



Das Flüstern der Gravitation

Erstmals gibt es Hinweise auf sehr niederfrequente Gravitationswellen.

Gerhard Schäfer

Was uns Gravitationswellen (GW) zu Gehör bringen, hängt wie bei allen Wellenvorgängen von deren Wellenlängen und Frequenzen ab. Aber da sie keine Abschirmung erfahren, können sie uns aus allen mit uns kausal verbundenen Regionen des Universums Kunde bringen ebenso wie über die dabei zurückgelegten Wege. Seit dem ersten Nachweis von Gravitationswellen verschmelzender Schwarzer Löcher am 14. September 2015 [1] fanden sich über hundert solcher Signale, darunter auch solche, bei denen eine oder beide der Komponenten ein Neutronenstern ist. Interferometrische Detektoren auf der Erde wie LIGO sind für Frequenzen von etwa 10 bis 10^3 Hz ausgelegt, solche der Erde folgend in einem Sonnenorbit, wie LISA ab 2035, für 10^{-4} bis 10^{-1} Hz.

Am 29. Juni gelang es nun erstmals, mit einer gänzlich anderen Methode und international abgestimmt Hinweise auf niederfrequente Gravitationswellen zu finden [2–5]. Dazu dienten die Ankunftszeiten von Radiopulsen jeweils einer ausgewählten Gruppe von Pulsaren an unter anderem mehreren Teleskopen mit korrelierter Datenauswertung – ein sogenannter Pulsar Timing Array (PTA). Die Frequenzen der betreffenden Gravitationswellen liegen dabei im Nanohertz-Bereich, was Wellenlängen von Lichtjahren entspricht. Solche Gravitationswellen sind unter

anderem aus superschweren binären Schwarzen Löchern im Bereich von hundert Millionen bis zehn Milliarden Sonnenmassen zu erwarten, die in Zentren von Galaxien auftreten. Ein Beispiel ist das Schwarze Loch in der Galaxie M87 mit 6,5 Milliarden Sonnenmassen.

Die genannten Hinweise entsprechen gewissermaßen einem Flüstern der Gravitationswellen im Sinne einer „Raumzeit-Akustik“. Die einzelnen Gravitationswellen vermischen sich nämlich milliardenfach zu einem stochastischen Hintergrund und sind in diesem noch nicht einzeln identifizierbar. Die Gravitationswellen aus binären Schwarzen Löchern sind mitnichten monochromatisch, da PTA-Beobachtungen über Jahre bis Jahrzehnte hinweg das Einspiralen der zwei Schwarzen Löcher bei Frequenzen von 10^{-9} bis 10^{-7} Hz auflösen.

Im Folgenden ist es hilfreich, sich typische Eigenschaften Einsteinscher GW klarzumachen. Diese breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und sind transversal polarisiert – und das gänzlich ohne Monopol oder dipolartige Anteile. Die rein quadrupolare Polarisation existiert in zwei unabhängigen Versionen, dargestellt durch zwei mit der Wellenfrequenz flächenerhaltend oszillierenden Ellipsen. Deren Halbachsen schließen einen Winkel von 45 Grad ein. Physikalisch haben wir es mit Gezeitenwellen im Gravi-

tationsfeld zu tun, die nach Einstein gleichzeitig Krümmungswellen der Raumzeit-Geometrie sind [6]. Somit ist einsichtig, dass Gravitationswellen die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beeinflussen, hier von Radiostrahlung, die oberhalb der Polkappen schnell rotierender magnetisierter Neutronensterne (Pulsare) in Richtung der Magnetfeldachse entsteht. Wenn Rotationsachse und Magnetfeldachse nicht parallel sind, erreicht die Strahlung die Erde wie ein Leuchtfeld von Radiopulsen.

Mikhail Sazhin vom Sternberg Astronomischen Institut in Moskau und Steven Detweiler von der Yale University waren es, die 1978 bzw. 1979 erstmals aufgezeigt haben, wie sich mit einzelnen Pulsaren Gravitationswellen im Nanohertz-Bereich bzw. auch ein GW-Hintergrund detektieren lassen. Dies geschieht über die erwähnte Variation der Ankunftszeiten der Radiopulse auf der Erde, induziert durch die durchquerten Gravitationswellen. Betrachten wir zur Orientierung eine ebene monochromatische Gravitationswelle der Frequenz f und Amplitude A_0 , so ergibt sich die von ihr verursachte Zeitverzögerung R zu $R = A_0 / 4\pi f$ (ohne Winkel- und Zeitangaben) [6]. Bei einer Genauigkeit der Pulsrate von 30 ns und einer Frequenz der Gravitationswelle von 30 nHz lassen sich somit GW-Amplituden von $A_0 \approx 10^{-14}$ erfassen.

Ronald Hellings und George Downs vom Jet Propulsion Laboratory haben 1983 unter Einführung eines PTA Messungen vorgeschlagen, die den Nachweis eines Hintergrundes aus Einsteinschen Gravitationswellen ermöglichen [7]. Weltweit gibt es fünf PTAs: In Europa das EPTA mit dem 100-m-Radioteleskop in Effelsberg und vier weiteren Teleskopen in Europa, in den USA und Kanada das North-American Nanohertz Observatory for Gravitational waves (NANOGrav) mit vier (drei seit 2021) Teleskopen sowie in Australien (Parkes-PTA), Indien (InPTA) und China (CPTA).

Betrachtet werden die relativen Frequenzschwankungen der Ankunftszeiten der Radiopulse einzelner Pulsare, wobei für je zwei dieser Pulsare das Produkt dieser Frequenzschwankungen gebildet und über einen isotropen GW-Hintergrund gemittelt wird. Der binäre Korrelationskoeffizient ist eine Funktion der Winkelabstände der Pulsar-Paare (Hellings-Downs-Funktion). In ihr ist die Herkunft aus rein quadrupolaren Gravitationswellen kodiert.

Der Spektralindex der spektralen Leistungsdichte der Frequenzschwankungen der Ankunftszeiten zeigt die Herkunft eines GW-Hintergrundes aus quasi-kreisförmig einspiralenden Schwarzen Löchern. Multipliziert mit der Leistungsdichte ergibt die Hellings-Downs-Funktion die spektrale (Kreuz-)Korrelationsfunktion.

Zur Anwendung kommen Radiopulse von Millisekunden-Pulsaren (MSP). Glücklicherweise sind solche Pulsare die genauesten Uhren im Universum. Genau genommen verlangsamt sich der Gang dieser Uhren durch die zusätzliche magnetische Dipolstrahlung stetig geringfügig, da die Strahlung den Neutronensternen Rotationsenergie entzieht. Dieser Effekt ist aber gut modellierbar [8].

Auswertung und auch Vergleich der Messdaten verschiedener PTAs sind überaus aufwändig. Das auftretende Rauschen in den Signalen der einzelnen PTAs kann ganz unterschiedlich bedingt sein: instrumentell (Uhrengang auf der Erde, Empfänger-Instabilität, Kalibrierungsunsicherheit), Pulsar-inhärent (Instabilität der Radioemission, Variation der

Sternrotation durch Massenumlagerungen) oder durch das interstellare Medium (Streuungen und Verzögerungen durch Dispersion). Genaue Modellierungen sind unverzichtbar. Dazu kommt die exakte Kenntnis der Bewegung eines Teleskops relativ zum Schwerpunktsystem des Sonnensystems, wozu die genauesten Werte der Planetenbewegungen nötig sind.

Die Datenbanken, auf denen die neuen Resultate beruhen (Abb. 1), reichen für EPTA mit eingebundenen InPTA dank Effelsberg mehr als 25 Jahre zurück und beruhen auf den Signalen von 25 MSP. Im Falle von NANOGrav beträgt der Beobachtungszeitraum 15 Jahre bei einem Array von 67 MSP. Die beiden Konsortien erreichten statistische Signifikanzen für einen Hintergrund aus Einsteinschen GW von mehr als $3,5\sigma$ bzw. ungefähr 3,5 bis 4σ . Mit einem Array von 30 MSP erreichte das Parkes-PTA in 18 Jahren eine Evidenz für GW aus binären superschweren Schwarzen Löchern von ungefähr 2σ [4]. Die Messungen von CPTA umfassen unter Verwendung von 57 MSP nur einen Zeitraum von knapp 3,5 Jahren, weisen aber bereits deutlich in Richtung der anderen PTAs [5]. Gegenwärtig sind Beiträge anderer Gravitationswellen als aus einspiralenden Binärsystemen

nicht auszuschließen, etwa primordiale GW aus der Inflationsphase des Kosmos oder aus kosmischen Phasenübergängen.

Das International Pulsar Timing Array (IPTA) beabsichtigt, in naher Zukunft 13 Teleskope zur Beobachtung von 100 Millisekunden-Pulsaren einzusetzen und mehr als 1000 Beobachtungen pro Pulsar zu machen, um damit einzelne Gravitationswellen identifizieren zu können und das mit dem 5σ -Goldstandard der Physik von einer Wahrscheinlichkeit unter eins zu 3,5 Millionen für ein nur zufallsbedingtes Signal [9].

- [1] B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)
- [2] G. Agazie et al., arXiv:2306.16213 (2023)
- [3] J. Antoniadis et al., arXiv:2306.16214
- [4] D. J. Reardon et al., arXiv:2306.16215
- [5] H. Xu et al., arXiv:2306.16216 (2023)
- [6] K. S. Thorne und R. D. Blandford, Relativity and Cosmology, Princeton University Press, Princeton (2021)
- [7] R. W. Hellings und G. S. Downs, ApJ **265**, L39 (1983)
- [8] J. P. W. Verbiest, S. Osłowski und S. Burke-Spolaor, arXiv:2101.10081 (2021)
- [9] www.epta.eu.org

Der Autor

Prof. Dr. Gerhard Schäfer, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Theoretisch-Physikalisches Institut, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

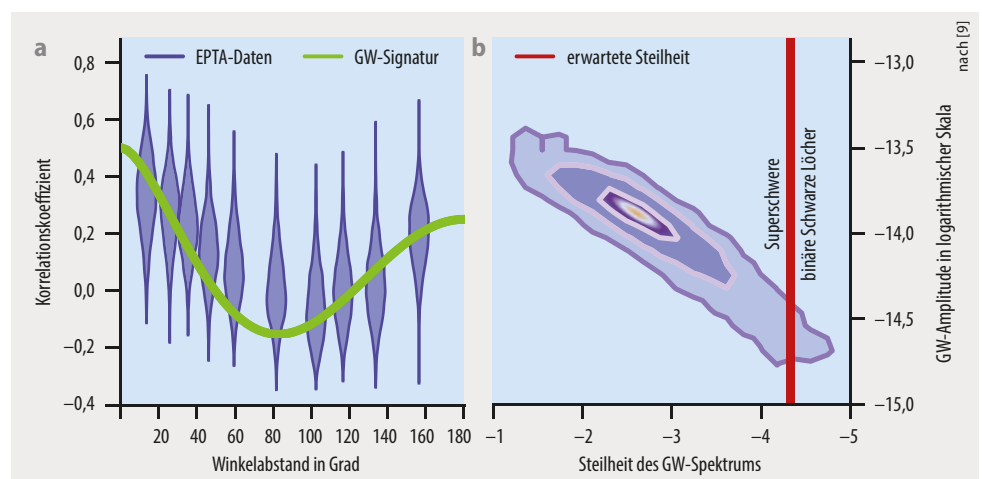


Abb. 1 Der Violin-Plot (a) zeigt gemittelte Korrelationskoeffizienten für zehn Winkelabstandsintervalle mit je 30 Pulsar-Paaren. In der Fläche einer Violine liegen anteilmäßig je 30 Paare und geben an, wie viele dieser Paare jeweils an einem bestimmten Korrelationskoeffizienten beteiligt sind (Häufigkeitsdichte). Die Hellings-Downs-Kurve (grün) lässt sich als Signatur einer effektiven Gravitationswelle interpretieren. Der Amplitudenplot (b) zeigt den Logarithmus der effektiven Amplitude eines GW-Hintergrundes als Funktion des Exponenten (Steilheit, Spektralindex) des Potenzgesetzes der spektralen Leistungsdichte der Ankunftszeit-Residuen mit Konturen von $1/2\sigma$ -Signifikanz. Die rote Linie markiert die zu erwartende Steilheit der Leistungsdichte von $-13/3$ eines Hintergrundes aus GW einspiralender superschwerer Schwarzer Löcher.