DFG Sonderforschungsbereich/Transregio: „Gravitationswellen-Astronomie", Garching | Hannover | Jena | Potsdam | Tübingen

Was bewirken Gravitationswellen?

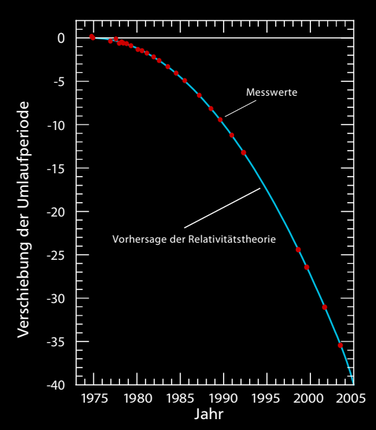
Ein feines Kräuseln bezwingt Giganten

Gravitationswellen äußern sich als Verzerrungen des Raumes, die sich wellenförmig ausbreiten. Dabei werden die geometrischen Eigenschaften des Raumes in einer Ebene, die im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung der Welle steht, verändert.

Diese Wirkung ist sehr schwach: Typische Gravitationswellen bewirken Längenänderungen um den Bruchteil von 0,000 000 000 000 000 000 001 der Grundlänge. Eine Strecke von einem Kilometer verkürzt oder verlängert sich um ein Tausendstel des Durchmessers eines Protons, das ist ein Millionstel eines Milliardstel eines Millimeters. Selbst der Abstand der Erde von der Sonne verändert sich nur um den Durchmesser eines typischen Atoms.

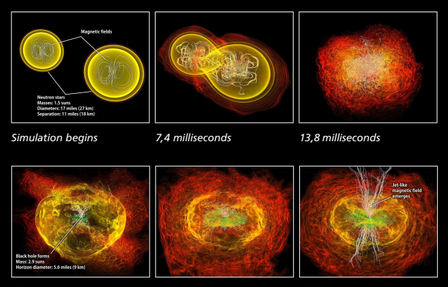
Eine Quelle von Gravitationswellen verliert Energie durch die Abstrahlung. Dies geschieht auch bei engen Binärsystemen, bei denen beispielsweise zwei Neutronensterne im Abstand von einigen Hunderttausend Kilometern um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen. Durch die Abstrahlung verliert ein Binärsystem so viel Energie, dass die Umlaufbahnen immer enger und schneller werden. In ca. 100 Millionen Jahren werden die beiden Sterne schließlich aufeinanderstürzen und miteinander verschmelzen.

Zwar ist die Verzerrung des Raumes durch eine Gravitationswelle winzig klein, doch es steckt so viel Energie darin, dass sich am Ende selbst so gigantische Objekte wie ein Neutronenstern-Binärsystem dagegen nicht behaupten können.



Ein Binärsystem verliert Energie durch Abstrahlung von Gravitationswellen (siehe Bild „Radiopulsar in einem Binärsystem" auf Poster „Quellen"). Die Umlaufbahn wird dadurch stetig enger und schneller. Der Pulsar erreicht bestimmte Punkte der Bahn daher früher, als man dies ohne den Energieverlust durch Gravitationswellen erwarten würde.

(Nach: J. M. Weisberg and J. H. Taylor, Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis, July 2004)



Simulation begins — *7,4 milliseconds* — *13,8 milliseconds*

15,3 milliseconds — *21,2 milliseconds* — *26,5 milliseconds*

Verschmelzendes Binaersystem (Bilderfolge):

Die letzten Augenblicke in der Entwicklung eines Binärsystems aus zwei Neutronensternen, die starke Magnetfelder aufweisen. Durch die Verschmelzung entsteht ein schwarzes Loch, das von einem heißen und stark magnetisierten Torus umgeben ist. Solche Ereignisse könnten hinter extrem energiereichen Blitzen von Gammastrahlung stecken.

Der gesamte Vorgang ließe sich auch anhand der abgestrahlten Gravitationswellen beobachten. Dabei erhielte man zusätzliche Informationen über die Eigenschaften der Neutronensterne.

(Bild: AEI/ZIB/NASA)

Gravitationswellen am Werk: Binärpulsare

Neutronensterne (zur Erklärung: siehe Poster Quellen) haben ein extrem starkes Magnetfeld und können sehr schnell um ihre Achse rotieren. Sie erzeugen eine stark gerichtete elektromagnetische Strahlung. Durch die Rotation wandert dieser Strahl über Teile des Universums. Trifft er dabei auch die Erde, so registrieren wir hier regelmäßige Pulse von Strahlung. Man spricht daher von Pulsaren.

Manchmal tritt ein solcher Pulsar gemeinsam mit einem zweiten kompakten Stern als Binärsystem auf. Beide laufen dann um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Diese Bewegung lässt sich an den auf der Erde empfangenen Strahlungspulsen exakt ablesen.

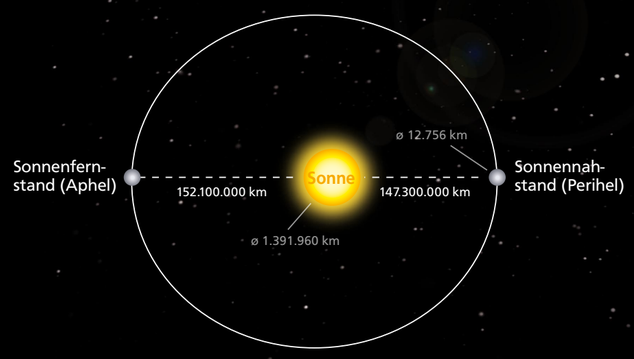
Noch nie direkt gemessen ...

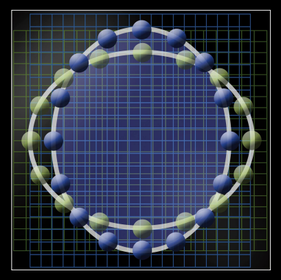
Ein solches Binärsystem erzeugt auch Gravitationsstrahlung. Bisher allerdings konnte diese Strahlung noch nicht direkt empfangen werden. Sie entzieht dem Binärsystem aber Energie, so dass die beiden Sterne immer enger aneinander rücken und daher zunehmend schneller um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen. Diese Veränderung der Umlaufbahn kann man anhand der Pulse elektromagnetischer Strahlung, die auf der Erde ankommen, sehr genau mitverfolgen.

... und doch muss es sie geben!

Präzise Messungen seit 1974 zeigen: Die beobachtete Veränderung der Umlaufbahn entspricht genau dem, was man auf Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnen kann. Eine andere Erklärung dafür gibt es nicht. Es bestehen daher kaum Zweifel, dass Gravitationswellen tatsächlich existieren, auch wenn sie wegen der enormen technischen Schwierigkeiten bisher nicht direkt gemessen werden konnten.

Elliptische Umlaufbahn der Erde

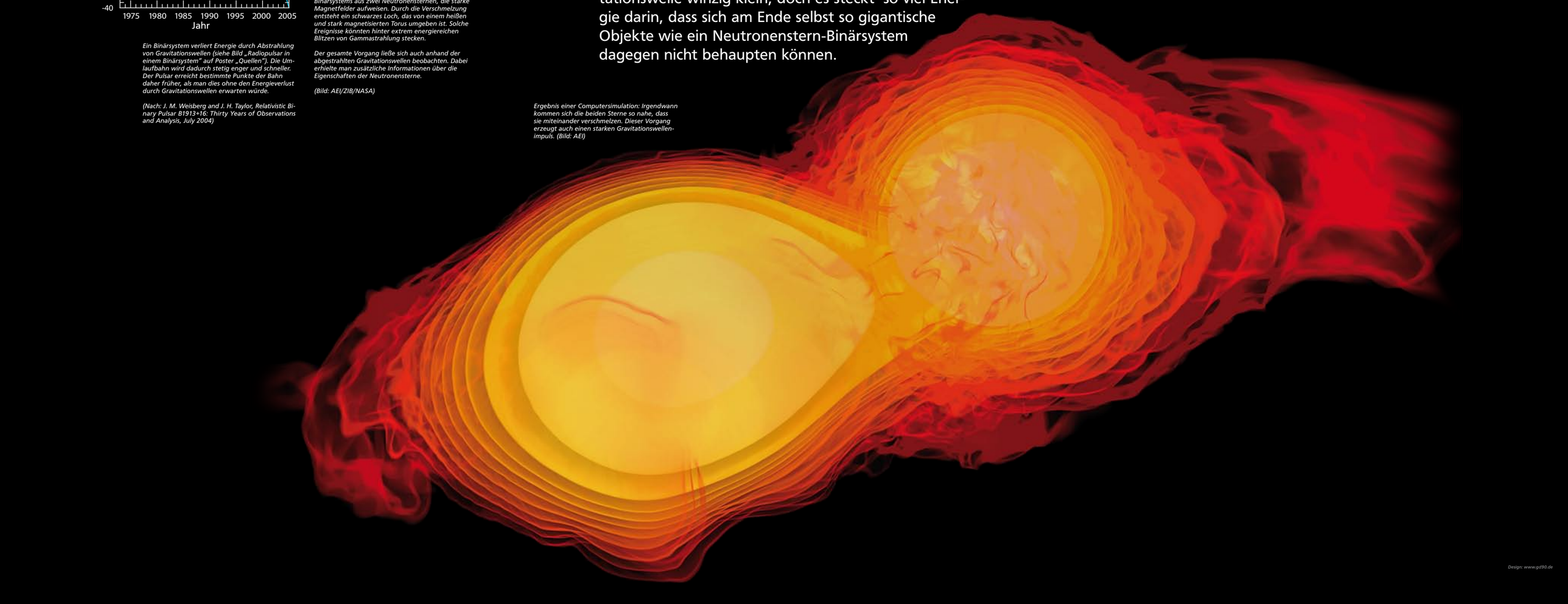




Rechts und oben: Der Abstand der Erde von der Sonne liegt bei ca. 150 Millionen Kilometer. Eine Reise zur Sonne mit der Geschwindigkeit eines Verkehrsflugzeugs würde mehr als 17 Jahre dauern. Selbst eine derart gewaltige Strecke wird nur um ungefähr den Durchmesser eines Atoms gedehnt oder gestaucht – eine Größe, die weit kleiner ist als Alles, was wir mit bloßem Auge sehen können.

Links: Zwei Momentaufnahmen, welche die Veränderung von Entfernungen im Raum durch eine Gravitationswelle zeigen, sind hier übereinander gelegt. Gezeigt ist die Wirkung einer Grundschwingung, die als „+"-Polarisation bezeichnet wird.

Atom, ca. 100 – 400 pm



Ergebnis einer Computersimulation: Irgendwann kommen sich die beiden Sterne so nahe, dass sie miteinander verschmelzen. Dieser Vorgang erzeugt auch einen starken Gravitationswellenimpuls. (Bild: AEI)

Design: www.gd90.de