickelt und hat in den letzten Jahren präzise die Radiuswerte einiger Neutronensterne bestimmen können.



Interior Composition
er Mission



Gemessene Wahrscheinlichkeiten für die Masse und den Radius des Neutronensterns PSR J0030 + 0451, basierend auf der Analyse von Miller et al. (ApJ Letters 887, L24.

Twin stars and the stiffness of the nuclear equation of state: ruling out strong phase transitions below $1.7n_0$ with the new NICER radius measurements

Jan-Erik Christian^{1,*} and Jürgen Schaffner-Bielich^{1,†}

¹*Institut für Theoretische Physik, Goethe Universität Frankfurt,
Max von Laue Strasse 1, D-60438 Frankfurt, Germany*

(Dated: January 22, 2020)

We explore the connection between the stiffness of an hadronic equation of state (EoS) with a sharp phase transition to quark matter to its tidal deformability. For this we employ a hadronic relativistic mean field model with a parameterized effective nucleon mass to vary the stiffness in conjunction with a constant speed of sound EoS for quark matter. We compute multiple scenarios with phase transitions according to the four possible cases of a hybrid star EoS with a stable second branch. We demonstrate at the example of GW170817 how the effective nucleon mass can be constrained by using gravitational wave data. We find, that certain values of the effective nucleon mass are incompatible with GW170817 and a phase transition simultaneously. By using the recent NICER measurements of J0030+0451 at the 1σ level we constrain our results further and find that strong phase transitions with a visible jump in the mass-radius relation are ruled out at densities below 1.7 times saturation density.

I. INTRODUCTION

parametrization presented by Alford et al. [47]. The parameters for the phase transition are chosen according

Twin stars and the sharp phase transitions

We explore the sharp phase transition in the relativistic mean-field model in conjunction with the phase transition with a stable second branch. We demonstrate that the mass-radius relation is constrained by the NICER measurements of the compactness of J0030+0451 and the strong phase transition below 1.7 times solar mass.

I. INTRODUCTION

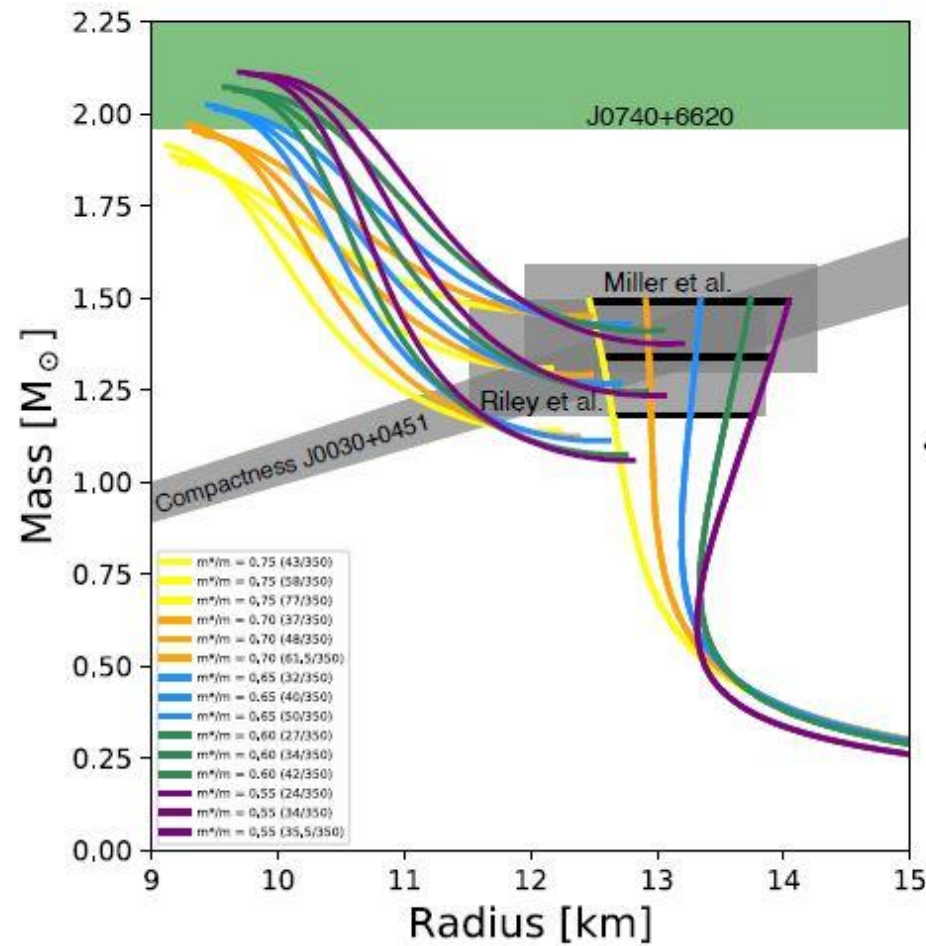


FIG. 6. Mass-radius relations for category III phase transitions are depicted for all considered effective nucleon masses. The constraints for the J0030+0451 measurement by NICER are taken from refs. [48, 49] and are shaded gray. The $2M_{\odot}$ constraint from J0740+6620 [44] is shaded green. All cases of m^*/m can generate neutron stars and hybrid stars within the NICER likelihood, if the transition parameters are chosen accordingly. The case $m^*/m = 0.75$ does not meet the $2M_{\odot}$ constraint if a phase transition takes place. The black straight lines indicate the maximal mass of the hadronic branch for the respective transitional pressure.

we are ruling out strong phase transitions as measurements

which¹, [1]

Frankfurt,
many

ion of state (EoS) with a transition we employ a hadronic EoS to vary the stiffness in order to compute multiple scenarios. The EoS with a stable second branch can be used as a test case for the effective nucleon mass. By using the recent results further and find that they are ruled out at densities

presented by Alford et al. [47]. The phase transition are chosen according

Studying the onset of deconfinement with multi-messenger astronomy of neutron stars

David Blaschke^{*1,2,3} | Mateusz Cierniak^{**1}

¹Institute of Theoretical Physics, University of Wrocław, 50-204 Wrocław, Poland

²Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR Dubna, 141980 Dubna, Russia

³National Research Nuclear University (MEPhI), 115409 Moscow, Russia

Correspondence

* Email: david.blaschke@uwr.edu.pl

** Email: mateusz.cierniak@uwr.edu.pl

With the first multi-messenger observation of a binary neutron star merger (GW170817) new constraints became available for masses and radii of neutron stars. We introduce a class of hybrid EoS that fulfils all these constraints and predicts a region in the mass-radius diagram that could be populated only by hybrid neutron stars with quark matter cores. A confirmation of this conjecture would be provided when the NICER radius measurement for the high-mass pulsar PSR J0740+6620 yields a radius significantly less than 11 km. Would this radius measurement yield a result in excess of 12 km, this would allow for both, a purely hadronic and a hybrid

HE] 7 Jan 2021

ARTICLE TYPE

Studying the on astronomy of n

David Blaschke*^{1,2,3} | 1

¹Institute of Theoretical Physics, University of Wrocław, 50-204 Wrocław, Poland

²Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR Dubna, 141980 Dubna, Russia

³National Research Nuclear University (MEPhI), 115409 Moscow, Russia

Correspondence

* Email: david.blaschke@uwr.edu.pl

** Email: mateusz.cierniak@uwr.edu.pl

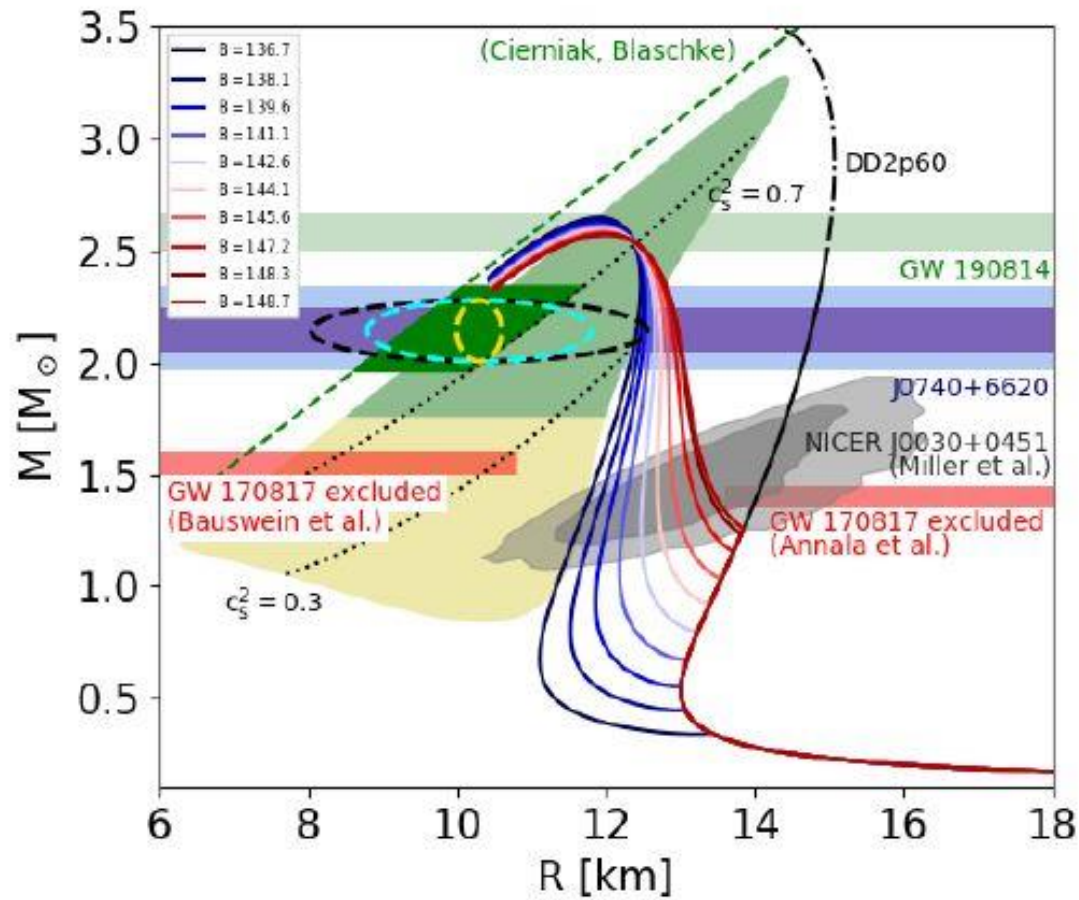


FIGURE 5 Mass-radius diagram for a hybrid star family that corresponding to the DD2p60-CSS hybrid EoS introduced in the text. The maximum mass on the hybrid star branch reaches the mass range of the lighter compact object in GW190814 (R. Abbott et al., 2020), which therefore could be a hypermassive neutron star. The sequences with lowest onset masses for deconfinement exhibit the twin phenomenon.

essenger

Binary neutron star merger
 masses and radii of neutron stars.
 these constraints and predicts a
 related only by hybrid neutron
 conjecture would be provided
 mass pulsar PSR J0740+6620
 radius measurement yield a
 purely hadronic and a hybrid

DRAFT VERSION MAY 17, 2021

Typeset using L^AT_EX preprint style in AAS_TE_X63

THE RADIUS OF PSR J0740+6620 FROM NICER AND XMM-NEWTON DATA

M. C. MILLER ¹ F. K. LAMB ^{2,3} A. J. DITTMANN ¹ S. BOGDANOV ⁴ Z. ARZOUMANIAN,⁵
K. C. GENDREAU ⁵ S. GUILLOT ^{6,7} W. C. G. HO ⁸ J. M. LATTIMER ⁹
M. LOEWENSTEIN ^{10,5,11} S. M. MORSINK ¹² P. S. RAY ¹³ M. T. WOLFF ¹³ C. L. BAKER,¹⁴
T. CAZEAU,⁵ S. MANTHRIPRAGADA,¹⁵ C. B. MARKWARDT ¹⁶ T. OKAJIMA,⁵ S. POLLARD,⁵
I. COGNARD ^{17,18} H. T. CROMARTIE ^{19,20} E. FONSECA ^{21,22,23,24} L. GUILLEMOT ^{17,18}
M. KERR ²⁵ A. PARTHASARATHY ²⁶ T. T. PENNUCCI ^{27,28} S. RANSOM ²⁷ AND I. STAIRS ²⁹

¹*Department of Astronomy and Joint Space-Science Institute, University of Maryland, College Park, MD 20742-2421
USA*

²*Illinois Center for Advanced Studies of the Universe and Department of Physics, University of Illinois at
Urbana-Champaign, 1110 West Green Street, Urbana, IL 61801-3080, USA*

³*Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 West Green Street, Urbana, IL
61801-3074, USA*

14 May 2021

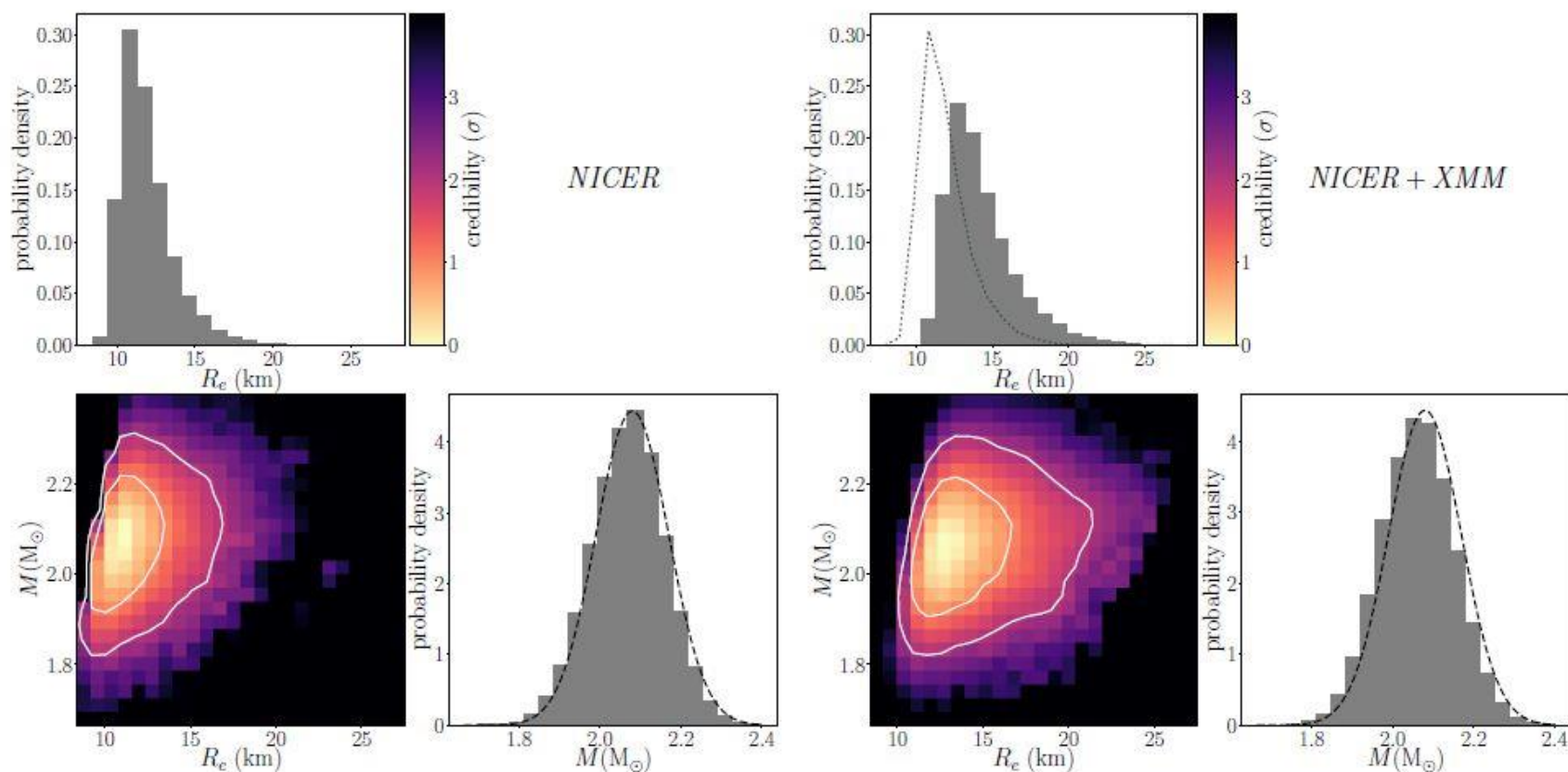


Figure 1. Comparison of the $M - R_e$ corner plots obtained using two circular spots, fit to only the *NICER* data (left panels) and to both the *NICER* and the *XMM-Newton* data with the nominal *XMM-Newton* calibration (right panels). All of the results that we present use pure hydrogen model atmospheres that allow for the possibility of partial ionization. The mass prior is represented by the dashed line in each of the one-dimensional mass posterior plots. In the mass-radius plots, brighter colors indicate higher posterior probability densities; the inner contour in these plots contains 68.3% of the posterior probability whereas the outer contour contains 95.4%. In the *NICER+XMM-Newton* one-dimensional radius posterior plot, the dotted line shows the posterior obtained using only the *NICER* data. The two radius posteriors have substantial overlap, but the effect of including the *XMM-Newton* data is to increase the favored radius by roughly 2 km.

DRAFT
Typeset

THE
M. C.

M. L.
T.
I.
M. KE

¹Depart

²Il


³Dep

DATA

ANIAN,⁵

BAKER,¹⁴

ARD,⁵

 17, 18

VAIRS  29

20742-2421

ois at

ana, IL

14 May 2021

A NICER VIEW OF THE MASSIVE PULSAR PSR J0740+6620 INFORMED BY RADIO TIMING AND XMM-NEWTON SPECTROSCOPY

THOMAS E. RILEY,¹ ANNA L. WATTS,¹ PAUL S. RAY,² SLAVKO BOGDANOV,³ SEBASTIEN GUILLOT,^{4,5}
SHARON M. MORSINK,⁶ ANNA V. BILOUS,⁷ ZAVEN ARZOUMANIAN,⁸ DEVARSHI CHOUDHURY,¹ JULIA S. DENEVA,⁹
KEITH C. GENDREAU,⁸ ALICE K. HARDING,¹⁰ WYNN C. G. HO,¹¹ JAMES M. LATTIMER,¹² MICHAEL LOEWENSTEIN,^{13,14}
RENEE M. LUDLAM,^{15,16} CRAIG B. MARKWARDT,⁸ TAKASHI OKAJIMA,⁸ CHANDA PRESCOD-WEINSTEIN,¹⁷
RONALD A. REMILLARD,¹⁸ MICHAEL T. WOLFF,² EMMANUEL FONSECA,^{19,20,21,22} H. THANKFUL CROMARTIE,^{23,16}
MATTHEW KERR,² TIMOTHY T. PENNUCCI,^{24,25} ADITYA PARTHASARATHY,²⁶ SCOTT RANSOM,²⁴ INGRID STAIRS,²⁷
LUCAS GUILLEMOT,^{28,29} AND ISMAEL COGNARD^{28,29}

¹*Anton Pannekoek Institute for Astronomy, University of Amsterdam, Science Park 904, 1090GE Amsterdam, the Netherlands*

²*Space Science Division, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA*

³*Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, 550 West 120th Street, New York, NY 10027, USA*

⁴*IRAP, CNRS, 9 avenue du Colonel Roche, BP 44346, F-31028 Toulouse Cedex 4, France*

⁵*Université de Toulouse, CNES, UPS-OMP, F-31028 Toulouse, France.*

⁶*Department of Physics, University of Alberta, 4-183 CCIS, Edmonton, AB, T6G 2E1, Canada*

⁷*ASTRON, the Netherlands Institute for Radio Astronomy, Postbus 2, 7990 AA Dwingeloo, The Netherlands*

⁸*X-Ray Astrophysics Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, Code 662, Greenbelt, MD 20771, USA*

DRAFT VERSION MAY 17,
Typeset using L^AT_EX tw

A NICER VIEW OF

THOMAS E. J.
SHARON M. MORS
KEITH C. GENDREAU,
RENEE M. LUI
RONALD A. REMIL
MATTHEW KERR,²

¹*Anton Pannekoek Ins*

²*St*

³*Columbia As*

⁴*IR*

⁶*Depar*

⁷*ASTRON, th*

⁸*X-Ray Astro*

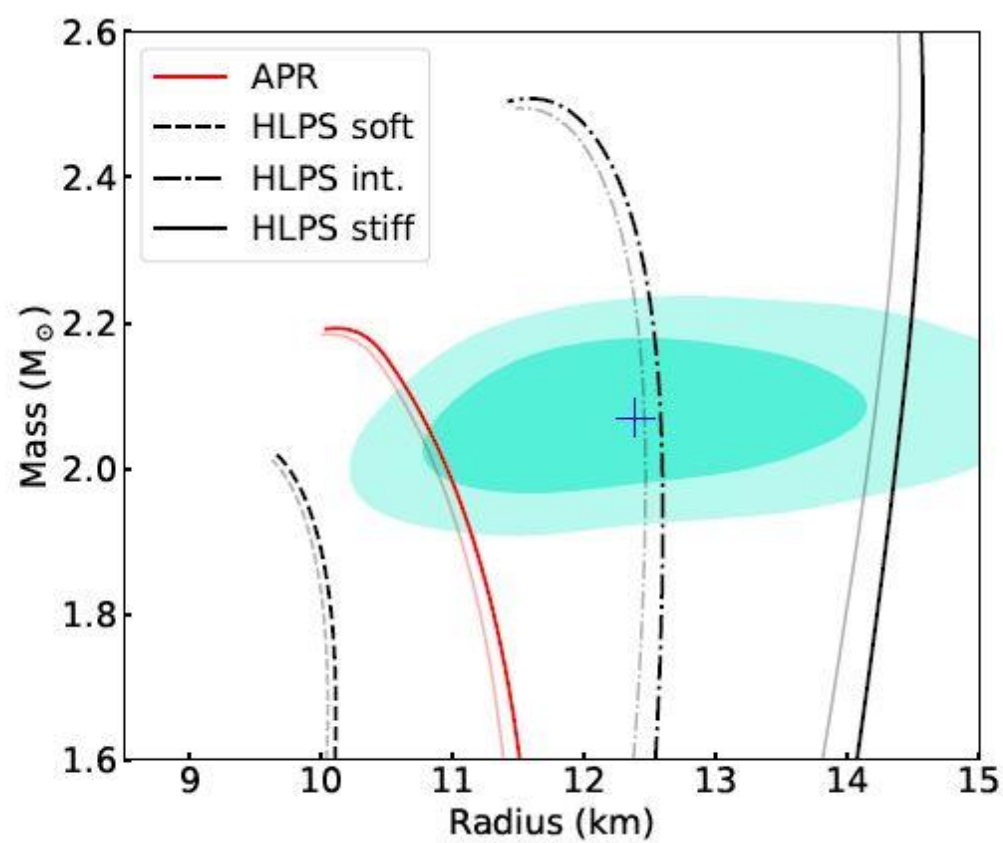


Figure 13. Mass versus equatorial radius for several example EOS models from [Hebeler et al. \(2013\)](#), showing the difference between non-rotating stellar models and stars rotating at 346 Hz. For each EOS shown the right hand (heavier) curve is for a spin of 346 Hz, while the left-hand (lighter) curve is for zero rotation. The 68% and 95% credible regions for mass and radius inferred from our analysis of PSR J0740+6620 are shown by the shaded *cyan* contours. The blue crosshair shows the inferred median values.

RADIO TIMING

JILLOT,^{4,5}
IA S. DENEVA,⁹
LOEWENSTEIN,^{13,14}
EINSTEIN,¹⁷
ROMARTIE,^{23,16}
IGRID STAIRS,²⁷

v, the Netherlands

927, USA

da

therlands

771, USA

Nuclear-Physics Multi-Messenger Astrophysics Constraints on the Neutron-Star Equation of State: Adding NICER's PSR J0740+6620 Measurement

PETER T. H. PANG,^{1,2} INGO TEWS,³ MICHAEL W. COUGHLIN,⁴ MATTIA BULLA,⁵ CHRIS VAN DEN BROECK,^{1,2} AND
TIM DIETRICH^{6,7}

¹*Nikhef, Science Park 105, 1098 XG Amsterdam, The Netherlands*

²*Institute for Gravitational and Subatomic Physics (GRASP), Utrecht University, Princetonplein 1, 3584 CC Utrecht, The Netherlands*

³*Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA*

⁴*School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455, USA*

⁵*The Oskar Klein Centre, Department of Astronomy, Stockholm University, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden*

⁶*Institut für Physik und Astronomie, Universität Potsdam, Haus 28, Karl-Liebknecht-Str. 24/25, 14476, Potsdam, Germany*

⁷*Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), Am Mühlenberg 1, Potsdam 14476, Germany*

(Dated: May 19, 2021)

ABSTRACT

In the past few years, new observations of neutron stars and neutron-star mergers have provided a wealth of data that allow one to constrain the equation of state of nuclear matter at densities above nuclear saturation density. However, most observations were based on neutron stars with masses of about 1.4 solar masses, probing densities up to ~ 3 -4 times the nuclear saturation density. Even higher densities are probed inside massive neutron stars such as PSR J0740+6620. Very recently, new radio observations provided an update to the mass estimate for PSR J0740+6620 and X-ray observa-

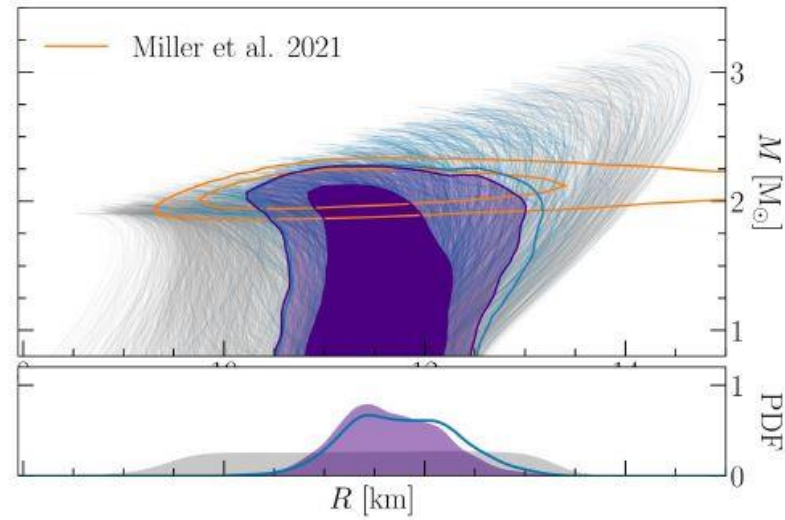
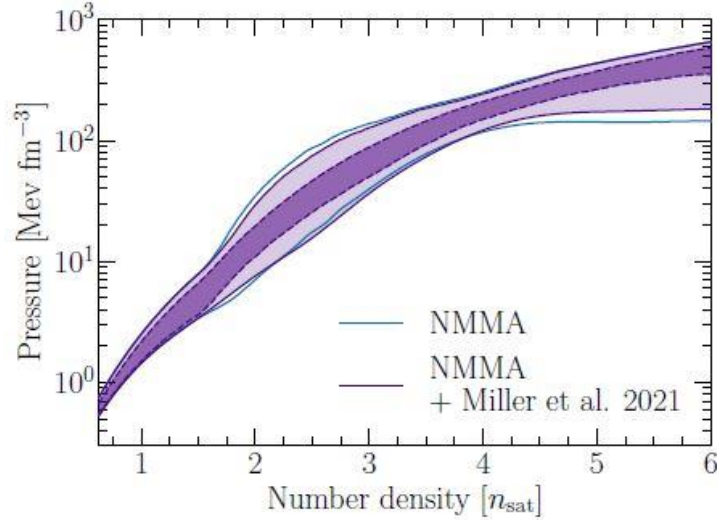
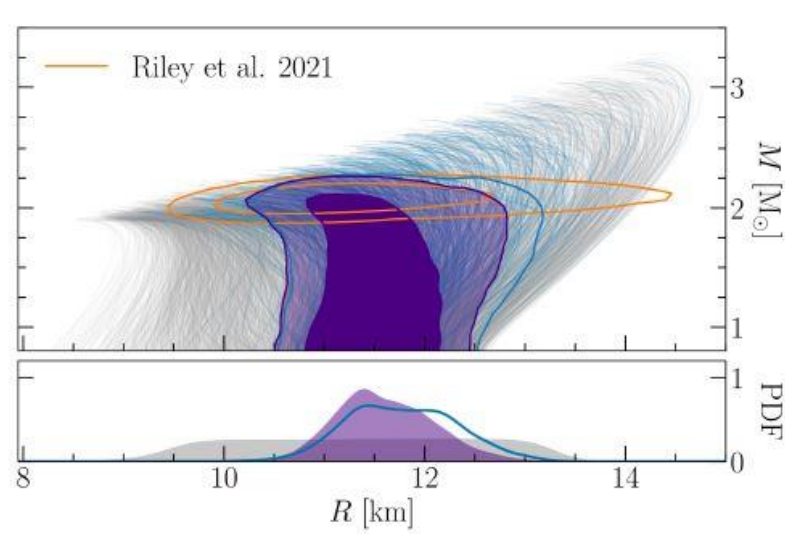
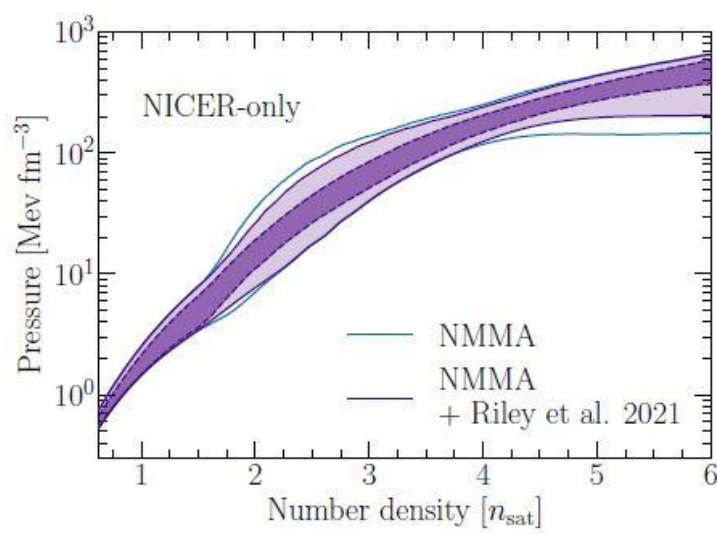


Figure 3. Left panels: The posterior for the pressure as a function of number density including the NICER-only observation of PSR J0740+6620 from Riley et al. (2021a) (upper panel) and from Miller et al. (2021b) (lower panel). The bands indicate 68% and 95% credible intervals. The 95% band for the NMMA result without the new NICER measurement is shown as comparison (blue line). Right panels: NICER mass-radius posteriors of PSR J0740+6620 plotted at 68% and 95% confidence intervals (orange contours) and the EOSs included in the analysis (gray lines). The 95% contour for the NMMA result without including the new NICER observation is shown as thick blue line, while the individual EOSs within this credible interval of the NMMA analysis are shown as thin blue lines. The resulting mass-radius posterior after the inclusion of the new NICER-only observation is shown in purple for the NICER result of Riley et al. (2021a) (upper panel) and of Miller et al. (2021b) (lower panel) at 68% and 95% credible intervals. The 1D insets show the posteriors for $R_{1.4}$ with (purple) and without (blue) the inclusion of the NICER-only measurement of PSR J0740+6620.

In t
wealth
nuclea
about
higher
radio

uation of State:

BROECK,^{1,2} AND

icht, The Netherlands

SA
olm, Sweden
sdam, Germany
476, Germany

provided a
sities above
1 masses of
sity. Even
cently, new
ay observa-

- Home
- EoS
- Overview
- Families
- Cold Neutron Star EoS**
 - Relativistic mean field models
 - Skyrme models (unified)
 - Microscopic calculations
 - STOS (H_Shen et al)
 - Hybrid (quark-hadron) EoS
 - Holographic (quark-hadron) EoS
 - Models with hyperons
 - All
- Cold Matter EoS
- Neutron Matter EoS

CompOSE

CompStar Online
Supernovae Equations of State

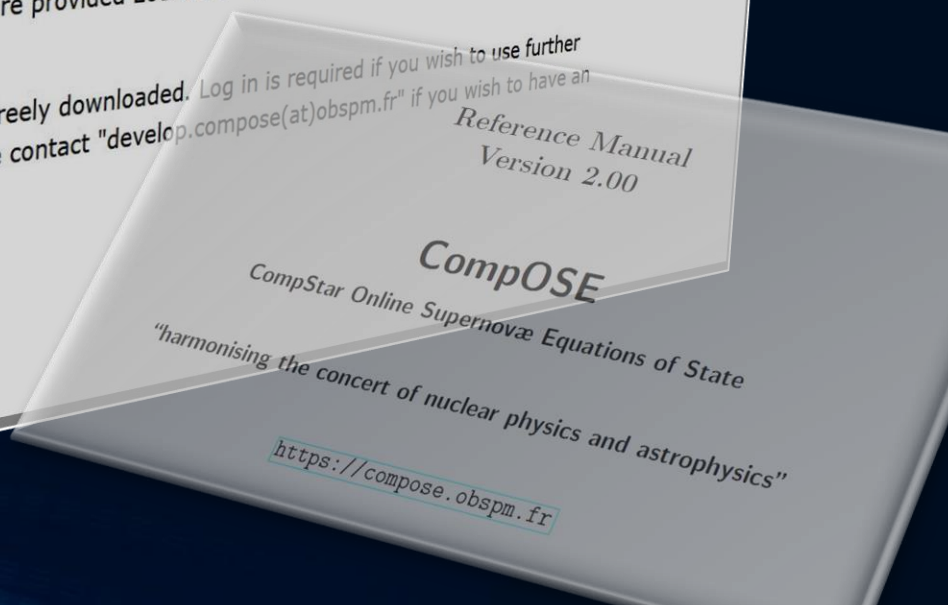


The online service CompOSE provides data tables for different state of the art equations of state (EoS) ready for further usage in astrophysical applications, nuclear physics and beyond.

The cold neutron star EoS tables can be used directly within LORENE to obtain models of (rotating/magnetised) neutron stars, see the eos_compose class.

If you decide to publish work using one or more of the here provided EoS we ask you to cite the given references and would be happy if you acknowledge CompOSE.

Data tables, associated software and the manual can be freely downloaded. Log in is required if you wish to use further utilities, such as graphics and online computations. Please contact "develop.compose(at)obspm.fr" if you wish to have an account.



<https://compose.obspm.fr>

Dr.phil.nat. Dr.rer.pol. [Matthias Hanauske](#)

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

[Einführung](#)

[Teil I: Analytische Berechnungen und numerische Simulationen in Maple](#)

[Teil II: Paralleles Programmieren mit C++ und OpenMP/MPI](#)

[Teil III: Computersimulationen mit dem Einstein-Toolkit](#)

[Aufgaben](#)

Aufgaben im Kurs allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer

Aufgaben im Teil I: Analytische Berechnungen und numerische Simulationen in Maple

[Berechnung von Christoffelsymbolen der Schwarzschild-Metrik](#)

[Berechnung des Riemann Tensors der Schwarzschild-Metrik](#)

[Probekörper fällt radial in ein nichtrotierendes schwarzes Loch](#)

[Geodätische Bewegung eines Probekörpers um ein nichtrotierendes schwarzes Loch](#)

[Radialer Wurf eines Probekörpers in der Nähe eines nichtrotierenden schwarzen Lochs](#)

[Berechnung eines Neutronensterns](#)

[Berechnung eines Weißen Zwergs](#)