

Der freie Fall ist universell

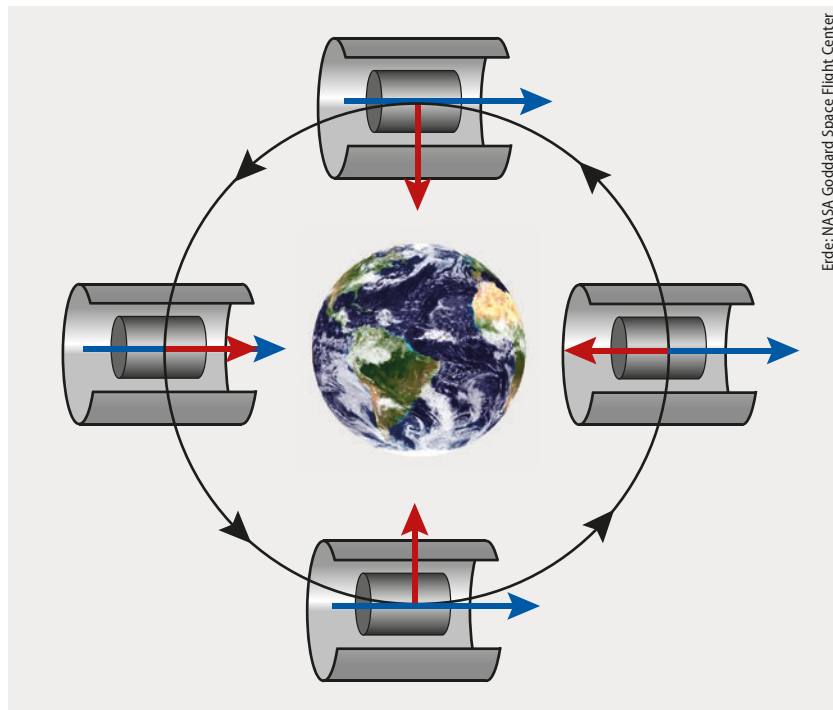
Die Satelliten-Mission Microscope bestätigt das schwache Äquivalenzprinzip mit höchster Präzision.

Gerhard Schäfer

Galileo Galilei erkannte, dass Massen verschiedener Zusammensetzung im Gravitationsfeld der Erde mit gleicher Beschleunigung fallen. Diese „Universalität des freien Falls“ (kurz „Universalität“) leitete Isaac Newton in seiner „Principia“ von 1687 aus der zentralen Annahme seiner Mechanik ab, der Äquivalenz von träger und schwerer Masse, dem „schwachen Äquivalenzprinzip“. Newton verifizierte dies durch eigene Pendelversuche mit einer Genauigkeit von 10^{-3} . Mit intuitiver Weitsicht konstatierte er das Äquivalenzprinzip auch bei Himmelskörpern im Gravitationsfeld der Sonne. Das ist heutzutage bei Messungen mit Lunar-Laser-Ranging von großer Bedeutung, beinhaltet aber eine gewisse Erweiterung der schwachen Äquivalenz, von der noch die Rede sein wird.

Loránd Eötvös gelang 1890 mithilfe von Torsionswaagen der Durchbruch zu einer Genauigkeit von 5×10^{-8} . Torsionswaagenexperimente mit Testmassen unterschiedlicher Metalle im Gravitationsfeld von Erde und Sonne erreichten in den 1960er- und 1970er-Jahren des vorigen Jahrhunderts unter Robert Dicke in Princeton und Wladimir Braginski in Moskau Genauigkeiten von 10^{-11} (Al-Au) bzw. 10^{-12} (Al-Pt). Die aktuellen Genauigkeiten mit Torsionswaagenexperimenten liegen unter Eric Adelberger in Seattle bei 2×10^{-13} (Be-Ti, Be-Al) [1], die Laser-Ranging-Messungen erreichten 7×10^{-14} [2] bzw. 5×10^{-14} [3].

Nun ist es mit dem im April 2016 gestarteten französischen Kleinsatelliten Microscope¹⁾ gelungen, die Universalität des freien Falls mit einer Genauigkeit von $2,7 \times 10^{-15}$ nachzuweisen [4]. Diesen fantastischen Wert ergab die Endauswertung des Freifall-Experiments (drag-free) an Bord von Microscope. Pierre Touboul, der Prin-



Erde: NASA Goddard Space Flight Center

Das Messprinzip von Microscope erlaubt es, eine Verletzung des schwachen Äquivalenzprinzips festzustellen, wenn die beiden zylindrischen Testmassen unterschiedliche Beschleunigungen erfahren (rote Pfeile), während der Satellit die Erde umkreist. Die Differenz dieser Beschleunigungen lässt sich durch die Differenz der an die Testmassen angelegten Spannungen messen, um sie im Gleichgewicht zu halten. Die blauen Pfeile zeigen die in der Bahnebene liegende empfindliche Achse (in Bahnfrequenz zu den roten Pfeilen), entlang derer nach einer Verletzung der schwachen Äquivalenz gesucht wird.

cipal Investigator der Mission, hat dies leider nicht mehr erleben können.

Dass der Drang nach immer genaueren Bestätigungen der Universalität des freien Falls kein Selbstzweck ist, liegt nicht zuletzt an Albert Einsteins Erkenntnis von 1907, dass man im freien Fall das eigene Gewicht nicht spürt. Dies bezeichnete er selbst als „glücklichsten Gedanken meines Lebens“, auf dem eine Revolution unvergleichbarer begrifflicher Tiefe basiert: Aus dem seit Newton bekannten Prinzip der schwachen Äquivalenz erwuchs durch Übergang in frei fallende Bezugssysteme das „Einsteinsche Äquivalenzprinzip“, das die lokale Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie postuliert. Nach acht Jahren intensivster Forschung fand Einstein damit eine Theorie der

Gravitation – von ihm „Allgemeine Relativitätstheorie“ genannt –, in der Gravitation und Krümmung der Raumzeit ein und dasselbe bedeuten. In lokalen Bereichen der Raumzeit, d. h. bevor Gezeitenkräfte zum Tragen kommen, sind demnach Gravitations- und Trägheitsfelder ununterscheidbar.

Das Eötvös-Verhältnis

$$\eta(A,B) = 2 \frac{(\vec{a}_A - \vec{a}_B) \cdot \vec{N}}{(\vec{a}_A + \vec{a}_B) \cdot \vec{N}} \\ \approx (m_g/m_i)_A - (m_g/m_i)_B,$$

dem die Newtonsche Bewegungsgleichung $m_i \vec{a} = m_g \vec{g}$ im gravitativen Beschleunigungsfeld $\vec{g}$ zugrunde liegt, quantifiziert die Gültigkeit der schwachen Äquivalenz. Dabei bedeuten A und B die beteiligten Materialien und m_i und m_g deren träge (inertiale)

1) An MicroSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence) sind CNES, ESA, ONERA, CNRS, OCA, DLR und ZARM beteiligt. Mehr auf bit.ly/3EfaHJo

bzw. schwere (gravitative) Massen. Der Vektor $\vec{N}$ legt die Richtung fest, längs der die Relativbeschleunigung der beiden Materialien gemessen wird. Genau dann, wenn die trägen und schweren Massen aller Körper identisch sind, ist die schwache Äquivalenz erfüllt. Dies trifft für den Aufbau von Körpern aus der Materie des Standardmodells der Elementarteilchenphysik zu, nicht aber für gewisse fundamentale Modifikationen davon, wie sie etwa die Stringtheorie ermöglicht.

Wir wissen heute [5], dass das Einsteinsche Äquivalenzprinzip, das auch das schwache beinhaltet, eine gekrümmte Raumzeit zur Folge hat, nicht jedoch schon zwingend die Allgemeine Relativitätstheorie. Hierzu bedarf es noch der Verschärfung des freien Falls auf Körper, bei denen das von einem Körper selbst erzeugte Gravitationsfeld zu seiner Energie und damit seiner Masse beiträgt, wie z. B. bei Mond und Erde, und zwar genauso viel zur trägen wie zur schweren Masse. Das ist das „starke Äquivalenzprinzip“. Dessen Gültigkeit führt ebenfalls zur Universalität. Der Vollständigkeit halber sei hier angefügt, dass die das Gewicht bestimmende passive und die das Gravitationsfeld erzeugende aktive Gravitationsmasse aus guten theoretischen Gründen (Newtons drittes Axiom) identisch sind [5]. Die unverzichtbare Bedeutung der Universalität des freien Falles für die Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie erklärt den Drang, die Universalität immer genauer verifizieren zu wollen, wie nun mit Microscope [4].²⁾

Die Mission, die sich vom 25. April 2016 bis 18. Oktober 2018 zur Optimierung der thermischen Stabilität auf einer sonnensynchronen Umlaufbahn in 710 Kilometer Höhe befunden hatte, hatte vier Testmassen in Form von zwei elektrostatischen Beschleunigungsmessern (Beschleunigung als Kraft pro Masse) an Bord, bestehend aus jeweils zwei frei beweglichen koaxialen Hohlzylindern. Bei der

Sensor-Einheit zur Messung der Universalität bestand der Innenzylinder aus einer Platin-Legierung und der Außenzylinder aus einer Titan-Legierung, bei der Sensor-Einheit zur Erkennung von systematischen instrumentellen Fehlern bestanden beide Zylinder aus der Platin-Legierung.³⁾

Die erreichte ultrahohe Genauigkeit verdankt sich dem rauscharmen Weltraum und dem periodischen freien Fall mit eingetakteten Messkampagnen über Zeiträume von typisch 120 Erdumrundungen über ungefähr 8 Tage. Bei jeder Kampagne wurde der Satellit mithilfe seiner Mini-Kaltgastrtriebwerke in eine von zwei optimierten Rotationen gegenläufig zur Bahnbewegung versetzt. Dadurch kam es zu zwei im Vergleich zur Bahnfrequenz (**Abb.**) höherfrequenten Modulationen des gesuchten Signals, sodass die Störeinflüsse besser kontrollierbar waren [6].

Die Signale wurden an der Sensor-Einheit längs deren Koaxialrichtung über die Differenz der elektrostatischen Beschleunigungen der beiden Zylinder abgegriffen, die mit dem Satelliten kapazitativ verbunden waren. Als Referenz für den freien Fall des Satelliten dienten einzeln und weniger häufig auch gleichzeitig die beiden Massen des Sensors. Dabei erfolgten Bahnkorrekturen des Satelliten sofort, wenn sich Abweichungen vom gleichen freien Fall anbahnten.

Die Mission hat mit ihrem sehr erfolgreichen Drag-free-System Bedeutung für künftige Missionen hoch-

genauer geodätischer Raumverfahren und astronomischer Beobachtungen. Neben den hervorragenden aktuellen Ergebnissen brachte sie auch die wichtige Erkenntnis, welche Faktoren entscheidend sind, um mit einer neuen Freifall-Mission eine Empfindlichkeit von 10^{-17} erreichen zu können: Dazu gehören kontaktlose Verbindungen zwischen den Sensor-Einheiten und dem Satelliten, eine verbesserte thermische Charakterisierung des Satelliten sowie ein tieferes Verständnis kurzlebiger Störeinflüsse auf die Signale.

Solange die Vereinigung der Gravitation mit den Quantenfeldern der Elementarteilchenphysik aussteht, bleiben jegliche experimentellen Bemühungen um die Gültigkeit der Universalität des freien Falls und damit der Allgemeinen Relativitätstheorie von größter Bedeutung.

- [1] T. A. Wagner et al., *Class. Quantum Grav.* **29**, 184002 (2012)
- [2] V. Viswanathan et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **476**, 1877 (2018)
- [3] F. Hofmann und J. Müller, *Class. Quantum Grav.* **35**, 035015 (2018)
- [4] P. Touboul et al., *Phys. Rev. Lett.* **129**, 121102 (2022)
- [5] C. M. Will, *Living Rev. Relativity* **17**, 4 (2014)
- [6] P. Touboul et al., *Class. Quantum Grav.* **39**, 204009 (2022)

Der Autor

Prof. Dr. Gerhard Schäfer, Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Kurzgefasst

Hochgeladene Atomuhr

Forschenden des Exzellenzclusters QuantumFrontiers ist es erstmals gelungen, eine Atomuhr mit hochgeladenen Ionen zu realisieren. Dazu nutzten sie 13-fach geladene Ar-Ionen, die sie auf $2 \cdot 10^{-4}$ K abkühlten. Der Vergleich mit einer Yb-Ionen-Uhr an der PTB ergab für die neue Atomuhr eine systematische Frequenzunsicherheit von $2,2 \cdot 10^{-17}$ – im Bereich der bisher besten Uhren. Die Methode lässt sich auch auf andere Elemente als Argon übertragen, sodass es z. B. möglich wird, fundamentale Effekte der Speziellen Relativitätstheorie noch präziser als bisher zu untersuchen.

S. A. King et al., *Nature* **611**, 43 (2022)

Fußabdruck von Kollisionen

Die Teilchenphysik-Community plant als Nachfolger des Large Hadron Collider eine „Higgs-Fabrik“, in der Elektronen und Positronen bei Schwerpunktsenergien von mehr als 200 GeV kollidieren. Ein Vergleich des Energiebedarfs pro Higgs-Boson der verschiedenen weltweit geplanten Anlagen zeigt große Unterschiede: Der vom CERN vorgeschlagene Future Circular Collider (FCC) braucht nur 3 MWh, der US-amerikanische Cool Copper Collider das Sechsfache. Bei der CO₂-Bilanz schneiden die CERN-Vorschläge FCC und CLIC am besten ab.

P. Janot und A. Blondel, *Eur. Phys. J. Plus* **137**, 1122 (2022)

2) Die Genauigkeiten des Lunar-Laser-Ranging sind der starken Äquivalenz zuzurechnen.

3) Die Wahl fiel auf Platin und Titan, weil sich diese Elemente stark im Wert des Neutron (N)-Proton (Z)-Überschusses pro Atommasse (A), $(N - Z) / A$, und etwas auch in der nuklearen elektrostatischen Energie, $Z(Z - 1) / (N + Z)^{1/3}$ unterscheiden.