

Ausstellungskapitel: Die Allgemeine Relativitätstheorie

Die historische Entwicklung

Acht Jahre brauchte Einstein von der Idee zur fertigen Theorie. Was waren die entscheidenden Schritte, mit wem hat Einstein dabei zusammengearbeitet?

Die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie sind auf der Erde und im gesamten Sonnensystem sehr schwach. Bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts gab es daher nur vier Effekte, die beobachtet werden konnten, um die Theorie zu überprüfen und zu bestätigen.



Poster: „1907–1915: Die schwierige Geburt einer revolutionären Theorie“

Wie entstand die Allgemeine Relativitätstheorie, die bis heute jeden Test bestanden hat?

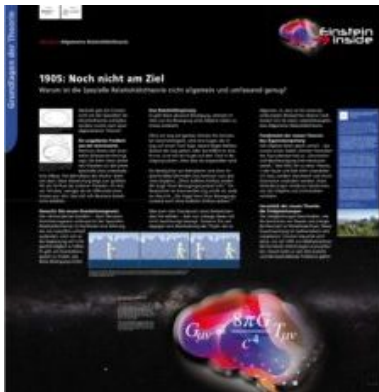


Poster: „Von Newton zu Einstein — Auswirkungen der Gravitation“

Die vier grundlegenden Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie und ihre Messung

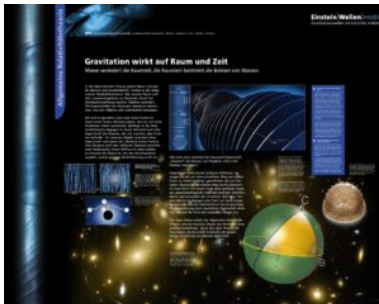
Darstellung der Theorie

Die Spezielle Relativitätstheorie war eine großartige Leistung — weshalb gab sich Einstein damit nicht zufrieden, weshalb suchte er nach einer umfassenderen, allgemeineren Relativitätstheorie? Was sind die wesentlichen Bestandteile dieser Theorie?



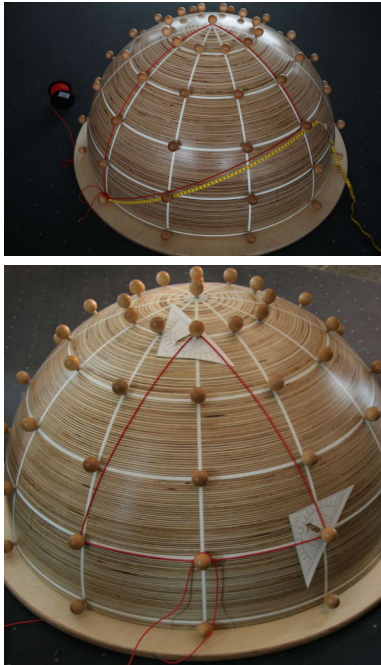
Poster: „1905: Noch nicht am Ziel“

Warum ist die Spezielle Relativitätstheorie nicht allgemein und umfassend genug?



Poster: „Gravitation wirkt auf Raum und Zeit“

Masse verändert die Raumzeit, die Raumzeit bestimmt die Bahnen von Massen.

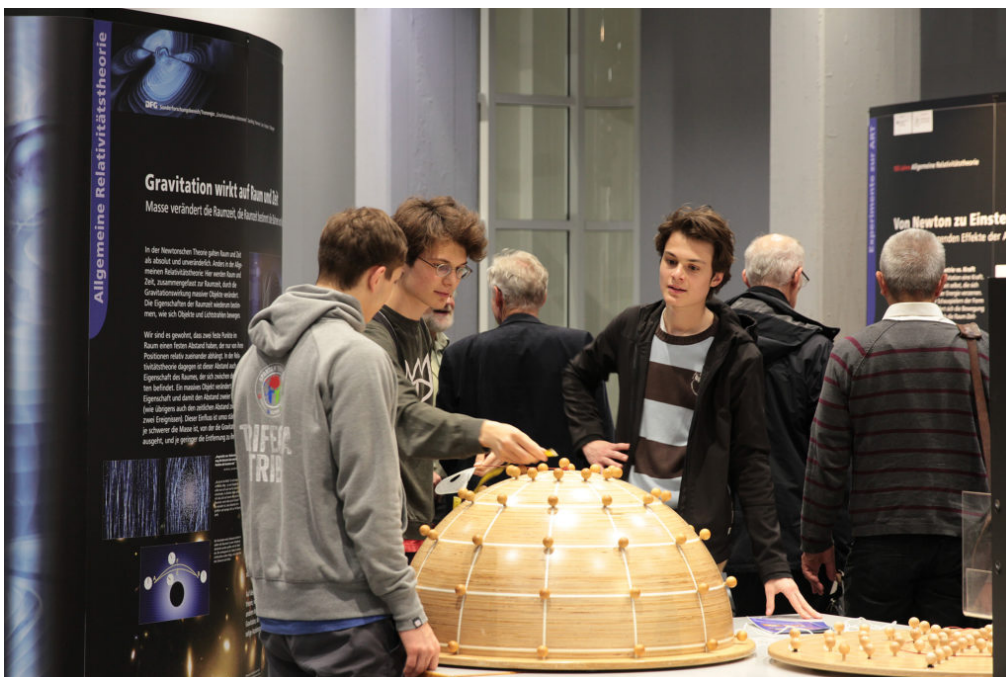


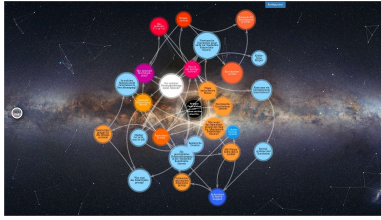
Experiment: „Sphärische Geometrie“

Eine ebene Fläche und die gekrümmte Oberfläche einer großen Holzkugel bilden Modelle für einen ebenen bzw. für einen gekrümmten Raum. Mit Hilfe von Holzstiften als „Ankerpunkten“ kann man Schnüre spannen und vermessen und so die Geometrie der beiden Flächen erforschen. Konstruieren Sie geometrische Objekte, messen Sie Längen und Winkel, und vergleichen Sie die Ergebnisse für beide Situationen. Die Ergebnisse solcher Messungen verraten, ob Sie sich in einem flachen oder einem gekrümmten Raum befinden. (Siehe auch: Anhang: Anleitung zum Experiment „Sphärische Geometrie“)

- Stellt ein Breitenkreis die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten dar?
- Gilt die bekannte Beziehung zwischen Radius und Umfang eines Kreises?
- Beträgt die Winkelsumme im Dreieck 180 Grad?
- Gilt der Satz des Pythagoras?

Alle Messungen können durchgeführt werden, ohne die Kugeloberfläche zu verlassen. Sie sind also unabhängig vom drei-dimensionalen Raum, der die Kugel umgibt. Damit wird der gedankliche Übergang von der Außen- zur Innenperspektive begreifbar gemacht.

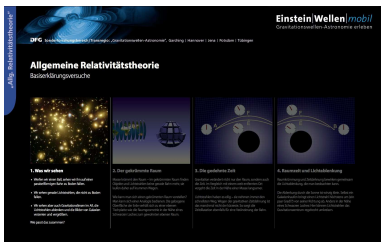




Touch Table: Allgemeine Relativitätstheorie

Relativitätsprinzip, Äquivalenzprinzip, Inertialsystem, Beschleunigung — diese und viele andere Begriffe und Konzepte sind eng miteinander verbunden. Sie bilden seit Newton das Netzwerk der Theoretischen Physik, und damit auch die Grundlage für die Entwicklung

der Allgemeinen Relativitätstheorie. Auf einem Touchtable können Sie die Knoten und Verbindungen dieses Netzwerks erforschen und sich einen Eindruck davon verschaffen, welche Herausforderungen Einstein bei der Entwicklung der Theorie zu bewältigen hatte.



Filmstation: Allgemeine Relativitätstheorie

Vier kurze Filme ermöglichen eine individuelle, interaktive Beschäftigung mit Fragen, wie folgenden:

- Wie sähe die Welt aus, wenn die relativistischen Effekte erheblich stärker wären, als sie es in unserer Welt sind?
- Oder wenn wir uns in der Nähe von Objekten mit sehr starker Gravitation, wie beispielsweise schwarzen Löchern, aufhalten könnten?
- Wie kann man sich einen gekrümmten Raum vorstellen?
- Oder gar eine gedehnte Zeit?
- Wie bewirken Raumkrümmung und Zeitdehnung zusammen den Effekt, den wir als Lichtablenkung wahrnehmen?



Film-Loop: Science Face Interviews

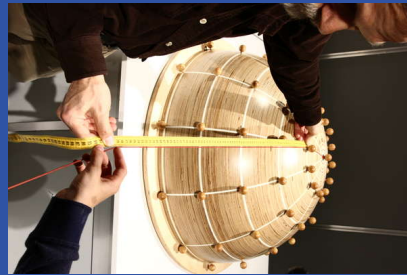
Schwarze Löcher - befremdliches Phänomen, schwer greifbare Wirklichkeit. Einstein zweifelte an ihrer Existenz, Astronomen haben lange nach danach gesucht. Heute sind Schwarze Löcher unverzichtbar für unser Verständnis des Universums.

Interviews mit bekannten Astrophysikern und Astronomen wie Kip Thorne, Clifford Will und vielen anderen verraten, was Schwarze Löcher sind, wie Astronomen sie beobachten, wie Physiker sie mit den schnellsten Supercomputern der Welt untersuchen und wie sie mit Hilfe von Gravitationswellendetektoren belauscht werden.

121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen

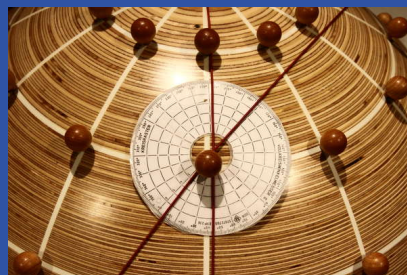
Längenmessung



Nehmen Sie die gesuchte Länge (etwa den Umfang eines Kreises) mit der Schnur ab, messen Sie sie mit Hilfe des Maßbandes.

Tip: Dies gelingt am besten zu zweit.

Winkelmessung



Legen Sie den Winkelmesser an und lesen Sie den Wert des Winkels ab.

Tip: Bei spitzen Winkeln treffen sich die Linien erst hinter dem Mittelpunkt der Kugel. Legen Sie den Winkelmesser passend an.

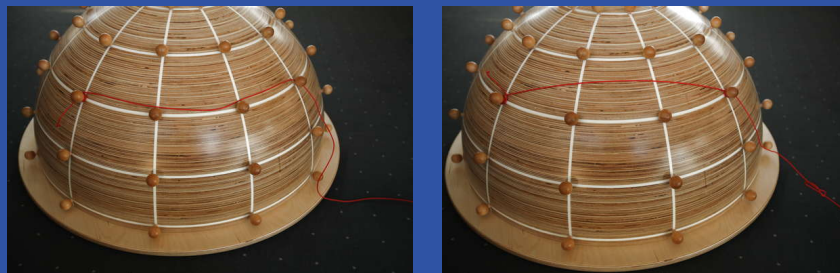
121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen



Führen Sie alle Messungen auf der ebenen Fläche und auf der Oberfläche der Kugel aus, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten



Stellt ein Breitenkreis die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf dem gleichen Breitengrad dar? Legen Sie die Schnur an einem Breitenkreis entlang, dann spannen Sie die Schnur, um die Antwort zu finden.

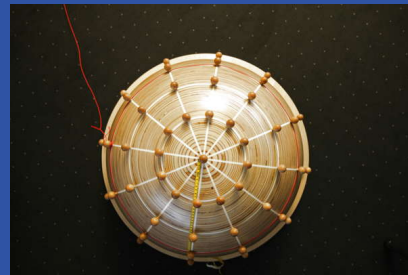
121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen



Führen Sie alle Messungen auf der ebenen Fläche und auf der Oberfläche der Kugel aus, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Umfang eines Kreises



Konstruieren Sie verschieden große Kreise. Messen Sie Radius und Umfang. Was fällt Ihnen auf?

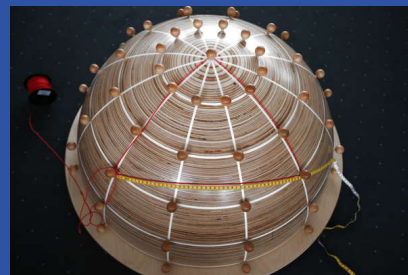
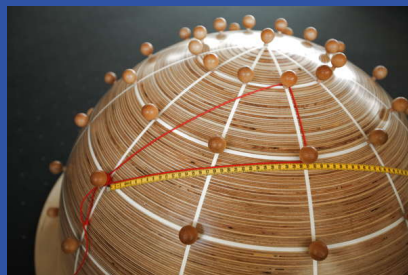
121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen



Führen Sie alle Messungen auf der ebenen Fläche und auf der Oberfläche der Kugel aus, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Satz des Pythagoras



Konstruieren Sie ein rechtwinkliges Dreieck, und messen Sie die Längen der Seiten. Gilt hier der Satz des Pythagoras, dass $a^2 + b^2 = c^2$?

Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse für ein kleines und ein großes Dreieck. Bemerkten Sie einen Unterschied?

Tip: Konstruieren Sie gleichschenklige Dreiecke. Sie brauchen dann nur zwei verschiedene Seiten zu messen.

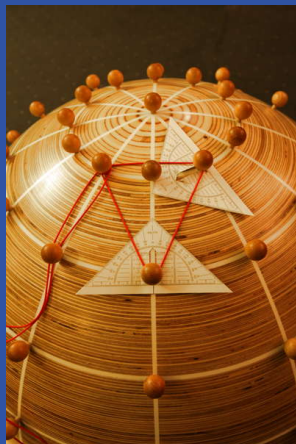
121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen



Führen Sie alle Messungen auf der ebenen Fläche und auf der Oberfläche der Kugel aus, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Winkelsumme im Dreieck



Messen Sie die Winkelsumme im Dreieck. Konstruieren Sie ein kleines und ein großes Dreieck. Was fällt Ihnen auf?

Tip: Konstruieren Sie gleichschenklige Dreiecke. Sie brauchen dann nur zwei verschiedene Winkel zu messen.

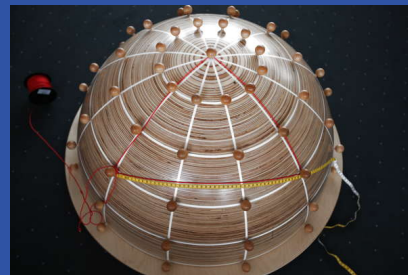
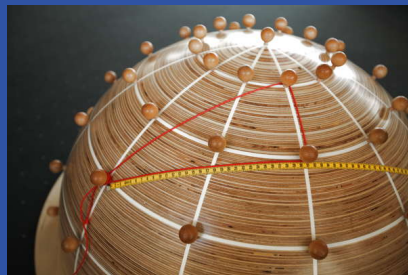
121

Vermessen Sie die innere Geometrie zweier Flächen



Führen Sie alle Messungen auf der ebenen Fläche und auf der Oberfläche der Kugel aus, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Flächeninhalt



Wie können Sie den Flächeninhalt einer Figur auf einer gekrümmten Fläche messen? Was bedeutet eine Flächenmessung überhaupt? Versuchen Sie, den Flächeninhalt eines kleinen und eines großen Dreiecks zu messen. Gilt die Formel

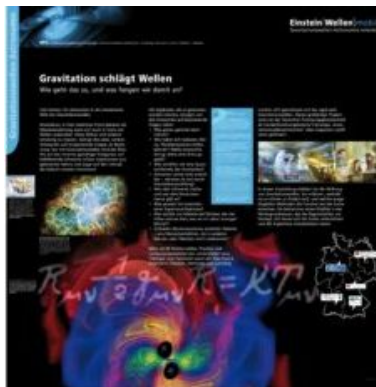
„Fläche = (Grundseite \times Höhe) / 2“ ?

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.

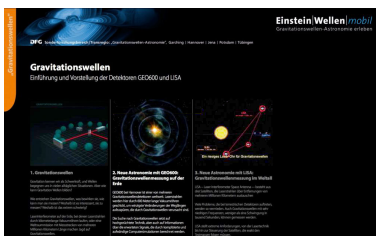
Weltweit beschäftigen sich daher weit über 1000 Wissenschaftler mit der theoretischen Erforschung von Gravitationswellen und mit ihrem Nachweis. In Deutschland geschieht dies vor allem an den Universitäten Jena, Hannover und Tübingen und an Max-Planck-Instituten in Potsdam, Hannover und Garching.



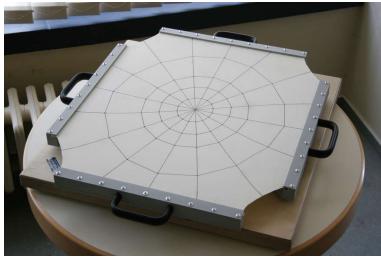
Poster: „Gravitation schlägt Wellen“
Wie geht das zu, und was fangen wir damit an?



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.

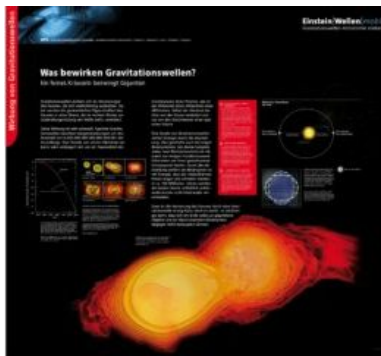


Interaktive Simulation: „Gravitationswellentuch“

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“

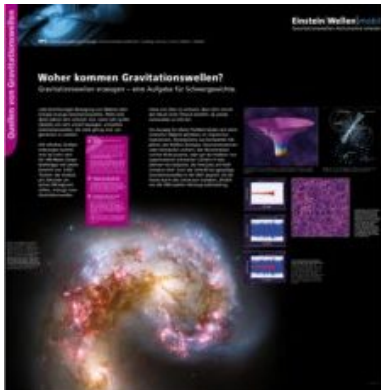
Bild: VIP Infotainment Marco Gerhard, Berlin

Gravitationswellen bewirken Verzerrungen des Raumes, die zwei mögliche Grundformen (Polarisationen) aufweisen. Diese Formen werden hier visualisiert, indem Bilder entsprechend der Schwingung von

Gravitationswellen verzerrt werden. Verzerrten Sie Ihr eigenes Bild im Muster und Rhythmus verschiedener Gravitationswellensignale! Die so entstandenen Bilder können Sie via WLAN auf Ihr mobiles Gerät herunterladen.

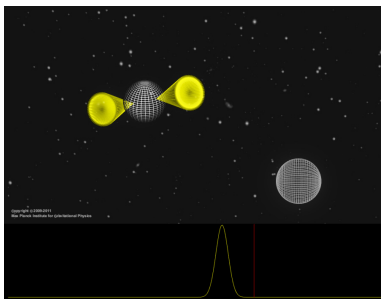
Quellen von Gravitationswellen

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.

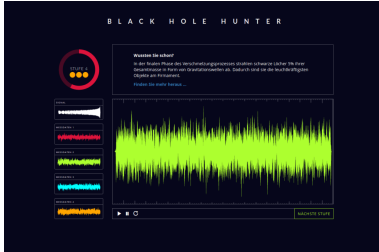


Computersimulation: „Binärpulsar“

Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1974 boten Binärpulsare 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.

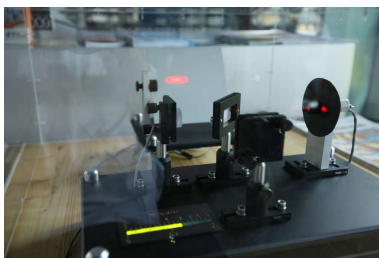
Messung von Gravitationswellen

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.

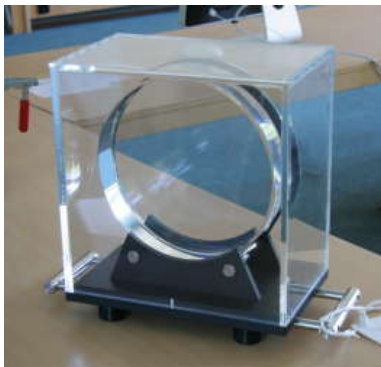


Funktionsmodell: „Laserinterferometer“

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 Gegenteil 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.

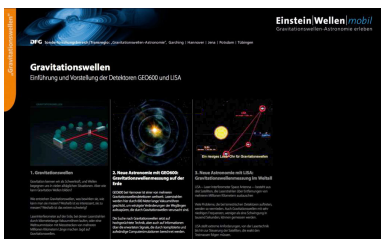
Bei diesem funktionstüchtigen Tischmodell kann die Länge der einen Messstrecke künstlich verändert werden. Dazu ist einer der Endspiegel auf einen Piezokristall geklebt, der sich beim Anlegen einer Spannung ausdehnt. Mit dem Schieberegler kann die Spannung kontinuierlich verändert und die Strecke so 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.

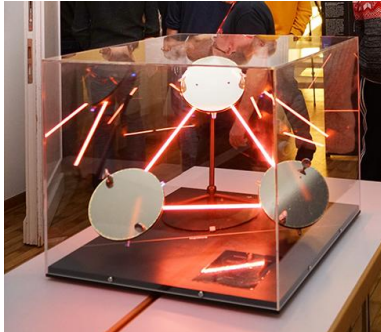


Filmstation: „Gravitationswellendetektoren“

Wie kann der winzige Einfluss von Gravitationswellen auf die Raumgeometrie 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 verändert?

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

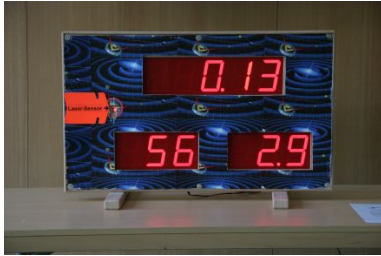
Laserstrahlen austauschen und so Gravitationswellen aufspüren können, die eine sehr niedrige Frequenz — bis hinunter zu einer Schwingung in Tausend Sekunden — haben. Die drei Satelliten bilden ein gleichseitiges Dreieck, das der Erde in 50 Millionen Kilometer Abstand auf ihrer Bahn um die Sonne folgt. 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 Gravitationswellendetektoren 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 unzugängliche 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.

Ausstellungskapitel: Allgemeine Relativitätstheorie und optische Astronomie

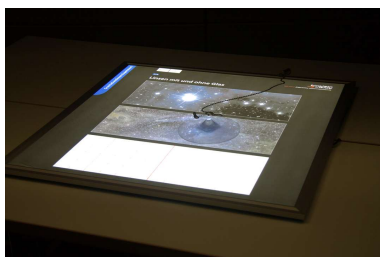
Gravitationslinsen

Historisch gibt es eine enge Verbindung der Allgemeinen Relativitätstheorie zur optischen Astronomie: Der Nachweis anlässlich der Sonnenfinsternis von 1919, dass die Gravitation der Sonne das Licht von Sternen genau so beeinflusst, wie es Einsteins Theorie vorhergesagt hatte, machte Einstein auf einen Schlag weltberühmt.

Dieser Einfluss der Gravitation auf Licht spielt immer noch eine wichtige Rolle — inzwischen nicht mehr zur Bestätigung der Relativitätstheorie, sondern als Werkzeug der Astronomie bei der Erforschung Dunkler Materie, und als Störeffekt, der berücksichtigt werden muss, um die extreme Genauigkeit der Messungen beim Gaia-Projekt realisieren zu können.



Poster: „Gravitationslinsen enthüllen die Tiefen des Universums“
Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Interaktive Simulation: „Gravitationslinse aus Glas“

Der Effekt der Gravitation auf elektromagnetische Strahlung ähnelt in bestimmten Situationen dem einer Sammellinse. Man spricht daher von Gravitationslinsen. Die Wirkung einer Gravitationslinse lässt sich teilweise durch eine Glaslinse demonstrieren. So lassen sich einige Effekte von Hand ausprobieren.

Vermessung der Milchstraße

Wie sieht die Milchstraße, unsere Heimatgalaxie, aus? Diese Frage ist nicht so leicht zu beantworten, da wir die Milchstraße ja nicht von außen anschauen können, wie das bei anderen Galaxien möglich ist.

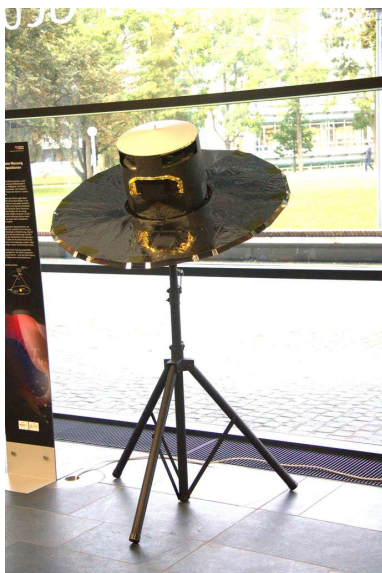
Die Satellitenmission Gaia vermisst die Positionen von einer Milliarde Sterne der Milchstraße mit extrem hoher, bisher unerreichter Genauigkeit, um so eine Karte unserer kosmischen Umgebung anfertigen zu können. Dabei zeigt sich der Einfluss der Gravitation auf die Lichtstrahlen als Störung, die berücksichtigt werden muss, wenn man die angestrebte Genauigkeit erreichen will. Hier geht es nicht nur um die Schwerkraft der Sonne, sondern auch die aller Planeten sowie einiger Monde und größerer Asteroiden im Sonnensystem.



Poster: „Kosmologie vor unserer Haustür“
Was uns die Erforschung der Milchstraße über das Universum als Ganzes verrät



Film-Loop: „Gaia-Projekt“
Ein Film (Endlos-Schleife) gibt Auskunft über die Ziele und den Ablauf der Gaia-Mission zur hochgenauen Vermessung von mehr als einer Milliarde Sternen in der Milchstraße.



Exponat: „Modell des Gaia-Satelliten“

Der Astrometrie-Satellit Gaia (der Name war ursprünglich als Akronym für „Globales Astrometrisches Interferometer für die Astrophysik“ gedacht) führt seit Dezember 2013 hochpräzise Messungen der Positionen, Bewegungen und Entfernungen von mehr als einer Milliarde Sterne unserer Milchstraße durch.

Insbesondere die Entfernungen dieser Sterne sollen durch diese Mission in bislang unerreichter Genauigkeit bestimmt werden. Dafür nutzt Gaia den Parallaxeneffekt: Die Positionen dieser Sterne am Himmel verschieben sich ein wenig, während der Satellit zusammen mit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne die weit entfernten Sterne immer wieder aus einer leicht veränderten Position anpeilt.

Ausstellungskapitel: Radioastronomie und Pulsare

Radioastronomie

Viele Fragen zur Allgemeinen Relativitätstheorie lassen sich mit Hilfe der Radioastronomie untersuchen. Eine zentrale Rolle spielen dabei Pulsare. Das sind Neutronensterne, ultradichte Körper, die überwiegend aus Neutronen bestehen und eine Masse von bis zum 2-fachen der Sonne auf einen Durchmesser von nur 20 Kilometer konzentrieren. In ihrer Nähe herrscht daher ein sehr starkes Gravitationsfeld. Sie rotieren und senden entlang der Magnetpole einen Radiostrahl aus. Ein Pulsar erscheint deshalb wie ein Leuchtturm, der einmal pro Rotation zu sehen ist. Messungen an Pulsaren erlauben Tests der Theorie in sehr starken Gravitationsfeldern, wie sie etwa im Sonnensystem nicht möglich sind.

Aus weltweiten Beobachtungen von Pulsaren lässt sich eine Art Gravitationswellen-Detektor von galaktischem Ausmaß entwickeln. Damit können bei ausreichend langer Beobachtungszeit möglicherweise extrem langwellige Gravitationswellen nachgewiesen werden.

Durch Beobachtungen von Pulsaren in unmittelbarer Nähe des supermassiven Schwarzen Loches im Zentrum unserer Milchstraße lassen sich die Eigenschaften des Schwarzen Loches vermessen und mit einem Radiobild vom „Schatten“ des Schwarzen Loches vergleichen. So können viele Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie in einer solchen extremen Umgebung bestätigt werden.



Poster: „Pulsierende Signale aus dem All“
Was wird erforscht mit dem Radioteleskop in Effelsberg?



3D-Film-Loops: „Radioteleskop Effelsberg“ und „Pulsare“

Nehmen Sie Platz im 3D-Kino! Erleben Sie eine Tour durch das Radioteleskop in Effelsberg, einem der größten frei beweglichen Radioteleskope der Welt. Auf dem Weg vom Kontrollraum bis hoch zur Fokuskabine — dort werden die Signale, gebündelt von der gigantischen

Schüssel, empfangen — gewinnen Sie einen Eindruck von den Ausmaßen dieses technischen Wunderwerks.

Ein Film über Pulsare zeigt, wie diese kosmischen Leuchttürme aufgebaut sind, wie sie funktionieren und weshalb sie für Astrophysik und Relativitätstheorie so wichtig sind.

Pulsare

Pulsare sind rotierende Neutronensterne. Ein Neutronenstern entsteht, wenn ein Stern, der etwas größer ist als die Sonne, seine Energie aufgezehrt hat und dann unter seiner eigenen Gravitation zusammenstürzt. Die „Sternleiche“, die dabei zurückbleibt, hat eine Masse, die bis zum Doppelten der Masse der Sonne gehen kann, zusammengeschmolzen auf eine Kugel mit einem Radius von nur ca. 10km! Diese Objekte können sehr schnell rotieren — einige schaffen viele Hundert Umdrehungen pro Sekunde!

Pulsare senden einen stark gebündelten Strahl elektromagnetischer Strahlung aus. Durch die Rotation des Sterns entsteht ein Leuchtturmeffekt: Streift der Strahl dabei über die Erde, wird hier ein pulsierendes Signal gemessen. Diese Pulse sind extrem regelmäßig, und sie können sehr genau analysiert werden. Dadurch lässt sich eine große Vielfalt von Informationen gewinnen, über den Pulsar selbst wie auch über seine Umgebung. So stellten Binärpulsare (das sind Pulsare, die zusammen mit einem Begleitstern ein enges Doppelsternsystem bilden) seit Ende der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts einen praktisch zwingenden indirekten Nachweis von Gravitationswellen dar.



Poster: „Pulsare hören“

Jeder erzeugt seinen akustischen Fußabdruck



Hörstation: „Pulsarsounds“

Die Signale vieler Pulsare liegen im hörbaren Bereich: Der schnellste bekannte rotiert 760 mal pro Sekunde und liegt damit deutlich über dem Kammerton a!
Andere Pulsare rotieren zwar mit einer Frequenz, die weit unterhalb des Hörbereichs liegt. Die Signale weisen aber eine starke Pulsmodulation auf, so dass auch die sehr niederfrequenten Signale hörbar sind.

Diese Station bietet eine Auswahl von gut 20 der insgesamt über 2500 bekannten Pulsaren, die aus verschiedenen Gründen besonders interessant sind. Lassen Sie sich von der enormen kosmischen Klangvielfalt beeindrucken!



Ausstellungskapitel: Äquivalenzprinzip und Schwerelosigkeit

Schwereelosigkeit auf der Erde

Das Äquivalenzprinzip ist fundamentale Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie. Es besagt, dass träge und schwere Masse gleich sind, so dass alle Objekte gleich fallen. Die Gültigkeit dieses Prinzips kann mit Experimenten in Schwerelosigkeit untersucht werden.

Beim Stichwort Schwerelosigkeit denkt man wahrscheinlich an eine Raumstation oder an einen Satelliten in der Erdumlaufbahn. Tatsächlich kann man auch auf der Erde Experimente in Schwerelosigkeit durchführen: Man muss die Versuchsanordnung lediglich frei fallen lassen. Grundlage dafür ist das Äquivalenzprinzip.

Daher gibt es in Bremen am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) einen Fallturm, der genau diesem Zweck dient. Mit einer Höhe von 146 Metern ermöglicht er bis zu 9,4 Sekunden Schwerelosigkeit. Für viele technische Untersuchungen wie auch für Experimente zu Grundlagen der Physik reicht das aus.

Im Fallturm herrscht nicht ideale Schwerelosigkeit. Aus technischen Gründen bleibt eine winzige Beschleunigung. Der Zustand wird daher als Mikrogravitation bezeichnet. In Bremen wird eine Mikrogravitation erreicht, die nur einem Millionstel der normalen Erdbeschleunigung entspricht.

Seit der Turm 1990 in Betrieb gegangen ist, stürzte die Fallkapsel mehr als 5000 mal in die Tiefe und nahm mehr als 150 Experimente von Wissenschaftlern aus 42 Ländern mit auf die „Reise“.



Poster: „Einstein im freien Fall“
Forschung unter der Spitze des Fallturms



Funktionsmodell: „Fallturm“

Bild: VIP Infotainment Marco Gerhard, Berlin

Bei diesem funktionsfähigen Modell des Bremer Fallturms wird ein Ball nach oben geschossen und fällt frei wieder herunter. In dem Ball befindet sich ein Beschleunigungssensor. Die Daten, die dieser Sensor liefert, werden auf einem Monitor dargestellt. Man erkennt die Phase der Schwerelosigkeit während der verschiedenen Abschnitte des Flugs.



Exponat: „Modell einer Fallkapsel“

Modell einer Fallkapsel im Maßstab 1:4

Die Experimente werden auf einer Plattform der Fallkapsel montiert. Die Plattform wird in Bremen in die Fallkapsel eingebaut. Die komplette Anordnung wird dann nach oben katapultiert und fällt mitsamt dem Experiment frei zunächst nach oben und dann wieder nach unten, wo sie in einem Zylinder mit 2 Tonnen Styroporkügelchen mit einer Beschleunigung von 30g (30-fache Erdbeschleunigung) in 0,2 Sekunden von 176km/h auf 0km/h abgebremst wird.



Film-Loop: „Fallturm am ZARM“

Welche Experimente werden am Fallturm in Bremen durchgeführt? Wie läuft ein solches Experiment ab? Wie sieht es aus, wenn man mit der Fallkapsel nach oben geschleudert wird und dann wieder nach unten fällt? Was passiert, wenn die Kapsel aus einer Höhe von 146 Metern herunterfällt und wieder unten ankommt? Das und Vieles mehr erfahren Sie in diesem Film.

Ausstellungskapitel: Spezielle Relativitätstheorie

Einführung

Bei der Speziellen Relativitätstheorie geht es „nur“ um die Auswirkungen hoher Geschwindigkeiten, oder genauer, um die Rolle, die das Bezugssystem bei Messungen spielt, und um den Einfluss gleichförmiger Bewegung verschiedener Bezugssysteme zueinander. Von Gravitation ist hier noch gar nicht die Rede. Dennoch hält schon die Spezielle Relativitätstheorie etliche überraschende Effekte bereit, die unser gewohntes Bild von der Welt gründlich ins Wanken bringen können: Längenkontraktion, Zeitdilatation, Relativität der Gleichzeitigkeit, und einiges mehr.



Poster: „Schnelle Uhren — langsame Zeit“
Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist absolut konstant: Welche Konsequenzen hat dies?



Filmstation: Spezielle Relativitätstheorie
Längen und Zeiten sind relativ — und das Alles nur, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum unabhängig ist vom Bewegungszustand der Lichtquelle und dem des Beobachters? Wie das zusammenhängt, erfahren Sie hier in vier anschaulichen Filmen, die Sie individuell anschauen können.

Einsteinfahrrad

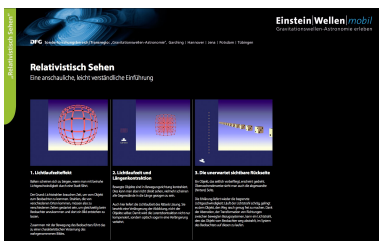
Unter Alltagsbedingungen sind die Effekte der Relativitätstheorie so winzig, dass wir sie nicht wahrnehmen können. Wie würde die Welt aussehen, wenn wir uns mit beinahe Lichtgeschwindigkeit bewegen könnten? Um dies wenigstens virtuell zu ermöglichen, wurde in dieser interaktiven Simulation einer Fahrradfahrt durch die Tübingen Altstadt die Lichtgeschwindigkeit auf 30km/h festgesetzt. Lassen Sie sich überraschen! Ein wenig anstrengen müssen Sie sich trotzdem, wenn Sie auf dem Hometrainer 99% der Lichtgeschwindigkeit erreichen wollen...



Interaktive Simulation: Relativistische Fahrradfahrt

Das Einsteinfahrrad ist eines der beliebtesten Exponate. Es wird gerade auch von jüngeren Besuchern begeistert angenommen. Dabei werden nicht immer alle angebotenen Lerninhalte auch aufgenommen. In jedem Fall verstehen die Besucher, dass die Welt in bestimmten Bereichen und Bedingungen, die vom Üblichen abweichen, ganz anders aussehen kann als gewohnt. Ihre Neugier wird geweckt, es entsteht der Wunsch, Unbekanntes, Ungewohntes zu entdecken und weiter zu erforschen.

Die Lichtgeschwindigkeit liegt bei über einer Milliarde Kilometer pro Stunde. Kein Mensch hat sich je auch nur annähernd so schnell bewegt. Wir können uns daher nicht vorstellen, wie es aussähe, wenn wir jemals mit diesem Tempo unterwegs wären. In dieser Simulation ist die Lichtgeschwindigkeit auf 30 Kilometer pro Stunde herabgesetzt. So ist eine annähernd lichtschnelle Fahrradfahrt möglich. Durch den Vergleich mit einer Alltagssituation — der Fahrt durch eine Stadtkulisse — sind die Veränderungen sehr viel leichter zu erkennen, als dies etwa bei der Simulation eines Weltraumflugs mit knapp Lichtgeschwindigkeit möglich wäre.



Filmstation: Relativistisch Sehen

Was hat die begrenzte Lichtgeschwindigkeit mit unserem Bild von der Welt zu tun? Wie beeinflusst die Lichtlaufzeit das Bild, das wir sehen, wenn wir uns mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Welt bewegen? Kann man die relativistische Längenkontraktion sehen? Weshalb erscheinen gerade Balken plötzlich krumm und

Würfel derart verdreht, dass man sogar ihre Rückseite sehen kann?

In drei kurzen Filmen, die Sie individuell anschauen können, finden Sie anschauliche Antworten auf solche Fragen.

X11

Relativistische Fahrradfahrt



Längenkontraktion



Die relativistische Längenkontraktion verkürzt Objekte in Bewegungsrichtung. Können Sie das in der Simulation beobachten?

Krumme Wände

Beobachten Sie, wie sich die Gestalt der Häuser bei hoher Geschwindigkeit zu verändern scheint.



Was es damit auf sich hat, erfahren Sie in den Filmen der Station „Relativistisches Sehen“.

X11

Relativistische Fahrradfahrt



Das Ziel rückt in die Ferne

Wenn Sie beschleunigen, scheint sich die Szenerie vor Ihnen von Ihnen zu entfernen. Schauen Sie auf das Straßenpflaster möglichst nahe vor dem Fahrrad: Bewegen Sie sich vorwärts oder rückwärts?



Der Grund für den scheinbaren Widerspruch: Als Folge der zwar hohen, aber doch begrenzten Lichtgeschwindigkeit erscheinen Objekte in Bewegungsrichtung in die Länge gezogen, Entfernungen in Vorwärtsrichtung werden scheinbar größer.

Eine genaue Erklärung finden Sie in den Filmen der Station „Relativistisch Sehen“.



X11

Relativistische Fahrradfahrt



Weglänge und Geschwindigkeit

Befahren Sie den Parcours mit mindestens 90% der Lichtgeschwindigkeit, die in der Simulation auf 30 km/h gesetzt ist. Haben Sie den Eindruck, mit knapp 30 km/h unterwegs zu sein? Oder scheint die Geschwindigkeit höher zu sein?



Messen Sie die Fahrzeit für eine Runde bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Beginnen Sie mit nicht mehr als 30%, und nehmen Sie weitere Messwerte etwa bei 50%, 70%, 80% und 90% auf. Bestimmen Sie jeweils die gefahrene Strecke aus Fahrzeit und Geschwindigkeit.



X11

Relativistische Fahrradfahrt



Relativistische Längenkontraktion

Tragen Sie die eben erhaltenen Werte der gefahrenen Strecke gegen die Geschwindigkeit graphisch auf. Fällt Ihnen etwas auf?

Tip: Versuchen Sie, die Fahrtgeschwindigkeit möglichst konstant zu halten.

Welche Fehlerquellen gibt es bei Ihren Messungen? Wie können Sie sie verringern?

Hintergrund: Die relativistische Längenkontraktion verkürzt die Weglänge bei 90% der Lichtgeschwindigkeit auf weniger als die Hälfte, bei 95% der Lichtgeschwindigkeit auf weniger als ein Drittel, bei 99% sogar auf nur noch ein Siebtel.

X11

Relativistische Fahrradfahrt



Tastenbelegung

R Umschalten Relativistische / Nichtrelativistische Simulation

- 1 Längenkontraktion ausschalten (einschalten: s. 2)
- 2 Geometriemodus: Längenkontraktion einschalten, „Tunneleffekt“ und Dopplereffekt ausschalten
- 3 „Tunneleffekt“ einschalten (ausschalten: s. 2)
- 4 Dopplereffekt einschalten (ausschalten: s. 2)
- 5 „Tunneleffekt“ und Dopplereffekt einschalten (ausschalten: s. 2)

Bei eingeschaltetem „Tunneleffekt“ können Sie eine virtuelle Sonnenbrille aufsetzen:

S Sonnenbrille eine Stufe dunkler (mehrfach möglich)

A Sonnenbrille eine Stufe heller (mehrfach möglich)

L Springt zu einer von mehreren vorgegebenen Positionen des Rundkurses

P Pause einschalten / ausschalten

Bei eingeschaltetem Pausemodus:

B Bild bei höherer Geschwindigkeit (mehrfach möglich)

N Bild bei niedrigerer Geschwindigkeit (mehrfach möglich)

Esc Simulation verlassen



Ausstellungskapitel: Visualisierung, Spiel und Spaß

Visualisierung

Würden wir auf einem Neutronenstern leben und mit fast Lichtgeschwindigkeit zu unserem Arbeitsplatz in der Nähe eines Schwarzen Loches pendeln, dann könnten wir die Effekte der Relativitätstheorie unmittelbar erleben. In unserem realen Alltag sind relativistische Effekte dagegen so winzig, dass wir nichts davon bemerken. Das macht es sehr schwierig, eine Intuition dafür zu entwickeln.

Die relativistische Visualisierung versucht, durch Computersimulation die ungewohnten, in der Relativitätstheorie beschriebenen Phänomene wenigstens sichtbar und damit ein wenig verständlicher zu machen.



Poster: „Relativitätstheorie sehen“

Relativistische Effekte werden durch Visualisierung begreifbar.



Interaktive Simulation: Speziell-relativistische Bildverzerrung

Wie sähen der Tübinger Marktplatz oder der Stuttgarter Schlossplatz aus, wenn man sich dort mit beinahe Lichtgeschwindigkeit bewegen könnte? Experimentieren Sie mit verschiedenen Szenen, Geschwindigkeiten, Blickwinkeln und Darstellungsformen.



Interaktive Simulation: Sternenflug ohne und mit Warp-Antrieb

Wie verändert sich der Sternenhimmel, wenn man, ohne Warp-Antrieb, auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt? Oder wenn man sich zunutze macht, dass die Allgemeine Relativitätstheorie wenigstens im Prinzip eine Art Warp-Antrieb zulässt, bei dem ein Teil des Raumes, bspw. mit einem Raumschiff darin, sich beliebig schnell von einem Ort zu einem anderen verschieben lässt?



Interaktive Simulation: Bildverzerrung durch ein Schwarzes Loch

Verschiedene Hintergrundbilder können durch ein Schwarzes Loch verzerrt werden, das zwischen dem Hintergrund und dem Betrachter angeordnet ist. Position, Masse und die Entfernungen zwischen dem Schwarzen Loch, dem Hintergrund und dem Betrachter können interaktiv verändert werden.



Animation: Visuelle Effekte am Schwarzen Loch

Vier Filme zeigen und erklären, wie der Einfluss eines Schwarzen Loches auf Licht die Bilder beeinflusst, die man von Objekten und Ereignissen in seiner Nähe sehen kann. Der Einfluss von Masse und Rotationsgeschwindigkeit des Schwarzen Loches wird ebenso dargestellt wie ein freier Fall ins Loch hinein.



Eventschirm: „Schwarzes Loch“

Dieser dekorative Schirm ist einem flammischen Paraboloid nachempfunden, das die innere Geometrie der Äquatorebene eines Schwarzen Loches repräsentiert. Zu sehen sind auch die Bahnen von Lichtstrahlen in der Umgebung des Schwarzen Loches.

Spiel und Spaß

Wenn Ihnen der Sinn nach einer Pause steht, können Sie sich auf den Einstein-Sitzwürfeln ausruhen. Oder Sie entspannen sich bei einer Runde „Black Hole Pong“. Wenn Sie nach einer Herausforderung suchen, versuchen Sie doch mal Ihr Glück beim Einstein-Quiz! Vielleicht gewinnen Sie sogar einen attraktiven Preis!



Computerspiel: Black Hole Master

(für zwei Personen)

Unvergessen: Pong, eines der ersten Computerspiele. Hier haben Sie Gelegenheit, nicht Bälle mit einem Schläger, sondern Sterne mit Hilfe eines Schwarzen Loches ins Feld Ihres Gegners zu schleudern. Viel Spaß!



Sitzwürfel „Einstein inside“

Auf den Sitzwürfeln können Sie sich einfach ausruhen - oder Sie lösen das Puzzle und legen die Würfel zum Ausstellungslogo zusammen.



Einstein inside: Das Quiz

Alle Fragen lassen sich anhand der Experimente, Filme und Exponate dieser Ausstellung beantworten. Zu jeder Frage sind die Stationen angegeben, bei denen Sie die Antwort am ehesten finden können.

Tragen Sie die vorgegebenen Buchstaben der richtigen Antworten in die Kästchen auf der letzten Seite ein, um den Lösungssatz zu erhalten.

Hinweis: Es können eine oder mehrere Antworten zutreffen.

Viel Erfolg!

1. Schon Galileo Galilei stellte fest, dass
(Siehe: Touch Table „Vor welcher Herausforderung stand Einstein?“)
 L schwere Objekte schneller fallen als leichte.
 R leichte und schwere Objekte gleich schnell fallen.
 N Objekte nur fallen, wenn man sie anschubst.
 A die Fallgeschwindigkeit vom Material abhängt, aus dem ein Objekt besteht.
2. Welches ungelöste Problem ergab sich Anfang des 20. Jahrhunderts aus der Beobachtung der Bahnabweichung des Planeten Merkur?

Quiz zur Ausstellung

Sind Sie Einstein-Experte? Keine Angst - wenn Sie die eine oder andere Frage nicht auf Anhieb beantworten können, dann gibt's Tips, wo die notwendigen Informationen in der Ausstellung zu finden sind. Vielleicht können Sie sogar einen Preis gewinnen!