GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung
GEFÖRDERT DURCH DIE Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung

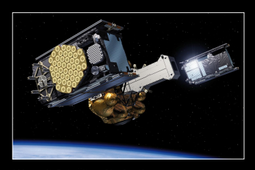
Von Newton zu Einstein – Auswirkungen der Gravitation

Die vier grundlegenden Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie und ihre Messung

Einstein und Newton: Geometrie vs. Kraft
In Newtons Beschreibung ist Gravitation eine Kraft. Bei Einstein sind es Raum und Zeit selbst, die sich in Anwesenheit von Masse oder Energie verzerren. Wie sich die Bewegung von Schauspielern der Form der Bühne anpasst, so verändert sich die Bewegung von Körpern und von Licht durch die Raum-Zeit-Verzerrung.

1. Gravitations-Zeitdehnung

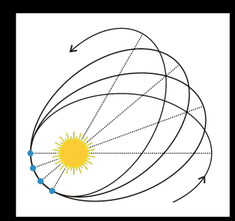
Die Gravitation im irdischen Alltag, und der Großteil der Gravitation, welche die Planeten unseres Sonnensystems auf ihren Umlaufbahnen hält, wird in Einsteins Theorie jeweils als Verzerrung der Zeit beschrieben. Diese lässt sich mit hochpräzisen Atomuhren auch direkt nachweisen: Uhren gehen in der Nähe einer Masse langsamer als in größerer Entfernung von der Masse.



Wer mit Satelliten-Navigationssystemen so genau wie möglich messen möchte, muss die relativistischen Effekte der Zeitdehnung berücksichtigen. Andernfalls ergeben sich Fehler im Meter-Bereich. (Bild: ESA/Carril)

2. Relativistische Perihel-Drehung

Einsteins Beschreibung von Planetenbewegungen ergibt eine kleine Abweichung von den Newton'schen Ellipsenbahnen: Der sonnennächste Punkt solcher Bahnen verschiebt sich mit jedem Umlauf ein wenig. Beim Merkur ist der Effekt am größten, beträgt aber dennoch nur rund ein Hundertstel Grad pro Jahrhundert.



Bahnberechnungen in Einsteins Theorie führen zu leicht anderen Vorhersagen als Newtons Gravitationstheorie.

Die Unterschiede sind umso größer, je stärker die Gravitationswirkung in der gegebenen Situation ist. Aus den bei Newton geschlossenen Ellipsenbahnen werden bei Einstein Bahnen, die sich mit der Zeit leicht drehen. (Bild: MpFiz/Wikimedia-Commons)

Weit größer ist der Effekt beim sogenannten Doppelpulsar PSR J0737-3039: Dort kreisen zwei hochkompakte Neutronensterne umeinander, von denen wir hier auf der Erde mit großer Regelmäßigkeit Radiopulse empfangen. Ihre Bahn dreht sich um beachtliche 17 Grad/Jahr.

3. Lichtablenkung

In Newtons Gravitationstheorie kann man argumentieren, die Beschleunigung im Schwerefeld sei unabhängig von der Masse eines Körpers. Warum sollten Lichtteilchen dann auf ihren Bahnen nicht dieselbe Beschleunigung erfahren wie Materieteilchen? Das ergibt – wenn auch nicht ganz konsistent – einen Newton'schen Wert für Lichtablenkung durch die Gravitationswirkung einer Masse.

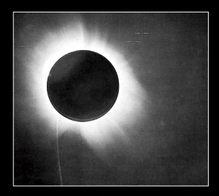
In der Einstein'schen Theorie ist nicht nur die Zeit, sondern auch die Geometrie des Raums verzerrt. Insgesamt ergibt dies für die Lichtablenkung das Doppelte des Newton'schen Werts.

4. Lichtlaufzeit-Verzögerung

Wird Licht von einer Masse angezogen, ergibt sich nicht nur eine Ablenkung seiner Bahn, sondern auch die Laufzeit des Lichts verlängert sich ein wenig.

Wieder tragen Zeit- und Raumverzerrung zu gleichen Teilen bei und die allgemein-relativistische Vorhersage ergibt den doppelten Wert der Newton'schen.

Diese Lichtlaufzeit-Verzögerung wurde erstmals Mitte der 1960er Jahre von Irwin Shapiro postuliert und anhand von interplanetaren Radarsignalen nachgewiesen.



Erstmals nachgewiesen wurde der Einstein'sche Wert für die Lichtablenkung von Sternenlicht, das an der Sonne vorbeiläuft bei zwei von den britischen Astronomen Arthur Eddington und Frank Dyson organisierten Beobachtungen während einer Sonnenfinsternis im Jahre 1919.

Um das Licht von Sternen, die sich am Himmel gerade direkt neben der Sonne befinden, überhaupt messen zu können, nutzten die beiden Astronomen die totale Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919.

Die Reproduktion des SW-Glaspositivs weist Strichmarkierungen auf, in deren Mitte ganz schwach zwei Sternorte zu sehen sind. Deutlich genauere Werte lieferten später die Radio-Positionsbestimmungen weit entfernter, sehr heller Galaxienkerne, von Quasaren. (Bild: Dyson, Eddington, Davidson, 1919)

Gravitations-Zeitdehnung, Periheldrehung, Lichtablenkung und Shapiro-Effekt waren ursprünglich die klassischen vier Tests, die Newtons und Einsteins Theorien auf die Probe stellten. Die Antwort fiel eindeutig zugunsten der Allgemeinen Relativitätstheorie aus.

Längst sind diese Effekte zu Werkzeugen oder aber zu Störeffekten geworden: Astronomen nutzen Gravitationslinsen unter anderem zur Massenbestimmung von Galaxien und die Lichtablenkung muss bei den hochgenauen Positionsmessungen des Gaia-Satelliten als Störung berücksichtigt werden.

Haus der Astronomie, Heidelberg

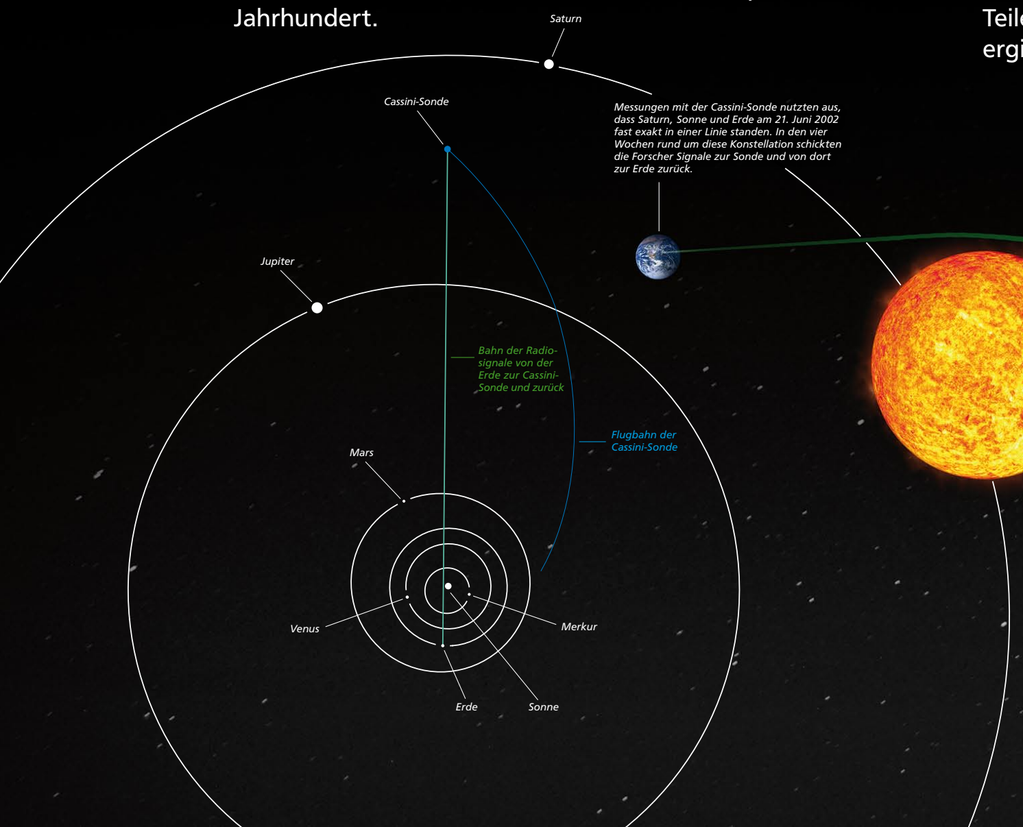
Das Haus der Astronomie in Heidelberg trägt die Faszination der Astronomie in die breite Öffentlichkeit und in die Schulen. Es fördert den Austausch der Astronomen untereinander und mit den Kollegen angrenzender Wissensgebiete.

Dazu führen wir Veranstaltungen für die allgemeine Öffentlichkeit, Workshops für Schulklassen und Kindergartengruppen sowie Fortbildungen für Lehrer durch. Entwickeln Lehrmaterialien, unterstützen Schülerforschungsprojekte, wissenschaftliche Treffen und Konferenzen, engagieren uns bei Ausstellungen und bei der Visualisierung astronomischer Phänomene und arbeiten Vertretern der Medien bei der Berichterstattung über astronomische Inhalte zu.

Das Haus der Astronomie wurde Ende 2008 von der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V. und der Klaus Tschira Stiftung gGmbH gegründet. Die Klaus Tschira Stiftung war Bauherrin des HdA-Gebäudes und hat außerdem eine angemessene Grundausstattung gestiftet. Das 2011 fertiggestellte Gebäude in Form einer Spiralgalaxie bietet neben Workshop-, Büro- und Ausstellungsräumen das zentrale Klaus Tschira-Auditorium mit digitaler Planetariumsanlage. Die Leitung des Hauses obliegt der Max-Planck-Gesellschaft und wird durch das Max-Planck-Institut für Astronomie wahrgenommen. Weitere Partner sind die Universität Heidelberg und die Stadt Heidelberg.

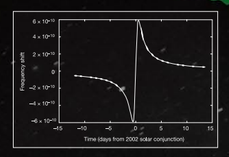
Allgemeinverständliche Informationen zu Einsteins Relativitätstheorien präsentieren wir in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) auf www.einstein-online.info

Bild: Markus Pössel/HdA

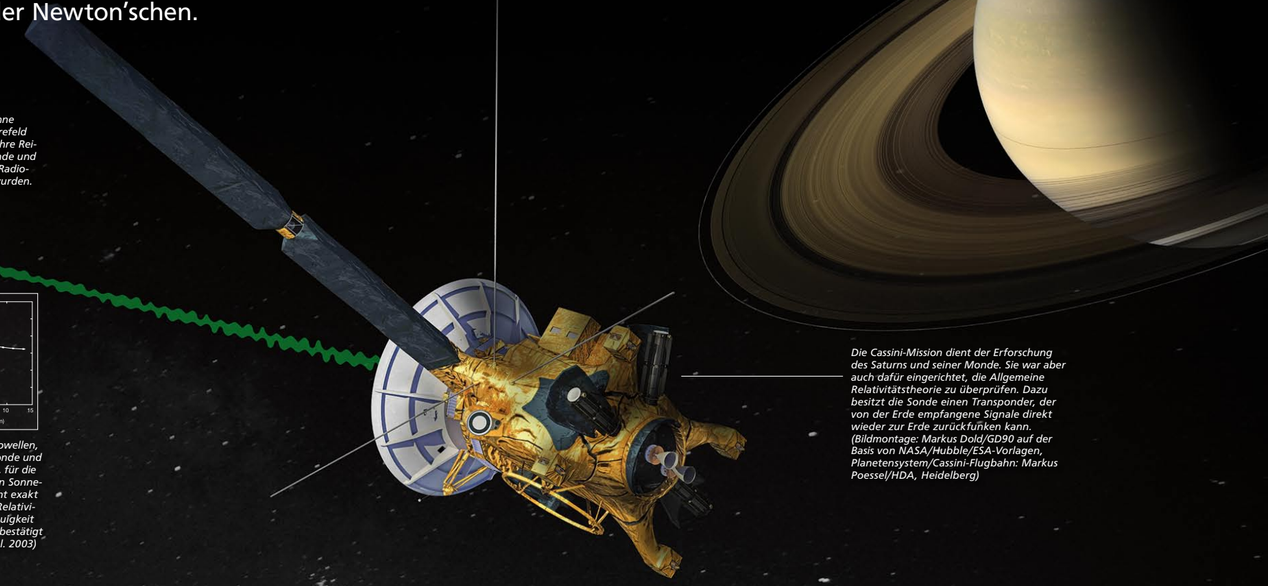


Messungen mit der Cassini-Sonde nutzten aus, dass Saturn, Sonne und Erde am 21. Juni 2002 fast exakt in einer Linie standen. In den vier Wochen rund um diese Konstellation schickten die Forscher Signale zur Sonde und von dort zur Erde zurück.

Beim „Vorbeistreichen" an der Sonne wurden die Lichtsignale im Schwerefeld abgelenkt. Das beeinflusste auch ihre Reisezeit von der Erde zur Cassini-Sonde und zurück – und die Frequenzen der Radiowellen, die hin- und hergesandt wurden.



Die Frequenzänderungen der Radiowellen, welche im Juni 2002 zur Cassini-Sonde und von dort zur Erde gesandt wurden, für die Tage vor und nach der Konjunktion Sonne-Erde-Saturn. Der Verlauf entspricht exakt der Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie, die so mit einer Genauigkeit von einigen Hunderttausendsteln bestätigt werden konnte. (Bild: Bertotti et al. 2003)



Die Cassini-Mission dient der Erforschung des Saturns und seiner Monde. Sie war aber auch dafür eingerichtet, die Allgemeine Relativitätstheorie zu überprüfen. Dazu besitzt die Sonde einen Transponder, der von der Erde empfangene Signale direkt wieder zur Erde zurückfunken kann. (Bildmontage: Markus Dold/GD90 auf der Basis von NASA/Hubble/ESA-Vorlagen, Planetensystem/Cassini-Flugbahn: Markus Poessel/HDA, Heidelberg)

Design: www.gd90.de