

Die Ausstellung „Von Newton zu Einstein: Eine Reise durch Raum und Zeit“ dreht sich rund um das Wesen von Raum und Zeit. Eng verknüpft mit diesen Begriffen ist das Konzept der Gravitation oder anders ausgedrückt die Frage danach, „was die Welt im Innersten zusammenhält“ (Faust I, J. W. v. Goethe).

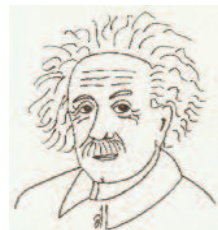
Die Ausstellung führt die Besucherinnen und Besucher zunächst auf die Spuren des englischen Naturphilosophen Sir Isaac Newton (1643 – 1727), eines der Begründer unserer alltäglichen Vorstellung von Raum und Zeit.



In der „Welt Sir Isaac Newtons“ können Sie mithilfe verschiedener Experimente die Gesetze der Schwerkraft erkunden. Auf einer „Newtonschen Bühne“ sowie anhand einer „Newtonschen Uhr“ können Sie seine Ideen zu Raum und Zeit genauer studieren.

Anschließend lernen Sie die moderne Sicht der Dinge kennen, die hauptsächlich auf den Relativitätstheorien des Physikers Albert Einstein (1879-1955) beruht.

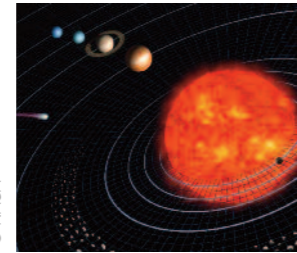
Anders als Sir Isaac Newton versteht Albert Einstein Gravitation als Krümmung – und entsprechend drehen sich die Experimente in der „Welt Albert Einsteins“ um diese anschauliche und gleichzeitig mathematisch faszinierende Idee.



Unterschiede und Gemeinsamkeiten

Sowohl Newton als auch Einstein entwickelten eine Theorie über Gravitation, Raum und Zeit. Diese sind sehr verschieden, beschreiben aber dennoch jeweils Teile der physikalischen Wirklichkeit mit erstaunlicher Präzision. Im dritten Teil der Ausstellung erfahren Sie mehr über das Verhältnis der beiden Theorien und die Konsequenzen für die moderne mathematische und astrophysikalische Forschung.

Wer kennt nicht die berühmte Anekdote: Der Naturphilosoph Sir Isaac Newton saß einst unter einem Apfelbaum und grübelte. Er dachte darüber nach, warum die Planeten unentwegt umeinander kreisen. Plötzlich knackte ein Ast, ein Apfel löste sich und fiel Sir Isaac direkt auf den Kopf. Vor lauter Schreck hatte er einen Geistesblitz: Vielleicht, dachte er, kreisen die Planeten aus genau demselben Grunde umeinander, aus dem der Apfel vom Baum auf meinen Kopf herunter gefallen ist? Weil sie schwer sind!



© NASA

Durchbruch nach Geistesblitz

Sir Isaac Newton begann, eine der wichtigsten Theorien aller Zeiten aufzustellen: die (heute so genannte) Newtonsche Theorie der Gravitation oder der Schwerkraft.

Dazu benötigte er zwei wichtige Konzepte, die er zunächst präzisieren musste: Raum und Zeit. Unter dem (absoluten) Raum stellte sich Newton – so wie wir heute auch – unsere dreidimensionale Umgebung vor. Dazu zählen alle Orte, die wir potentiell durch Bewegungen nach links und rechts, vorne und hinten, unten und oben erreichen könnten, jedenfalls dann, wenn nichts im Weg stünde und wir nicht durch die Schwerkraft an die Erde gefesselt wären. Der Raum ist absolut in dem Sinne, dass er sich wie eine Bühne im Theater unbeeindruckt davon zeigt, was sich in ihm abspielt. Er ist seit jeher und für immer und ewig derselbe. Er sieht an jedem Ort, in jede Richtung gleich aus.

Auch die Zeit ist in Newtons Vorstellung absolut. Ungerührt von den Geschehnissen der Welt fließt sie gleichmäßig vor sich hin und vergeht. Ereignisse geschehen gleichzeitig, nach- oder voreinander, unabhängig davon, wer sie beschreibt. Raum und Zeit sind voneinander unabhängig. Objekte, Licht und Information können sich beliebig schnell von einem Ort zum anderen bewegen. Mit Hilfe dieser Konzepte von Raum und Zeit beschreibt Sir Isaac Newton seine Vorstellung der Welt, in der sich die Gravitation als Schwerkraft manifestiert.

In der „Welt Sir Isaac Newtons“ laden wir Sie ein, eine starre hölzerne Bühne zu betreten. Diese Bühne symbolisiert Newtons Vorstellung des absoluten Raums. Eine über der Bühne befestigte Uhr veranschaulicht die absolute Natur des Newtonschen Zeitbegriffs. Der Apfelbaum auf der Newtonschen Bühne erinnert an die Legende, die die Entdeckung der Gravitation umrankt. Gleichzeitig dient er als Gerüst für zwei Experimente zur Erdanziehung, einer Facette der Newtonschen Gravitations- oder Schwerkraft.

Die Balkenwaage

Die Balkenwaage dient dazu, das Gewicht (genauer: die Masse) zweier Gegenstände qualitativ zu vergleichen. Der schwerere Gegenstand wird von der Erde stärker angezogen als der leichtere – und lenkt dadurch die Waage stärker nach unten aus: Er „wiegt mehr“.



Die Federn

Mithilfe einer Metallfeder kann man das Gewicht (die Masse) eines Gegenstands auch quantitativ bestimmen. Kennt man ihre Federstärke, so kann man von der Auslenkung, um die der Gegenstand die Feder verlängert, auf dessen Gewicht (Masse) schließen. Dabei macht man sich zu Nutze, dass die Auslenkung zur Masse proportional ist.

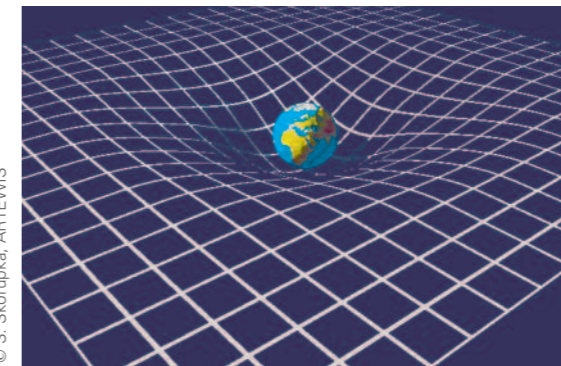
Der freie Fall

Lässt man zwei beliebige, nicht allzu leichte Gegenstände auf gleicher Höhe über der Erde fallen, so kommen sie gleichzeitig unten an. Diese überraschende Erkenntnis geht auf Galileo Galilei (1564-1642) zurück. Zur Erklärung des Phänomens beruft man sich auf zwei Naturgesetze, die bis heute (begrenzt) gültig sind: auf das Aktionsprinzip und das Gravitationsgesetz. Ersteres besagt, dass die (Änderung der) Bewegung eines Gegenstands zu der den Fall verursachenden Schwerkraft proportional ist ($F=m \cdot a$); der Proportionalitätsfaktor ist gerade die Masse des Gegenstands. Das Gravitationsgesetz stellt fest, dass die Schwerkraft selbst zu dieser Masse proportional ist ($F=m \cdot GM/r^2$). Zusammengefasst ergibt sich, dass die Bewegung unabhängig von der Masse ist („m kürzt sich raus“): Verschieden schwere Gegenstände kommen gleichzeitig unten an.

Der Physiker Albert Einstein war ein eigenwilliger und eigenständiger Denker. Er hatte Zweifel daran, ob Newtons Konzepte von absolutem Raum und absoluter Zeit wirklich geeignet sind, die Natur zu beschreiben. Es leuchtete ihm nicht ein, dass Licht sich einerseits (nach Newtons Theorie) prinzipiell beliebig schnell ausbreiten können sollte, eine schnellere Geschwindigkeit als ca. 300.000 km/s andererseits aber nie beobachtet worden war.

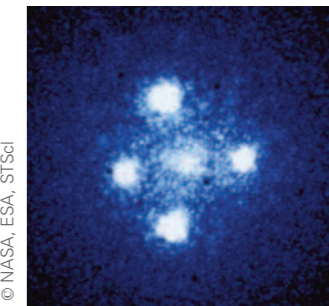
Deshalb zäumte er das Pferd von hinten auf und versuchte, ein neues Konzept von Zeit zu entwickeln, beruhend auf der Idee einer endlichen Lichtgeschwindigkeit „c“. Dabei stellte er fest, dass diese Geschwindigkeit c die Konzepte von Raum und Zeit untrennbar miteinander verbindet. Raum existiert nicht unabhängig von Zeit, und Zeit hat keinerlei Bedeutung ohne Raum. Vielmehr sind Raum und Zeit offenbar nur Schatten oder Projektionen eines komplexeren Objektes, der so genannten Raumzeit. Mit dieser Erkenntnis hatte Einstein seine (heute so genannte) Spezielle Relativitätstheorie geschaffen.

Die Verschmelzung der Konzepte Raum und Zeit zu einer Raumzeit hatte weitreichende Konsequenzen, die auch den Namen Relativitätstheorie erklären: Anders als bei Newton besteht in Einsteins Bild der Welt keine absolute Klarheit darüber, ob zwei Ereignisse gleichzeitig oder nacheinander stattfinden; dies liegt gewissermaßen im Auge des Betrachters. Anders ausgedrückt: Gleichzeitigkeit ist relativ, eine Frage der Perspektive.



© S. Skorupka, ARTEWIS

Leider ist es nicht möglich, die bei Newton so prägnant fassbare Gravitation als Schwerkraft in die Relativitätstheorie zu integrieren. Einstein musste in eine ganz neue Richtung denken und erkannte, dass nur eine Veränderung der Raumzeit – eine Krümmung derselben – geeignet war, Gravitationsphänomene zu beschreiben. Er konzipierte eine allgemeinere Theorie, die Allgemeine Relativitätstheorie, und untersuchte fortan, wie die Krümmung der Raumzeit und die vorhandene Materie (z.B. Sterne, Galaxien, Schwarze Löcher) sich durch Gravitation gegenseitig beeinflussen. Diese Erkenntnisse sind inzwischen experimentell gut bestätigt – und durchaus praktisch relevant: So würden beispielsweise GPS-Geräte ohne Kenntnis der Vorhersagen der Relativitätstheorien kläglich versagen.



© NASA, ESA, STScI

Was ist Krümmung?

Unsere Erde ist in etwa kugelförmig, und ihre Oberfläche ist alles andere als flach: Berge und Täler, Flussbetten und Höhlen machen ihre unverwechselbare Gestalt. Doch diese geographischen Eigenheiten sind nicht allein

dafür verantwortlich, dass die Erdoberfläche nicht flach sondern gekrümmt ist. Auch eine glatte Kugel wie beispielsweise ein Ball oder ein Globus ist gekrümmt. Diese Krümmung macht sich unter anderem dadurch bemerkbar, dass wir selbst auf einem spiegelglatten Ozean nicht beliebig weit blicken können, sondern unsere Sicht durch den Horizont beschränkt wird.

Mathematisch fassbar wird die Krümmung einer (Ober-)Fläche durch das Konzept der „Winkelsumme im Dreieck“. In der ebenen Geometrie ist diese stets 180 Grad, egal ob man ein spitzes oder stumpfes, symmetrisches oder rechtwinkliges Dreieck betrachtet. Ist eine Fläche jedoch gekrümmt, so weicht die Winkelsumme der meisten Dreiecke, die man auf sie zeichnet, von 180 Grad ab. So summieren sich zum Beispiel die Winkel eines Dreiecks auf einem Globus immer zu mehr als 180 Grad.

In der „Welt Albert Einsteins“ haben Sie die Möglichkeit, am eigenen Leib zu erfahren, wie Gewicht (Masse) Krümmung erzeugt und wie umgekehrt Krümmung die Position von Gegenständen beeinflussen kann. Dazu laden wir Sie ein, auf eine Luftmatratze zu steigen, die als vereinfachtes Modell der vierdimensionalen Raumzeit dient. Sobald Sie auf der Matratze stehen, wird ein Teil der Luft unter Ihnen verdrängt, und Sie sinken ein: Die Oberfläche der Luftmatratze krümmt sich. Steigt nun eine zweite Person zu Ihnen auf die Matratze, so wird auch an deren Standort Luft bewegt. Dadurch ändert sich die Krümmung der Hülle der Luftmatratze und Sie stehen – nachdem sich die Unruhe der Bewegung gelegt hat – auf einer anderen Höhe als vorher.

Die seltsamen Uhren

An der Wand oberhalb der Luftmatratze hängen mehrere Uhren. Wenn Sie sich auf der Matratze bewegen, werden Sie feststellen, dass jede einzelne dieser Uhren je nach Blickwinkel und Position unterschiedliche Uhrzeiten anzeigt. Dieses Exponat illustriert, dass in den Relativitätstheorien von Albert Einstein Zeit (und auch Gleichzeitigkeit) relative Konzepte sind, die vom Betrachter abhängen; je nach dessen Position und Bewegungszustand ist die Zeit, die zwischen zwei Ereignissen vergeht, unterschiedlich lang.

Die Luftballons

Anhand der ausliegenden Luftballons können Sie untersuchen, wie groß die Winkelsumme in ganz unterschiedlichen Dreiecken ist. Da die Winkelsumme in Dreiecken Aufschluss über die Krümmung einer Fläche gibt – stark/schwach, konvex/konkav/sattelförmig –, erhalten Sie dadurch einen Einblick darin, was das mathematische Konzept Krümmung bedeutet. Zeichnen Sie zunächst ein Dreieck auf einen nicht aufgepusteten Ballon und messen mit Hilfe eines Geodreiecks dessen Winkel. Zählen Sie nun die drei Winkel zusammen, so erhalten Sie bis auf kleine Messungenauigkeiten eine Winkelsumme von 180 Grad: In nicht aufgeblasenem Zustand ist der Luftballon flach. Jetzt dürfen Sie den Ballon aufpusten und erneut die Winkelsumme in dem Dreieck messen. Diesmal wird sie von 180 Grad abweichen.

Die beiden Physiker Sir Isaac Newton und Albert Einstein haben sehr verschiedene Theorien darüber aufgestellt, wie Gravitation wirkt. Während Newton von einer Schwerkraft ausging, die in einem unveränderlichen absoluten Raum wirkt, in dem die absolute Zeit gleichmäßig vergeht, fasste Einstein erst Raum und Zeit und dann auch Gravitation zu etwas völlig Neuem zusammen, der so genannten (gekrümmten) Raumzeit.

Aber welche Theorie ist denn nun besser, welche ist richtig? Die Antwort lautet: „Es kommt darauf an“. Sicher ist: Alle bisher durchgeführten Experimente haben die Vorhersagen aus Einsteins Theorie bestätigt. Daher ist Einsteins Theorie nach dem aktuellen Stand der Forschung auf jeden Fall richtig. Andererseits ist sie kompliziert und es ist sehr schwierig, mit ihrer Hilfe praktisch relevante Probleme zu lösen. Mit Newtons Theorie verhält es sich eher umgekehrt: Zwar weichen ihre Vorhersagen für einige Gravitationsexperimente von den tatsächlich gemessenen Ergebnissen ab, dafür ist sie aber rechnerisch gut handhabbar und konzeptionell wesentlich einfacher.

Newton und Einstein!

Was auf den ersten Blick unbefriedigend erscheinen mag, eröffnet bei näherer Betrachtung ganz neue Möglichkeiten. Wenn man genau wüsste, bei welcher Art von Experimenten Newtons Theorie näherungsweise richtige Vorhersagen macht, könnte man sie in diesen Fällen statt der rechnerisch wesentlich anspruchsvolleren Einsteinschen Theorie einsetzen und viel Aufwand sparen. Und man könnte versuchen, das über Jahrhunderte angehäuften Wissen und Verständnis der Newtonschen Gravitationstheorie soweit wie möglich auf Einsteins Theorie zu übertragen.

Newtons Theorie reicht zur Beschreibung von Systemen mit nicht allzu großen Massen, Geschwindigkeiten und Energien, z.B. dem Herunterfallen eines Apfels von einem Baum, vollkommen aus. Wissenschaftlich ausgedrückt: Die Newtonsche Theorie ist ein Grenzfall der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie.

Wie groß dürfen Massen, Geschwindigkeiten und Energien eines Systems (z.B. eines Sterns, einer Galaxie) sein, um im Gültigkeitsbereich der Newtonschen Theorie zu liegen? Gibt es eine scharfe Grenze, ab der Newtons Theorie ihre Vorhersagekraft verliert, oder passiert das schleichend? Wie stark hängt dies mit anderen Eigenschaften der betrachteten Systeme zusammen? Dies alles ist Inhalt aktueller Forschung, man spricht vom „Newtonschen Limes“.

Das mathematische Auge

Wenn Sie die Bilder auf der Titelseite dieses Flyers betrachten, können Sie sehen, wie sich das Gesicht von Sir Isaac Newton in das Gesicht Albert Einsteins verwandelt. Ähnlich stellt man sich den Newtonschen Limes vor: Einzelne Ausschnitte von Newtons Gesicht ähneln denen von Einstein so sehr, dass man sie getrost als „Näherung“ dafür verwenden kann. Manche Gesichtszüge jedoch sind so unterschiedlich, dass der Versuch, Einsteins Gesicht aus dem von Newton zu rekonstruieren, zwangsläufig scheitern muss.

Wie in der physikalischen Theorie ist es auch bei der sinnbildlichen Gesichterreihe schwierig, quantitativ abzuschätzen, welche Bereiche (z.B. Stirn, Kinn, Mund, Nase) sich stark und welche sich weniger stark unterscheiden. In der Forschung braucht man dazu komplizierte mathematische Methoden, die – wie eine Art mathematisches Auge – die innewohnende Struktur aufzeigen und sichtbar machen.

Zum Weiterlesen

Claus Kiefer: *Gravitation*
Domenico Giulini: *Spezielle Relativitätstheorie*
beide: Fischer, Frankfurt a. M. 2004
Markus Pössel: *Das Einstein-Fenster*, Hoffmann und Campe, Hamburg 2005
Kip Thorne: *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit: Einsteins Vermächtnis*, Droemer Knaur, München 1994

Carla Cederbaum: *Wie man einen Schokoladendieb entlarvt ... und andere mathematische Zaubertricks*, Herder Verlag, Freiburg i. B. 2008
Carla Cederbaum, Philipp von Homeyer (Hrsg): *Ein Moment für Mensch und Mathematik*, Freiburger Verlag, Freiburg 2007

Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI)

Am AEI wird der gesamte Bereich der Gravitationsphysik erforscht – von den riesigen Dimensionen des Kosmos bis hin zu den winzigen Abmessungen der Strings. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Albert-Einstein-Instituts in Potsdam arbeiten u.a. an der Entwicklung einer Theorie, die Quantenfeldtheorie und Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie vereint. Sie erforschen die Struktur von Gravitationswellen, die von Neutronensternen und Schwarzen Löchern ausgesendet werden – teils unter Anwendung numerischer Lösungen der Einsteinschen Gleichungen. Außerdem werden auf der Basis von Einsteins Theorie die mathematischen Grundlagen der Raumzeit und der Gravitation untersucht.

Die Experimentalphysiker am Teilinstitut in Hannover betreiben den Gravitationswellendetektor GEO600; sie sind federführend am Weltraumprojekt LISA Pathfinder beteiligt und entwickeln neue Gravitationswellendetektoren für den Einsatz auf der Erde und im Weltraum. Außerdem werden hier moderne mathematische Datenanalysemethoden entwickelt und eingesetzt. Die Vereinigung aller dieser wichtigen Forschungszweige unter einem Dach ist weltweit einzigartig.

www.aei.mpg.de

www.einstein-online.info

Projektverantwortliche

Dipl. Math. Carla Cederbaum
(Konzeption, wissenschaftliche Inhalte und Texte)
Dr. Elke Müller
(Konzeption, Koordination und Redaktion)
Prof. Dr. Gerhard Huisken
(Wissenschaftliche Beratung)



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



© Einsteinbild: bpk / Orron Jack Turner

Von Newton zu Einstein:
Eine Reise durch
Raum und Zeit