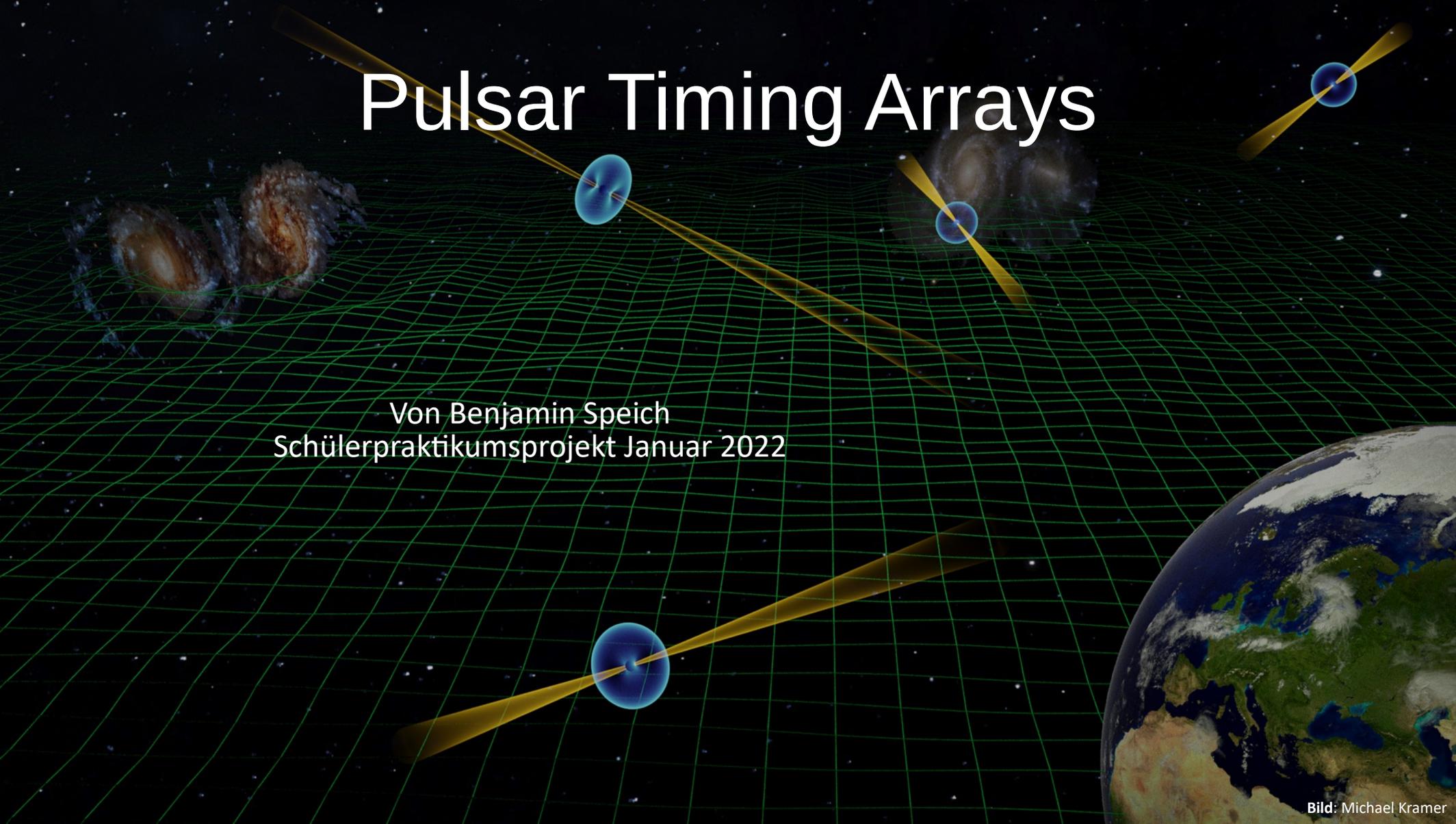


Pulsar Timing Arrays



Von Benjamin Speich
Schülerpraktikumsprojekt Januar 2022

Inhaltsangabe

- Pulsar Timing Arrays
- Gravitationswellen
 - Was wird gesucht?
 - Gravitationswellen im allgemeinen
 - Besonderheiten dieser Gravitationswellen im Nanohertzbereich
 - Warum sind Gravitationswellen so interessant für die Wissenschaft?
- Pulsare
- Was sind Pulsare?
- Pulsare - Leuchttürme des Universums
- Pulsar Timing Arrays (PTAs)
 - Funktionsweise eines Pulsar Timing Arrays

Pulsar Timing Arrays

- “Pulsar Timing Arrays“ sind Netzwerke von Radioteleskopen rund um die Welt, mit denen Pulsare beobachtet und analysiert werden, um Korrelationen in deren Pulsankunftszeiten zu finden.
- Dazu werden im wesentlichen Millisekunden-Pulsare genutzt, da diese nicht durch Sternbeben oder Akkretion im Takt ihrer Pulse gestört werden.
- In diesem Gebiet gibt es viele Forschungskollaborationen zwischen verschiedenen Radioteleskopen, wie das Nanograv, sowie die IPTA, EPTA, PPTA und InPTA-Programme.



Bild: International Pulsar Timing Array (IPTA)

Inhaltsangabe (2)

- Das rote Rauschen
- EPTA – Das European Pulsar Timing Array
- IPTA – Das International Pulsar Timing Array
- Ergebnisse der beiden Programme
- PTA zur Bestimmung der Masse von Planeten (1)
- PTA zur Bestimmung der Masse von Planeten (2)
- Mögliche Ursachen für den Gravitationswellen-Hintergrund
 - Theoretische Ursache für Graviationswellen-Hintergrund (1)
 - Theoretische Ursache für Graviationswellen-Hintergrund (2)
 - Theoretische Ursache für Graviationswellen-Hintergrund (3)
- Was wird die Zukunft bringen?

Was wird gesucht?

- Gesucht: der Gravitationswellen-Hintergrund.
- Er wird von der Relativitätstheorie vorhergesagt unter anderem als Folge der Umkreisung und Verschmelzung zwei supermassereichen Schwarzen Löchern. Dies passiert z.B., wenn zwei Galaxien miteinander verschmelzen.
- Die Gravitationswellen im Gravitationswellen-Hintergrund haben Frequenzen im Nanohertzbereich.
- So kann man sich aus der Formel $\lambda=c/f$ die Wellenlänge herleiten, die im Fall von Nanohertz-Wellen einige Lichtjahre beträgt. Dabei ist λ die Wellenlänge in Metern, c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit (hier: Lichtgeschwindigkeit in m/s) und f ist die Frequenz in Hertz

Exa	1.000.000.000.000.000.000	10^{18}
Peta	1.000.000.000.000.000	10^{15}
Tera	1.000.000.000.000	10^{12}
Giga	1.000.000.000	10^9
Mega	1.000.000	10^6
Kilo	1.000	10^3
	1	10^0
Milli	0,001	10^{-3}
Mikro	0,000.001	10^{-6}
Nano	0,000.000.001	10^{-9}
Pico	0,000.000.000.001	10^{-12}
Femto	0,000.000.000.000.001	10^{-15}
Atto	0,000.000.000.000.000.001	10^{-18}

Die Astronomie ist eine Wissenschaft der großen Zahlen.
Es kommt dabei leicht zu 10 oder mehr Dezimalen (Votameter: 10^{24} m oder 100 Millionen Lichtjahre).

Die Zusammenstellung der (griechischen) Bezeichnungen für die Dezimalstellen hilft bei der Einordnung (z.B. Megahertz, Nanometer, Petabyte, Attosekunden).

Größenordnungen

MPIfR
MPE
MPE

Bild: Norbert Junkes/MPIfR

Gravitationswellen

- Eine Gravitationswelle, auch Schwerkraftwelle genannt, ist eine Welle in der Raumzeit.
- Sie wird durch beschleunigte Massen ausgelöst.
- Gravitationswellen haben die Eigenschaft, dass sie die Raumzeit beim Durchlaufen verändern, wodurch Stauchungen und Streckungen hervorgerufen werden.
- Solche Gravitationswellen wurden zum ersten Mal im September 2015 von einer internationalen Kollaboration mit den LIGO-Observatorien gemessen.

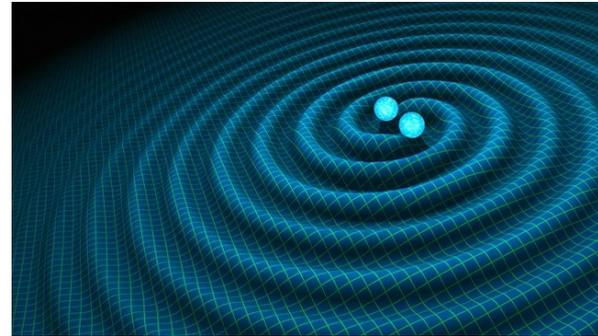


Bild: Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)

Besonderheiten der Gravitationswellen im Nanohertzbereich

- Der Gravitationswellen-Hintergrund ist dauerhaft messbar (Gravitationswellen sind in den LIGO-Daten nur für Sekundenbruchteile aufgetreten.)

Es handelt sich dabei um mehrere sich gegenseitig überlagernde Gravitationswellen.

- Aber hier auf der Erde ist es nicht möglich, diese Art von Gravitationswellen zu messen, aufgrund ihrer enormen Wellenlängen. Hier kommen die Pulsare ins Spiel.

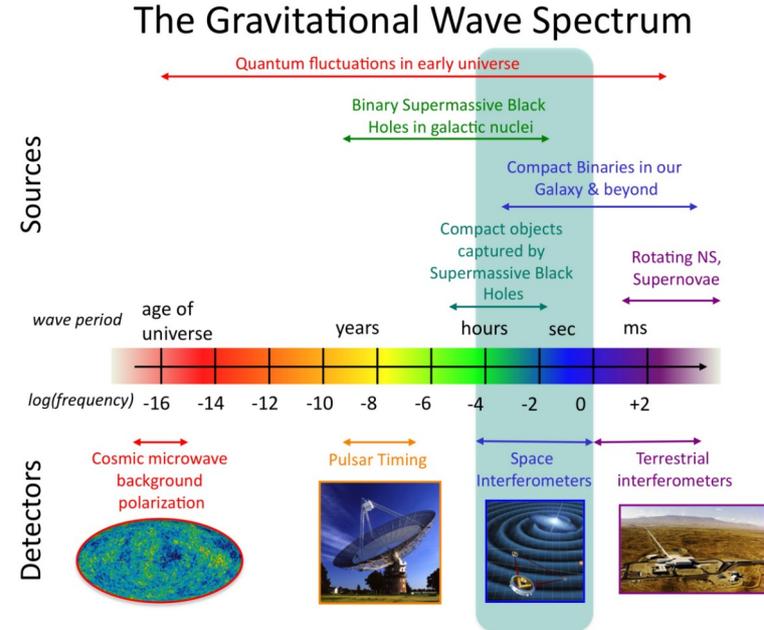


Bild: NASA (Wikipedia)

Warum sind Gravitationswellen so interessant für die Wissenschaft?

- Elektromagnetische Strahlung ist normalerweise die Quelle astronomischer Messungen. Nur führen viele verschiedene Prozesse zu einer Verunreinigung dieser Signale, wie Absorption, Diffusion und Dispersion.
- Gravitationswellen breiten sich dagegen ungehindert mit Lichtgeschwindigkeit aus und sind weniger Verunreinigungen ausgesetzt.
- Des Weiteren geben Gravitationswellen im Gegensatz zu den elektromagnetischen Wellen - bei der man etwas über den thermodynamischen Zustand der Materie erfahren kann - einen Einblick in die dynamischen und globalen Eigenschaften der Materie (Größe, Masse und Geschwindigkeit).
- Sie könnten einen Aufschluss geben auf Ereignisse kurz nach dem Urknall und die Verschmelzung der massereichsten schwarzen Löcher im Universum.

Was sind Pulsare

- Ein Pulsar ist der Überrest eines massereichen Sterns, der am Ende seines Lebenszyklus als Supernova explodiert ist, wobei der Kern aufgrund seiner enormen Masse auf ein extrem kleinen Volumen (ca. 20 Kilometer Durchmesser) komprimiert wurde. Er weist aber nach wie vor eine Masse von 1,3-2 Sonnenmassen auf. Dadurch besitzen die Neutronensterne eine enorme Dichte.

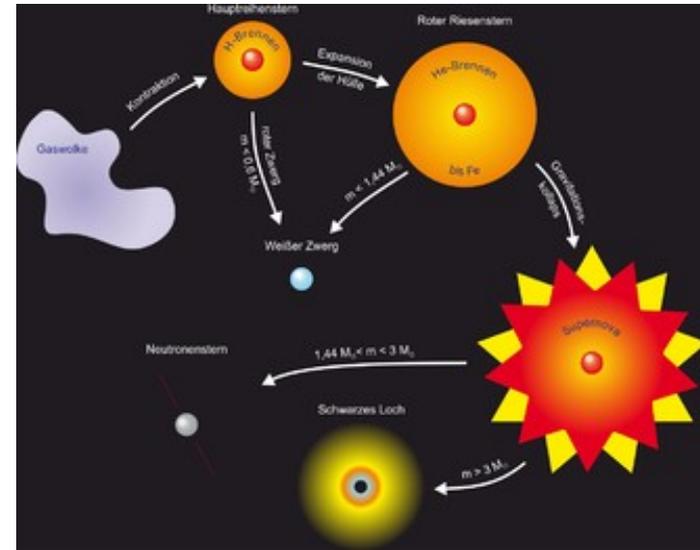


Bild: Wikipedia: Sterne (GNU Free Documentation License)

Pulsare - Leuchttürme des Universums

- Da der Drehimpuls des Sterns erhalten bleibt, dreht sich ein Pulsar in Sekunden oder Sekundenbruchteilen um die eigene Achse.
- Die Symmetrieachse des Magnetfeldes weicht von der Rotationsachse ab, wodurch die Pulsare an ihren Dipolachsen gebündelt elektromagnetische Strahlung abgeben.
- Wenn der Strahl die Erde trifft, empfängt man regelmäßig wie von einem Leuchtturm elektromagnetische Strahlung des Pulsars. Das führt zu einem extrem stabilen Rhythmus der Pulsarsignale.

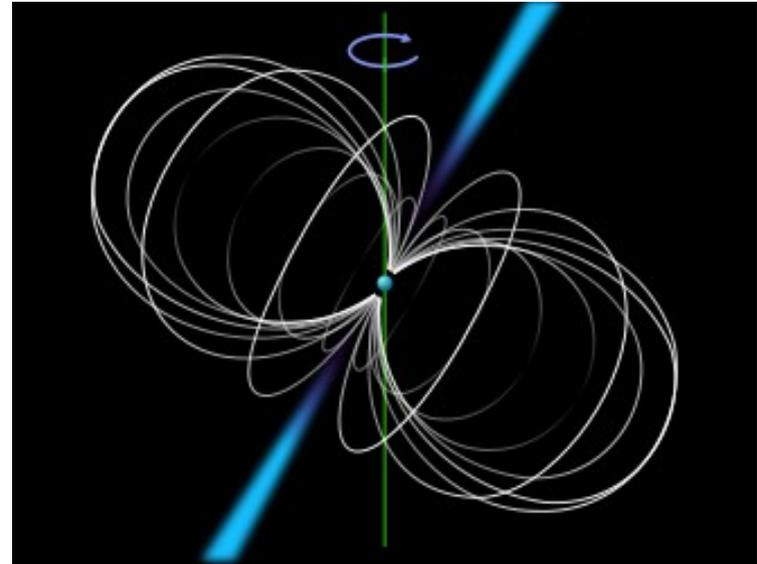


Bild: Wikipedia: Pulsare (GNU Free Documentation License)

Pulsar Timing Array - Funktionsweise

- Die Wissenschaftler messen regelmäßig eine Reihe von Pulsaren, die zwischen 3000 und 6000 Lichtjahren von der Erde entfernt sind.
- Der Gravitationswellen-Hintergrund streckt und staucht die Raumzeit, in der sich die elektromagnetische Strahlung auf ihrem Weg zur Erde bewegt. Dadurch kommt die Strahlung geringfügig verzögert oder beschleunigt an.
- Zusammengefasst: Mit Hilfe von Pulsaren wird ein Observatorium als Nachweis für Gravitationswellen im galaktischen Maßstab aufgebaut.
- Pulsare sind extrem genaue Zeitmesser; den Wissenschaftlern ist es möglich, diese Pulse mit einer Genauigkeit von millionstel Sekunden zu vermessen.

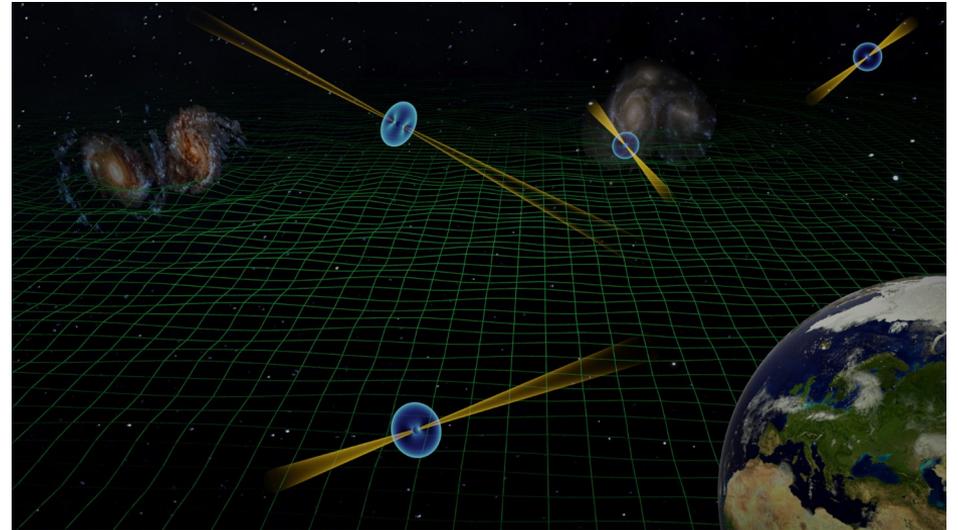


Bild: Michael Kramer/MPIfR

Das rote Rauschen

- Aus der Differenz zwischen theoretischen Vorhersagen für die Ankunftszeit eines Pulses (unter der Annahme, dass der Puls auf seinem Weg keiner Gravitationswelle ausgesetzt ist) und der experimentell tatsächlich gemessenen Ankunftszeit erhält man eine physikalische Beobachtungsgröße, in Form eines Zeitresiduums, das sich durch ein sogenanntes rotes Rauschen bemerkbar macht.
- Dieses Rauschen liefert den Beweis dafür, dass es einen Gravitationswellen-Hintergrund gibt.

Simulationen des Roten Rauschens

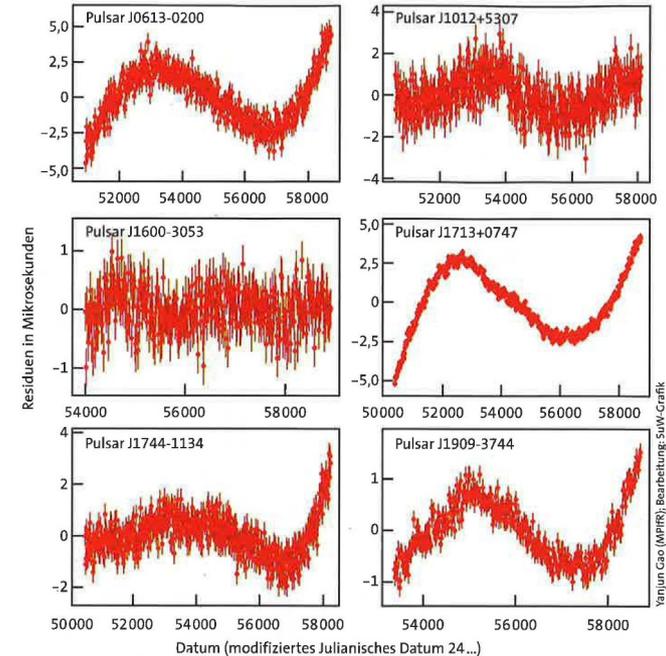


Bild: Yanjun Gao/ MPIfR

Fehlerquellen

Verzögerung der Ankunftszeit aufgrund von Dispersion

- Das Rauschen kann auch andere Ursachen haben, wie z.B.:
 - die Dispersion im interstellaren Medium. Bei jeder Beobachtung muss eine Korrektur dieses Effekts durchgeführt werden, die sogenannte De-Dispersion.
 - instrumentelle Probleme.
 - ein falscher Massenschwerpunkt der Planeten im Sonnensystem.
- Diese Fehlerquellen können zu einer falschen Schlussfolgerung bezüglich des Gravitationswellen-Hintergrundes führen, da der Gravitationswellen-Hintergrund nur zu einer Schwankung von etwa hundert Nanosekunden oder weniger führen würde.
- Dies hat zur Folge, dass bei der Auswertung der Ergebnisse extrem sorgfältig und genau gearbeitet werden muss.
- Das Spektrum kosmischer Gravitationswellen ist auf den unteren Bild gut zu sehen. Der linke Teil zeigt wie knapp EPTA und IPTA den Gravitationswellenhintergrund detektiert.

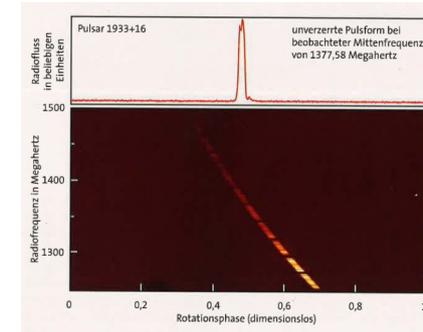


Bild: Ramesh Karuppusamy/ MPIfR

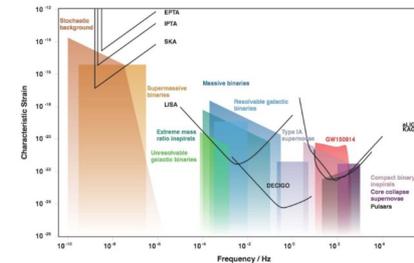


Bild: C.J. Moore, R.H. Cole and C.P.L. Berry, Class. Quantum Grav. 32, 015014 (2015)

Bild: Moore et al. 2016
(siehe Kramer und Champion, SuW 2/2022)

EPTA

- EPTA steht für **E**uropean **P**ulsar **T**iming **A**rray und ist eine europäische Forschungskollaboration zum Aufbau eines Pulsar Timing Arrays.
- Beobachtungen können im Rahmen von LEAP (Large European Array for Pulsars) durchgeführt werden. Dabei werden die fünf großen Radioteleskope Europas zusammenschaltet und stellen ein virtuelles voll bewegliches Radioteleskop dar.
- Zu LEAP gehören das 100-m-Radioteleskop des Bonner Max-Planck-Instituts für Radioastronomie bei Effelsberg, das 76-m-Lovell-Teleskop in Cheshire/Großbritannien, das Nançay-Teleskop für Dezimeterradiowellen in Frankreich, das 64-m-Radioteleskop bei Pranu Sanguni (Sardinien/Italien) sowie die 16 Antennen des Westerbork-Synthesis-Radioteleskops in den Niederlanden.

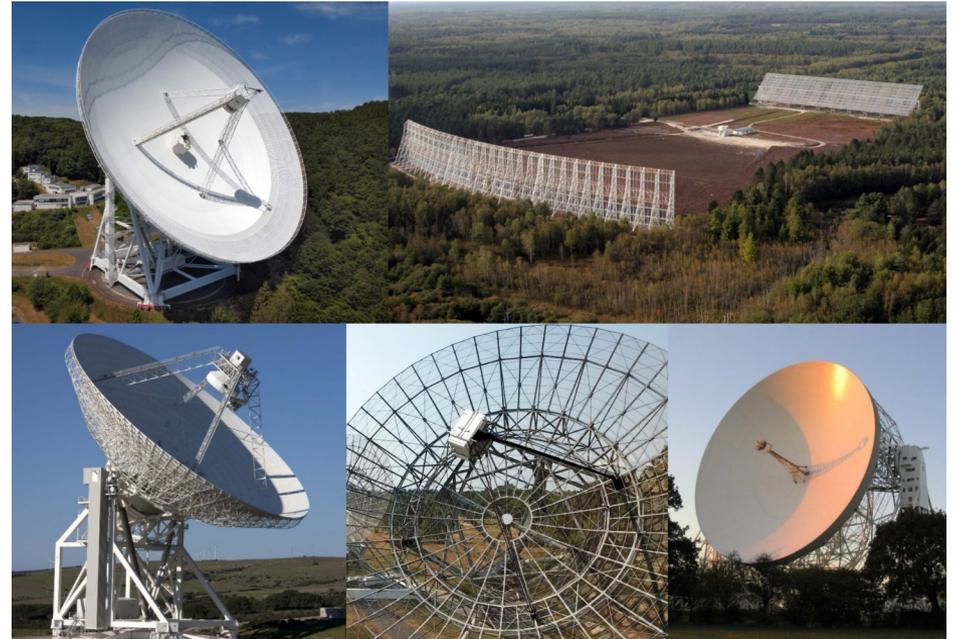


Bild: MPIfR-Pressemedung vom 27 Oktober 2021

IPTA

- IPTA steht für **I**nternational **P**ulsar **T**iming **A**rray und ist ein internationale Forschungskollaboration auf dem Gebiet der Pulsar Timing Arrays.
- Die verschiedenen Datensätze von EPTA, NanoGrav (das Nordamerikanische Äquivalent zu EPTA), PPTA (Australisches Programm), und bald dazu noch die Datensätze vom MeerKAT-Teleskop in Südafrika und des InPTA (Indian Pulsar Timing Array) werden in Rahmen dieses Programms ausgewertet.



Bild: MPIfR-Pressemeldung vom 22 Oktober 2018

Ergebnisse der beiden Programme

- Im Rahmen beider Programme (IPTA, EPTA) wurden deutliche Hinweise auf ein niederfrequentes Gravitationswellensignal entdeckt.
 - In vielen Pulsaren in den kombinierten Daten ist dieses Signal gefunden worden.
 - Die Eigenschaften des Signals entsprechen dem was, man von einem Gravitationswellenhintergrund erwarten würde.
- Für die Bestätigung des Gravitationswellen-Hintergrundes muss aber ein bestimmtes räumliches Korrelationsmuster festgestellt werden, die sogenannte Hellings-Downs-Kurve.

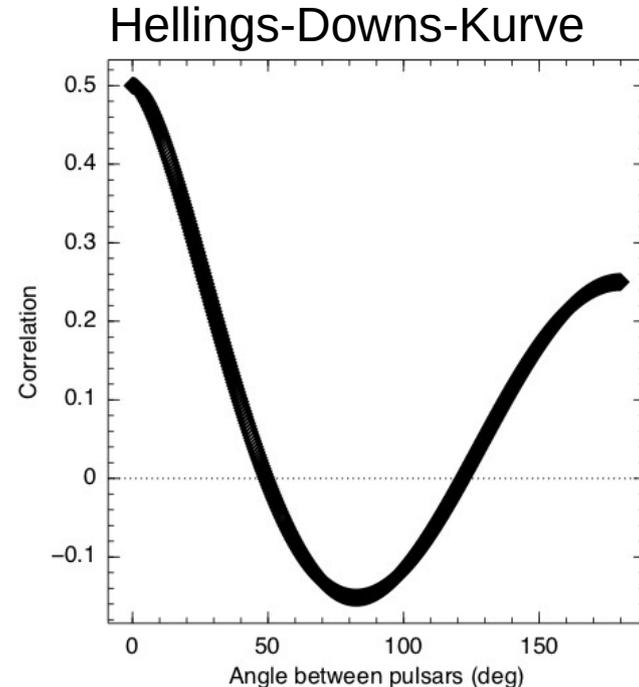


Bild: Wikipedia
HellingsDowns.png (Creative
Commons Attribution-Share Alike
4.0 International)

PTA zur Bestimmung der Massen von Planeten (1)

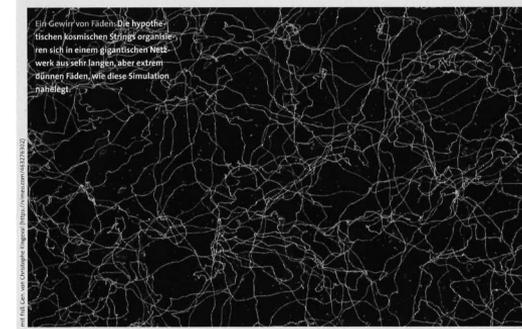
- Im Zusammenhang mit der Korrektur möglicher Fehlerquellen bei der Suche nach dem Gravitationswellen-Hintergrund wurde eine neue Methode entwickelt, wie Planetenmassen im Sonnensystem berechnet werden können.
- Denn auf der Erde lässt sich die Taktrate der Pulsare nicht genau messen, da die Erde sich um die Sonne dreht; dadurch werden die Taktraten verzerrt.
- Um dies zu verhindern, brauchen die Forscher einen Bezugspunkt. Sie nutzen dafür das Massezentrum des Sonnensystems, das sogenannte Baryzentrum oder Rotationszentrum.

PTA zur Bestimmung der Masse von Planeten (2)

- Dieser Baryzentrum kann von Astrophysikern berechnet werden.
- Die Ergebnisse der Teleskopbeobachtungen von Pulsaren werden dann auf das Baryzentrum korrigiert. Bei falschen Korrekturen kommt es zu Verzerrung der Pulsrate.
- Die auftretenden Fehler wiederholen sich mit der Umlaufperiode der Planeten um die Sonne
- So kann anhand der zeitlichen Muster auf den Planeten geschlossen werden, dem zuvor eine falsche Masse zugeteilt wurde.
- Durch ein iteratives Verfahren (Annäherung an eine Lösung durch Wiederholung ähnlicher oder gleicher Handlungen) werden die Massen des Planeten solange verändert, bis die Pulsrate nicht mehr schwankt.
- Bislang liegt die Genauigkeit bei 0.0003% der Erdmasse.
- Das lässt sich weiter reduzieren, wenn man mehr Pulsare nutzt diese über einen größeren Zeitraum betrachtet.

Theoretische Ursache für Gravitationswellen-Hintergrund (1)

- Der Gravitationswellen-Hintergrund besteht aus vielen einzelnen Gravitationswellen, die sich gegenseitig überlagern. Im Einzelnen wäre es wahrscheinlich unmöglich, die Gravitationswellen zu erfassen.
- Nun werde ich auf etwas andere mögliche Ursachen für einen Gravitationswellenhintergrund eingehen.
- 1) Kosmische Strings:
 - Nach der Theorie winzige röhrenartige Überbleibsel eines Phaseneinübergangs, während das gesamte Vakuum um sie herum in einen neuen Zustand übergegangen ist, bewahren sie den alten Zustand mitsamt dessen Eigenschaften in sich auf.
 - Kosmische Strings sind nach ihrer Theorie eindimensionale Regionen im Raum.
 - Sie haben winzige Durchmesser im subatomaren Bereich, haben jedoch gigantische astronomische Längen aufzuweisen, sodass sie nach Simulationen ein gigantisches Netzwerk bilden. Die Simulationen dazu haben auch dargestellt, dass verschiedene Stringabschnitte kollidieren und Schleifen bilden.
 - Schleifen oszillieren (schwingen) unter dem Einfluss ihrer eigenen Spannung, dabei geben sie Gravitationswellen ab.
 - unstetige Stringabschnitte in Form von scharfen Knicken oder Spritzen strahlen Gravitationswellen ab.



Das Stringnetzwerk

Bild:Christoph Ringeval et al. in: Schmitz, SuW 7/2021



Die Stringschleifen

Bild:Daniel, Domingueze et al. in: Schmitz, SuW 7/2021

Theoretische Ursachen für den Gravitationswellen-Hintergrund (2)

- 2) Phasenübergänge als eine Ursache für den Gravitationswellen-Hintergrund:
 - Besonders abrupte und un stetige kosmische Phasenübergänge könnten zu Gravitationswellen geführt haben.
 - In der Theorie werden Phasenübergänge mit den Vorgängen in einem Kochtopf verglichen.
 - Bei einigen Phasenübergängen entstehen Blasen. In diesen Blasen befindet sich das Vakuum, welches sich schon im neuen Zustand befindet. Sie breiten sich in Umgebungen aus, wo noch der alte Vakuum-Zustand vorherrscht. Die Vakuumblasen können miteinander kollidieren.
 - Eine Wechselwirkung mit dem umgebenden heißen Plasma und die Kollisionen könnten Gravitationswellen erzeugt haben.

- Was sind Phasenübergänge:
 - Veränderungen von Materieformen und/oder Naturkräfte, z.B. Wasser gefriert.
 - So folgt aus dem Standardmodell der Teilchenphysik und dessen Erweiterung, dass es aufgrund der abfallenden Temperaturen des expandierenden Universums zu spontanen Änderungen des energetisch niedrigstmöglichen Zustand (Vakuumzustands) kommt. Die Phasenübergänge verursachen, dass Teilchen neue Eigenschaften (z.B. neue Massen oder Wechselwirkungsverhalten) bekommen.

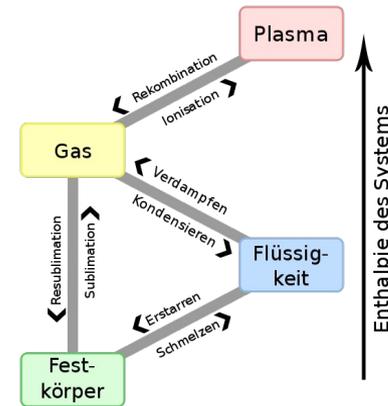


Bild: Wikipedia
Aggregatzustände (Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Theoretische Ursachen für Gravitationswellen-Hintergrund (3)

- 3) Kosmische Inflation als Ursache für den Gravitationswellen-Hintergrund
 - Am Anfang der Bildung unseres Universums gab es eine sogenannte Inflationsepoche, die durch extrem schnelles Ausdehnen der kosmischen Raumzeit gekennzeichnet ist. Dies begründet einige Eigenschaften unseres heutigen Universums, unter anderem seine Größe und den Umstand, dass es keine ausgezeichneten Orte oder Richtungen aufweist.
 - Während dieser Epoche, gerät die Raumzeit nach Quantenphysik selber in Schwingungen. Diese Quantenfluktuationen breiten sich dann später als Gravitationswellen durch das Universum aus.

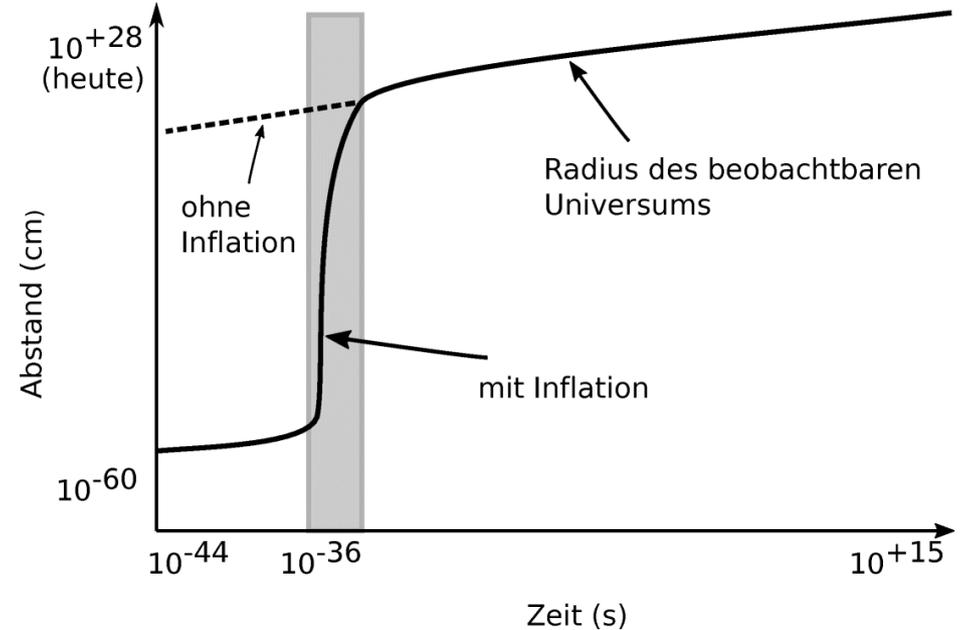


Bild: Aus Astrophysik von K.-H. Spatzek, Springer Verlag 2017

Was wird die Zukunft bringen?

- Ob und welche der drei Theorien zutrifft ist im Moment unklar. Um dies herauszufinden, muss noch weitere Forschung betrieben werden bzw. neue Beobachtungstechnik zum Einsatz kommen, wie das Gravitationswelleninterferometer LISA, das Einstein-Teleskop und das SKA.
- Die Existenz des Gravitationswellen-Hintergrundes selbst ist noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen, aber sehr wahrscheinlich.
- Mit weiteren Beobachtungsdaten ist aber zu erwarten, dass in der Zukunft der Gravitationswellen-Hintergrund eindeutig bestätigt werden kann.
- Falls Sie sich mehr und vertiefend in das Thema einarbeiten wollen, können Sie in meine Textquellen schauen.

Besser werdende Datensätze

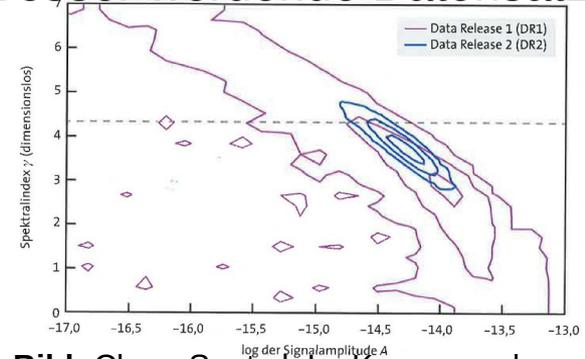


Bild: Chen, S. et al. In: Kramer und Champion, SuW 2/2022

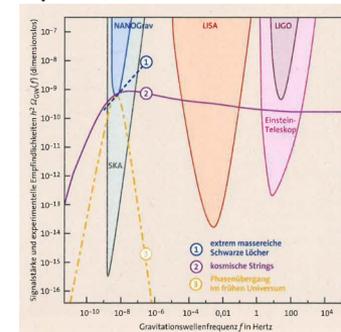


Bild: Blasi, S. et al. in: Schmitz, SuW 7/2021

Textquellen

- Kai Schmitz: Hintergrundsignal mit Pulsaren entdeckt?, Sterne und Weltraum 7| 2021, Seite 30-41: <https://www.spektrum.de/inhaltsverzeichnis/netzwerk-aus-pulsaren-sterne-und-weltraum-7-2021/1789736>
- Michael Kramer und David Champion: Die Suche nach einem neuen Hintergrundsignal, Sterne und Weltraum 2|2022, Seite 40-47: https://www.spektrum.de/page/p_sdww_ausgabe&sv%5Br_sdww_zeitschrift%5D=798889&sv%5Bf_sonderheft%5D=off&_z=798889
- Wikipedia Artikel zum Thema Pulsare: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsar>
- Wikipedia Artikel zum Thema Pulsar Timing: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle>
- Pressemeldung vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie von 22 Oktober 2018 „Planeten und Asteroiden wiegen“: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2018/12>

Textquellen (2)

- Pressemeldung vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie vom 12 Januar 2022 „Die Suche nach einem kosmischen Gravitationswellenhintergrund“:
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2022/1>
- Pressemeldung vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie vom 27 Oktober 2021 „Auf dem Weg zum Nachweis des Graviationswellen-Hintergrund“:
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2021/11>
- Pressemeldung vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie von 24. August 2010 „Eine Waage für unsere kosmischen Nachbarn“:
<https://www.mpg.de/602435/pressemitteilung20100824>
- Luciano Rezolla: „Die unwiderstehliche Anziehungskraft der Schwerkraft“, C.H. Beck Verlag, München 2021
- Was sind Graviationswellen?: Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR):
https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6568/10784_read-24345/