

Kerne, Sterne und Gravitationswellen

Hendrik van Hees

Goethe-Universität Frankfurt

29. Juni 2023



Outline

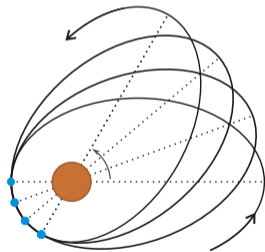
Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

Schwarze Löcher und Gravitationswellen

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

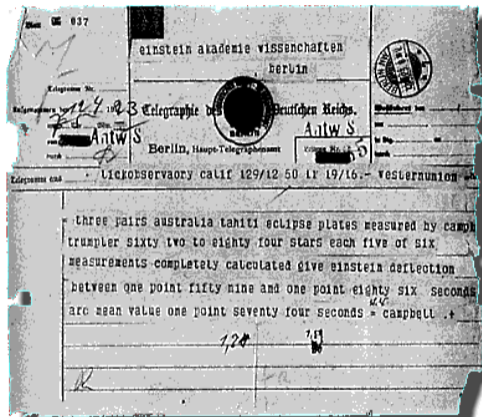
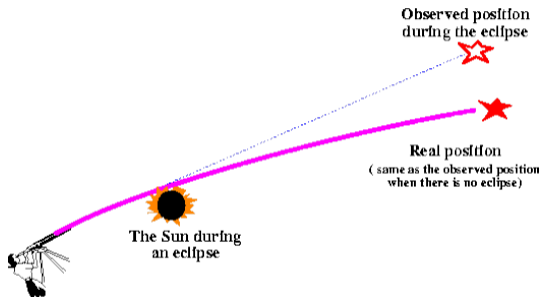


- ▶ **Newton:** Bahnkurven der Planeten geschlossene Ellipsen
- ▶ **Einstein:** Perihel (sonnennächster Punkt) dreht sich
- ▶ bekannt für Merkur seit 19. Jh.: **43" pro Jahrhundert!**

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

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

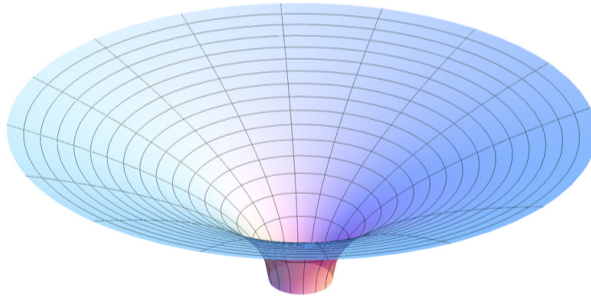
► Lichtablenkung durch Gravitation



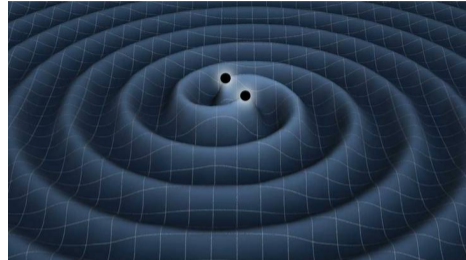
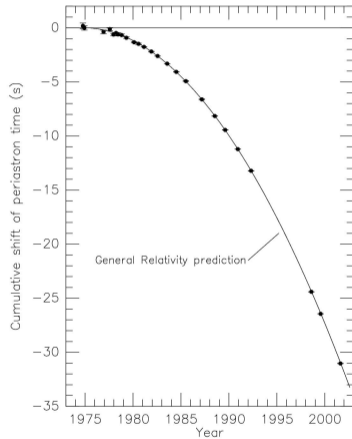
- Lichtablenkung an Sonne um 1,75"
- zuerst von Eddington nachgewiesen (1919)
- ART korrekt \Rightarrow Einstein „1. Popstar der Physik“

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!**



Gravitationswellen

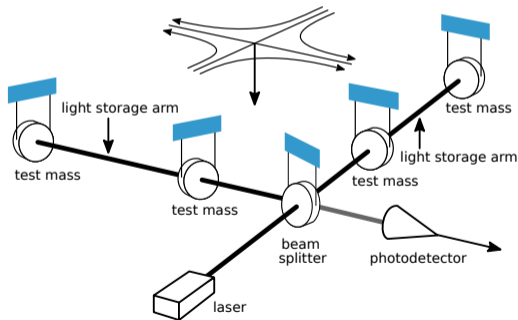


[Quelle: NASA]

- ▶ 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

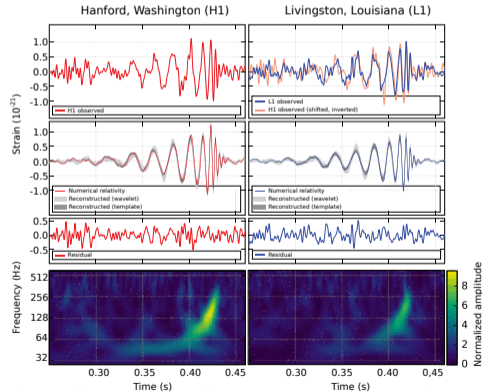
- ▶ 14. September 2015: erster direkter **Nachweis eines Gravitationswellensignals!**
- ▶ zwei Detektoren der LIGO-Kollaboration
- ▶ Gravitationswelle bringt Probmassen zum Schwingen
- ▶ Nachweis durch Lichtschwankungen im Photodetektor
- ▶ Nobelpreis 2017 an Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish



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

Breakthrough: Direkter Nachweis von Gravitationswellen

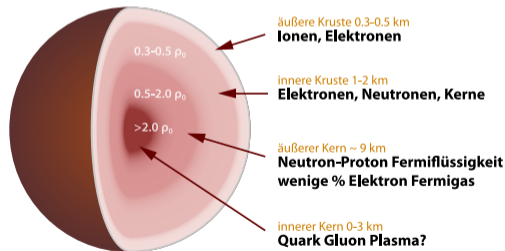
- ▶ Quelle: zwei umkreisende schwarze Löcher
- ▶ strahlen Gravitationswellen ab
- ▶ am Ende **Zusammenprall und Vereinigung**
- ▶ Rest: **neues schwarzes Loch**



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

Neutronensterne

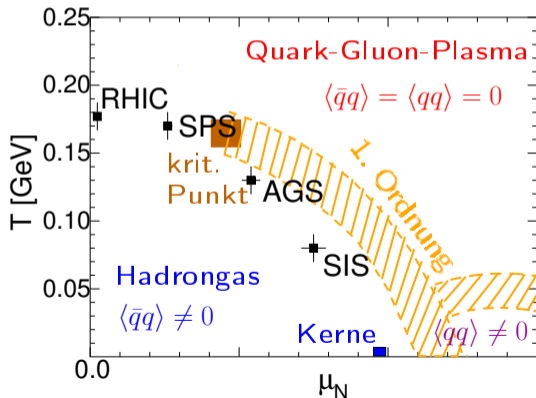
- ▶ Sterne (z.B. Sonne):
stabil durch Balance zwischen **Gravitation und Gasdruck**
- ▶ Energieproduktion durch **Kernfusion**
- ▶ produziert schwere Atomkerne bis zum Eisen
- ▶ wenn „Brennstoff“ verbraucht: Kollaps
- ▶ in bestimmtem Massenbereich: **Neutronenstern** (Dichte $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{kg/m}^3!$)



[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: $\rho = \rho(P)$
- ▶ 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



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>]

Zusammenfassung

- ▶ 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
- ▶ **Institut für Theoretische Physik der Goethe-Universität:**
Theoretische Kern- und Astrophysik; experimentelle Kern-/Schwerionenphysik
(+ Physik der kondensierten Materie)
- ▶ Weblinks an der GU bzgl. Teilchen-, Kern- und Astrophysik
 - ▶ **Institut für Theoretische Physik**
 - ▶ **CRC-TR 211**
 - ▶ **Astro-Physik@GU**
 - ▶ **Experimentelle Astro-Physik**
 - ▶ **Institut für Kernphysik**