



**Grundlagen der Physik
im extraterrestrischen Test**



Eine kurze Begegnung im Oktober 1798 änderte das Leben des jungen schottischen Botanikers und Militärarztes Robert Brown grundsätzlich: Er lernte Sir Joseph Banks, den grossen Naturforscher kennen, der ihn gleich für seine Forschungsreise mit dem Segelschiff *Investigator* anheuerte. Die Reise führte ihn nach Australien und Tasmanien, und als die *Investigator* vier Jahre später wieder in London anlegte, hatte sie Tausende von Pflanzen an Bord, von denen die meisten noch unbekannt waren.

Fünf Jahre benötigte Robert Brown, um das umfangreiche Material zu beschreiben und zu klassifizieren. Dazu nutzte er das Mikroskop, um möglichst genaue Hinweise für die systematische Einordnung der Pflanzen zu finden. Eine überraschende Beobachtung gelingt ihm 1827: Er stellt fest, dass der Pollen der *Clarkia pulchella* aus kleinen Partikeln besteht, die sich offensichtlich in unaufhörlicher Bewegung befinden. Der Biologe denkt zunächst an kleinste Lebewesen, die sich mit eigener Kraft fortbewegen; daher untersucht er im Weiteren auch Pollenkörner, die während Monaten in Alkohol konserviert wurden, nur um wieder dieselbe dauernde Bewegung festzustellen. Selbst zu Staub zerriebener Fels zeigt das gleiche Verhalten. Brown, der systematische Forscher, zieht daraus den Schluss, dass es sich hier um ein physikalisches und nicht um ein biologisches Phänomen handelt.

Achtzig Jahre später stimmte der junge Albert Einstein dieser Interpretation zu. Er deutete die Brown'sche Bewegung als die Folge von Stössen der sich in thermischer Bewegung befindlichen unsichtbaren Moleküle der Flüssigkeit auf die kleinen sichtbaren Partikel. Diese Erkenntnis publizierte er 1905 zusammen mit drei weiteren Arbeiten in den Annalen der Physik, womit er ein neues Kapitel der Physik aufschlug.

Seit Einstein bemühen sich die Wissenschaftler, in immer komplexeren Experimenten die Aussagen des Einstein'schen Gedankengebäudes zu überprüfen oder – noch besser – zu widerlegen. Denn bis heute ist es nicht gelungen, seine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik in Einklang zu bringen. Daher suchen die Physiker selbst nach kleinsten Unstimmigkeiten zwischen der Relativitätstheorie und dem Experiment, um allfällige Hinweise darauf zu erhalten, wo anzusetzen ist, um vielleicht doch noch die *Grand Unified Theory* zu finden, von der die Physiker seit Einstein träumen. Diesem Thema ist die vorliegende Ausgabe des *Spatium*s gewidmet.

Wir danken Herrn Professor Martin C.E. Huber, Präsident der Europäischen Physikalischen Gesellschaft, für die freundliche Erlaubnis, sein Referat vom 21. Oktober 2004 für Pro ISSI in erweiterter Form wiedergeben zu dürfen.

Hansjörg Schlaepfer
Zürich, Juni 2005

Impressum

SPATIUM
Publikationsorgan des
Vereins Pro ISSI
Erscheint zweimal jährlich



Verein Pro ISSI
Hallerstrasse 6, CH-3012 Bern
Tel. +41 (0)31 631 48 96
www.issi.unibe.ch/pro-issi.html
(hier sind alle bisherigen Nummern
des *Spatium*s als pdf verfügbar)

Präsident

Prof. Heinrich Leutwyler,
Universität Bern

Herausgeber

Dr. Hansjörg Schlaepfer,
legenda schläpfer wort & bild,
CH-8185 Winkel

Layout

Marcel Künzi, marketing · kommunikation,
CH-8483 Kollbrunn

Druck

Schellenberg Druck AG
CH-8330 Pfäffikon

Titelbild

Dieses Bild zeigt die Wirkung hoher Massenkonzentrationen auf die Ausbreitung des Lichts: Im Vordergrund ist der Galaxienhaufen Abell 1689 als gelbe Objekte zu sehen. Die Masse seiner Galaxien ist so gross, dass er das Licht der dahinter liegenden Galaxie ablenkt und verzerrt, sodass sie mehrfach als blaue Kreissegmente sichtbar wird. (Quelle: NASA/ESA, STScI)

Grundlagen der Physik im extraterrestrischen Test¹

Einleitung

Der österreichische Wissenschaftsphilosoph Karl Popper² schreibt 1972 in seiner «Objektiven Erkenntnis»³:

«... die neue Theorie kann wie jede unwiderlegte Theorie auch falsch sein. Der Theoretiker wird also alles versuchen, unter den nicht widerlegten Theorien falsche herauszufinden, «dingfest zu machen». ...»

«Er wird ... versuchen, strenge Prüfungen sowie zwischen Theorien entscheidende Prüfungssituationen zu entwerfen.» ...

«Ziel des Experimentes muss es ... sein, eine Theorie zu falsifizieren, um auf diesem Weg allenfalls auf eine wahre Theorie zu stossen ...»

Albert Einstein⁴, der Schöpfer der Relativitätstheorie, war sich der epochalen Bedeutung seines Werkes wohl bewusst. Er selbst hat Experimente vorgeschlagen, um die Gültigkeit seiner Theorien zu überprüfen, ihre Aussagen allenfalls zu falsifizieren. Es ist beson-

«**Eine Theorie sollte so einfach wie möglich sein, aber nicht einfacher.**»

ders seit den Sechzigerjahren eines der zentralen Anliegen der Physik, die Relativitätstheorie immer «strengeren Prüfungen» zu unter-

werfen und damit in den innersten Kern unseres physikalischen Weltbildes vorzustossen. Einerseits gibt das Universum selbst mit seiner unvorstellbaren Grösse und seinen riesigen Massen den idealen Rahmen für solche Tests. Andererseits eröffnet die Weltraumtechnik die

Möglichkeiten, Experimente unter praktisch störungsfreien Bedingungen durchzuführen und zu Messgenauigkeiten vorzudringen, die weit über diejenigen irdischer Versuchsvorrichtungen liegen. Der Zugang zu solch exquisiten Experimentiertechniken ermöglicht es, sowohl die Richtigkeit der Theorien als auch die ihnen zu Grunde liegenden Annahmen mit stets grösserer Genauigkeit zu überprüfen. Das vorliegende Spatium ist dem Menschen Albert Einstein und den Bemühungen der Physiker gewidmet, seine Theorien zu falsifizieren.

Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie (1905) beschreibt die physikalischen Gesetze im Spezialfall unbeschleunigter Referenzsysteme, der sogenannten Inertialsysteme.

Die Allgemeine Relativitätstheorie (1916) beschreibt die physikalischen Gesetze im allgemeinen Fall, also auch für beschleunigte Referenzsysteme oder solche, die sich im Einflussbereich eines Gravitationsfeldes befinden.

Der entscheidende Gedanke der Relativitätstheorie ist der, dass alle physikalischen Gesetze in beschleunigten Systemen dieselben sind, unabhängig davon, ob die Beschleunigung von der Schwerkraft oder von einer Änderung der Geschwindigkeit stammt.



Bild 1: Der junge Albert Einstein im annus mirabilis 1905

¹ Nach dem Pro ISSI Referat vom 21. Oktober 2004

² Sir Karl R. Popper, 1902 Wien bis 1994 London; Philosoph und Wissenschaftstheoretiker

³ K. Popper: Objektive Erkenntnis, campe paperback, 1993

⁴ Albert Einstein, 1879 Ulm bis 1955 Princeton; Physiker, Nobelpreis für Physik 1922

Die Zeit vor der Relativitätstheorie

Am 14. März 1879 kommt in Ulm ein Knabe zur Welt, der die Naturwissenschaften in ihren Fundamenten erschüttern wird: Albert Einstein. Mit vier Jahren erhält er von seinem Onkel einen Kompass, der mit seiner stets nach Norden zeigenden Nadel den jungen Albert fasziniert. Vielleicht ahnt er dabei ein erstes Mal, dass etwas hinter den Dingen unsichtbar verborgen sein muss, das die Welt beherrscht. Von einem Freund der Familie erhält er im Laufe der Jahre eine Vielzahl populärwissenschaftlicher Bücher, die der heranwachsende Junge mit grossem Interesse verschlingt. In der Schule in München erbringt er zwar ausgezeichnete Leistungen in Mathematik und auch in den klassischen Sprachen, doch die wie «Feldweibel agierenden Lehrer» werden ihm zunehmend zum grossen Ärgernis. Ein eifriges Selbststudium hilft, den ihm völlig ungenügend erscheinenden Unterricht in Mathematik zu ertragen. Die Mittelschule bricht er unvermittelt ab, reist zu seinen Eltern, die sich mittlerweile in Mailand niedergelassen haben, und beginnt sich dort im Selbststudium für die Aufnahmeprüfung am Polytechnikum in Zürich vorzubereiten.

Diese findet im Oktober 1895 statt, endet für den erst 16-Jährigen aber mit einem Fiasko: Albert hatte die Sprachen vernachlässigt und sich zu sehr auf die ihn so faszinierenden naturwissenschaftlichen Fächer konzentriert. Für einen zweiten Anlauf schreibt er sich in der Abschlussklasse der Kantonsschule Aarau ein. Ihr liberales Klima sagt ihm sehr zu. Die herzliche Aufnahme

«*Mir geht es gut; ich bin ehrwürdiger eidgenössischer Tintenscheisser mit ordentlichem Gehalt: Daneben reite ich auf meinem alten mathematisch-physikalischen Steckenpferd und fege auf der Geige.*»

durch die Familie des Kantonschullehrers Winteler, vor allem aber die Tochter Marie, Einsteins erste grosse Liebe, haben es ihm angetan, und der junge Freigeist fühlt sich in Aarau überaus wohl. Das Ergebnis ist entsprechend: Eine hervorragende Maturität, wenn auch mit einer ungenügen-

den Note in der französischen Sprache...

Zu jener Zeit verfasst Albert Einstein seine erste wissenschaftliche Arbeit über den Äther, ein hypothetisches, das Vakuum ausfüllendes Medium, das damals zur Erklärung der Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung postuliert wurde. Im Oktober 1896 immatrikuliert er sich am

Polytechnikum in der «Schule für Fachlehrer mathematischer und naturwissenschaftlicher Richtung». Die obligatorischen Lehrveranstaltungen lässt er mit mässiger Begeisterung über sich ergehen. Er fühlt sich eher zu der einen oder anderen fakultativen Vorlesung hingezogen, wie zum Beispiel zur Urgeschichte des Menschen oder zur Geologie der Gebirge. Nach vier Jahren schliesst Albert Einstein sein Studium mit dem Diplom ab, doch trotz intensiver Bemühungen gelingt es ihm nicht, eine Stelle als Assistent am Poly oder an einer anderen europäischen Hochschule zu finden. Daher muss er sich mehr schlecht als recht zunächst als Hilfslehrer am Technikum Winterthur, dann als Lehrer an einer Privatschule in Schaffhausen und als freier Privatlehrer in Bern durchschlagen. Dem gebürtigen Deutschen, der seine Staatsbürgerschaft nach der Übersiedlung in die Schweiz abgelegt hat, gewährt die stadtzürcherische Einbürgerungskommission das Schweizer Bürgerrecht und – mit Blick auf seine

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Zentrales Element der Relativitätstheorie ist die absolute Konstanz der Lichtgeschwindigkeit von 299'792'458 m/s im Vakuum. Sie bedingt, dass sich in einem bewegten Bezugssystem Raum und Zeit in Abhängigkeit seiner Geschwindigkeit so verändern, dass die Lichtgeschwindigkeit erhalten bleibt: Die Zeit dilatiert und die Raumdimensionen verkürzen sich; die Lichtgeschwindigkeit ist konstant, aber Raum und Zeit sind relativ.

bescheidenen finanziellen Verhältnisse – erst noch zu einem reduzierten Tarif. Dies und vertrauensvolle Beziehungen ermöglichen ihm, am 23. Juni 1902, eine Anstellung als Technischer Experte III. Klasse am Eidgenössischen Amt für Geistiges Eigentum in Bern zu finden. Nun sind auch die finanziellen Verhältnisse geregelt, sodass er zu Beginn des Jahres 1903 seine ehemalige Kommilitonin Mileva Maric heiraten kann. Das junge Paar fühlt sich in der Dachwohnung an der Tillierstrasse 18 in der «altertümlichen, urgemütlichen» Stadt Bern sehr wohl.

Es sind die Widersprüche der Physik seiner Zeit, die Albert Einstein zu den grossen Entdeckungen anregen: Während die klassische Mechanik von Isaac Newton⁵ von einer zeitverzugslosen Wirkung der Gravitation auf Massen ausgeht, postuliert die neuere Feld-

theorie von James Clerk Maxwell⁶ die Ausbreitung elektromagnetischer Felder mit Lichtgeschwindigkeit. Auch der Begriff des Äthers führt zu Widersprüchen,

«**Nur wer nicht sucht,
irrt nicht.**»

denn das Licht einer bewegten Quelle müsste sich darin mit grösserer als Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, was undenkbar ist, hatten doch Albert Michelson⁷ und Edward Morley⁸ erst vor wenigen Jahren in ihrem wegweisenden Experiment gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit die gleiche ist, unabhängig davon, ob es sich in Richtung der Bahn der Erde um die Sonne – immerhin mit einer Geschwindigkeit von etwa 30 Kilometern pro Sekunde – oder quer dazu ausbreitet.

Oft diskutiert Einstein zu jener Zeit bis spät in die Nacht hinein oder auf Ausflügen am Sonntag mit seinen Freunden, die ihren Kreis scherzhaft *Akademie Olympia* nennen. Albert Einstein arbeitet an verschiedenen Themenkreisen gleichzeitig, und im Frühjahr 1905 publiziert er innerhalb weniger Monate fünf Arbeiten, welche der Physik die grosse Wende bringen: Die erste Arbeit gilt den energetischen Eigenschaften des Lichts. Hier führt er eine zum bisherigen Wellenbild alternative Erscheinungsform des Lichts ein: Energiepakete, die wir heute Photonen nennen. Dafür erhält er 1922 den Nobelpreis für Physik.

Die zweite Arbeit, seine Dissertation, betrifft die Bestimmung der Grösse von Molekülen. Die dritte damit verbundene Publikation erklärt die Brown'sche Bewegung von in ruhender Flüssigkeit suspendierten Körpern durch Stösse der unsichtbaren Moleküle, die sich gemäss den Gesetzen der Thermodynamik bewegen. Die vierte Arbeit erst behandelt die Elektrodynamik bewegter Körper: Die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie. Im Herbst veröffentlicht er noch einen fünften Artikel, in welchem er die wohl berühmteste Formel der Naturwissenschaften

$$E = m \cdot c^2$$

herleitet. Vier dieser Arbeiten erscheinen in den *Annalen der Physik* zwischen März und Dezember

⁵ Sir Isaac Newton, 1643 Woolsthorpe bis 1727 London; Physiker

⁶ James Clerk Maxwell, 1831 Edinburg bis 1879 Cambridge; Physiker

⁷ Albert Michelson, 1852 Strelno (Posen) bis 1931 Pasadena; Physiker

⁸ Edward Morley, 1838 Newark, New Jersey, bis 1923; Physiker

1905, die Arbeit über die Grösse der Moleküle reicht er als Doktorarbeit an der Universität Zürich ein. Diese ungeheure Leistung kennt in der gesamten Wissenschaftsgeschichte nichts Ebenbür-

tiges: Man spricht vom Jahr 1905 als dem *annus mirabilis*, dem Wunderjahr. So überragend die bisherigen Erkenntnisse von Albert Einstein auch sind, so zermürbend und rastlos ist der ihm noch bevorste-

hende, weitere elf Jahre dauernde Weg, der ihn erst auf die Höhe seines wissenschaftlichen Denkens bringen wird. Er versucht sich zunächst an der Universität Bern als Privatdozent für theoretische Physik zu habilitieren; erfolglos, denn er hat dem Gesuch zwar viele veröffentlichte Arbeiten, aber keine eigentliche Habilitationsschrift beigelegt. Erst nachdem Einstein der Forderung mit der unveröffentlichten, aber leider verschollenen Arbeit «Folgerungen aus dem Energieverteilungsgesetz der Strahlung schwarzer Körper, die Konstitution der Strahlung betreffend» nachkommt, sind die Formalitäten erfüllt, und Einstein beginnt Vorlesungen zu halten. Doch deren Erfolg hält sich in engen Grenzen: Nur wenige Hörer verirren sich in seine Lektionen.

Ein Jahr später folgt er einer Berufung der Universität Zürich als Extraordinarius. Ein weiteres halbes Jahr später übernimmt Einstein eine ordentliche Professur an der Universität Prag. Nach einem weiteren Jahr übersiedeln die Einsteins wieder nach Zürich und zwei Jahre später übernimmt Einstein eine Stelle in Berlin.

In dieser turbulenten Zeit arbeitet sich Einstein Schritt für Schritt voran: Zunächst postuliert er, dass die Physik in einer beschleunigten Umgebung dieselbe ist, gleichgültig ob die Beschleunigung durch Gravitation entsteht oder durch Änderung der Geschwindigkeit erzeugt wird. Man nennt dies das starke Äquivalenzprinzip (1907). Dieses beinhaltet auch die Äquivalenz von schwerer und träger

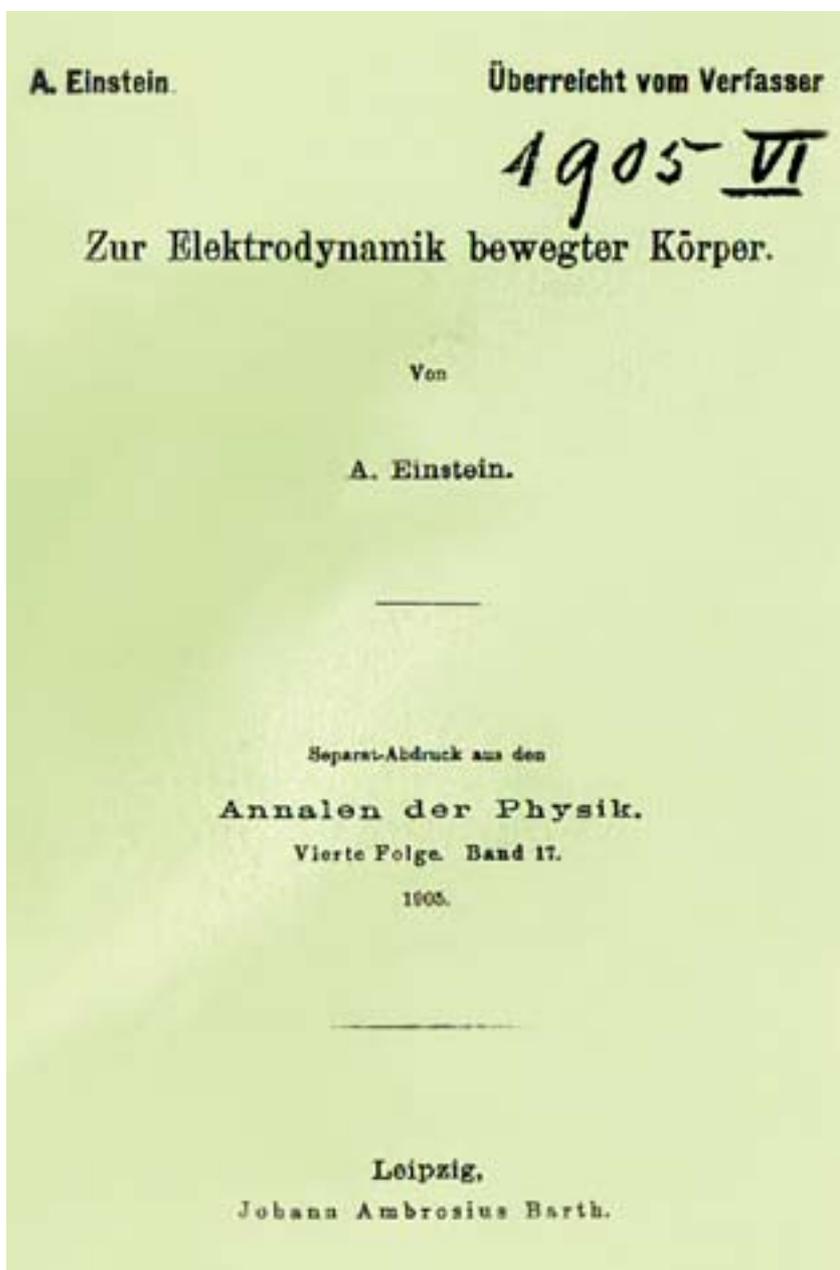


Bild 2: Titelblatt der Publikation von Albert Einstein über die Elektrodynamik bewegter Körper. Diese Arbeit ist die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie.

Die Äquivalenz der Massen

Wenn sich ein Beobachter im freien Fall, zum Beispiel in einer frei fallenden Liftkabine, befindet und einen Apfel loslässt, so wird der Apfel bei der Hand bleiben. Wenn er sich für dieses Experiment an Bord eines um die Erde kreisenden Raumfahrzeuges begibt, so wird er das gleiche Resultat feststellen: In beiden Fällen fühlt er Schwerelosigkeit, in beiden Fällen wird er behaupten, keiner Gravitation ausgesetzt zu sein.

Wenn er sich dagegen auf dem Erdboden befindet, wird er feststellen, dass sein Apfel mit einer Beschleunigung von $9,8 \text{ m/s}^2$ zu Boden fällt. Entsprechend wird er an Bord eines mit $9,8 \text{ m/s}^2$ beschleunigten Raumfahrzeuges dasselbe feststellen.

Das Äquivalenzprinzip sagt aus, dass die – sich der Beschleunigung widersetzen – träge Masse und die – vom Gravitationsfeld angezogene – schwere Masse unabhängig von ihrer Zusammensetzung einander strikt proportional sind. Für Albert Einstein war dies eine Annahme, die damals erst mit einer Genauigkeit von 10^{-5} bestätigt war. Heute ist das Äquivalenzprinzip bis zu einer Genauigkeit von 10^{-13} überprüft.

Masse, das sogenannte schwache Äquivalenzprinzip. Dann erarbeitet er die nicht-euklidische Geometrie für gekrümmte Räume und stellt schliesslich die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf (1916).

Es ist ein äusserst anstrengender Weg: Einstein verirrt sich einige Male, muss umkehren, um wieder von Neuem anzufangen. Hartnäckigkeit und überragende physikalische Intuition verhelfen ihm letztendlich doch zum krönenden Abschluss: Das wunderbare Werk der Allgemeinen Relativitätstheorie ist gelungen. Allerdings bezahlt er einen hohen Preis dafür: Das Verhältnis zu Mileva hat sich in den ruhelosen Jahren so sehr verschlechtert, dass sie mit den beiden Söhnen von Berlin zurück nach Zürich reist. Endgültig trennen sie sich im Sommer 1914, und Albert Einstein ist fortan allein, fern von seinen geliebten Söhnen Hans Albert und Eduard...

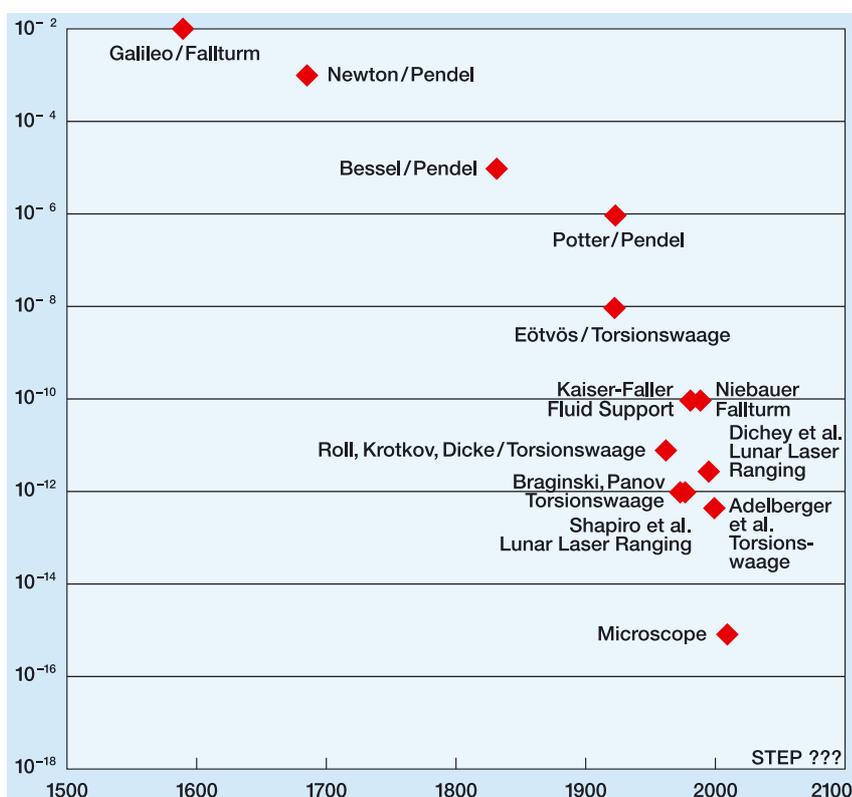


Bild 3: Die zeitliche Entwicklung der Messgenauigkeit zur Verifikation des Äquivalenzprinzips seit Galileo Galilei. Die heutige Genauigkeit liegt bei 10^{-13} . Das entspricht etwa der Wellenlänge von rotem Licht verglichen mit dem Durchmesser der Erde.

Die frühen Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie



Die Kenntnis der Newton'schen Gesetze reicht in unserem Alltag längstens aus, um zurechtzukommen, denn hier sind die Geschwindigkeiten stets klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit, und das Gravitationsfeld der Erde ist überall auf ihrer Oberfläche annähernd konstant und verhältnismässig schwach. Daher spielen relativistische Effekte keine merkliche Rolle; zum Glück muss man sagen, denn die für das Verständnis der Newton'schen Gesetze erforderliche Mittelschul-Mathematik ist den meisten Menschen zugänglich, was bei der speziellen Relativitätstheorie gerade noch, bei der Allgemeinen Relativitätstheorie aber nicht mehr zutrifft.

Den Zeitgenossen Einsteins geht es gleich; seine Gedanken werden selbst in der Fachwelt zunächst nur mit äusserster Skepsis aufgenommen. Den ersten Durchbruch ermöglicht die Klärung eines seit Jahrzehnten offenen Problems, nämlich der Wanderung des Perihels des Merkurs, das heisst des Punktes der Merkurbahn, welcher der Sonne am nächsten liegt.

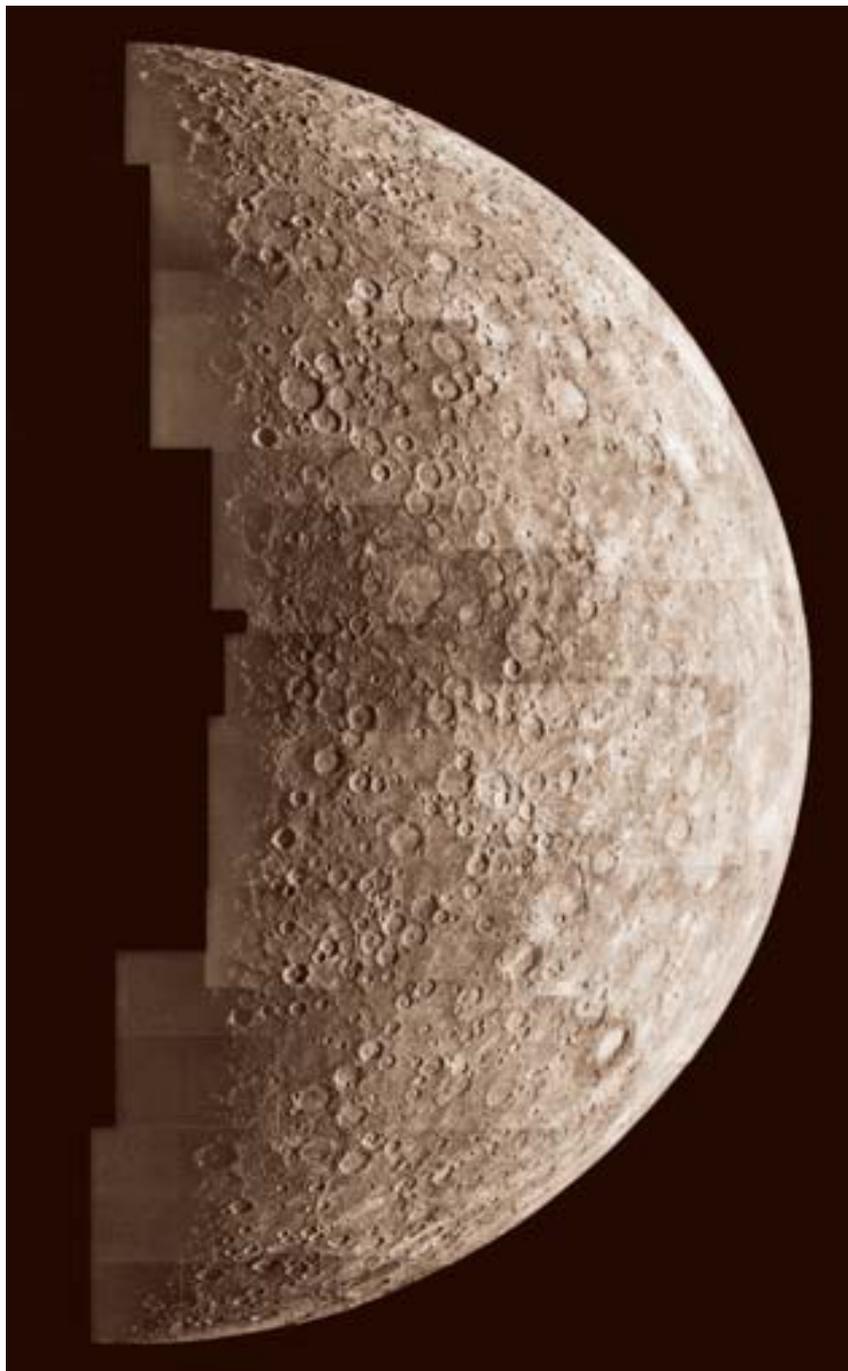


Bild 4: Merkur, der innerste Planet, aufgenommen 1974 von der amerikanischen Sonde Mariner 10. Er umkreist die Sonne auf einer elliptischen Bahn hoher Exzentrizität: Das Aphel, der sonnenfernste Punkt der Umlaufbahn, misst 69,82 Mio km, das Perihel (der sonnennächste Punkt) 46 Mio km. In diesem Bereich ist das Gravitationsfeld der Sonne so stark, dass sich das Perihel schneller um die Sonne dreht, als es die klassische Mechanik erwarten lässt. Dies war der erste Hinweis auf die Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Drehung des Perihels des Merkurs

Nach dem ersten Kepler'schen⁹ Gesetz bewegen sich die Planeten auf Ellipsen um die Sonne. Das gilt, solange es sich um einen einzigen Planeten handelt, der um die Sonne kreist. Im Sonnensystem beeinflussen sich aber die Planeten gegenseitig, was zu einer laufenden Bahnänderung namentlich auch des Merkurs führt. Auch das kann die Newton'sche Physik noch erklären.

Bereits 1855 erkannte Urbain Le Verrier¹⁰, dass die Bahn des Merkurs von diesen Erwartungen abweicht. Er versuchte, die Diskrepanz mit einem bisher nicht beobachteten Planeten oder einem unsichtbaren Asteroidengürtel zu erklären. De Sitter¹¹ stellte um 1880 auf Grund präziserer Messungen fest, dass das Perihelion um etwa 531 Bogensekunden pro Jahrhundert wandert, während die klassische Newton'sche Mechanik einen etwas kleineren Wert vorausagt. Die Allgemeine Relativitätstheorie erklärt die fehlenden 43 Bogensekunden mit der Dilatation der Zeit im Gravitationsfeld der Sonne, womit sie in Wissenschaftskreisen ein erstes Mal für Aufmerksamkeit sorgt. Damit wird die Erklärung der Drehung des Merkur-Perihels zum ersten grossen Erfolg der Relativitätstheorie.

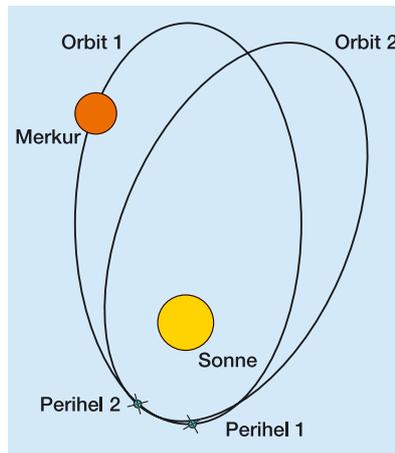


Bild 5: Die zeitliche Veränderung der Merkurbahn um die Sonne: Das Perihel des Merkurs wandert im Laufe der Zeit um die Sonne nicht nur auf Grund der Einflüsse der (hier nicht eingezeichneten) Nachbarplaneten, sondern auch infolge relativistischer Effekte im Gravitationsfeld der Sonne.

Die Ablenkung des Lichts an massereichen Sternen

Von Albert Einstein stammt dagegen die Idee, die Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichts im Bereich des Gravitationsfeldes der Sonne zu bestimmen, denn die klassische Mechanik sagt eine Ablenkung voraus, die halb so gross ist wie die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte. Der Unterschied ist zwar im Bereich der Sonne klein, er ist zu jener Zeit aber schon messbar. Dazu ist eine totale Sonnenfinsternis erforderlich, bei welcher der Mond die Sonnenscheibe vollständig bedeckt, so dass die Sterne

sichtbar werden. Zur Beobachtung der Sonnenfinsternis vom 21. August 1914 macht sich eine Expedition nach Russland auf. Sie endet mit der Gefangennahme der deutschen Expeditionsteilnehmer. Zwar können diese später gegen russische Kriegsgefangene ausgetauscht werden, doch die Sonnenfinsternis ist mittlerweile vorüber.

Eine weitere Finsternis ist für den 29. Mai 1919 in äquatorialen Breiten vorausgesagt. Sir Arthur Eddington¹², ein engagierter Verfechter der Relativitätstheorie, versucht, die sich zusehends verschlechternden Beziehungen Englands zu Deutschland nach der Besetzung des neutralen Belgiens durch Zusammenarbeit auf wissenschaftlicher Ebene zu verbessern. Er organisiert zwei Expeditionen, von denen die eine in

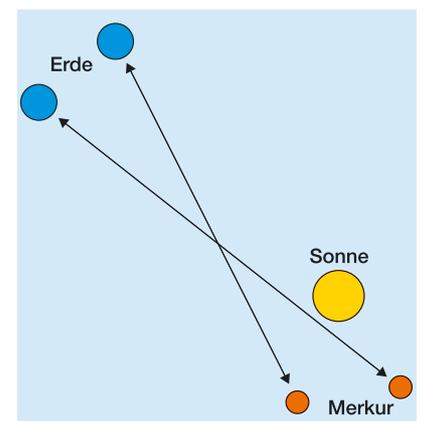


Bild 6: Zur Geometrie des Versuchs von I.I. Shapiro: Die Laufzeit eines Radarsignals von der Erde zum Merkur und zurück wird zunächst bei grossem Abstand der Achse Merkur/Erde von der Sonne gemessen und ein weiteres Mal, wenn die Achse nahe an der Sonne vorbeigeht. Im zweiten Fall wird das Signal im Gravitationsfeld der Sonne um insgesamt 0,2 ms gegenüber der von der klassischen Mechanik vorhergesagten Laufzeit verzögert.

⁹ Johannes Kepler, 1571 Weil bis 1630 Regensburg; Mathematiker und Astronom

¹⁰ Urbain Le Verrier, 1811 St. Lô bis 1877 Paris; Mathematiker und Astronom

¹¹ Willem de Sitter, 1872 Sneek bis 1934 Leiden; Astronom

¹² Sir Arthur Eddington, 1882 Kendal bis 1944 Cambridge; Physiker und Astronom

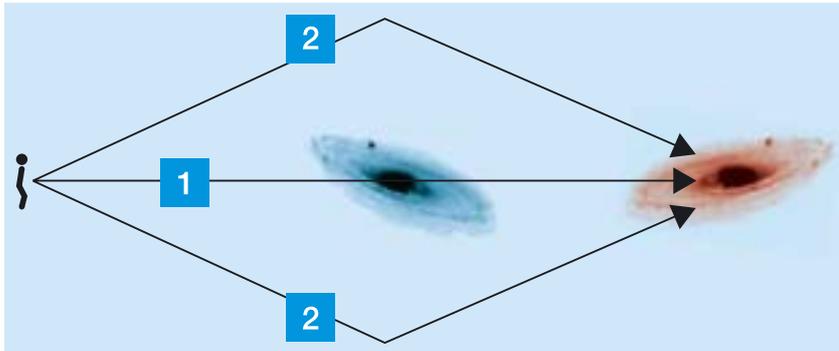


Bild 7: Zur Geometrie der Gravitationslinsen. In Abwesenheit der vorderen Galaxie sieht der Beobachter die Galaxie im Hintergrund in der Richtung 1. Unter dem relativistischen Einfluss der Gravitation der Galaxie im Vordergrund wird das Licht der Galaxie im Hintergrund umgelenkt, und der Beobachter sieht ihr Bild in den Richtungen 2, d.h. rund um die vordere Galaxie. Wären die beiden Galaxien praktisch punktförmig und lägen sie exakt auf derselben Linie, so entstünde ein kreisförmiges Bild der Hintergrundgalaxie. Die ausgedehnten Massenverteilungen von Galaxien führen zu einem verzerrten Bild, wobei das umgelenkte Licht vor allem in Form von Kreissegmenten erscheint. Das Titelbild der vorliegenden Nummer zeigt diesen Fall.

den Norden Brasiliens, die andere zur Insel Principe im Golf von Guinea ausgesandt wird. Trotz schwierigen Wetterbedingungen entstehen sieben brauchbare fotografische Platten. Sie werden ausgemessen und die Sternpositionen mit älteren Fotos des Nachthimmels, bei denen die Sonne weit weg von der Sichtlinie war, verglichen. Anfang September 1919 hält Eddington in Bournemouth einen Vortrag, in welchem er das vorläufige Ergebnis bekannt gibt: Die beobachteten Positionsverschiebungen der Sterne in Sonnennähe stimmen mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie überein! Dieser augenfällige Beweis bringt Einstein die allgemeine Anerkennung seiner neuen Ideen, nicht nur in wissenschaftlichen Kreisen, sondern nun auch in der breiteren Öffentlichkeit...

Der Shapiro-Effekt¹³

Einen ähnlichen Versuch führt etwa 50 Jahre später I.I. Shapiro durch: Er sendet Radarsignale zu den Planeten Venus und Merkur und misst an den reflektierten Signalen die Verzögerung infolge der Dilatation der Zeit im Gravitationsfeld der Sonne. Die erwartete Verzögerung beträgt 0,2 Tausendstel Sekunden, was er mit einer Genauigkeit von etwa 10% bestätigen kann.

Auch die Natur selber führt relativistische Experimente durch, die von aufmerksamen Astronomen beobachtet werden können. Es handelt sich um die Gravitationslinsen: Hohe Dichten von Materie, die zwischen einer Galaxie im Hintergrund und dem Beobachter liegen, führen zu einer Ablenkung des Lichts der Galaxie, sodass diese mehrfach beobachtet werden kann, siehe **Bild 7**. Das berühmte

Einsteinkreuz, wie es in der Abbildung 11 des Spatium Nr. 3 dargestellt ist, kommt auf diese Weise zustande.

Die Gravitations-Rotverschiebung

Eine weitere «strenge Prüfung» im Popper'schen Sinne betrifft die Rotverschiebung des Lichts, die auftritt, wenn sich die Strahlungsquelle in einem stärkeren Gravitationsfeld befindet als der Beobachter. Dort laufen die Uhren langsamer, und entsprechend sendet ein Atom seine Spektrallinien auch mit einer etwas langsameren Frequenz aus. Dies kann man mit modernen Spektrometern im Sonnenspektrum beobachten.

Das präziseste bisher durchgeführte Experiment zur Bestimmung der Rotverschiebung kommt überraschenderweise ohne das Gravitationsfeld eines Sterns aus, aber nutzt die Potenzialdifferenz auf unterschiedlichen Höhen im Gravitationsfeld der Erde. Es stammt von Pound-Rebka-Snyder (1960 bis 1965) und besteht darin, dass am Fuss des Laborturms der Harvard Universität angeregtes Eisen Photonen emittiert, die an der Spitze des Turms von einem auf dem Mössbauer-Effekt beruhenden Empfänger detektiert werden. Die Photonen bewegen sich entgegen dem Schwerfeld der Erde und verlieren dabei etwas Energie, was zu einer zwar äusserst geringen Rotverschiebung führt, die aber mit diesem empfindlichen Messverfahren doch zweifelsfrei nachgewiesen werden kann.

¹³ Irwin I. Shapiro, 1929 New York; Physiker

Die extra-terrestrischen Tests

Seit etwa 50 Jahren steht die erforderliche Technik zur Verfügung, um Experimente im Welt- raum, aber auch in grossen Teil- chenbeschleunigern durchzuführen und die Relativitätstheorie wie auch die Quantenmechanik um viele Grössenordnungen genauer zu testen, als es mit den bisher be- sprochenen Versuchsanordnungen möglich ist. Und ohne dass wir es bemerkt hätten, hat sich die The- matik der relativistischen Zeit schon in unseren Alltag eingeschli- chen, denn die Navigation mittels Satelliten ist eine alltägliche An- wendung der Relativitätstheorie. Diese Navigationssysteme erfor- dern Uhren höchster Genauigkeit. Damit alle Uhren im System die- selbe Zeit anzeigen, müssen ihre relativistischen Frequenzabweichungen ständig kompensiert wer- den. Doch kehren wir zunächst

Maser und Laser

Der Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) und der Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sind Verfahren zur Erzeugung kohärenter elektro- magnetischer Strahlung.

Im Bohr'schen Atommodell umkreisen die Elektronen den Kern, und zwar je nach ihrem Energiezustand in unterschiedlichen Bahnen. Energiezufuhr durch ein Photon bewirkt, dass die Elektronen in ener- giereichere Bahnen übergehen (angeregte Zustände), aus denen sie normalerweise spontan wieder in den Grundzustand fallen unter Abgabe eines Photons.

Einstein hat 1915 das Konzept der stimulierten Emission eingeführt: Hier wird ein angeregtes Atom durch ein Photon zu einem Übergang in einen tieferen Energiezustand stimuliert, was zu einer Verstärkung führt: Aus einem Photon werden zwei. Dieser Vorgang wird in Lasern mehrfach wiederholt, wobei die entstehenden Lichtwellen im Takt einer wohldefinierten Frequenz sind. Damit lassen sich Uhren höchster Präzision herstellen.

zum ersten Test im Weltraum, zur Gravity Probe A, zurück.

Die Gravity Probe A

Ende der 70er-Jahre startet die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA auf einer Scout-Rakete das

Experiment Gravity Probe A. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Wasserstoff-Masern (siehe Kas- ten) als Zeitnormale höchster Prä- zision, wovon der eine auf dem Erdboden stationiert ist, währen- dem der zweite mit der Rakete auf eine Höhe von 10'000 Kilometern gebracht wird. Während des Fluges werden die Taktfrequenzen der beiden Uhren laufend miteinander verglichen. Die Geschwindig- keit der Rakete führt zu einer Ver- langsamung der Uhr an Bord der Rakete gemäss der Speziellen Re- lativitätstheorie. Andererseits be- wirkt das mit zunehmender Höhe schwächer werdende Gravitations- feld der Erde eine stets raschere Gangart der Borduhr entspre- chend der Allgemeinen Relativi- tätstheorie. Die Messungen bestä- tigen diese mit einer Genauigkeit von einem Teil in 100'000.

Satellitennavigation

Die 24 Satelliten des zukünftigen europäischen Galileo-Systems umkreisen in 12 Stunden die Erde einmal. Die Uhren an Bord der Satelliten verlieren auf Grund ihrer Geschwindigkeit $7 \mu\text{s}$ pro Tag im Vergleich zu den Referenzuhren am Boden (Spezielle Relativitäts- theorie). Die in der Umlaufbahn der Satelliten geringere Schwerkraft der Erde führt andererseits zu einem Gewinn von $45 \mu\text{s}$ pro Tag (Allgemeine Relativitätstheorie). Somit ergibt sich eine Differenz von $38 \mu\text{s}$ pro Tag, was bei der Lichtgeschwindigkeit von ca. $300'000 \text{ km/s}$ zu Fehlmessungen von bis zu $11'400 \text{ m}$ führen würde, wenn die relativistischen Effekte nicht kompensiert würden.

Das ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) Experiment

Von allen physikalischen Grössen kann die Zeit mit Abstand am genauesten gemessen werden. Diesen Vorsprung weiter voranzutreiben, ist eines der Ziele des ACES-Experiments, das für die Installation als externe Nutzlast des Europäischen Columbus Labors an Bord der Internationalen Raumstation ISS vorgesehen ist. Es besteht aus zwei Atomuhren mit unterschiedlichen Atomen: Das PHARAO (Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite) des französischen Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) basiert auf Caesium-Atomen, die mittels Laserstrahlung auf eine Temperatur von wenigen Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden. Diese Temperatur und das praktische Fehlen von Beschleunigungen an Bord der ISS ermöglichen eine Stabilität besser als 3×10^{-16} über einen Tag. Die zweite Uhr wird vom Observatoire Cantonal de Neuchâtel in Zusammenarbeit mit Contraves Space entwickelt. Es handelt sich dabei um den Space Hydrogen Maser (SHM), der auf Wasserstoffatomen basiert. Während PHARAO eine hervorragende Langzeitstabilität besitzt, ist ihm der Wasserstoffmaser über Zeiträume von weniger als einer Stunde überlegen. Er dient daher als Referenz für den Caesium Maser. Zusammen bilden PHARAO und SHM eine Uhr, die genauer ist als alle bisherigen Uhren: Sie hat eine Abweichung von weniger als einer Sekunde in 100 Millionen Jahren! Derartige Genauigkeiten sind er-

forderlich, wenn Verkehrsflugzeuge künftig mit satellitenbasierten Navigationssystemen sicher landen sollen.

Die Signale der beiden Uhren gelangen zunächst zu einer gemeinsamen Datenverarbeitung an Bord der Raumstation und anschliessend zu Forschungslaboratorien in aller Welt. Das Experiment verfolgt damit auch das Ziel einer genauen zeitlichen Synchronisation von globalen Datennetzwerken.

Gemäss der Allgemeinen Relativitätstheorie ist zu erwarten, dass die beiden Uhren schneller gehen werden als auf der Erde, da auf der Höhe der Raumstation das Gravitationspotenzial der Erde geringer ist; andererseits folgt aus der Speziellen

Relativitätstheorie, dass die Uhren wegen ihrer Geschwindigkeit gegenüber fest auf der Erdoberfläche montierten Uhren etwas langsamer laufen. Beide Effekte lassen sich aber aufgrund der bekannten Position und Geschwindigkeit der Uhren in der Umlaufbahn berechnen. Mit dieser Versuchsanordnung wird auch das Äquivalenzprinzip überprüft, das besagt, dass sich die beiden Uhren am Boden und im Orbit der Raumstation gleich verhalten, obwohl sie für die Zeitmessung verschiedene Atome benutzen. Eine allfällige Drift der Taktfrequenzen der beiden Uhren im Orbit, das heisst in einem anderen Gravitationspotenzial, käme daher einer Verletzung des Äquivalenzprinzips gleich.

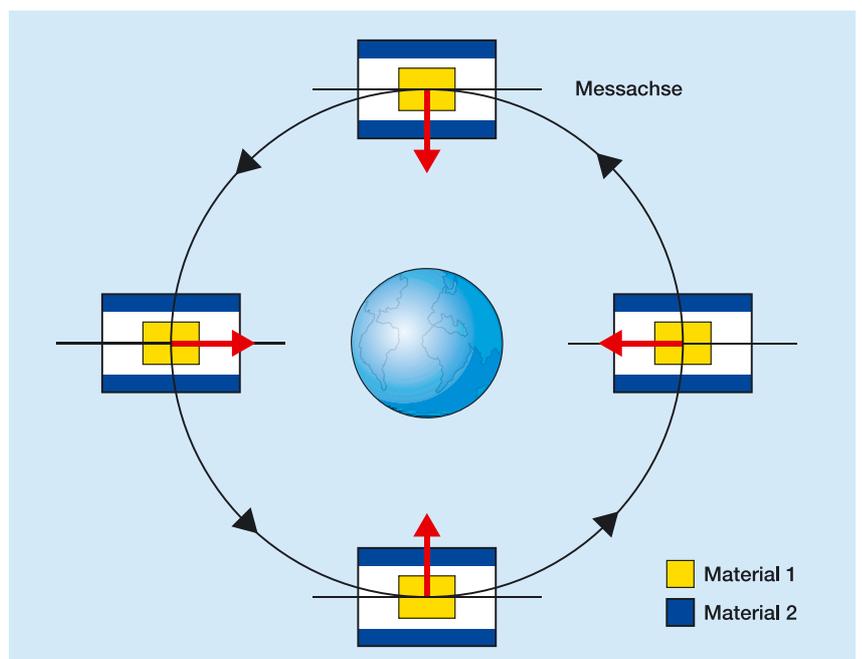


Bild 8: Das Messprinzip des Microscope-Satelliten: Zwei Testmassen aus unterschiedlichen Materialien (gelb und blau eingetragen) sind konzentrisch angeordnet. Sie können sich gegenseitig entlang der gemeinsamen Achse verschieben. Eine allfällige Verletzung des Äquivalenzprinzips würde zu einer Auslenkung der inneren gegenüber der äusseren Testmasse im Rhythmus des Erdumlaufs führen.

Die Microscope-Mission

Das Äquivalenzprinzip und damit auch die Äquivalenz von träger Masse und schwerer Masse ist der zentrale Kern, sozusagen das Dogma der Allgemeinen Relativitätstheorie. Für die Verifikation des Äquivalenzprinzips hatten Wissenschaftler schon 1989 die Mission «Satellite Test for the Equivalence Principle» (STEP) vorgeschlagen. Die Mission ist jedoch bis heute nicht realisiert worden, dagegen hat die französische Raumfahrtbehörde CNES die Initiative ergriffen und das Projekt Microscope (MICROSatellite à Traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) in ihr Programm aufgenommen. Dieses Experiment wird auch von der ESA unterstützt; es befindet sich derzeit in Entwicklung und soll im März 2008 in eine Erdumlaufbahn gebracht werden.

Das Messverfahren

Das Konzept der Mission gleicht dem Versuch von Galileo Galilei, der um 1590 zwei Körper unterschiedlicher Zusammensetzung gleichzeitig vom Schiefen Turm in Pisa fallen liess und feststellte, dass sie exakt zur gleichen Zeit auf dem Boden auftreffen. Auch beim Microscope-Experiment handelt es sich um den freien Fall zweier unterschiedlicher Testmassen aus reinem Platin, resp. aus einer Platin-Titan-Legierung. Sie befindet sich in einer Erdumlaufbahn und unterliegen dem Gravitationsfeld der Erde: Ihre schweren Massen erfahren demnach die glei-

che Anziehung. Beide bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 20'000 Kilometern pro Stunde um die Erde, und ihre trägen Massen widersetzen sich in gleicher Weise der durch das Gravitationsfeld erzwungenen Kreisbahn. Wenn nun die träge Masse ungleich der schweren Masse wäre, dann würden mit der Zeit die Bahnen der beiden Testmassen auseinanderlaufen. Um den Versuch zu vereinfachen, sind die Testmassen nur entlang einer Richtung frei beweglich. Präzise kapazitive Sensoren messen laufend ihre Lage. Sobald sie kleinste Unterschiede erkennen, werden Rückführkräfte ausgelöst, sodass die Testmassen in ihrer ursprünglichen Lage bleiben. Sollten periodische Rückführkräfte im Rhyth-

mus der Umlaufbahn auftreten, so liesse sich daraus eine Verletzung des Äquivalenzprinzips bestimmen. Dazu sind die Testmassen vor äusseren Einflüssen, wie zum Beispiel den restlichen Atomen der Atmosphäre und der Strahlung der Sonne, zu schützen. Dies wird erreicht, indem der Satellit mittels feiner Triebwerke so gesteuert wird, dass die Testmassen stets in einer rein der Gravitation unterliegenden Umlaufbahn sind.

Der Satellit

Der Satellit basiert auf der Myriade-Plattform des CNES und findet mit seinen nur 120 Kilogramm Gewicht an Bord einer Zusatzstruktur der Ariane 5 Platz.



Bild 9 zeigt den Microscope-Satelliten in einer Darstellung von D. Ducros.

Gravitationswellen

Nach den Vorstellungen der klassischen Physik wirkt die Gravitationskraft über grössere Entfernungen zwar mit abnehmender Stärke, aber ohne Zeitverzug. Nach relativistischer Anschauung dagegen ist Gravitation ein sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitendes Feld, was grundsätzlich die Existenz von Wellen beinhaltet.

Als in Bern im Jahre 1955 unter dem Vorsitz von Wolfgang Pauli¹⁴ eine Konferenz zum 50. Jubiläum von Einsteins *annus mirabilis* stattfindet, gehen die Meinungen darüber, wie real Gravitationswellen seien, noch weit auseinander. Hermann Bondi schreibt in seinen Erinnerungen¹⁵, dass er damals von Markus Fierz¹⁶ mit den Worten «the problem of gravitational waves is ready for solution, and you are the person to solve it» aufgefordert worden sei, sich mit diesem Problem zu beschäftigen. Und tatsächlich haben Bondi und seine Mitarbeiter in den folgenden Jahren die Theorie der Gravitationswellen erarbeitet. Ihre Bemühungen finden 1962 ihren krönenden Abschluss.

Bis heute ist es nicht gelungen, Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Aber zwei astronomische Entdeckungen der 60er- und 70er-Jahre haben zu einem indirekten Nachweis der Existenz von Gravi-

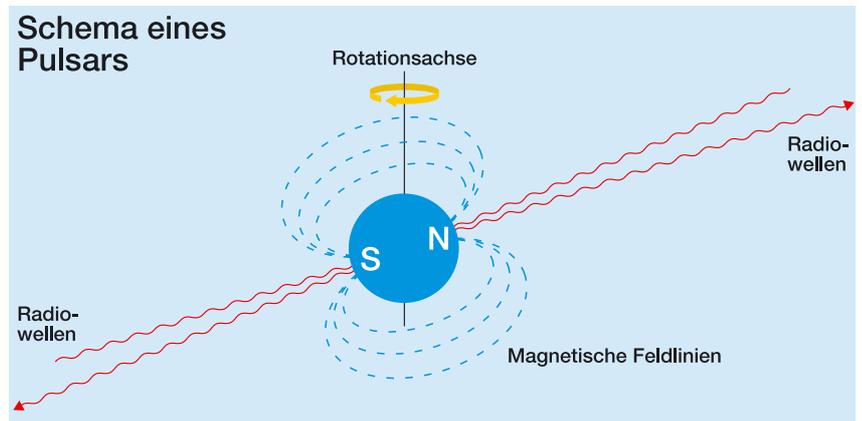


Bild 10: Ein Pulsar rotiert und sendet Radiowellen in zwei Strahlenbündeln aus, die, ähnlich wie beim Lichtbündel eines Leuchtturms, an einem weit entfernten Beobachter vorbeiflitzen und von diesem als Radio- und Lichtpulse registriert bzw. empfunden werden. Pulsare sind äusserst kompakte Objekte, sogenannte Neutronensterne. Diese sind etwa gleich schwer wie die Sonne (genauer gesagt: Sie haben eine mit der Sonne vergleichbare Masse); aber dieselbe Masse, die in der Sonnenkugel einen Durchmesser von 1,2 Millionen Kilometern einnimmt, ist in Neutronensternen enorm verdichtet – sie ist in einen Durchmesser von lediglich etwa 10 km gepackt.

tationswellen geführt. Beiden wurden Nobelpreise zuerkannt. Antony Hewish¹⁷ und seine Studentin Jocelyn Bell finden 1967 ein neuartiges Himmelsobjekt, einen Pulsar, d.h. eine Radioquelle, die äusserst regelmässig kurze Pulse aussendet. In einer intensiven Suche nach weiteren Pulsaren entdecken Russell Hulse und Joseph Taylor 1974 den Doppelpulsar PSR 1913+16, in welchem ein Pulsar, zusammen mit einem etwa gleich schweren Begleiter, ein enges Doppelsystem bildet.

Dass es sich um ein Doppelsystem handelt, bei dem die zwei Objekte umeinander kreisen,

schliessen Hulse und Taylor aus der regelmässigen Variation der Pulsfolge: Während sich der Pulsar von uns wegbewegt, verlangsamt sich scheinbar die Folge seiner Pulse, und wenn er wieder auf uns zukommt, treffen die Pulse wieder schneller hintereinander ein. Diese Modulation der Pulsfrequenz beruht auf dem Dopplereffekt: Wenn der Pulsar von uns wegfliht, vergrössert sich der Zeitabstand zwischen zwei Pulsen, weil der spätere Radiopuls einen etwas längeren Weg zurücklegen muss als sein Vorgänger, bis er bei uns eintrifft. Das Umgekehrte ist der Fall, wenn der Pulsar auf uns zukommt.

¹⁴ Wolfgang Pauli, 1900 Wien bis 1958 Zürich; Physiker, Nobelpreis für Physik 1945.

¹⁵ Sir Hermann Bondi, 1919 Wien; Mathematiker und Kosmologe: *Science, Churchill and Me*, Pergamon Press, 1990

¹⁶ Markus Fierz, 1912; Physiker

¹⁷ Antony Hewish, 1924 Fowey, Cornwall; Physiker, Nobelpreis für Physik 1974

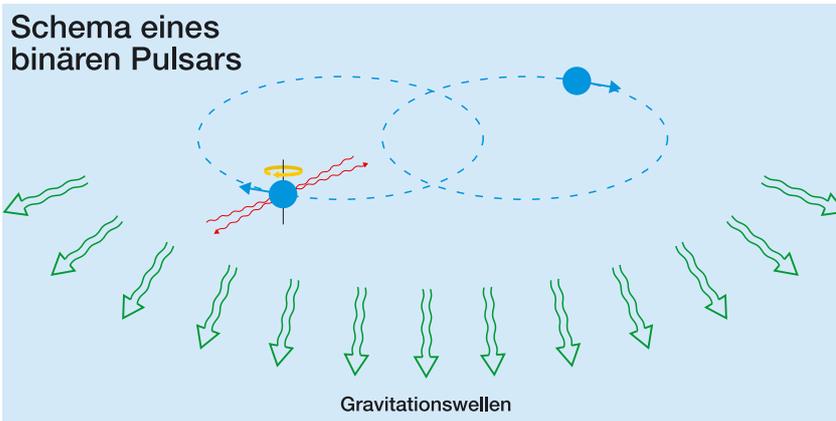


Bild 11 zeigt den von Hulse und Taylor entdeckten Doppelpulsar PSR 1913+16 in einer Entfernung von 21'000 Lichtjahren. Er besteht aus zwei etwa gleich großen Neutronensternen, die sich innerhalb von nur acht Stunden umkreisen. Einer der beiden Neutronensterne wird als Pulsar beobachtet; er rotiert etwa 17 Mal pro Sekunde um seine eigene Achse. Der Abstand der beiden Neutronensterne im Doppelpulsar ist klein: lediglich einige Male die Distanz von der Erde zum Mond.

Taylor und seine Mitarbeiter beobachteten den Doppelpulsar über mehrere Jahre und fanden, dass sich die Pulsfolge langsam verändert. Sie können eindeutig nachweisen, dass das System stetig Energie verliert und sich dabei entsprechend den Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie verändert. Die verlorene Energie entspricht genau dem Wert, den das System nach der Theorie von Bondi in Form von Gravitationswellen abstrahlt. Damit liegt ein erster indirekter Beweis für die Existenz von Gravitationswellen vor.

Gravitationswellen entstehen, wenn sich Massen relativ zueinander bewegen. Dabei verändern sie in ihrer Umgebung das Raumzeit-Kontinuum. Diese Störungen des Raumzeit-Kontinuums breiten sich als Gravitationswellen aus, ähnlich wie wenn von einem Stein,

der ins Wasser geworfen wurde, an der Oberfläche Wellen erzeugt werden. Allerdings breiten sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit aus. Aber selbst die Analogie mit elektromagnetischen Wellen ist nicht vollständig. Der tiefere Grund dafür liegt in der Symmetrie der Gravitation. Diese ist eine von der Elektrizität grundsätzlich verschiedene Erscheinung. Dort ziehen sich positive und negative Ladungen an, während sich gleichpolige abstoßen. In der Gravitation dagegen gibt es nur eine Art «Ladung», die Masse, und nur Anziehung, keine Abstoßung. Dies bedeutet auch, dass Gravitationswellen nur entstehen, wenn sich Massen asymmetrisch gegeneinander bewegen. Beispielsweise erzeugt ein Stern, der so pulsiert, dass sich lediglich sein Radius periodisch verändert, keine Gravitationswellen.

Faszinierend am Doppelpulsar von Hulse und Taylor ist, dass man hier zum ersten Mal ein Objekt beobachten kann, das starker Gravitation unterworfen ist. Die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie führen hier zu erheblichen Abweichungen von der Newton'schen Mechanik. So beträgt im Doppelpulsar die Drehung des Periastrons $4,2^\circ$ pro Jahr – rund 35'000 mal schneller als die dazu analoge Drehung des Merkurperihels von 43 Bogensekunden pro Jahrhundert!

Gravitationswellen sind nicht nur deshalb interessant, weil sie eine der wenigen bis heute nicht direkt nachgewiesenen Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind, sondern auch, weil sie uns Einblicke in Objekte geben, in denen starke Gravitation herrscht. In der Tat eröffnen Gravitationswellen ein völlig neues Fenster zum Universum, da sie ein von elektromagnetischen Wellen grundsätzlich verschiedenes Phänomen sind.

Gravitationswellen enthalten zwar enorme Energien, sie verzerren aber das Raumzeit-Kontinuum nur geringfügig, das heißt, sie haben nur eine geringe Wechselwirkung mit der Materie. Typisch sind Verzerrungen des Raums um einen Teil in 10^{22} , d.h. eine kilometerlange Strecke, wie sie in den derzeit sich im Bau befindlichen erdgebundenen Gravitationswellen-Detektoren üblich ist, ändert sich lediglich um einen Zehntausendstel eines Kerndurchmessers (10^{-19} m). Dies macht es so schwierig, Gravitationswellen zu detektieren. Die



Bild 12: Der Spiralnebel NGC 613 enthält, wie unsere Milchstrasse, ein Schwarzes Loch in ihrem Zentrum. Diese seltsamen Objekte sind eine der erstaunlichsten Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie können entstehen, wenn ein massiver Stern unter seiner eigenen Gravitation in sich zusammenfällt. Dann krümmt er den Raum in seiner Umgebung derart, dass selbst das Licht nicht mehr entweichen kann. Schwarze Löcher können dann auch weitere Sterne aufessen und zu Monstern mit Millionen von Sonnenmassen anwachsen. (Bild: ESO)

geringe Wechselwirkung zwischen Gravitationsstrahlung und Raum und Materie macht sie andererseits auch besonders attraktiv: Gravitationswellen werden praktisch nicht absorbiert oder gestreut, wenn sie das Weltall durchqueren.

Daher ist anzunehmen, dass Gravitationswellen tiefere Einblicke ins Universum erlauben als elektromagnetische Wellen. Beispiels-

weise zeigt die kosmische Hintergrundstrahlung das frühe Universum im Alter von 300'000 Jahren, als es sich auf etwa 3000 K abgekühlt hatte, so dass sich neutrale Atome bilden konnten und der Kosmos für elektromagnetische Strahlung durchlässig wurde. Noch früher war es von Plasma, das heisst elektrisch geladenen Teilchen, ausgefüllt und damit für elektromagnetische Strahlung undurchlässig. Im Gegensatz dazu ist dieses

frühere Universum für Gravitationswellen durchsichtig. Die direkte Beobachtung von Gravitationswellen öffnet daher in Zukunft ein Fenster näher zum Urknall. Auch die unmittelbare Umgebung von schwarzen Löchern wird mittels Gravitationswellen der Beobachtung zugänglich sein, bei denen uns heisse, ionisierte Materie den Einblick mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung verwehrt.

Die LISA-Mission

Die Weltraummission LISA (Laser Interferometer Space Antenna) ist ein gemeinsames Projekt von ESA und NASA, ein Observatorium zur Beobachtung von Gravitationswellen mit niedrigen Frequenzen oder, was dasselbe ist, Gravitationswellen mit grossen Wellenlängen. LISA nützt mit seinen 5 Millionen Kilometer langen Armen die Weite des Weltraums und ermöglicht damit die Beobachtung auch langwelliger Gravitationswellen. Fern von den lokalen Schwankungen der Gravitation auf der Erde infolge seismischer Aktivitäten, denen alle erdgebundenen Observatorien unterworfen sind, kann LISA Gravitationswellen im Bereich von 10^{-4} Hz bis 10^{-1} Hz feststellen.

Die Beobachtung niederfrequenter Gravitationswellen ermöglicht das Studium von astrophysikalischen Objekten, die über lange Zeit – von Monaten bis Äonen – detektierbare Gravitationswellen ausstrahlen. Für Beobachtung vom Weltraum aus ist der Himmel übersät von Objekten,

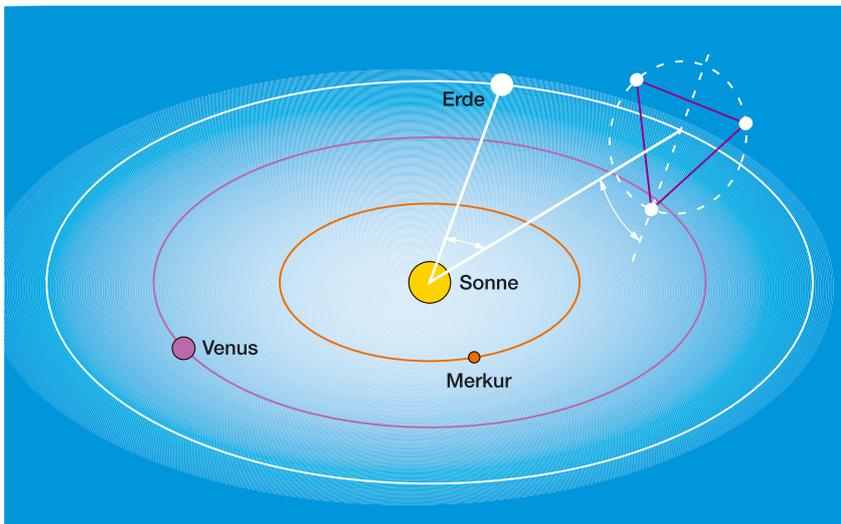


Bild 13 zeigt die Konfiguration der LISA-Mission. Sie besteht aus drei identischen Satelliten, die ein gleichseitiges Dreieck mit 5 Millionen Kilometern Seitenlänge bilden, das sich im Abstand von 50 Millionen Kilometer von der Erde mit ihr um die Sonne bewegt. Die Ebene des von den Satelliten aufgespannten Dreiecks ist gegenüber der Ebene der Erdbumlaufbahn um 60° geneigt.

von denen wir aufgrund anderweitiger, klassischer astronomischer Beobachtungen wissen, dass sie niederfrequente Gravitationswellen aussenden. Dagegen sind die Quellen, deren höherfrequente Gravitationswellen vom Erdboden aus detektiert werden können, zum vornherein unbekannt und sie leuchten nur kurz auf. Damit ist die exakte Position dieser Quellen schwieriger zu bestimmen.

Das Messverfahren

LISA misst die Veränderung der räumlichen Dimensionen durch Gravitationswellen. Ihr Messprinzip beruht auf der laufenden, exakten Vermessung der gegenseitigen Lage der Testmassen in drei je 5 Millionen Kilometer entfernten Satelliten, siehe **Bild 13**. Es

handelt sich dabei nicht um eine statische, sondern um eine dynamische Vermessung, bei der – anstatt Abweichungen von einer mittleren Distanz – Abweichungen von einer mittleren Frequenz gemessen werden. Frequenzen kann man äusserst genau messen.

Jeder Satellit besitzt zwei Teleskope, die auf die beiden andern Satelliten ausgerichtet sind, siehe **Bild 15**. Jedes Teleskop enthält je einen Laser-Sender und -Empfänger. Jedes Teleskop enthält zudem eine aus einer Gold-Platin-Legierung gefertigte würfelförmige Testmasse von etwa 4 cm Kantenlänge. Das Lichtsignal eines Lasersenders wird über das Teleskop auf einen der gegenüberliegenden

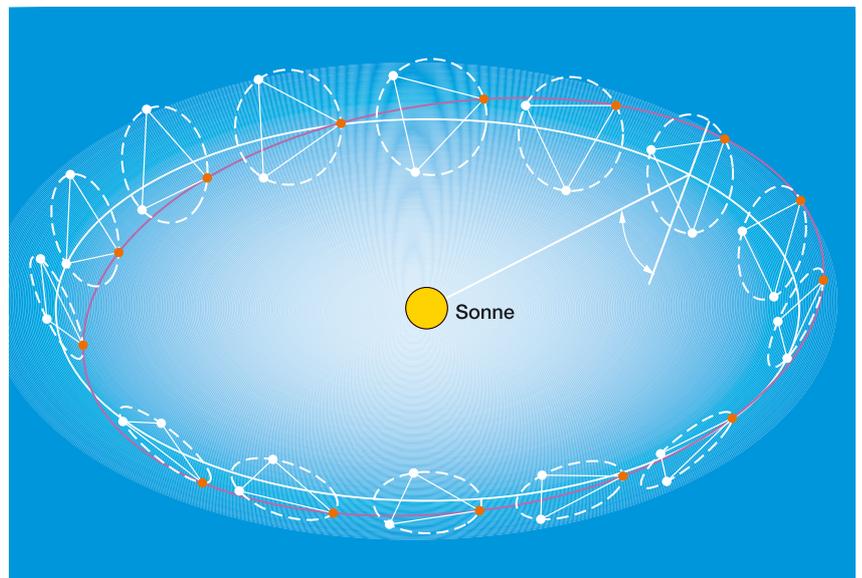


Bild 14 zeigt die Lage der drei LISA-Satelliten im Laufe eines Jahres. Sie befinden sich in natürlichen, heliozentrischen Umlaufbahnen, sind aber gegenüber der Ekliptik leicht geneigt, sodass sich ein bestimmter Satellit ein halbes Jahr über und ein halbes Jahr unter der Ekliptik befindet. Das von den Satelliten gebildete Dreieck dreht sich dabei im Laufe eines Jahres einmal um seinen Mittelpunkt. Da die Umlaufbahnen der Satelliten, wie diejenige der Erde, leicht exzentrisch sind, verändert sich auch der Abstand der Satelliten, und damit die Armlänge der Interferometer. Dies erleichtert die Messung tieffrequenter Gravitationswellen wesentlich.

Satelliten gerichtet. Dort befindet sich ebenfalls ein Teleskop, welches die eintreffende Strahlung sammelt und, nach Reflexion an der Testmasse, auf einen Lasertransponder abbildet. Dieser verstärkt das empfangene Signal und sendet es über das Teleskop zum ersten Satelliten zurück. Um die Veränderung des Raumes durch Gravitationswellen zu messen, wird nicht die gegenseitige Entfernung der Satelliten ermittelt, sondern deren zeitliche Veränderung. Jeder der drei LISA-Satelliten befindet sich in einer natürlichen, erdähnlichen Umlaufbahn um die Sonne. Da die Erdbahn nicht exakt kreisförmig, sondern leicht exzentrisch ist, ändert sich im Laufe der

Zeit der Abstand der Erde und der Satelliten zur Sonne und, in geringerem Mass allerdings, auch der gegenseitige Abstand der Satelliten. Dies hat zur Folge, dass zwischen Sendesignal und Empfangssignal eine zeitlich rasch veränderliche Interferenz eintritt, die eine Grundfrequenz definiert. Verzerrt nun eine Gravitationswelle den Raum, so erzeugt sie kleine periodische Abweichungen von dieser Grundfrequenz, das heisst, sie moduliert die Grundfrequenz. Solche Modulationen sind leicht von der Grundfrequenz zu trennen: Damit kann sowohl die Amplitude wie auch die Frequenz der Gravitationswelle sehr genau gemessen werden.

Die Satelliten

Ähnlich wie bei der Microscope-Mission müssen auch bei LISA Vorkehrungen getroffen werden, um die Testmassen gegen äussere Störungen abzuschirmen, sodass letztlich nur noch gravitationelle Kräfte auf sie einwirken. Dazu werden kleine Triebwerke eingesetzt, welche eine aktive Korrektur der Flugbahnen der Satelliten so ermöglichen, dass die auf sie einwirkenden nicht-gravitationellen Effekte, wie zum Beispiel der Lichtdruck der Sonnenstrahlung, kompensiert werden. Diese Triebwerke müssen Schübe im Bereich von einigen μN (ein Zehnmillionstel eines Gramms) erzeugen. Um diese Triebwerke und das dazu gehörende Navigationssystem im Welt- raum selbst zu testen, sieht das Programm eine Vorläufermission (LISA Pathfinder) vor. Erst anschliessend wird LISA entwickelt und voraussichtlich im Jahre 2013 von einer amerikanischen Träger- rakete in ihre Umlaufbahnen ge- bracht werden.



Bild 15 zeigt einen der drei LISA-Satelliten. Diese bestehen aus einem gleichseitigen Y, in dessen beiden Armen je ein Teleskop mit seinen Testmassen und je ein Laser-Sender- und -Empfänger untergebracht sind. Im unteren Teil des Y befinden sich die Bordelektronik, die Stromversorgung und die Telemetrieelektronik.

Die Gravity Probe B

In der Newton'schen Physik sind Raum und Zeit unabhängige Grössen. In relativistischer Sicht sind dagegen Raum und Zeit untrennbar miteinander verknüpft. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie krümmt die Masse die Raumzeit. In einem zweidimensionalen Modell führt eine Masse, ein Stern beispielsweise, zu einer Delle in der Raumzeit, die um so tiefer ist, je höher die Konzentration der Masse ist, **siehe**

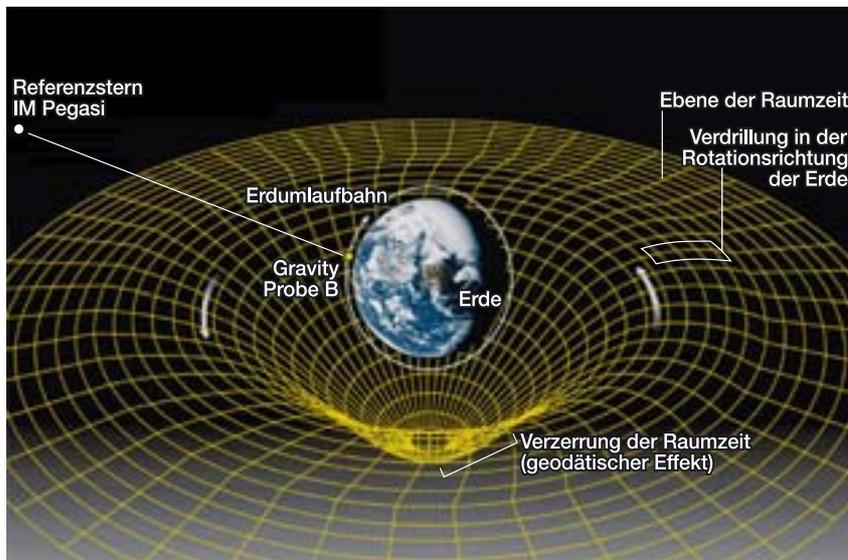


Bild 16 veranschaulicht die Krümmung der (hier zweidimensional angenommen) Raumzeit durch die Erde. In der relativistischen Vorstellung von Lense-Thirring krümmt die Masse der Erde einerseits die Raumzeit in ihrem Umfeld und führt zum geodätischen Effekt, andererseits verursacht ihre Rotation eine Verdrillung der Raumzeit (frame dragging). Die quantitative Bestimmung dieser beiden Effekte ist das Ziel der Gravity Probe B Mission.

Bild 15. Nun haben Lense¹⁸ und Thirring¹⁹ wenige Jahre nach der Publikation der Allgemeinen Relativitätstheorie gezeigt, dass eine Masse nicht nur zu einer Krümmung der Raumzeit führt, sondern diese auch mit sich zieht (verdrillt), wenn sie rotiert. Dieser Effekt wird als Lense-Thirring-Effekt bezeichnet.

Der Lense-Thirring-Effekt zählt, wie die Gravitationswellen, zu den bisher experimentell noch nicht verifizierten Voraussagen der Relativitätstheorie, was ihn natürlich besonders attraktiv macht. Die Gravity Probe B der NASA wurde 2004 in eine Erd-

umlaufbahn gebracht, um diesen subtilen Effekt experimentell nachzuweisen.

Der Lense-Thirring-Effekt

Schon kurz nach der Publikation der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein fanden die beiden österreichischen Physiker Lense und Thirring einen relativistischen Effekt, der im Englischen als «frame dragging effect» bezeichnet wird. Auf Deutsch heisst er Lense-Thirring-Effekt.

Dieser bezeichnet das Phänomen, dass eine rotierende Masse die Raumzeit in ihrer Umgebung mitrotieren lässt. Man kann sich dies so vorstellen, dass eine sich drehende Kugel in zähflüssigen Honig geworfen wird. Dabei nimmt die Kugel bei ihrer Drehung den sie umgebenden Honig teilweise mit, und zwar je stärker, je näher zur Kugel sich der Honig befindet.

Das Messprinzip

Die Aufgabe besteht in der exakten Bestimmung der lokalen Ausrichtung der Raumzeit auf der Umlaufbahn des Satelliten um die Erde. Als Sensoren eignen sich Kreisel, denn ein rotierender Kreisel hat die Eigenschaft, dass er ohne äussere Einflüsse seine Drehrichtung nicht ändert, solange er rotiert.

Die Gravity Probe B besteht daher aus vier hochpräzisen Kreiseln, deren exakte Ausrichtung im Universum laufend zu bestimmen ist. Dazu besitzt der Satellit ein Teleskop, das auf einen weit entfernten Stern als Referenz ausgerichtet ist. Wenn der Satellit im Orbit ist, werden die Kreisel in Rotation gebracht und ihre Drehrichtung mit der Richtung zum Referenzstern verglichen. Im Verlauf der etwa ein Jahr dauernden Messung wird die Drehrichtung der Kreisel

¹⁸ Joseph Lense, 1890 Wien bis 1985 München; Physiker

¹⁹ Hans Thirring, 1888 Wien bis 1976 Wien; Physiker

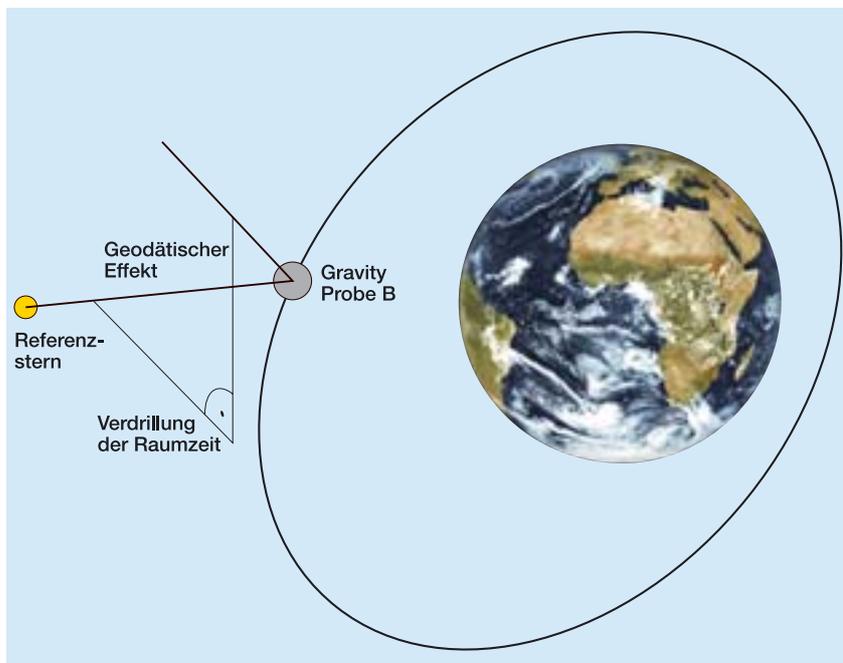


Bild 17: Das Konzept der Gravity Probe B. Der Satellit umkreist die Erde. Er besitzt Kreisel, welche die Eigenschaft haben, laufend der Richtung der lokalen Raumzeit zu folgen. Der Stern IM Pegasi dient als räumliche Referenz für die Messung. Gemäss der Allgemeinen Relativitätstheorie ist eine Drift der Kreisel bezogen auf die Achse zum Referenzstern von 6,6 Bogensekunden pro Jahr in Richtung des Nordpols zu erwarten (geodätischer Effekt). Der Lense-Thirring-Effekt seinerseits verursacht eine zusätzliche Drift in azimutaler Richtung von 0,042 Bogensekunden pro Jahr.

laufend beobachtet: Wenn die lokale Raumzeit durch die Gravitation der Erde verformt ist und wenn jene infolge der Erdrotation auf Grund des Lense-Thirring-Effektes verdrillt ist, dann muss sich im Verlauf der Zeit eine Differenz zur anfänglichen Richtung der Kreisel bezogen auf den Referenzstern ergeben. Aus dieser Differenz lassen sich die lokale Krümmung sowie das Ausmass der Verdrillung der Raumzeit ermitteln. Die zu messenden Differenzen sind allerdings äusserst klein: Ge-

mäss der Allgemeinen Relativitätstheorie werden sich die Kreisel infolge der durch die Masse der Erde gekrümmten Raumzeit um 6,6 Bogensekunden²⁰ pro Jahr und auf Grund des Lense-Thirring-Effektes um 42 Tausendstel einer Bogensekunde pro Jahr ändern. Dies entspricht einer vollen Umdrehung in 30 Millionen Jahren! Das Experiment ist so konzipiert, dass die erwarteten Verschiebungen rechtwinklig zueinander stehen, sodass sie experimentell getrennt bestimmt werden können.

²⁰ Eine Bogensekunde entspricht etwa dem Winkel, den ein menschliches Haar in 20 Metern Entfernung einnimmt.

²¹ Quasare sind sehr leuchtstarke und meist weit entfernte aktive Galaxien.

Der Satellit

Der Satellit Gravity Probe B umkreist derzeit die Erde auf einer Höhe von 600 km. Er besitzt aus Gründen der Redundanz vier hochpräzise Kreisel. Diese sind – wie bei den bisher besprochenen Satelliten – vor externen Einflüssen geschützt. Bei den Kreisel muss zudem sichergestellt sein, dass die Masseverteilung so homogen ist, dass das Gravitationsfeld der Erde nicht zu einer Präzession führt. Die Kreisel sind daher nahezu perfekte Kugeln von höchster Homogenität.

Weil sich der Stern, auf den das Teleskop der Gravity Probe B gerichtet ist, am Himmel leicht bewegt, muss auch diese Bewegung gegenüber weit entfernten Objekten geringer räumlicher Ausdehnung (sogenannten Quasaren²¹) auf Tausendstel einer Bogensekunde genau vermessen werden. Erst nachdem sowohl die Messdaten des Satelliten als auch die Beobachtungen des Referenzsterns unabhängig voneinander ausgewertet sind, können die Resultate miteinander verglichen und die wissenschaftlichen Erkenntnisse bekannt gegeben werden, was etwa im Spätsommer 2006 der Fall sein dürfte.

Bild 18: Die gewaltigen Spiralarme der Galaxie M101 haben einen Durchmesser von 170'000 Lichtjahren. Nach derzeitigem Wissen hat eine nahegelegene Galaxie zu Wellen von kondensiertem Gas geführt, welche um das Zentrum der M101 kreisen. Dabei wird das vorhandene Gas komprimiert, was zur Entstehung neuer Sterne führt.



Die Zeit nach der Allgemeinen Relativitätstheorie

Wenn Albert Einstein mit der Veröffentlichung seiner epochalen Erkenntnisse zwar in wissenschaftlichen Kreisen zu Berühmtheit gelangt ist, so verschafft ihm doch erst die Bestätigung der vorausgesagten Lichtablenkung bei der Sonnenfinsternis von 1919 den Durchbruch in der breiten Öffentlichkeit. Die Beobachtungen von Sir Arthur Eddington von 1919 bestätigen die Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie, und die Nachricht geht wie ein Lauffeuer über die ganze Welt. Die Berliner Illustrierte Zeitung beispielsweise kommentiert dieses Ereignis auf ihrer Titelseite mit «Eine neue Grösse der Weltgeschichte: Albert Einstein, dessen Forschungen eine völlige Umwälzung unserer Naturbetrachtung bedeuten und den Erkenntnissen eines Kopernikus, Kepler und Newton gleichwertig sind». Damit ist der Höhepunkt seiner Anerkennung in Deutschland erreicht, doch als Jude und überzeugter Pazifist warnt er vor dem aufkommenden

Nationalsozialismus und wird politisch zunehmend isoliert. Bei Einsteins Rückkehr von einer Reise in die USA kommt 1933 Hitler an die Macht. Einstein kehrt nicht mehr nach Berlin zurück, gibt aus Protest seinen deutschen Pass ab und verreisst unverzüglich wieder nach Princeton, USA, wo er die zweite Hälfte seines Lebens verbringt.

Auch im amerikanischen Exil engagiert sich Albert Einstein politisch. Er, der Pazifist, rät Präsident Roosevelt zur Entwicklung der Atombombe, um darin den Deutschen zuvorzukommen, ein Schritt, den er später aufs Tiefste bereut. (Ob Roosevelt den Brief von Einstein allerdings jemals gesehen hat, wird heute bezweifelt.)

«**Meine Religiosität besteht in der demütigen Bewunderung des unendlich überlegenen Geistes, der sich in dem wenigen offenbart, was wir mit unserer schwachen und hinfälligen Vernunft von der Wirklichkeit zu erkennen vermögen.**»

In wissenschaftlicher Hinsicht ist 1916 mit der Publikation der Allgemeinen Relativitätstheorie der Zenith erreicht. Zwar hat Einstein selber die Grundlagen der Quantenmechanik geschaffen, die nun von einer neuen Generation von Physikern weiterentwickelt wird, doch er kann sich mit der von ihr postulierten Zufälligkeit nicht mehr anfreunden: «Gott würfeln nicht», sagt er. Es kann nicht sein, wie der junge Heisenberg²² postuliert, dass sich Position und Geschwindigkeit eines Elementarteilchens nicht exakt bestimmen lassen, sondern nur deren Wahrscheinlichkeiten. In dieser Haltung erweist sich Albert Einstein als der letzte der grossen klassischen Physiker.

Einen wesentlichen Teil seiner zweiten Lebenshälfte widmet Albert Einstein dem Versuch, die Relativitätstheorie und die Quantentheorie zu einer einheitlichen Theorie zusammenzufassen. Seine Bemühungen

²² Werner Karl Heisenberg, 1901 Würzburg bis 1976 München; Physiker, Nobelpreis für Physik 1932

bleiben vergeblich, die Zeit ist noch nicht reif dafür. Sie ist es auch heute noch nicht: Noch immer suchen die Physiker intensiv nach der *Grand Unified Theory*. Dennoch hat Einstein fundamentale Beiträge zum Verständnis des Universums geleistet.

In seinem mathematischen Modell hat Albert Einstein die berühmt gewordene kosmologische Konstante Λ eingeführt, um das dem damaligen Paradigma entsprechende stationäre Universum zu beschreiben. Doch im

« Das
Unverständlichste
am Universum
ist im Grunde,
dass wir
es verstehen. »

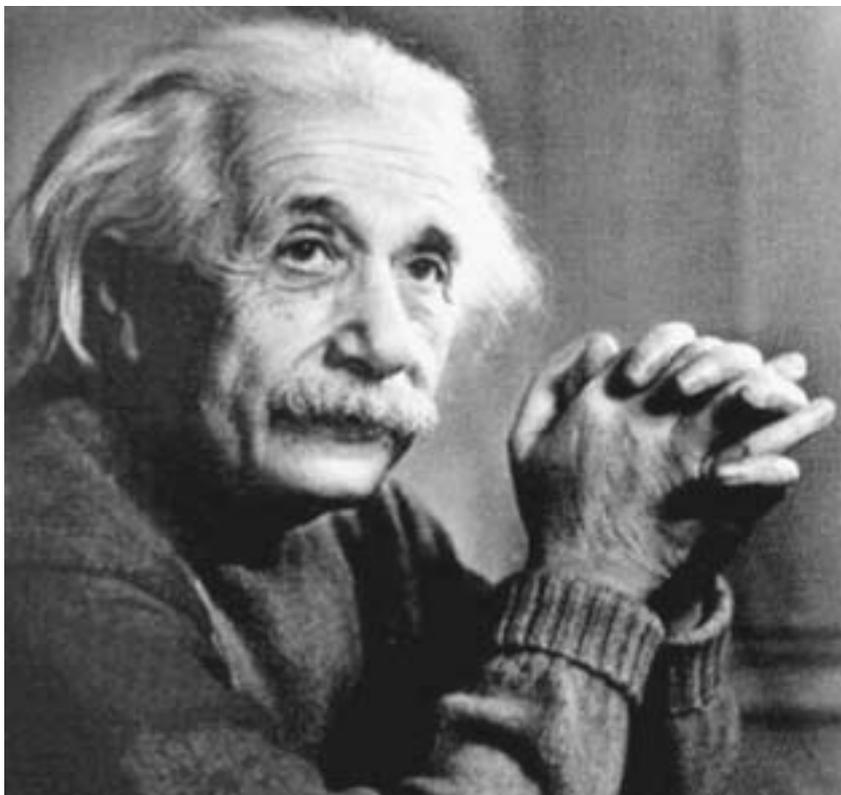


Bild 19: Albert Einstein (1954)

Jahre 1928 entdeckt Edwin Hubble²³, dass sich die Galaxien von uns entfernen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns weg sind: das Universum befindet sich also doch in einem dynamischen Zustand. Unter dem Eindruck dieser überraschenden Neuentdeckung glaubt Einstein, die Einführung der kosmologischen Konstanten sei die «grösste Eselei seines Lebens». Neueste Messungen, unter anderem mit dem Hubble Space Telescope, legen jedoch den Schluss nahe, dass sich das Universum sogar in einer beschleunigten Expansion befindet, was mit dem kosmologischen Modell nur beschrieben werden kann, wenn man die verschmähte kosmologische Konstante wieder einführt...

Am 13. April 1955 überfallen den 76-Jährigen heftige Schmerzen. Aber er lehnt die von den Ärzten dringend empfohlene Operation ab. Am 18. April gegen 1 Uhr nachts schliesst Albert Einstein seine Augen für immer. Eine Krankenschwester ist bei ihm. Sie hört seine letzten Worte, doch sie kann kein Deutsch. So verhallen seine Worte unverstanden. «The last words of the intellectual giant were lost in the world», berichtet die *New York Times* am Tag darauf.

²³ Edwin Powell Hubble, 1889 Marshfield bis 1953 San Marino; Jurist und Astronom

Der Autor



U. Markus, Zürich

Martin C.E. Huber ist Bürger der Stadt Basel, wo er die Primarschule und das Humanistische Gymnasium besuchte. Er studierte zunächst an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich und diplomierte mit einer Arbeit in experimenteller Festkörperphysik; anschliessend kehrte er nach Basel zurück und schloss sein Universitätsstudium 1963 bei Prof. Miescher mit einer Dissertation in Molekülspektroskopie ab. Nach einem weiteren Jahr in Basel, in dem er den wohl ersten Moleküllaser der Schweiz baute, erhielt er ein Stipendium der European Space Research Organisation (ESRO) für einen Forschungsaufenthalt am Harvard-Smithsonian Center for Astro-

physics in Cambridge (Massachusetts, USA). Vorerst arbeitete er dort in Laboratoriumsastrophysik, d. h. an der Messung von astrophysikalisch relevanten Eigenschaften von Atomen. Er besorgte auch die radiometrische Kalibrierung der Harvard-Instrumente auf dem Orbiting Solar Observatory, OSO-6, und dem Apollo Telescope Mount auf der damaligen Weltraumstation Skylab.

Gegen Mitte der 70er-Jahre kehrte M. Huber an die ETH Zürich zurück, wo er weiterhin spektroskopische Arbeiten durchführte und effiziente optische Systeme für Sonnenbeobachtungen im Weltraum entwickelte. Dort erwarb er auch die *venia legendi* und erhielt später den Titel eines Professors.

Als Vorsitzender der Solar System Working Group der Europäischen Weltraumorganisation ESA beteiligte er sich in den 80er-Jahren an der Vorbereitung des langfristigen ESA-Wissenschaftsprogramms Horizont 2000. Bei der gemeinsamen ESA / NASA-Mission Solar and Heliospheric Observatory SOHO ist er Co-Investigator bei drei Experimenten.

Von 1987 bis 2001 arbeitete Martin Huber in der ESA als Leiter des Wissenschaftsdepartements und als Wissenschaftsberater. Danach

war er gelegentlich als Gast am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Mass., und am ISSI tätig. Seit 2003 ist er regelmässiger Gast des Laboratoriums für Astrophysik am Paul Scherrer Institut in Villigen. Martin Huber ist Mitherausgeber des 2001 erschienenen umfassenden Werkes *The Century of Space Science* und Redaktor der Zeitschrift *The Astronomy and Astrophysics Review*.

Seine Wahl zum Präsidenten der Europäischen Physikalischen Gesellschaft EPS, und insbesondere das von der EPS initiierte und von der UNESCO wie auch den Vereinten Nationen unterstützte Weltjahr der Physik, gibt Martin Huber zahlreiche Gelegenheiten, der Öffentlichkeit nicht nur die technologische, sondern auch die kulturelle Bedeutung der Physik näher zu bringen. Es ist sein Wunsch, dass vor allem die jüngere Generation die Bedeutung der Naturwissenschaften wieder vermehrt anerkennt; kurz gesagt: er hofft, dass ein Bekenntnis vollkommener Ignoranz in physikalischen Dingen in naher Zukunft absolut *uncool* sein wird.

Als Amateur spielt Martin Huber in einem Klaviertrio – in dem nunmehr seit über 40 Jahren bestehenden Trio de Satigny – den Violoncellopart.



**Grundlagen der Physik
im extraterrestrischen Test**
