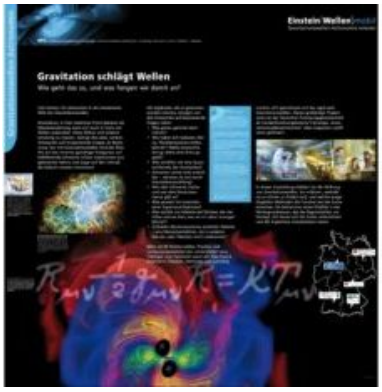
Ausstellungskapitel: Gravitationswellen

Einführung und Forschungsprojekte

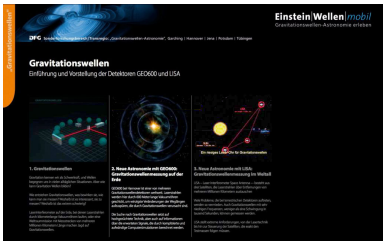
Gravitationswellen sind äußerst schwierig zu messen. Gelingt dies aber, winken Antworten auf fundamentale Fragen als Belohnung. Nur mit Gravitationswellen wird der Blick frei auf das Innerste gewaltiger Ereignisse: auf kollidierende Schwarze Löcher, Explosionen ausgebrannter Sterne und sogar auf den Urknall, die Geburt unseres Universums.

Weltweit beschäftigen sich daher weit über 1000 Wissenschaftler mit der theoretischen Erforschung von Gravitationswellen und mit ihrem Nachweis. In Deutschland geschieht dies vor allem an den Universitäten Jena, Hannover und Tübingen und an Max-Planck-Instituten in Potsdam, Hannover und Garching.

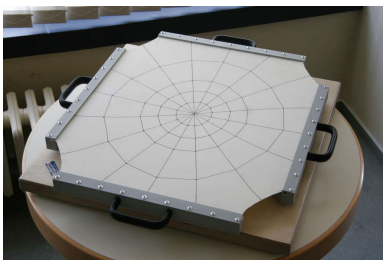


Poster: „Gravitation schlägt Wellen“
Wie geht das zu, und was fangen wir damit an?

Poster: „Ein neues Werkzeug zur Beobachtung des Kosmos“
Auf dem Weg zur Gravitationswellen-Astronomie



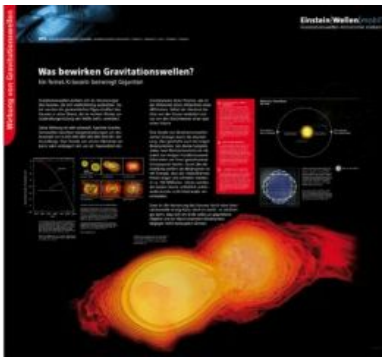
Filmstation: „Gravitationswellen“
Was sind Gravitationswellen, wie entstehen sie, was bewirken sie, wie kann man sie messen? Ein kurzer anschaulicher Film ermöglicht einen individuellen, interaktiven Zugang zur Welt der Gravitationswellen.



Interaktive Simulation: „Gravitationswellentuch“
Gravitationswellen verzerren die Geometrie des Raumes und verändern dadurch den Abstand von Punkten, die sich (lokal) nicht bewegen. Bei diesem interaktiven Demonstrationsmodell kann der Besucher eine Latexfolie mechanisch verzerren. Ein ursprünglich kreisförmiges Muster aufgemalter Punkte verändert dadurch seine Gestalt. Die Punkte verändern ihren Abstand zueinander, obwohl sie sich auf der Folie nicht bewegen können. Diese Analogie zur Wirkung einer Gravitationswelle macht das Konzept einer veränderlichen inneren Geometrie — im Unterschied zu einer von außen beobachteten Verformung — unmittelbar anschaulich und begreifbar.

Wirkung von Gravitationswellen

Real existierende Gravitationswellen sind extrem schwach. Sie spielen zwar eine wichtige Rolle in kosmischen Systemen wie Binärsystemen aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, im Alltag haben sie jedoch keinerlei direkt erkennbare Auswirkungen. Es ist extrem schwierig, sie zu messen und zu analysieren. Um die Wirkung von Gravitationswellen dennoch sichtbar und spürbar zu machen, greifen wir auf Simulationen zurück, die gegenüber echten Signalen extrem verstärkt sind.



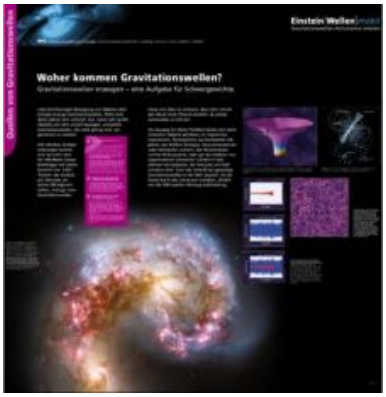
Poster: „Was bewirken Gravitationswellen?“
Ein feines Kräuseln bezwingt Giganten.

Interaktive Simulation: „Gravitationswellenstuhl“
Wie fühlt sich die Gravitationswelle an, die eine Supernova-Explosion erzeugt? Oder die eines verschmelzenden Binärsystems aus Schwarzen Löchern? Oder die Hintergrundstrahlung aus Gravitationswellen, die aus allen Quellen im Universum stammt — bis hin zurück zum Urknall? Das können Sie auf dem Gravitationswellenstuhl am eigenen Leib erfahren. Gegenüber den echten Signalen sind die simulierten Wellen, die für diese Demonstration verwendet werden, gewaltig verstärkt. Nach dieser Erfahrung sind Sie wahrscheinlich froh, dass Gravitationswellen nur so schwach sind, wie sie nun einmal sind, so dass wir echte Gravitationswellen eben nicht am eigenen Leib zu spüren bekommen...

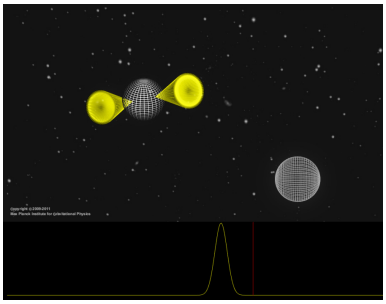
Interaktive Simulation: „Quadrupol-Deformation“
Bild: VIP Infotainment Marco Gerhard, Berlin
Gravitationswellen bewirken Ver- zerrungen des Raumes, die zwei mögliche Grundformen (Polarisationen) aufweisen. Diese Formen werden hier visualisiert, indem Bilder entsprechend der Schwingung von Gravitationswellen verzerrt werden. Verzerren Sie Ihr eigenes Bild im Muster und Rhythmus verschiedener Gravitationswellensignale! Die so entstandenen Bilder können Sie via WLAN auf Ihr mobiles Gerät herunterladen.

Quellen von Gravitationswellen

Grundsätzlich werden Gravitationswellen von unregelmäßig bewegten Massen aller Art erzeugt. Mit Objekten irdischer Ausmaße ist es jedoch nicht möglich, eine Signalstärke zu erreichen, die jemals gemessen werden könnte. Da braucht es andere Kaliber: Neutronensterne, Schwarze Löcher, Supernova-Explosionen oder gar der Urknall sind da geeignete Kandidaten.

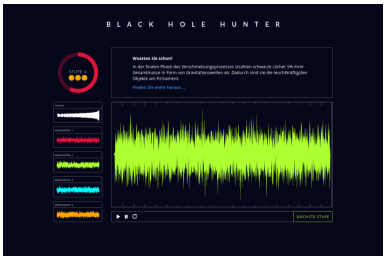


Poster: „Woher kommen Gravitationswellen?“
Gravitationswellen erzeugen — eine Aufgabe für Schwergewichte.



Computersimulation: „Binärpulsar“
Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1974 boten Binäpulsare die Möglichkeit, die Dynamik von Binärsystemen aus Neutronensternen sehr genau zu untersuchen. Dabei stellte man fest. dass der Einfluss von Gravitationswellen, die ein solches System aussendet, präzise mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie übereinstimmt. Binärpulsare galten daher als überzeugender Indizienbeweis für die Existenz von Gravitationswellen, lange bevor diese direkt gemessen werden konnten.

Die interaktive Animation zeigt einen solchen Binärpulsar. Beobachten Sie, wie die Pulse leicht schwanken, je nachdem, ob sich der Pulsar in seinem Umlauf gerade von uns weg oder auf uns zu bewegt. Verändern Sie die Parameter des Systems. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Eigenschaften der Pulse aus. Umgekehrt kann man durch eine Analyse der Pulse also auf die Eigenschaften des Binärsystems schließen.



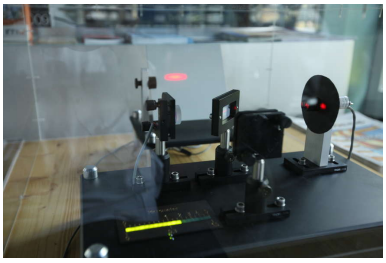
Computerspiel: „Black Hole Hunter“
Gravitationswellensignale werden durch das Rauschen des Detektors überdeckt. Wie lässt sich also feststellen, ob gemessene Daten tatsächlich ein Gravitationswellensignal enthalten?

In diesem Computerspiel können Sie Ihr Gehör einsetzen, um simulierte Gravitationswellensignale vom Rauschen zu trennen. Das klappt sehr viel besser, als sich nur auf das Auge zu verlassen. Unser Gehör reagiert sehr empfindlich auf die Frequenzanteile eines Geräuschs. Damit ähnelt es der mathematischen Technik der Fouriertransformation, die bei der statistischen Analyse echter Gravitationswellensignale eingesetzt wird.

Messung von Gravitationswellen

Messung und Analyse von Gravitationswellen öffnen den Weg zu bisher unzugänglichen Informationen über den Kosmos und läuten damit eine neue Epoche der Astronomie ein.

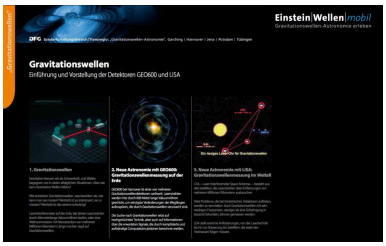
Poster: „Jagd auf Gravitationswellen“
Was Einstein nicht für möglich hielt, wird Realität — auf der Erde und im All.



Funktionsmodell: „Laserinterferometer“
Gravitationswellen erzeugen winzige Längenänderungen. Zu ihrer Messung ist ein Michelson-Interferometer das ideale Instrument. Es besteht aus einem Laser, einem Strahlteiler und zwei Spiegeln. Der Strahlteiler lässt den Laserstrahl zur Hälfte durch, die andere Hälfte wird reflektiert. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen die senkrecht zueinander stehenden Messstrecken, werden von den Endspiegeln zurückgeschickt und am Strahlteiler wieder überlagert. Auf dem Schirm sieht man das Resultat dieser Überlagerung: Sind die beiden Strecken gleich lang, so

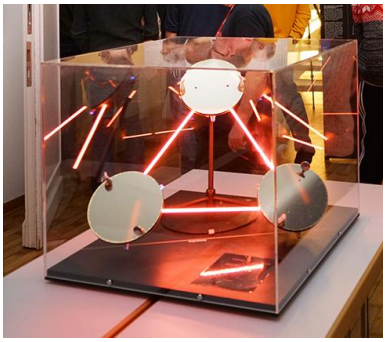
schwingen die beiden Lichtwellen im Gleichtakt und verstärken sich. Unterscheiden die Strecken sich um eine halbe Wellenlänge, so schwingen die Wellen im Gegentakt und löschen sich aus. Je nach Neigung der Strahlen entstehen so helle und dunkle Ringe. Verändert eine Gravitationswelle die Länge der Messstrecken, so äußert sich dies als Helligkeitsschwankung.
Bei diesem funktionstüchtigen Tischmodell kann die Länge der einen Messstrecke künstlich verändert werden. Dazu ist einer der Endspiegel auf einen Piezokristall geklebt, der sich beim Anlegen einer Spannung ausdehnt. Mit dem Schieberegler kann die Spannung kontinuierlich verändert und die Strecke so um bis zu 1,5 Mikrometer verlängert werden. Auf dem Schirm beobachtet man, dass selbst derart kleine Änderungen zu einer deutlichen Helligkeitsschwankung in der Mitte des Ringsystems führen.

Exponat: „Modell eines Strahlteilers“
GEO600 ist ein Michelson-Interferometer mit 600 Meter langen Messstrecken. In seinem Innern baut sich eine Lichtleistung von einigen Kilowatt auf, dabei wächst der Durchmesser des Laser„strahls“ auf ca. 15 cm an. Entsprechend groß müssen die optischen Elemente sein. Durchstrahlte Elemente erwärmen sich, da sie einen Teil der Lichtleistung absorbieren. Dadurch verformen sie sich, und es entstehen unerwünschte Bündelungen der Strahlen. Der Original-Strahlteiler von GEO600 besteht daher aus einem extra angefertigten, besonders absorptionsarmen Quarzglas (Absorption kleiner als ein Millionstel der Intensität pro Zentimeter Weglänge). Um Streulicht zu minimieren, ist die Oberfläche bis auf atomares Niveau plan geschliffen (die mittlere Rauigkeit beträgt ein Zehntel Nanometer). Leihgabe des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam und Hannover, und des Instituts für Gravitationsphysik, Leibniz-Universität Hannover.



Filmstation: „Gravitationswellendetektoren“
Wie kann der winzige Einfluss von Gravitationswellen auf die Raumgeo- metrie gemessen werden? Weshalb ist ein Laserinterferometer dafür so gut geeignet? Wie sieht der Detektor GEO600 bei Hannover aus? Was hat es mit der Weltraummission Laser Interferometer in Space Antenna (LISA) auf sich? Wie kann man ein Dreieck, das aus drei Satelliten besteht, um die Sonne laufen lassen, ohne dass sich das Dreieck ver- ändert?

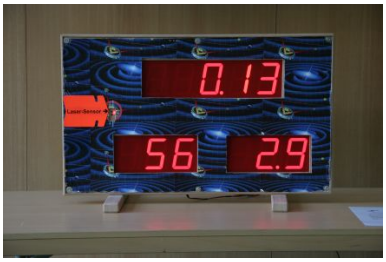
All das erfahren Sie individuell und interaktiv in diesen kurzen, unterhaltsamen Filmen in anschaulicher und verständlicher Form.



Exponat: „LISA im Orbit“
Bild: VIP Infotainment Marco Gerhard, Berlin

Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors wächst mit seiner Größe. Auf der Erde kann man bestenfalls Messstrecken von einigen Kilometern Länge realisieren. Deshalb ist ein Detektor im Weltall geplant (LISA steht für „Laser Interferometer Space Antenna“). LISA besteht aus drei Satelliten, die über eine Strecke von mehreren Millionen Kilometern Laserstrahlen austauschen und so Gravitationswellen aufspüren können, die eine sehr niedrige Frequenz — bis hinunter zu einer Schwingung in Tausend Sekunden — haben. Die drei Satelliten bilden ein gleichseitiges Dreieck, das der Erde in 50 Millionen Kilometer Abstand auf ihrer Bahn um die Sonne folgt. LISA ist ein Gemeinschaftsprojekt von NASA und ESA; der Start ist für das Jahr 2034 vorgesehen.
Leihgabe des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam und Hannover, und des Instituts für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover.

Touch Table: „LISA-Satellit“
Wie können Gravitationswellen gemessen werden? Mit zwei Filmen bekommen Sie individuell und interaktiv einige Eindrücke aus der Welt der Graviationswellendektektoren GEO600 und LISA.



Spiel: „Laserstrahl ausrichten“
Die Laserstrahlen der terrestrischen Detektoren müssen über mehrere Hundert Meter bis hin zu mehreren Kilometern genau ausgerichtet werden. Noch viel schwieriger wird dies für den weltraumgestützten Detektor LISA sein: Hier haben die Satelliten einen Abstand von mehreren Millionen Kilometern! Der Detektor fliegt in einem Abstand von 50 Millionen Kilometern von der Erde, eine Steuerung von der Erde aus ist also nicht möglich. Das Ziel — ein Satellit mit einer Größe von wenigen Metern — muss also über diese gewaltige Entfernung automatisch anvisiert werden.

Diese Station zeigt, wie schwierig es schon auf eine Entfernung von wenigen Metern ist, mit einem Laserstrahl ein kleines Ziel zu treffen. Die Aufgabe besteht darin, mit einem gewöhnlichen Laserpointer eine Photodiode zu treffen. Die Anzeige verrät, wie lange und für welchen Bruchteil der abgelaufenen Zeit man es geschafft hat, den Laserstrahl im Ziel zu halten. Hier ist Kreativität gefragt, um mit improvisierten Mitteln die Zielgenauigkeit zu verbessern.

Film-Loop: „Erster Nachweis von Gravitationswellen“
Gravitationswellen eröffnen der Astronomie völlig neue Möglichkeiten. Bisher unzugägnliche Informationen werden nun verfügbar. Mit der ersten Messung einer Gravitationswelle am 14. September 2015 hat sich ein neues Fenster zur Beobachtung des Universums geöffnet.
Wissenschaftler, die an diesem Ereignis unmittelbar beteiligt waren, erzählen, wie sie diesen Tag erlebt haben, und was dieser Durchbruch bedeutet.

Poster: „Gold für Gravitationswellenforschung“
Astrophysiker erhalten Nobelpreis für Physik 2017.

Alle Bilder, soweit nicht anders angegeben: © GD90/Universität Tübingen