

■ Detektivarbeit krönt Langzeitprojekt

Nach langwieriger Datenauswertung ist es mit Gravity Probe B gelungen, den Schiff-Effekt nachzuweisen.

Am 20. April 2004 war es endlich soweit: Nach über 40 Jahren Vorbereitung wurde der Satellit Gravity Probe B (GP-B) an Bord einer Delta-Rakete von der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien gestartet [1]. Der Start lief perfekt, obwohl aufgrund der wissenschaftlichen Anforderungen das Zeitfenster nur eine Sekunde betrug. Ebenso perfekt funktionierten alle Systeme auf dem Satelliten. GP-B sollte die geodätische Präzession sowie den Mitführungseffekt (*frame dragging*) der Allgemeinen Relativitätstheorie bestätigen.¹⁾ Nach über fünf Jahren Datenauswertung wurde dieses Ziel erreicht – beim Mitführungseffekt leider nicht mit der anvisierten Genauigkeit [2]. Dennoch ist damit ein weiterer wichtiger Test der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeschlossen.

Die geodätische Präzession lässt sich als Spin-Bahn-Kopplung ansehen, bei der die Drehachse eines freien Kreisels aufgrund seiner Bewegung im Newtonschen Gravitationsfeld präzediert. Charakteristisch für diese Präzession ist, dass eine in der Bahnebene liegende Drehachse immer in der Bahnebene bleibt (Abb. 1). Für den GP-B-Satelliten, der in 640 km Höhe einen polaren Orbit flog, resultiert aus der geodätischen Präzession eine Richtungsänderung von 6,6 Bogensekunden pro Jahr.

Ursache für den Mitführungseffekt ist die Rotation gravitierender Körper. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie erzeugt die Rotation eines gravitierenden Körpers ein zusätzliches Gravitationsfeld. Dieses sog. gravitomagnetische Feld ähnelt dem Magnetfeld einer rotierenden geladenen Kugel und beeinflusst die Bewegung von Satelliten und die Drehachsen von freien Kreiseln.

Albert Einstein hat als erster den Einfluss des gravitomagnetischen Feldes auf die Bahn von Satelliten vorhergesagt (zur Geschichte dieses Effektes siehe [3]). Allerdings ist

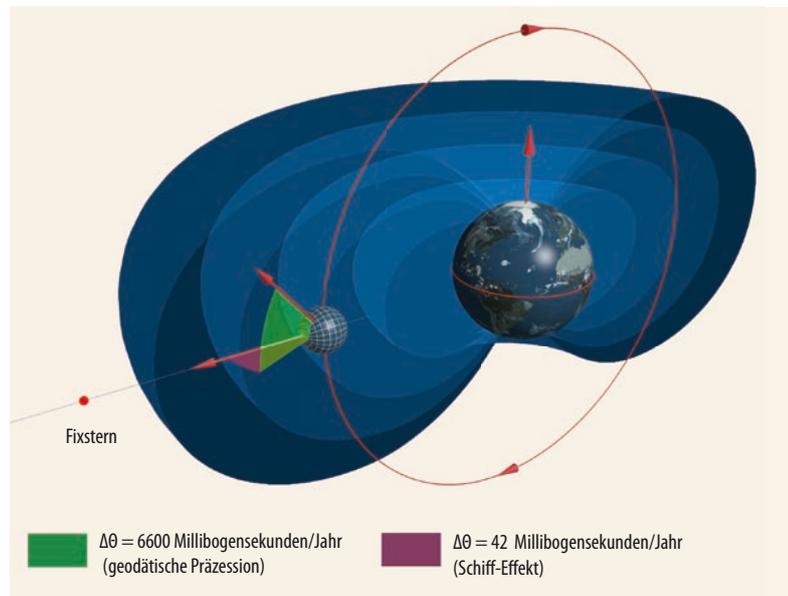


Abb. 1 Die Drehrichtung von Kreiseln in einem Satelliten, der sich in einem Orbit um die Pole befindet, bewegt sich in Bezug auf einen weit entfernten Fixstern. Bei den Bewegungen in der Bahnebene

(grün) handelt es sich um die geodätische Präzession, die aus der Bahnebene heraus (rot) rührt vom gravitomagnetischen Feld her.

der Effekt nach Lense und Thirring benannt, die ihre Rechnungen 1918 publizierten [4]. Demnach beginnt die Bahnebene eines Satelliten in Richtung der Erdrotation zu drehen – die Bahn wird mitgeführt. Dieser Lense-Thirring-Effekt wurde in den letzten Jahren durch die Satelliten LAGEOS und LAGEOS II mit einer Genauigkeit von rund 10 % bestätigt [5, 6]. Entscheidend ist dabei, den Lense-Thirring-Effekt von Effekten zu trennen, deren Ursache die Abweichung der Erde von der Kugelgestalt ist und die um mehrere Größenordnungen dominanter sind. Durch Daten eines dritten Satelliten, der mit einer bestimmten Inklination die Erde umkreist, lassen sich die konkurrierenden Effekte viel besser kompensieren, sodass eine Genauigkeit von knapp 1 % möglich ist. Eine entsprechende Mission, LARES, wurde von der italienischen Raumfahrtagentur ASI genehmigt und ist in Vorbereitung.

1960 hat Leonard Schiff den Einfluss des gravitomagnetischen Feldes auf die Drehachse von freien Kreiseln berechnet [7]. Dieser sog. Schiff-Effekt entspricht einer gra-

vitativen Spin-Spin-Kopplung. Da die Bahn eines Satelliten als großer Kiesel mit der Bahnnormalen als Drehachse anzusehen ist, entspricht der Schiff-Effekt im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie dem Lense-Thirring-Effekt. Im Gegensatz zur geodätischen Präzession bewegt sich hierbei die Drehachse eines Kreisels aber aus der Bahnebene heraus – bei GP-B um 42 Millibogensekunden pro Jahr. Daher lassen sich beide Effekte eindeutig trennen (Abb. 1).

George Pugh, Leonard Schiff und William Fairbank initiierten eine Satellitenmission, um dies zu bestätigen [1].²⁾ Die Kreisel bestanden aus äußerst präzise gefertigten Siliziumkugeln, die mit supraleitendem Niob beschichtet waren (Abb. 2). SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), die fest mit dem Satelliten verbunden waren, haben präzise jede kleinste Änderung des magnetischen Moments der sich frei drehenden Kugeln gemessen, wie sie sich z. B. aus der Präzession der Drehachse ergibt. Dabei musste der Satellit sehr genau auf einen weit entfernten,

1) Gravity Probe A (GP-A) bezeichnet eine 1976 durchgeführte Mission, mit der die gravitative Rotverschiebung von Uhren nachgewiesen wurde. Dies stellt bis heute den genauesten Nachweis dieses Effektes dar.

2) Mehr Hintergrundinformationen sowie Dokumentationen finden sich unter <http://einstein.stanford.edu>



Abb. 2 Bei den Kreiseln, die in Gravity Probe B zum Einsatz gekommen sind,

handelt es sich um mit Niob beschichtete fast perfekte Kugeln.

genau bekannten Fixstern ausgerichtet bleiben. Der Unterschied zwischen der festen Richtung zu dem Fixstern und der sich dazu ändernden Richtung der Drehachse der Kreisel macht die geodätische Präzession und den Schiff-Effekt aus (Abb. 1). Die Präzession sollte sich auf 0,5 Millibogensekunden pro Jahr genau messen lassen, was eine Messgenauigkeit von 1 % für den Schiff-Effekt bedeutet. Damit ließe sich auch die galaktische Rotation nachweisen [8].

Mit der Auswertung der Messdaten von GP-B ist nun erstmals der Nachweis des Schiff-Effektes gelungen [2]. Obwohl die Mission nach allen Regeln der Technologie ein voller Erfolg war, wurde die anvisierte Messgenauigkeit jedoch

nicht erreicht. Grund dafür waren unter anderem Störeffekte, die zwei Größenordnungen höher ausgefallen sind als erwartet. Dabei bilden sich in Metalloberflächen, wie den Kreiseln und ihrem Gehäuse, kleine Bereiche unterschiedlichen elektrischen Potentials, die zusätzliche elektrische Felder erzeugen. Aufgrund der Wechselwirkung wirkten kleine zusätzliche Drehmomente auf die Kreisel.

Ursprünglich war für die Datenauswertung ein Jahr angesetzt, aber die Störeffekte haben diese Planung zunichte gemacht. Über fünf Jahre intensive Detektivarbeit und Datenanalyse war nötig, um die Störeffekte zu identifizieren und zu charakterisieren. Dies ging auf Kosten der Genauigkeit – für die geodä-

tische Präzession ließ sich 0,3 % erreichen, für den Schiff-Effekt 20 %. Trotzdem ist dem Team um Francis Everitt, der 1962 zum Gravity Probe B-Projekt hinstieß, mit diesen unabhängigen Messungen zweier relativistischer Effekte ein wichtiger neuer Test der Allgemeinen Relativitätstheorie gelungen.

Die Bahn von Satelliten und die Bewegung von Kreiseln bieten die Möglichkeit für zwei vollkommen unterschiedliche Messungen. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie lassen sich aber beide auf dieselbe Ursache – das gravitomagnetische Feld – zurückführen. In verallgemeinerten Theorien der Gravitation (wie beispielsweise mit Torsion) ist das meist nicht der Fall. Daher ist es wichtig, diesen Effekt mit zwei unabhängigen Messprinzipien nachzuweisen. Obwohl das gesteckte Ziel nicht ganz erreicht wurde, ist das Ergebnis daher doch von großer Bedeutung. Mit diesem Resultat ist ein über 45 Jahre währendes Projekt abgeschlossen worden, das untrennbar mit dem Namen Francis Everitt verknüpft ist.

Claus Lämmerzahl

- [1] H. Dittus und C. Lämmerzahl, *Physik Journal*, Juni 2004, S. 10
- [2] C. W. F. Everitt et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 221101 (2011)
- [3] H. Pfister, *Gen. Rel. Grav.* **39**, 1735 (2007)
- [4] H. Thirring und J. Lense, *Phys. Z.* **19**, 156 (1918)
- [5] H. Dittus und C. Lämmerzahl, *Physik Journal*, Dezember 2004, S. 20
- [6] I. Ciufolini, *Nature* **449**, 41 (2007)
- [7] L. I. Schiff, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 215 (1960)
- [8] D. Giulini, *Physik Journal*, Oktober 2005, S. 27

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl, ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen

KURZGEFASST

■ Antimaterie in der Falle

Im Alpha-Experiment am CERN ist es gelungen, rund 300 Antiwasserstoffatome bis zu 16 Minuten lang einzufangen. Die Einschlusszeit ist so lang, dass die meisten Antiatome in den Grundzustand relaxieren. Damit sollte es nun möglich sein, das Spektrum im Detail zu untersuchen und mit demjenigen von Wasserstoff zu vergleichen. Falls sich beide Spektren unterscheiden, wäre die CPT-Symmetrie gebrochen. Dies könnte den Materieüberschuss im Universum erklären.

The Alpha Collaboration, *Nature Physics* DOI: 10.1038/NPHYS2025 (2011)

■ Lebender Laser

In der Biologie finden Laser z. B. Anwendung als optische Pinzetten, mit denen sich Zellen manipulieren lassen. Nun ist es amerikanischen Forschern gelungen, lebende Zellen als Lasermedium zu nutzen. Sie schleusten dafür eine Variante des grün fluoreszierenden Proteins (GFP) in menschliche Nierenzellen, die sie dann in wässriger Lösung zwischen zwei Spiegel eines optischen Resonators brachten. Nach Pumpen mit ns-Pulsen im nJ-Bereich emittierten die Zellen Laserlicht, ohne dabei abzusterben.

M. C. Gather und S. H. Yun, *Nature Photonics*, doi:10.1038/nphoton.2011.99 (2011)

■ Pioneer-Anomalie entschlüsselt

Seit 1979 registriert die NASA eine winzige Abbremsung der Pioneer-Sonden, welche die Flugbahn um über 650 000 Kilometer von der berechneten abweichen ließ. Physiker des Bremer ZARM haben nun Spekulationen um mögliche Effekte „neuer Physik“ mit einer detaillierten Computersimulation der Sonden beendet. Demnach sorgen die direkte Abstrahlung von Wärme und deren Reflexion an Bauteilen für die Abbremsung. Die Berechnungen lassen sich auf andere Raumfahrzeuge übertragen.^{†)}

B. Rievers und C. Lämmerzahl, *Annalen der Physik* **523**, 439 (2011)

+) vgl. *Physik Journal* Januar 2006, S. 25