

# Gravitationswellen

Von Lars Bockelmann

# Inhalt

## 1. Geschichte der Erforschung von Gravitationswellen

- 1.1 Einstein sagt mithilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie Gravitationswellen voraus (1916)
- 1.2 Indirekter Nachweis von Gravitationswellen (1993)
- 1.3 Erste Messung von Gravitationswellen (2015)
- 1.4 Erste Messung von Gravitationswellen zusammen mit anderen Wellen vom gleichen Ereignis (2017)

## 2. Neutronensterne

- 2.1 Pulsare in Doppelsternsystemen zum Nachweis von Gravitationswellen

## 3. Gravitationswellen und deren Funktionsweise

- 3.1 Entstehung von Gravitationswellen
- 3.2 Direkter Nachweis von Gravitationswellen (LIGO, VIRGO)
- 3.3 Pulsar Timing Array
- 3.4 Ausblick zur Gravitationswellenforschung

## 4. Multi Messenger Astronomie und deren Auswirkungen

# Inhalt

## 5. Quellennachweise

### 5.1 Textnachweise

### 5.2 Bildnachweise

# Einstein sagt mithilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie Gravitationswellen voraus

- Albert Einstein behauptete 1916 im Zuge seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), dass die Beschleunigung massereicher Objekte Gravitationswellen erzeugt.
- Das ist vergleichbar mit einem Stein, der ins Wasser geworfen wird und Wellen erzeugt. Gravitationswellen strecken und stauchen die Raumzeit.
- Einstein zweifelte aber aufgrund der vom ihm berechneten Schwäche dieser Wellen selbst daran, dass diese Gravitationswellen jemals aufzuspüren wären.

# Erster indirekter Nachweis der Gravitationswellen

- 1974 wurde in einem Suchprogramm der Pulsar PSR B1913+16 von Russell Hulse und seinem Doktorvater Joseph Taylor gefunden. Dieser wies eine für damalige Zeit extrem kurze Rotationszeit von 59 ms auf und wurde als Teil eines Doppelneutronensternsystems mit einer Umlaufdauer von acht Stunden erkannt.
- Diese extremen und bis dahin einzigartigen Bedingungen boten sich als Test für die Existenz von Gravitationswellen und damit auch der Richtigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie an.
- Sie besagt nämlich, dass dieses Doppelsternsystem Gravitationswellen abgeben muss, die Energie aus seiner Bewegung nehmen, und somit müssen sich die beiden Neutronensterne immer näher kommen und schließlich miteinander kollidieren.

# Erster indirekter Nachweis von Gravitationswellen (2)

- Da diese Annäherung eine messbare Verkürzung in der Umlaufperiode zu Folge hätte, wurde nach einer solchen gesucht.
- Bereits nach ca. 5 Jahren wurde klar, dass die beobachtete Verkürzung mit der aus der ART errechneten nahezu exakt übereinstimmt. Somit wurde Einsteins Theorie, und damit auch indirekt die Existenz von Gravitationswellen bestätigt.
- Für diese Entdeckung wurde Taylor und Hulse 1993 der Nobelpreis für Physik verliehen.

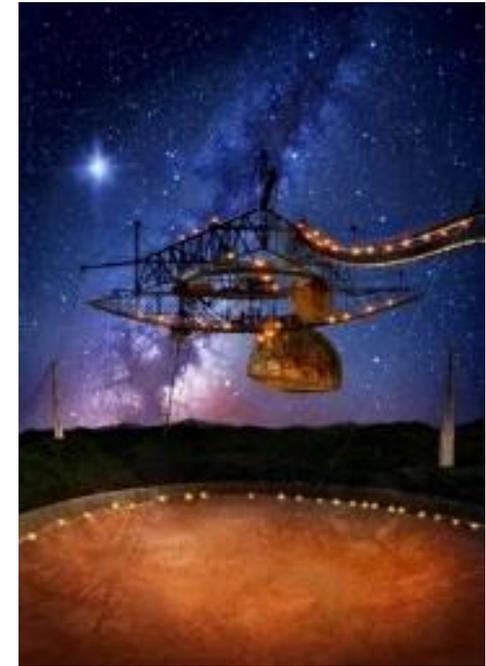


Abb.1: Das Arecibo Teleskop, mit dem PSR B1913+16 gefunden wurde

# Erster Nachweis von Gravitationswellen

- Am 14. September 2015 wurden mithilfe der beiden LIGO Observatorien (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, siehe 3.1), die in Hanford, Washington und Livingstone, Louisiana (beide USA) stehen, erstmals Gravitationswellen von der Kollision zweier Schwarzer Löcher nachgewiesen.
- Nach langer Prüfung der Ergebnisse wurden die Resultate der Messungen schließlich am 11.2.2016 veröffentlicht.
- Diese erste Messung von Gravitationswellen belegte erneut Einsteins Relativitätstheorie und bestätigte den indirekten Nachweis von Russell Hulse und Joseph Taylor.

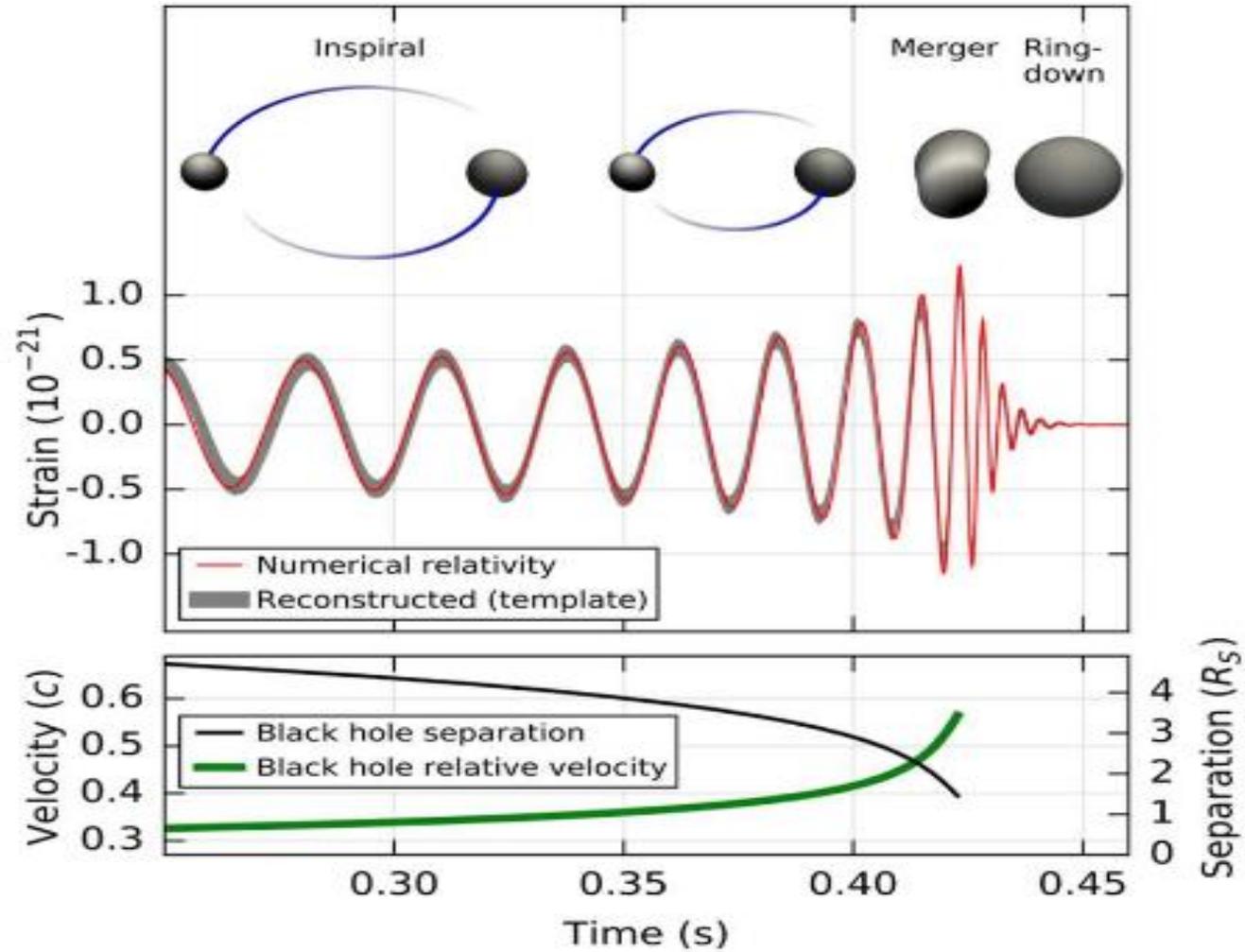


Abb.2.: Vergleich der Messdaten der beiden LIGOs mit dem Ablauf der Verschmelzung der beiden Schwarzen Löcher sowie mit einer mithilfe von Einsteins Feldgleichungen berechneten Kurve

# Erste Messung von Gravitationswellen zusammen mit anderen Wellen

- Am 17 August 2017 wurden, diesmal von drei Observatorien (den beiden LIGO-Detektoren sowie dem Italienischen Virgo-Detektor) Gravitationswellen gemessen, die von der Fusion zweier Neutronensterne ausgingen. Durch den Einsatz von drei separaten Messanlagen, war es möglich, die Position der Gravitationswellen am Himmel deutlich genauer als noch zuvor zu berechnen.
- Die Besonderheit dieser Messung lag allerdings darin, dass man in diesem Fall auch andere Signale derselben Quelle (bspw. elektromagnetische Wellen) von diesem Ereignis beobachten konnte (siehe 4). So empfing bspw. das Fermi-Weltraumteleskop Gammastrahlen, die von diesem Ereignis ausgingen.
- „Für entscheidende Beiträge zum LIGO-Detektor und die Beobachtung von Gravitationswellen“ erhielten Kip Thorne, Rainer Weiss und Barry Barish den Nobelpreis für Physik 2017, da sie tragende Rollen bei der Entdeckung dieser Gravitationswellen hatten, allerdings bestand die gesamte Forschergruppe, die daran beteiligt war, aus mehr als Tausend Mitarbeitern.

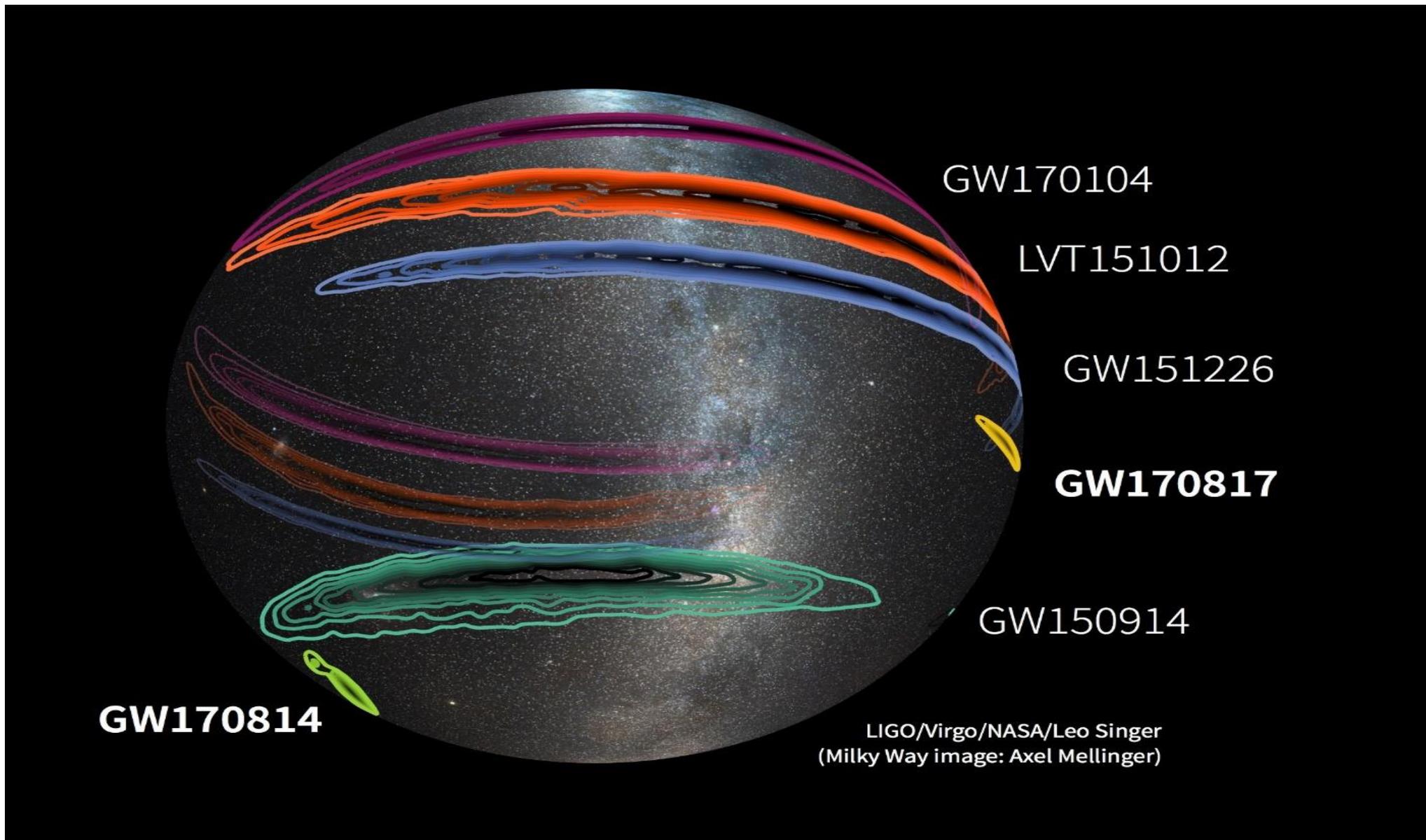


Abb.3.: Durch den Einsatz von drei Messgeräten lässt sich die Herkunft der Gravitationswellen viel besser eingrenzen (GW170814 und GW170817 von drei Messgeräten, die anderen jeweils von zwei Messgeräten)

# Pulsare in Doppelsternsystemen zum Nachweis von Gravitationswellen

- Sowie andere Sterne auch können sich Neutronensterne in einem binären Sternsystem befinden.
- Wenn das der Fall ist, kann es dazu dienen, die Relativitätstheorie unter extremen Bedingungen nachzuweisen, wie es in keinem Labor auf der Erde möglich wäre.
- Diese besagt nämlich, dass Energie aus ihrer Umlaufbewegung als Gravitationswellen abgegeben wird, und sie sich deshalb immer näher kommen müssen.
- Für die Untersuchung eines solchen binären Neutronensternsystems und dadurch die erneute Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie erhielten Russell Hulse und Joseph Taylor 1993 den Nobelpreis für Physik (siehe 1.2).
- Mithilfe von diesen Sternsystemen kann man auch noch verschiedene andere Vorhersagen der ART nachweisen.

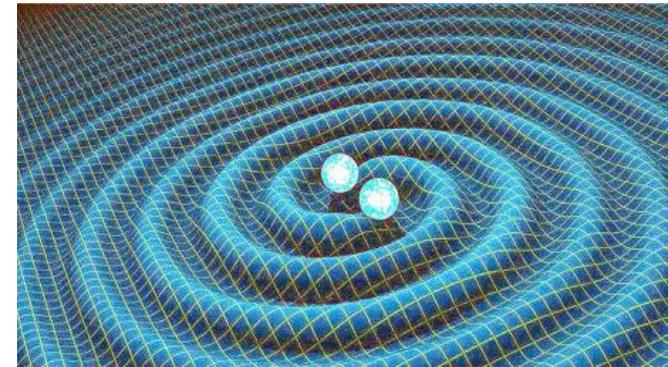


Abb. 5: Darstellung eines binären Neutronensternsystems und der aus ihrer Bewegung hervorgehenden Gravitationswellen

# Entdeckung von Pulsaren

- Am 6. August 1967 entdeckten die Doktorandin Jocelyn Bell und ihr Doktorvater Antony Hewish, während sie auf der Suche nach Radioquellen waren, eine in ungewöhnlich regelmäßigen Abständen auftretende Strahlung. Wie sich dann später herausstellte, wurde sie nicht etwa von einer außerirdischen Lebensform gesendet (daher auch der halb scherzhafte erste Name „Little Green Man 1“). Als Name wurde Pulsar gewählt, die Abkürzung für „Pulsating Star“.
- Thomas Gold vermutete als erster hinter dieser Erscheinung einen rotierenden Neutronenstern, seine Idee wurde aber zunächst als zu abwegig abgestempelt
- Antony Hewish erhielt für die Entdeckung 1967 den Nobelpreis für Physik, seine an dieser Arbeit maßgeblich beteiligte Doktorandin wurde allerdings außen vor gelassen.



Abb.4: Jocelyn Bell und Antony Hewish (v. links)

# Funktionsweise von Pulsaren

- Pulsare sind sich extrem schnell drehende Neutronensterne.
- Durch das starke Magnetfeld eines Pulsars werden die von dem Neutronenstern abgegebenen Strahlen und Partikel sehr stark gebündelt als sog. Jets in entgegengesetzten Richtungen abgestrahlt (siehe Abb. 5.)
- Aufgrund der Drehung des Pulsars scheint er für Betrachter von der Erde aus zu „pulsieren“. Ein Signal ist nur dann zu sehen wenn einer dieser Jets auf uns gerichtet ist.

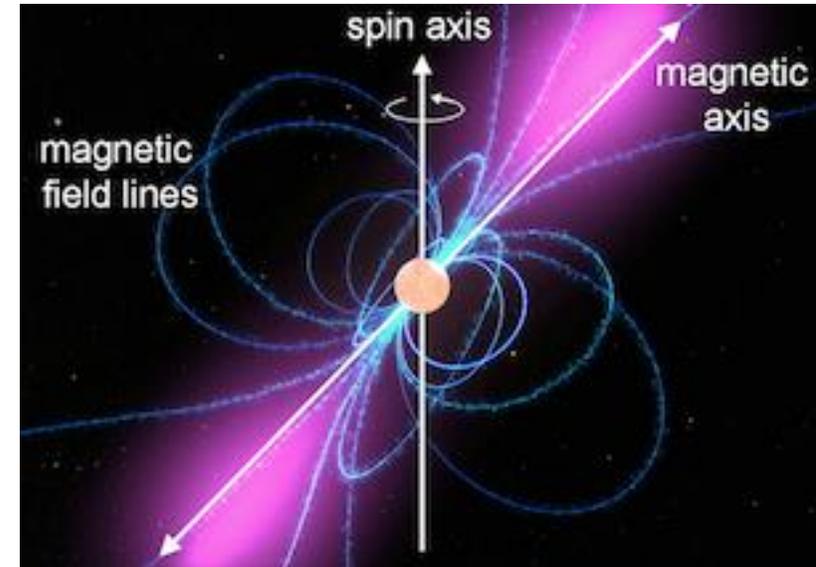
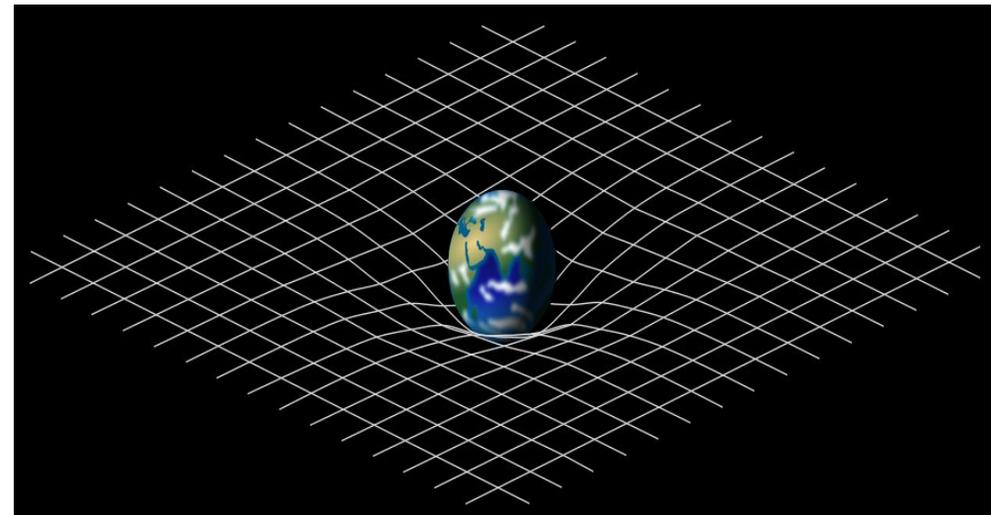


Abb. 5: Ein Pulsar, sein Magnetfeld und die daraus resultierenden Jets (von NASA)

# Entstehung von Gravitationswellen

- Gravitationswellen sind Krümmungen in der Raumzeit, die durch sich enorm schnell bewegende Objekte (bspw. umeinander rotierende Neutronensterne) hervorgerufen werden und sich mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen ausbreiten.
- Dieses Phänomen ist vergleichbar mit den Wellen, die entstehen, wenn man einen Stein ins Wasser wirft.
- Gravitationswellen strecken und stauchen die Raumzeit.

Abb.6.: Modell der Krümmung der Raumzeit durch die Erde



# Direkter Nachweis von Gravitationswellen

- Um Gravitationswellen direkt zu messen, benötigt man enorm präzise Instrumente.
- Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen gelang den beiden LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)-Stationen in Hanford und Livingstone in den USA (siehe 1.3).
- Diese Messgeräte weisen Veränderungen nach, die kleiner als ein Tausendstel eines Protons sind, damit sie die Auswirkungen der Gravitationswellen erfassen können.
- Um einen falschen Alarm zu vermeiden, korrigieren die LIGO-Observatorien eine Reihe von Außeneinflüssen wie bspw. Erdbeben, nahegelegene Zugstrecken etc., die ähnliche Effekte wie Gravitationswellen hervorrufen könnten.

# Funktionsweise von LIGO

- Jedes der LIGO-Observatorien hat zwei ca. 4 km lange Arme, die in einem 90° Winkel zueinander stehen.
- Ein ungemein präziser Laserstrahl wird aufgespalten und durch diese beiden Arme gesendet, und an ihrem Ende von Spiegeln zurückgeworfen, danach werden sie wieder zusammengefügt. Dabei entsteht ein, unter normalen Umständen, gleichbleibendes Überlagerungsmuster der beiden Laser.
- Um den Laser möglichst ungestört durch die LIGO-Arme verlaufen zu lassen, wurde in den Laufstrecken das weltweit größte Vakuum erschaffen.
- Wenn eine Gravitationswelle das LIGO-Observatorium erfasst, wird der räumliche Abstand zwischen den Spiegeln gestreckt bzw. gestaucht, und durch die Veränderung in ihrem Überlagerungsmuster kann man auf die Gravitationswelle und deren Beschaffenheit schließen.
- Durch die Reihenfolge, in denen die Observatorien anschlagen, kann man die Richtung der Gravitationswellen bestimmen. Durch die Hinzunahme des VIRGO-Observatoriums wurde diese Bestimmung deutlich genauer als zuvor mit den beiden LIGO-Observatorien alleine (siehe Abb. 3).

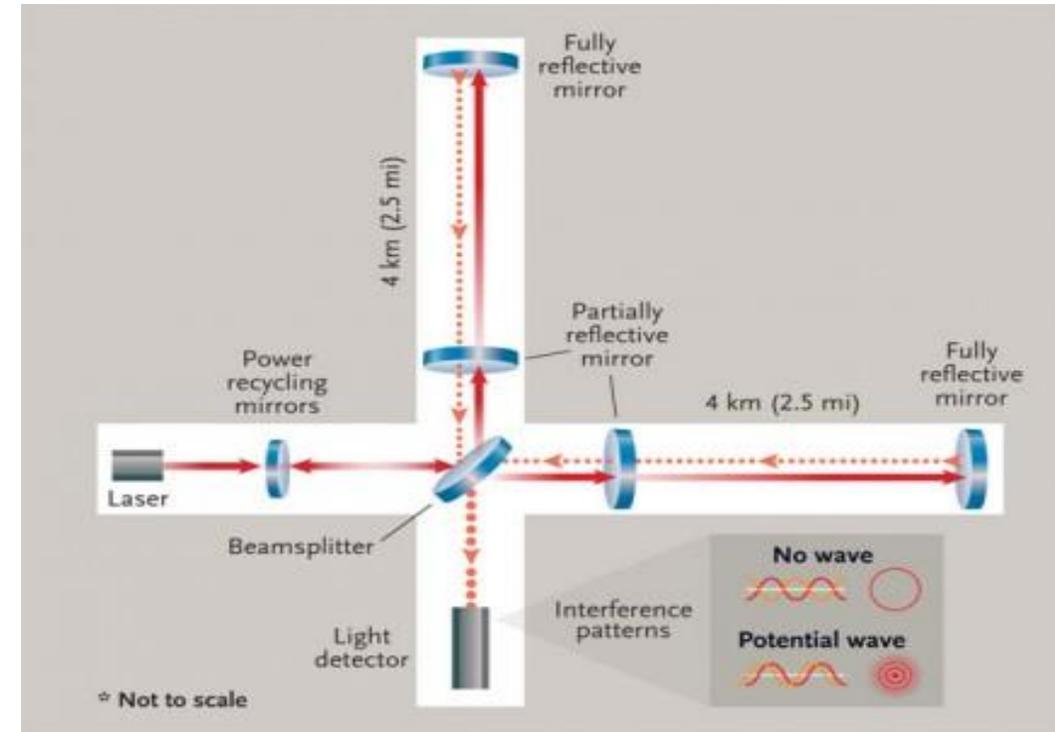
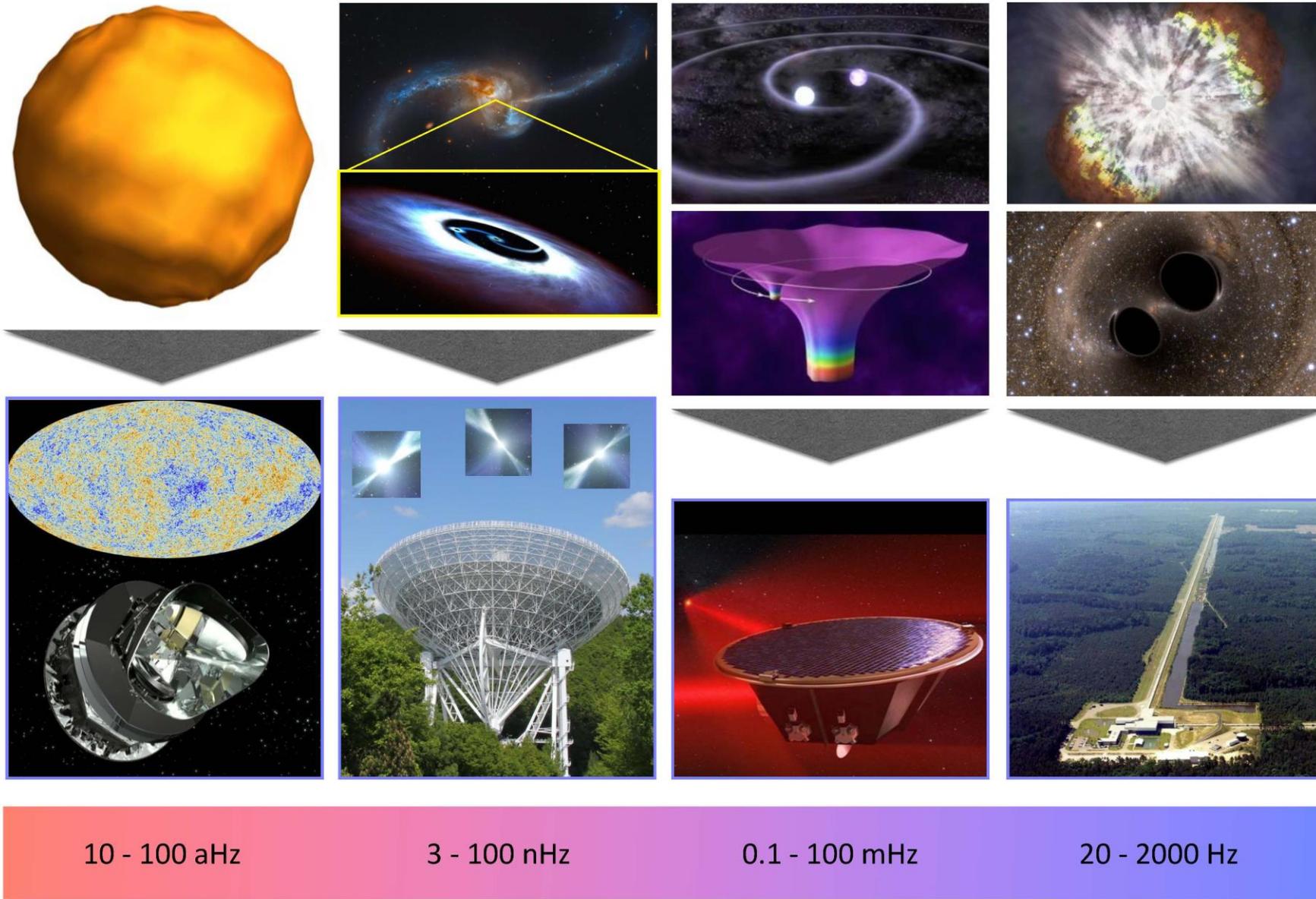


Abb.7: Schematische Abbildung eines der LIGO-Observatorien

# Exploring the Gravitational Wave Spectrum



← Quellen für Gravitationswellen

← Detektoren

← Frequenzbereich

Abb. 8: Das Gravitationswellenspektrum.

# Pulsar Timing Array

- Ein weiterer Weg, Gravitationswellen zu entdecken, sind die sog. Pulsar Timing Arrays.
- Ein Pulsar Timing Array ist eine Kombination aus mehreren Radioteleskopen, die die Ankunftszeiten der Radiopulse von ca. 30 Millisekunden-Pulsaren durch Auswerten der von ihnen ausgesendeten Radiowellen systematisch überwachen.
- Durch die Streckung und Stauchung der Raumzeit durch eine Gravitationswelle, würde sich die Ankunftszeit der Radiopulse ändern, wenn auch äußerst minimal.
- Indem man diese Änderung in der Ankunftszeit erfasst, können Gravitationswellen extrem niedriger Frequenz (Nanohertz-Bereich, siehe Abb. 8) sowie deren Ausbreitungsrichtung erfasst werden.



Abb. 9: Logo des European Pulsar Timing Arrays (EPTA)

# Ausblick zur Gravitationswellenforschung

- Die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) plant 2034 ein Gravitationswellen-Observatorium in den Weltraum zu schicken, um von dort aus deutlich langwelligere Gravitationswellen zu erfassen als mit LIGO.
- Dieses LISA (Laser Interferometer Space Antenna) wird, im Gegensatz zu den LIGO-Observatorium, drei anstatt zwei Messarme haben, die in Form eines gleichschenkligen Dreiecks angebracht werden sollen und jeweils 2,5 Millionen Kilometer lang sind.
- Um diese Armlänge zu verwirklichen, will die ESA drei Satelliten in den Orbit schicken, die jeweils mit zwei starken Lasern ausgestattet sind, die auf die restlichen beiden Satelliten zeigen.

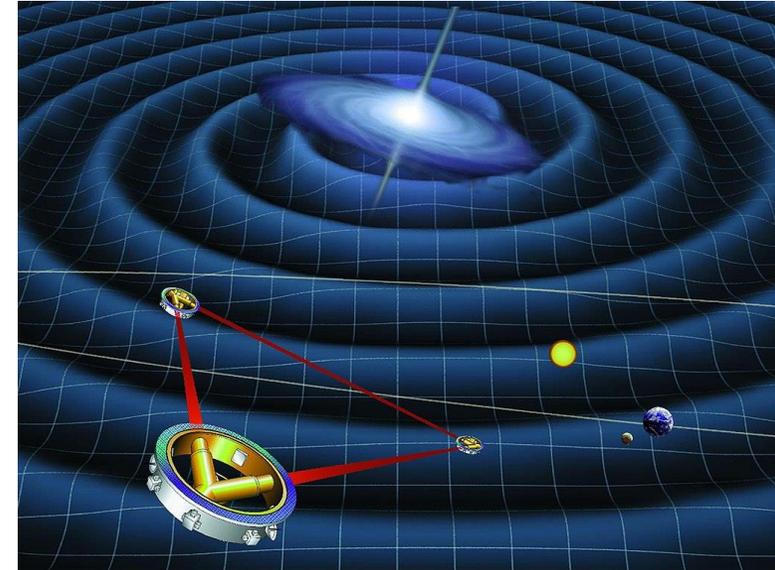


Abb. 10: Illustration des LISA-Observatoriums beim Messen von Gravitationswellen

# Multi-Messenger Astronomie und deren Auswirkungen

- Multi-Messenger Astronomie bedeutet, dass man dasselbe astronomische Phänomen durch vielfältige Botschafter aus dem Kosmos erfasst (Elektromagnetische Wellen, Gravitationswellen, Teilchenastronomie).
- Durch Multi-Messenger Astronomie wird es möglich, ein Phänomen viel tiefergehender zu betrachten und neue Erkenntnisse zu gewinnen. So war es durch die Multi-Messenger Beobachtung der eben genannten Neutronensternkollision möglich, etwas über die Herkunft von Elementen schwerer als Eisen in unserem Universum herauszufinden.
- Viele Wissenschaftler vergleichen die Fähigkeit, etwas mithilfe der Multi-Messenger Astronomie zu betrachten, damit, dass man als vorher Tauber, nun nicht nur sehend sondern auch hörend die Welt erkunden kann.

# Weiterführende Links

[LIGO-Website](#)

[VIRGO-Website](#)

[Geo600-Website \(Deutsches Gravitationswellen-Observatorium\)](#)

[Albert Einstein Institut \(Betreiber des Geo600\)](#)

[LISA-Website \(NASA\)](#)

[LISA-Science-Website](#)

[EPTA-Website \(European Pulsar Timing Array\)](#)

[IPTA-Website \(International Pulsar Timing Array\)](#)

# Bildnachweise

Abb. 1: Shutterstock.com, Foto von Brian Irwin, Dennis van de Water, Design von Danielle Futselaar ([www.artsource.nl](http://www.artsource.nl))

Abb. 2: LIGO.caltech.edu

Abb. 3: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer , Bild der Milchstraße : Axel Mellinger

Abb. 4: Hencoup Enterprise Ltd/SPL

Abb. 5: Foto von R. Hurt, dpa

Abb. 6: Bild von Wikipedia-Nutzer „Mysid“

Abb. 7: S&T : Leah Tiscione

Abb. 8: Zusammenstellung: Norbert Wex (Bilder: ESA, NASA, LIGO, MPIfR)

Abb. 9: EPTA.eu.org

Abb. 10: NASA

# Textquellen

[Wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave)

[Wikipedia.org/wiki/spacetime](https://de.wikipedia.org/wiki/spacetime)

[Wikipedia.org/wiki/pulsar\\_timing\\_array](https://de.wikipedia.org/wiki/pulsar_timing_array)

[Epta.eu.org](https://www.epta.eu.org)

[Independent.co.uk](https://www.independent.co.uk)

National Geographic

Youtube(The Absurdity of Detecting Gravitational Waves by User: Veritasium

Quarks & Co (WDR Serie)

[Wikipedia.org/wiki/Multi-messenger\\_astronomy](https://de.wikipedia.org/wiki/Multi-messenger_astronomy)

[Space.com](https://www.space.com)

Bild der Wissenschaft, Februar 2018

Sterne und Weltraum, 12/2017

[Spektrum.de](https://www.spektrum.de)

[Wikipedia.org/wiki/Jocelyn\\_Bell\\_Burnel](https://de.wikipedia.org/wiki/Jocelyn_Bell_Burnel)

[Web.de](https://www.web.de)