

# Die experimentelle Bestätigung des Thirring-Lense-Effekts

Franz Embacher<sup>1</sup>  
November 2004

Der Thirring-Lense-Effekt ist die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagte Mitführung des „nichtrotierenden Zustands“ in der Nähe rotierender Massen. Sowohl lokale Inertialsysteme (kräftefrei aufgehängte Kreisel) als auch die Bahnebenen von Satelliten sollten davon betroffen sein. Nachdem die Größe dieser Effekte im Jahr 1918 von Hans Thirring und Joseph Lense berechnet wurde, galten sie für lange Zeit als unbeobachtbar klein.

Vier Jahrzehnte später dachten George Pugh (1959) und Leonard Schiff (1960) unabhängig voneinander die Möglichkeit eines Präzisionsexperiments mit einem Kreisel im Erdumlauf an. Es sollten fast vier weitere Jahrzehnte vergehen, bis die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten zum Nachweis der extrem kleinen Effekte in Angriff genommen werden konnte. Heute verlaufen die Anstrengungen zum Nachweis des Thirring-Lense-Effekts vor allem in zwei Projekten:

## LAGEOS

Die erste Gruppe (um den italienischen Physiker I. Ciufolini) vermisst die Bahnen zweier Erdsatelliten<sup>2</sup>, LAGEOS (= *Laser Geodynamics Satellite*, seit 1976 im Umlauf) und LAGEOS 2 (seit 1992 im All). Die ursprüngliche Bestimmung der beiden Satelliten ist die genaue Vermessung des Gravitationsfelds der Erde. Es handelt sich um 406 kg schwere passive Kugeln von 60 cm Durchmesser, deren Positionen durch Laufzeitmessung reflektierter Laserpulse bestimmt werden (Fig. 1).

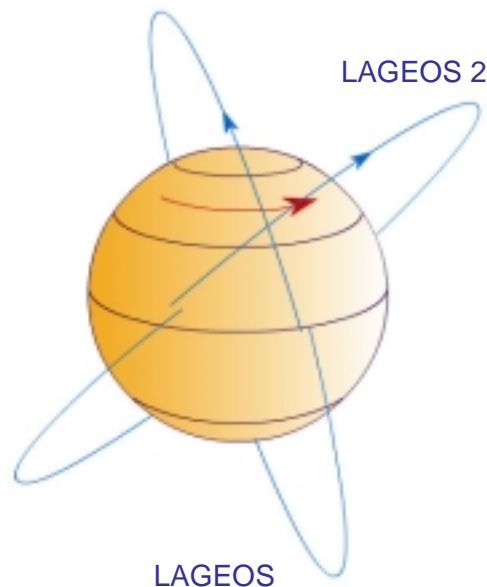


Fig. 1

Die Bahnen von LAGEOS und LAGEOS 2. Die großen Halbachsen sind 12270 und 12210

<sup>1</sup> Institut für Theoretische Physik der Universität Wien. E-mail: [fe@ap.univie.ac.at](mailto:fe@ap.univie.ac.at).

<sup>2</sup> Es handelt sich um eine Kooperation von NASA und ASI (= Agenzia Spaziale Italiana, italienische Raumfahrtagentur).

km, die Exzentrizitäten 0.004 und 0.014, und die Neigungen der Bahnebenen relativ zur Äquatorebene der Erde sind 110° und 52°.

Aufgrund des Thirring-Lense-Effekts, der von der Rotation der Erde herrührt, sollte sich die Bahnebene jedes der beiden Satelliten im Jahr um ungefähr 35 Millibogensekunden drehen. Eine solche Größenordnung wäre mit der heutigen Technologie, die Satellitenpositionen auf Zentimeter genau messen kann, ohne weiteres zu sehen. Das Hauptproblem des Nachweises besteht allerdings darin, dass die Abweichung der Erde von der Kugelform wesentlich größere Rotationen der Bahnebenen bewirkt – Effekte, die nichts mit der Erdrotation zu tun haben. Um diese Effekte abziehen zu können, ist eine sehr genaue Kenntnis des Gravitationsfelds der Erde nötig.

Zu den Einflüssen, mit denen der Thirring-Lense-Effekt bei dieser Nachweismethode konkurrieren muss, zählen

- die Bahnstörung durch den Strahlungsdruck der Sonne,
- die Bahnstörung durch den Restluftwiderstand,
- die Variation der Rotationsgeschwindigkeit der Erde (Gezeiten!),
- die Wanderung der Pole,
- die Bewegung der Bodenstation durch die Kontinentalverschiebung und
- gravitative Störungen durch Mond, Sonne und Planeten.

Schließlich wurde eine geschickte Kombination von Messgrößen der beiden Satelliten gewählt, in deren Zeitentwicklung sich der größte Störfaktor, das Quadrupolmoment der Erde (das sich der Abplattung verdankt), heraushebt.

Im Jahr 1998 veröffentlichte die Gruppe die Resultate der Auswertung von 4 Jahren Positionsdaten der LAGEOS-Satelliten<sup>3</sup>. Nach Abzug aller bekannten Einwirkungen auf die Bahnebenen der Satelliten blieb ein Netto-Effekt von  $110\% \pm 20\%$  des von Thirring und Lense vorausgesagten Werts übrig. Der angegebene Fehlerbereich rührte vor allem von den Unsicherheiten im damals besten Modell des Erd-Schwerefelds (EGM-96). Der Befund war daher nicht unumstritten und konnte als „vorläufige Bestätigung“ aufgefasst werden.

Im Herbst 2004 veröffentlichte die Gruppe Resultate, die auf 11 Jahren LAGEOS-Positionen und einem mittlerweile verbesserten Modell des Erd-Schwerefelds (EIGEN-GRACE02S) beruhen<sup>4</sup>. Der Netto-Effekt konnte auf  $99\% \pm 5\%$  des vorausgesagten Werts verbessert werden, was klarerweise das Vertrauen, dass es sich hierbei tatsächlich um die relativistische Mitführung handelt, steigert.

## Gravity Probe B

Hierbei handelt es sich um ein satellitengestütztes Experiment<sup>5</sup> nach der von Pugh und Schiff vorgeschlagenen Art, um die Thirring-Lense-Präzession von Kreisel mit Quarz-Rotoren (den rundesten Objekten, die je von Menschenhand hergestellt wurden) direkt nachzuweisen (Fig. 2). Der Satellit wurde am 20. April 2004 gestartet und kreist in etwa 400 Meilen Höhe auf einer über die Pole führenden Bahn.

<sup>3</sup> I. Ciufolini, E. Pavlis, F. Chieppa, E. Fernandes-Vieira and J. Perez-Mercader: *Test of general relativity and measurement of the Lense-Thirring effect with two Earth satellites*, Science, 279, 2100 (27 March 1998).

<sup>4</sup> I. Ciufolini and E. C. Pavlis: *A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect*, Nature, 431, 958 (21 October 2004).

<sup>5</sup> Kooperation von NASA und Stanford University

Auch in diesem Experiment ist höchste Präzision erforderlich. Hier stellt sich das interessante Problem, dass Fixsterne nicht fix sind: Um eine nichtrotierende Ebene zu definieren, bezüglich welcher die Mitführung gemessen werden kann, wird der Stern IM Pegasi herangezogen. Allerdings vollführt er, wie die meisten Sterne im Milchstraßensystem, eine Eigenbewegung. Blicke diese unberücksichtigt, so wäre der daraus resultierende Fehler von der selben Größenordnung wie der erwartete Thirring-Lense-Effekt! Daher wurde die Bewegung von IM Pegasi relativ zu dahinter liegenden Quasaren seit 1997 durch VLBI-Messungen<sup>6</sup> im Mikrowellenbereich auf eine Genauigkeit von 0.1 Millibogensekunden pro Jahr genau bestimmt.

Eine weitere beeindruckende Leistung ergab sich beim Start der Trägerrakete, die aus Gründen der erforderlichen Positionierung in einer für Messungen günstigen Bahnebene ein Startfenster von einer Sekunde hatte (und schaffte)!

Die erzielbare Genauigkeit des Experiments liegt bei 1%. Ergebnisse werden im Laufe des Jahres 2005 erwartet. Auf der Website <http://einstein.stanford.edu/> kann der Stand der Mission mitverfolgt werden.



Fig. 2

Einer der vier Kreisel, der rundesten je von Menschenhand hergestellten Objekte, die den „Machschen Aspekt“ der Allgemeine Relativitätstheorie testen sollen.

<sup>6</sup> *Very large baseline interferometry.*