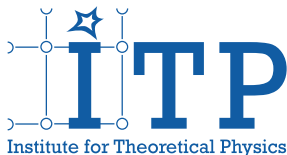


Einsteins Gravitationswellen: von Atomkernen und Neutronensternen

Hendrik van Hees

Goethe University Frankfurt

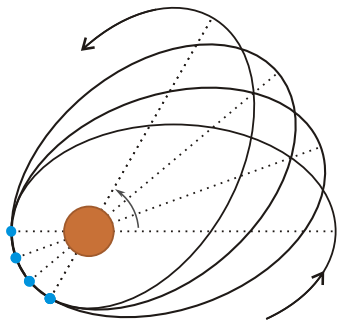
05. Dezember 2018



- 1 Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie
- 2 Schwarze Löcher und Gravitationswellen
- 3 Kollidierende Neutronensterne und Kernphysik

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

- Ausgangspunkt: Alle Körper fallen gleich schnell
- **Äquivalenz von träger und schwerer Masse**
- Relativitätstheorie \Rightarrow Gravitation = **Krümmung der Raumzeit**
- Energie-Verteilung \Leftrightarrow Krümmung der Raumzeit
- Krümmung der Raumzeit \Leftrightarrow Bewegung frei fallender (Himmels-)Körper

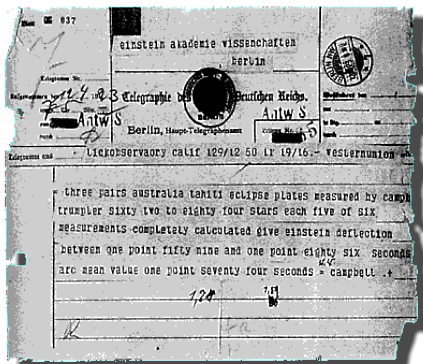
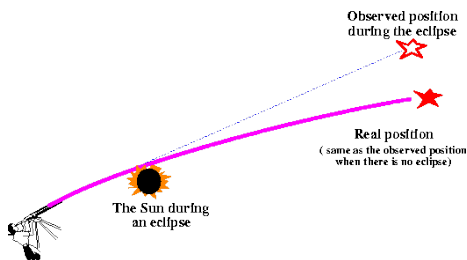


- **Newton:** Bahnkurven der Planeten geschlossene Ellipsen
- **Einstein:** Perihel (sonnennächster Punkt) dreht sich
- bekannt für Merkur seit 19. Jh.
43" pro Jahrhundert!

[Wikipedia: Von Stündle and Mpfiz - File:Perihelion precession.svg (PD), CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14536622>]

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

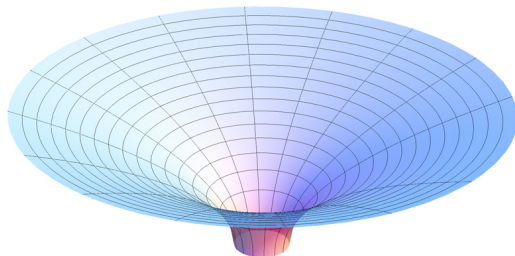
- **Lichtablenkung** durch Gravitation



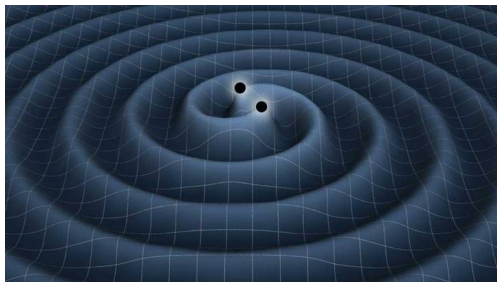
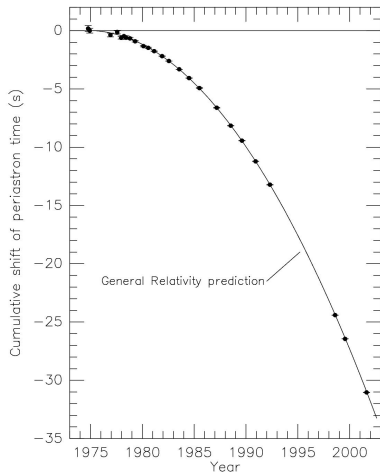
- **Lichtablenkung an Sonne** um $1,75''$
- zuerst von Eddington nachgewiesen (1919)
- **ART korrekt** \Rightarrow Einstein „1. Popstar der Physik“

Schwarze Löcher

- 1916: **Karl Schwarzschild**: Lösung der Einsteingleichungen für rotationssymmetrische Massenverteilung
- **Ereignishorizont**: Radius um Masse, ab dem nichts mehr der Gravitationsanziehung entkommt
- **auch nicht das Licht!**



[Wikipedia: Von AllenMcC. - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3871398>]

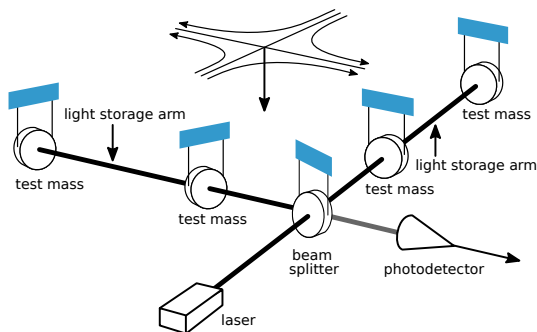


[Quelle: NASA]

- Vorhersage der ART (Einstein 1916):
umkreisende Doppelsternsysteme
senden Gravitationswellen aus
- verlieren Energie
⇒ **Umlaufzeiten werden kürzer**
- Nobelpreis 1993 für Hulse und Taylor

Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

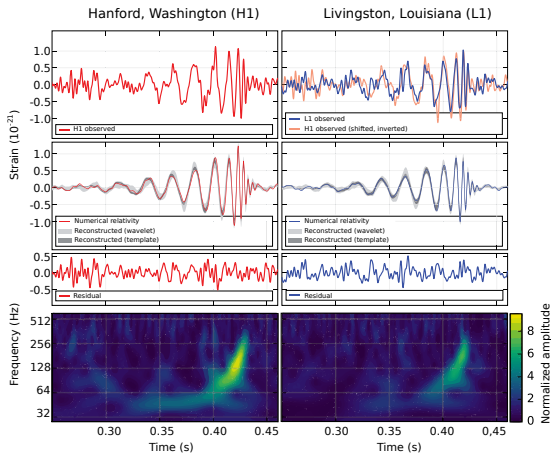
- 14. September 2015:
erster direkter **Nachweis eines Gravitationswellensignals!**
- zwei Detektoren der LIGO-Kollaboration
- Gravitationswelle bringt Probemassen zum Schwingen
- Nachweis durch Lichtschwankungen im Photodetektor
- Nobelpreis 2017 an Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish



[Wikipedia: Von Ligo.gif: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18325956>]

Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

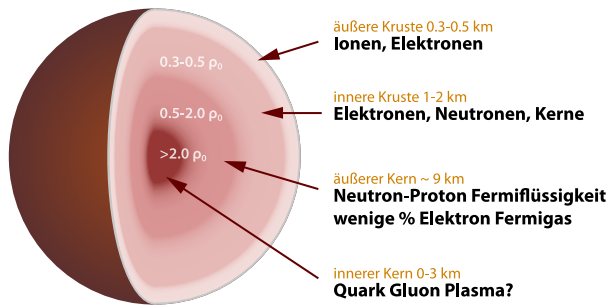
- Quelle: zwei umkreisende schwarze Löcher
- strahlen Gravitationswellen ab
- am Ende **Zusammenprall und Vereinigung**
- Rest: **neues schwarzes Loch**



[Wikipedia: Von B. P. Abbott et al. (LIGO and Virgo Coll.) <http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>]

Neutronensterne

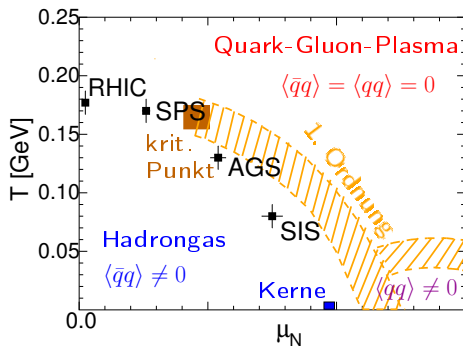
- Sterne (z.B. Sonne):
stabil durch Balance zwischen **Gravitation und Gasdruck**
- Energieproduktion durch **Kernfusion**
- produziert schwere Atomkerne bis zum Eisen
- wenn „Brennstoff“ verbraucht: Kollaps
- in bestimmtem Massenbereich: **Neutronenstern** (Dichte $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{kg/m}^3$!)



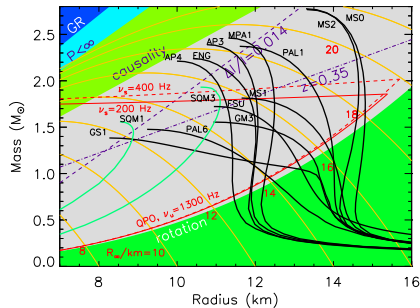
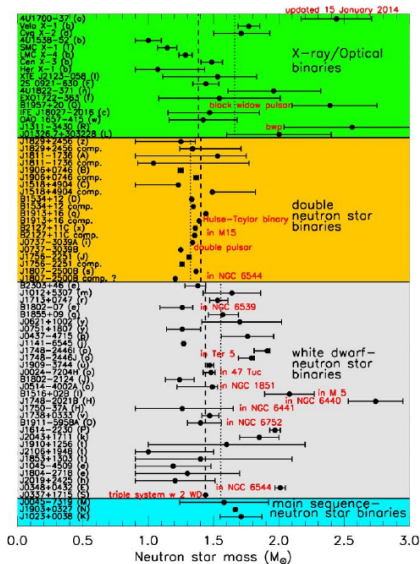
[Wikipedia: Von Robert Schulze - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11364464>]

Neutronensterne

- **Masse-Radius-Beziehung** \Leftrightarrow **Zustandsgleichung der Kernmaterie**
- im Labor: relativistische Kollisionen von **Atomkernen** bei LHC am CERN, RHIC auf Long Island, GSI/FAIR in Darmstadt
- **Quarks und Gluonen**: elementare Bestandteile von Proton und Neutron



Neutronensterne



- mögliche Neutronsterne \leftrightarrow Zustandsgl. Kernmaterie
- Berechnungen: ART + Zustandsgleichung!

Neutronensternkollisionen

- 17.08.2017: Gravitationswellen von **Neutronensternkollision** („Kilonova“)
- Quelle konnte lokalisiert werden
- auch **elektromagnetische Wellen** (Licht, Röntgen-, γ -Strahlen)
- „Multimessenger Astronomy“
 - neuer Blick ins Universum
 - Gravitationswellensignal \Leftrightarrow **sensitiv aus Zustandsgleichung der Kernmaterie**
 - Kilonovae \Rightarrow Quellen von hochenergetischen „Röntgenblitzen (γ Ray Bursts)“
 - Produktion der **schweren Elemente > Eisen**, z.B. Gold
 - wird an der Goethe-Uni **interdisziplinär erforscht!**



[Wikipedia: Von University of Warwick/Mark Garlick, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63436916>]

- Einsteins Gravitationswellen aus Kollisionen von schwarzen Löchern und/oder **Neutronensternen**
- Multimessenger Astronomie
 - Hochpräzisionstests der ART bei **starken Gravitationsfeldern**
 - **neue Einsichten über Zustandsgleichung der Kernmaterie**
 - Erklärung für „ **γ -ray bursts**“
 - Neutronensternkollisionen („Kilonovae“) Quellen der schweren Elemente
 - hochaktuelles **internationales Forschungsgebiet**
 - **interdisziplinär** zwischen Astronomie, Gravitations-, Kern- und Teilchenphysik
- **Goethe-Uni:**
Theoretische Kern- und Astrophysik; experimentelle Kern-/Schwerionenphysik
- Weblinks an der GU
 - [Institut für Theoretische Physik](#)
 - [CRC-TR 211](#)
 - [Astro-Physik@GU](#)
 - [Experimentelle Astro-Physik](#)
 - [Institut für Kernphysik](#)