

Einstein besser bestätigt

Die im Schwerfeld der Sonne gemessene Laufzeitverzögerung eines Signals bestätigt einmal mehr die Allgemeine Relativitätstheorie.

Alle bisherigen Beobachtungen und Experimente zur gravitativen Wechselwirkung stimmen völlig mit der 1915 von A. Einstein aufgestellten Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) überein, obwohl im Rahmen von Szenarien zur Quantisierung der Gravitation und zur Vereinheitlichung aller Kräfte Abweichungen vorhergesagt werden. Bisher wurde kein einziger Effekt gefunden, der den Grundlagen der ART, wie z. B.

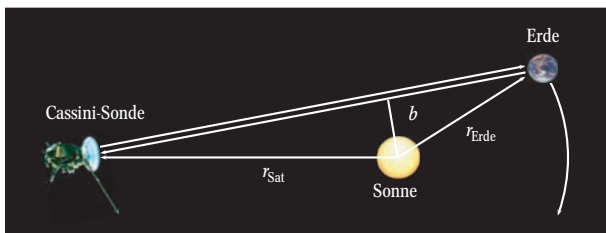


Abb. 1: Die Allgemeine Relativitätstheorie lässt sich überprüfen, indem man die Laufzeitverzögerung eines Signals misst, das sich an der Sonne vorbei ausbreitet.

dem schwachen Äquivalenzprinzip, widerspricht. Auch alle Vorhersagen der ART wie Periheldrehung, Lichtablenkung, gravitative Rotverschiebung, Zeitverzögerung, Lense-Thirring-Effekt und die Dynamik von Doppelsternen in starken wechselseitigen Gravitationsfeldern wurden in eindrucksvoller Weise bestätigt. Dabei bewegt sich die Übereinstimmung dieser in den relativ schwachen Gravitationsfeldern unseres Sonnensystems durchgeführten „Standard“-Tests mit der Theorie im Promille-Bereich. In einem neuen Satellitentest wurde jetzt die gravitative Zeitverzögerung um mehr als eine Größenordnung genauer bestätigt.

Diese Zeitverzögerung sagt aus, dass Signale, wenn sie durch ein Gravitationsfeld propagieren, länger brauchen, als wenn das Gravitationsfeld nicht da ist. Aus Gründen der Praktikabilität und um Probleme der Synchronisierung zu vermeiden, wird dazu im Experiment ein Signal von einem Sender zu einem Reflektor geschickt, der das Signal wieder zum Sender zurücksendet. Die Zeitspanne zwischen Senden und Anknunft des Signals ist dann am kürzesten, wenn sich in der Nähe des Signalwegs keine gravitierende Masse befindet. Andernfalls verlängert sich die Laufzeit. Bei real durchgeführten Experimenten steht der Sender auf der Erde, ist der

Reflektor ein Planet oder Satellit und erzeugt die Sonne das Gravitationsfeld. Aus der ART ergibt sich als Änderung der auf der Erde gemessenen Laufzeit eines Signals im Vergleich zur Laufzeit eines Signals bei weit entfernter Sonne

$$\Delta t = 2(1 + \gamma) \frac{GM_{\odot}}{c^3} \ln \left(\frac{4r_{\text{Erde}}r_{\text{Sat}}}{b} \right).$$

Dabei sind r_{Erde} und r_{Sat} der Abstand der Erde und des Satelliten zur Sonne, M_{\odot} die Masse der Sonne und b der Stoßparameter, der nächste Abstand der Signale zu Sonne (Abb. 1). Der Parameter γ charakterisiert im Rahmen metrischer Gravitationstheorien die Stärke des von einer Einheitsmasse erzeugten Gravitationsfeldes. In der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie ist $\gamma = 1$. Die Bewegungen des erdgebundenen Senders und des Reflektors sind hier nicht eingerechnet.

I. I. Shapiro hat diese Laufzeitverzögerung 1967 zum ersten Mal durch Reflexion von Radarwellen an der Venus gemessen [1]. Der bisher genaueste Test mit der Viking-Sonde auf dem Mars stammt aus dem Jahre 1979 und bestätigte die ART auf ca. 0,1 %, d. h. $|\gamma - 1| \leq 10^{-3}$ [2]. Kürzlich gelang es B. Bertotti und Mitarbeitern an der Universität Pavia, anhand der Daten eines im Sommer des letzten Jahres durchgeführten Satellitentests, dieses Ergebnis um mehr als eine Größenordnung zu verbessern [3]. Dabei handelt es sich um die Saturn-Mission Cassini,¹⁾ die am 21. Juni 2002 bei einem minimalen Stoßparameter von 1,6 Sonnenradien fast direkt hinter der Sonne stand (Konjunktion). Eine zweite Konjunktion in diesem Jahr konnte wegen technischer Probleme leider nicht genutzt werden.

Bei diesem neuen Test hat man nicht die Laufzeitverzögerung

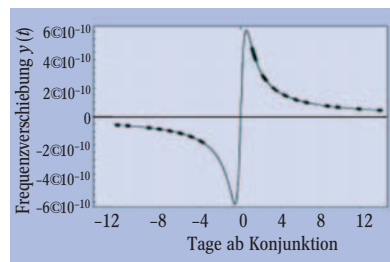


Abb. 2: Berechnete und gemessene Frequenzverschiebung [3]. Die dicken Bereiche bezeichnen die aufgenommenen Daten. (Das Fehlen der Messdaten kurz vor der Konjunktion geht auf einen Fehler in der Sendeanlage auf der Erde(!) zurück.)

selbst, sondern die durch die Änderung des Stoßparameters b hervorgerufene Frequenzverschiebung gemessen, wobei sich b wegen der Rotation der Erde um die Sonne ändert (Abb. 1). Der Vergleich der Laufzeiten zweier hintereinander ausgesandter Wellenberge ergibt sofort die Frequenzverschiebung

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{v(t) - v_0}{v_0} = -\frac{d}{dt} \Delta t(t) \\ &= 2(1 + \gamma) \frac{GM_{\odot}}{c^3} \frac{1}{b(t)} \frac{db(t)}{dt}. \end{aligned}$$

Da der Satellit über acht Mal weiter von der Sonne entfernt war als die Erde und wegen der fast kreisförmigen Bahn der Erde um die Sonne, sind r_{Sat} und r_{Erde} näherungsweise konstant; einzig der Parameter b ist relevant zeitabhängig. Aus demselben Grund ist auch $db/dt \approx v_{\text{Erde}} = 30 \text{ km/s}$. Mit diesen Werten ergibt sich eine erwartete Frequenzverschiebung von bis zu $6 \cdot 10^{-10} \text{ Hz}$ (Abb. 2). Dies liegt vollkommen im Bereich der Messbarkeit erdgebundener Uhren, die auf Skalen von Wochen eine Stabilität von über 10^{-15} besitzen.

Mögliche Messungen dieser Art wurden schon früher von J. D. Anderson untersucht und dann verworfen, weil die durch die Sonnenatmosphäre induzierte Dispersion jedes Messsignal unkenntlich macht. Mithilfe einer neuen Technik, die darin besteht, Signale aus zwei Frequenzbereichen, nämlich dem X-Band (ca. 7–8,5 GHz) und dem Ka-Band (ca. 32–34 GHz) zu verwenden, gelang es, dieses Problem zu überwinden. Dabei wurden jeweils Signale aus beiden Bändern von der Erde zur Sonde gesandt und mittels Transpondern verstärkt wieder zur Erde zurückgeschickt. Diese Transponder erlauben eine präzise Phasenkopplung zwischen den empfangenen und den ausgesandten Wellen. Darüber hinaus wurde aber noch die empfangene X-Welle an eine weitere ausgesandte Ka-Welle gekoppelt. Dieser „multi-frequency-link“ gestattet es, die von der Sonnenkorona verursachten Frequenzstörungen fast vollständig zu eliminieren.

Weitere Fehlerquellen, die zu berücksichtigen und zu eliminieren waren, sind der Einfluss der Erdatmosphäre sowie die Restbeschleunigung des Satelliten. Ersteres wurde durch eine gleichzeitig mittels neuer Methoden durchgeführten genaueren Ausmessung und Modellierung

¹⁾ Benannt nach dem italienischen Mathematiker und Astronomen G. D. Cassini, 1625–1712.

Priv.-Doz. Dr. Claus Lämmerzahl, ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen

der Eigenschaften der Atmosphäre (wichtig ist dabei der momentane Feuchtigkeitsgehalt) erreicht. Auch die Restbeschleunigung des Satelliten hatte man sehr gut unter Kontrolle, da einerseits das Gewicht von Cassini sehr groß ist und andererseits während der Messung alle anderen Subsysteme des Satelliten ausgeschaltet waren (nur Positions- und Lageregelung waren aktiv). Nur der Druck des Sonnenwindes und die thermische Abstrahlung trugen zu einer Beschleunigung bei, wobei zeitliche Änderungen der thermischen Eigenschaften und der Abstrahlung des Satellitenmaterials sowie der Sonnenaktivität vernachlässigt werden konnten. Ansonsten wurden diese Modelle und Daten mit den aus dem genauen Doppler-Tracking gewonnenen Daten abgeglichen.

Die aus der Datenanalyse gewonnene Abschätzung $|\gamma - 1| \leq (2,1 \pm 2,3) \cdot 10^{-5}$ verbessert die Bestätigung der ART um mehr als eine Größenordnung. Damit ist diese Messung schon sehr nahe an dem Bereich, in dem gewisse eingangs erwähnte und durch die Quantengravitation motivierte Szenarien Abweichungen von der ART von bis zu $|\gamma - 1| \approx 2 \cdot 10^{-5}$ für möglich halten [4]. Allerdings müssen wir noch eine Weile Geduld haben, bis dieser Bereich wirklich experimentell zugänglich ist: Erst mit der Mission GAIA (geplanter Start 2010) kann über die hochpräzise Beobachtung der Lichtablenkung, deren bester Wert heutzutage mittels interkontinentaler VLBI (Very Long Baseline Interferometry) bei $|\gamma - 1| \leq 3 \cdot 10^{-4}$

liegt, eine Abschätzung mit einer Genauigkeit von bis zu $5 \cdot 10^{-7}$ erreicht werden.

CLAUS LÄMMERZAHL

- [1] I.I. Shapiro et al., Phys. Rev. Lett. **20**, 1265 (1968)
- [2] R.D. Reasenber et al., Astrophys. J. Lett. **234**, L219 (1979)
- [3] B. Bertotti, L. Iess und P. Tortora, Nature **425**, 374 (2003)
- [4] T. Damour et al., Phys. Rev. D **66**, 046007 (2002)

Ausdehnung ausgeschlossen

Die intermetallische Verbindung YbGaGe dehnt sich bei Erwärmung praktisch nicht aus

Die meisten Festkörper dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden, da die Schwingungen der Atome im anharmonischen Gitterpotential zu einem Anwachsen des Atom-Atom-Abstands führen. Seit etwas über 100 Jahren sind aber auch Verbindungen bekannt, die in einem bestimmten Temperaturintervall eine sehr niedrige – fast verschwindende – thermische Ausdehnung aufweisen. Diese Verbindungen, deren erste die 1896 entdeckte Invar-Legierung $\text{Fe}_{0,65}\text{Ni}_{0,35}$ war, sind technisch von großer Bedeutung, insbesondere wenn die Ausdehnung über große Temperaturintervalle verschwindet. Kürzlich haben amerikanische Wissenschaftler an der Michigan State University gezeigt, dass sich die intermetallische Verbindung YbGa-

Ge für Temperaturen zwischen 100 und 400 K praktisch nicht ausdehnt [1]. Die Ursache dafür ist in den elektronischen Eigenschaften der Verbindung zu suchen.

Die Suche nach Materialien mit verschwindender thermischer Ausdehnung reicht bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts nach

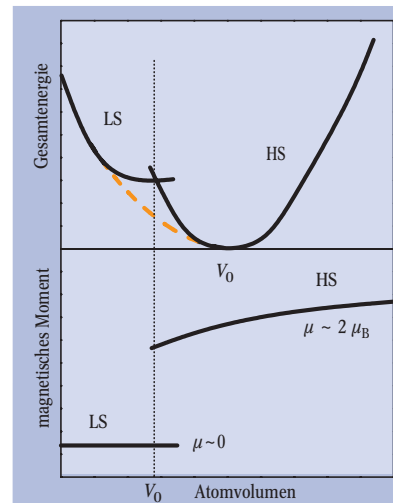


Abb. 1: Gesamtenergie und magnetisches Moment in Abhängigkeit vom Atomvolumen (schematisch). Die gestrichelte orange Kurve stellt die zusätzliche Anharmonizität dar, die sich aus der Existenz des LS-Zustandes ergibt (s. Text)

Frankreich zurück und war militärisch motiviert: Bei der Artillerie führte das kontinuierliche Abfeuern von Geschützen regelmäßig zu deren Ausfall, da sich die Kanonen bereits nach wenigen Abschüssen ausdehnten. Um dies zu verhindern, suchten daher die Metallurgen mit großem Aufwand nach neuen Verbindungen. Darüber hinaus tauchte Ende des 19. Jahrhunderts auch das Problem auf, einen Ersatz für den teuren Urmeter aus Platin und Iridium zu finden, der bis dahin aufgrund seiner niedrigen