

Gravity Probe B

Nachweis des Thirring-Lense Effekts

Ein Präzisionsexperiment zur Vermessung der Struktur der lokalen Raumzeit

Birgit Schörkhuber

Im Mai 2007 feierte Walter Thirring, Sohn von Hans Thirring und wie sein Vater ein bedeutender Wiener Physiker, seinen 80. Geburtstag. Unter den Vortragenden beim „Thirring-Fest“ an der Fakultät für Physik der Universität Wien war auch Dr. Berry Muhlfelder (University of Stanford). Mit den Worten „I really wished that I could tell you: Walter, we have measured it! Unfortunately I guess I have to wait a few more months“, beschloss Muhlfelder seine Geburtstagswünsche.

Den Hintergrund für diese Anekdote liefert ein Aspekt der Allgemeinen Relativitätstheorie, der vor beinahe 90 Jahren von Hans Thirring beschrieben wurde und dessen experimenteller Nachweis Physiker/innen seit über 40 Jahren beschäftigt: Der Einfluss rotierender Massen auf die umgebende Raumzeit.

Albert Einstein präsentierte 1915 mit der Allgemeinen Relativitätstheorie ein völliges neues physikalisches Bild von Raum und Zeit. Auch der Wiener Physiker Hans Thirring (1888-1976) widmete sich der Theorie und ging in einer Veröffentlichung von 1918 der Frage nach, ob und auf welche Weise eine rotierende Hohlkugel durch ihre Bewegung die Raumzeit beeinflusst [1]. Thirrings Berechnungen zeichnen ein Bild, das sich von der Newtonschen Betrachtungsweise deutlich unterscheidet. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die Rotation der Zentralmasse auch lokale Inertialsysteme in der Umgebung dieser Masse in Rotation versetzt werden.

Im selben Jahr noch publizierte er mit Josef Lense (1890-1985) eine Arbeit, in der sie diese Ansätze auf ein etwas realistischeres Problem anwandten [2]. Die beiden Physiker berechneten den Einfluss der Rotation eines Zentralkörpers auf die Bahn eines kleinen Satelliten und fanden eine weitere Abweichung zur Newtonschen Physik: auch der Schnittpunkt zwischen Bahnebene und Äquator wandert – die Bahnebene des Satelliten ändert sich (ausführlicher Artikel in Plus Lucis 2/99 [3]). Diese beiden Effekte wurden schließlich unter dem Namen **Thirring-Lense Effekt** bekannt.

Birgit Schörkhuber bac., ist Mitarbeiterin am AECC Physik, Universität Wien.

Im Laufe des letzten Jahrhunderts unterzogen Wissenschaftler unterschiedliche Aspekte der Allgemeinen Relativitätstheorie in zahlreichen Experimenten einer Prüfung. Die Bestätigung der Vorhersagen der beiden Wiener Physiker scheiterte jedoch lange Zeit an den Grenzen experimenteller Messgenauigkeit.

1960 analysierte Leonard Schiff (1915-1971, University of Stanford) ein mögliches Experiment [4]. Er berechnete die Auswirkungen der rotierenden Erde auf die Richtung der Drehachse eines Kreisels (Gyroskop) in einer Erdumlaufbahn bezüglich eines weit entfernten, inertialen Bezugssystems, wobei zwei Effekte hier eine zentrale Rolle spielen:

- Die **geodätische Präzession**, die unabhängig von der Rotation der Zentralmasse auftritt und eine Änderung der Drehachse des Kreisels um einen kleinen Winkel in der Bahnebene bewirkt (siehe Abb.1). Bereits 1916 hatte Willem de Sitter (1872-1934, Astronom in Leiden/Niederlande) eine Korrektur der Bewegung des Systems Erde-Mond um die Sonne aufgrund dieses Effekts vermutet, der experimentelle Nachweis gelang 1988.
- Eine weit kleinere Winkeländerung der Kreisellachse normal zur Bahnebene wird durch den so genannten **Thirring-Schiff Effekt** hervorgerufen. Dieser beschreibt die von Thirring vorhergesagte Rotation lokaler Inertialsysteme in der Umgebung rotierender Massen angewandt auf einen kräftefreien Kiesel in einer Erdumlaufbahn. Die Drehachse vollführt eine Präzessionsbewegung, wobei die Richtung der Präzession über dem Äquator entgegengesetzt zu der über den Polen ist.

Folgendes Bild veranschaulicht den Thirring-Schiff Effekt: Man stelle sich eine rotierende Kugel vor, eingetaucht in eine zähe Flüssigkeit. Durch die Drehbewegung wird die Flüssigkeit mitgenommen und es bilden sich Wirbel. Angewandt auf rotierende Massen bedeutet dies, dass die umgebende Raumzeit sozusagen „mitgeschleift“ (engl. **frame dragging**).

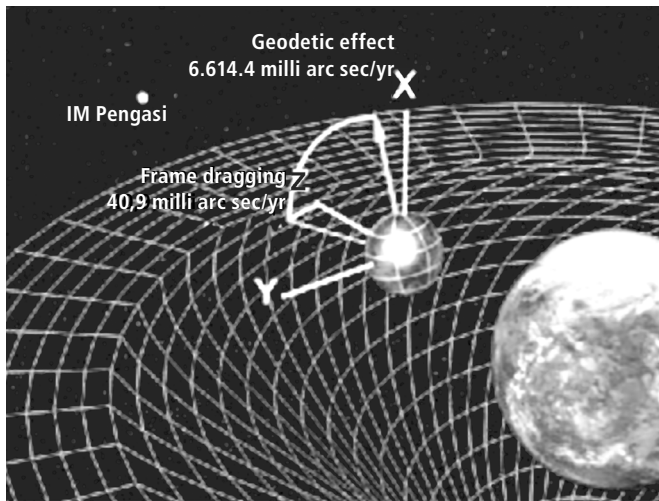


Abb. 1: Gyroskop in polarem Orbit um die Erde

Eine weitere, vielleicht treffendere Analogie lässt sich in der Struktur der relativistischen Gleichungen selbst finden und ergibt sich durch Analyse des Spezialfalles schwacher, stationärer Gravitationsfelder. Die Gleichungen können dann in eine Form gebracht werden, in der sie starke Ähnlichkeit mit den Grundgleichungen der Elektrodynamik aufweisen und erlauben so eine Unterscheidung zwischen gravielektischen („Newtonschen“) und gravimagnetischen („Mach-schen“) Effekten. Es sei betont, dass die Wortwahl auf eine mathematisch-formale Analogie zurückgeht und keinen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Effekten und der Gravitationstheorie impliziert.

Im Rahmen einer Newtonschen Beschreibung treten keinerlei gravimagnetische Phänomene auf, diese ergeben sich tatsächlich erst in der Relativitätstheorie. Ähnlich dem Biot-Savartschen Gesetz zur Berechnung des elektromagnetischen Feldes, das durch eine bewegte Ladung erzeugt wird, können ein gravimagnetisches Feld und eine Kraft, ähnlich der Lorentzkraft, abgeleitet werden, die durch eine bewegte Masse erzeugt werden.

Berechnet man die gravimagnetische Feldstärke für die rotierende Erde, so ergibt sich eine Abhängigkeit des Betrags der Feldstärke vom Breitengrad. An den Polen erhält man den größten, am Äquator den kleinsten Wert. Auf einen freien Kreisel wirkt aufgrund dessen eine Kraft, die eine Präzession der Kreiselachse bewirkt.

Für den experimentellen Nachweis dieser betragsmäßig sehr kleinen Abweichung muss der Kreisel kräftefrei rotieren. Dies gelingt am ehesten in einer Erdumlaufbahn, doch auch dort treten noch Störeffekte auf, die den Effekt überlagern und eine Messung zu einer experimentellen Herausforderung machen.

Nachdem die Allgemeine Relativitätstheorie bisher allen Tests stand gehalten hat und mittlerweile in unserem physikalischen Weltbild verankert ist, kann man die Frage stellen, was man sich denn von einem weiteren, so aufwendigen Experiment erhoffen kann.

Zum einen bestätigten vorhergehende Experimente gravielektische Effekte. Für den Einfluss rotierender Massen auf die Raumzeit, also für einen gravimagnetischen Aspekt der Theorie, gab es im 20. Jahrhundert keine experimentellen Befunde. Der Thirring-Lense Effekt für die rotierende Erde ist zwar sehr klein, bei massereichen Objekten im Universum müsste er sich hingegen stark auf die Bewegung der umgebenden Materie auswirken, beispielsweise auf die Dynamik von Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher oder Neutronensterne.

Darüber hinaus sind es noch grundlegendere Fragen, die Präzisionsexperimente zur Relativitätstheorie erhellen können – in kleinen Abweichungen von den Vorhersagen der Theorie hofft man, Anhaltspunkte zu finden, die letztendlich den Brückenschlag zur Quantenmechanik ermöglichen könnten.

Gravity Probe B

Das von L. Schiff vorgeschlagene Experiment erwies sich ehrgeiziges Unterfangen. Die Drehachse eines Kreisels in einer polaren Umlaufbahn (in ca. 640 km Höhe) sollte eine jährliche Winkeländerung von ca. 6,6" aufgrund der geodätischen Präzession sowie eine Änderung von ca. 0,04" (40 Millibogensekunden pro Jahr!) durch den Thirring-Lense Effekt erfahren. Schiff konnte die NASA als Kooperationspartner gewinnen und erarbeitete mit zwei Kollegen, dem Tieftemperaturphysiker W. Fairbank und dem Gyroskopexperten B. Cannon, ein Konzept zur Umsetzung dieser Idee. 1962 übernahm Francis Everitt die Leitung des Projekts und bemühte sich über 40 Jahre lang gemeinsam mit hunderten MitarbeiterInnen um die Realisierung des 760 Millionen Dollar teuren Präzisionsexperiments „Gravity Probe B“ (GP-B).

Das Satellitenexperiment sollte die Struktur der lokalen Raumzeit und die Bewegung lokaler Inertialsysteme mit einer Genauigkeit von 0,0005" vermessen. Zur Veranschaulichung: Auf einer Uhr mit kreisrundem Zifferblatt schließen benachbarte Minutenmarkierungen einen Winkel von 6° oder $2,16 \cdot 10^7$ Millibogensekunden ein. Gravity Probe B musste also in der Lage sein, Winkel zu messen, die etwa 50 Millionen Mal kleiner sind als der Winkel zwischen zwei Minutenmarkierungen.

Zur Erreichung dieses Ziels müssen alle störenden Einflüsse minimiert werden und die verbleibenden Fehler, die diese noch verursachen, so genau wie möglich bekannt sein. Nach Beendigung der Messung müssen die dadurch implizierten Korrekturen an den Daten vorgenommen werden, um als Resultat die relativistischen Effekte mit möglichst hoher Genauigkeit zu verifizieren.

Vier sphärische Kreiselle, ein Teleskop und ein Führungstern bilden die Hauptelemente des Experiments. Nach Erreichen der Umlaufbahn werden die Kreiselle so in Rotation versetzt, dass ihre Drehachse exakt in Richtung des Führungsterns IM Pegasi zeigt. Während der 18-monatigen Messung müssen das Teleskop und damit auch der Satellit diese Ausrichtung

beibehalten. Die Achse der Kreisel hingegen müsste sich bezüglich dieses Referenzsystems ändern, sofern die vorhergesagten relativistischen Effekte tatsächlich auftreten.

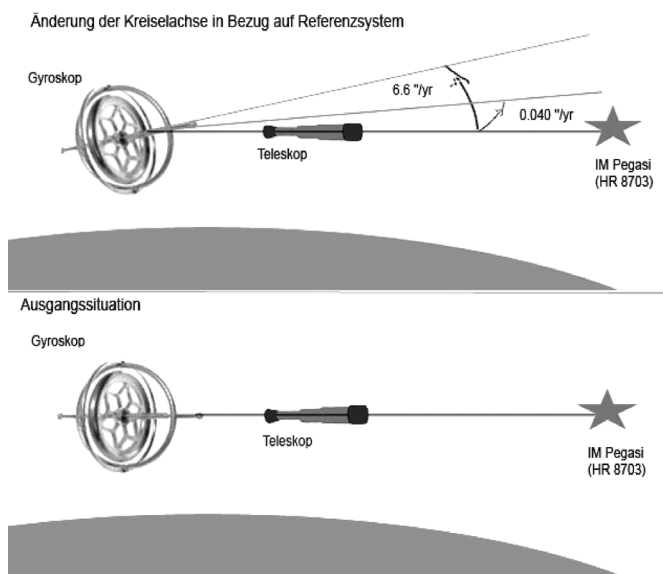


Abb. 2: Prinzip des GP-B Experiments

Die Auswahl des Führungsterns gestaltete sich schwierig. Als „Referenzsystem“ kommen nur Sterne in Frage, die neben einer entsprechenden Helligkeit auch eine geringe Eigenbewegung bezüglich weit entfernter Quasare aufweisen. Quasare sind extrem leuchtkräftig, besitzen eine sehr hohe Rotverschiebung und stellen somit im aktuellen kosmologischen Bild die „weitest“ entfernten Objekte des sichtbaren Universums dar. Sie markieren einen Hintergrund, auf den man die Eigenbewegung von Sternen beziehen kann.

Der Führungstern sollte – genau wie Quasare – im Radio-/Mikrowellenbereich emittieren, um seine Eigenbewegung gegenüber diesem Hintergrund auch von der Erde aus mit hoher Genauigkeit beobachten zu können.

Ausgewählt wurde schließlich der 300 Lichtjahre entfernte Stern IM Pegasi (HR 8703). Mit seinem kleineren Begleiter stellt das Doppelsternsystem eine der hellsten Radioquellen der nördlichen Hemisphäre dar.

Die rundesten Kugeln der Welt

In den vier Jahrzehnte, die das Projekt in Anspruch nahm, beschäftigten sich mehr als 90 Dissertationen mit Fragen, die das Experiment aufwarf und die außergewöhnlichen Technologien, die entwickelt wurden, fanden in vielen anderen Bereichen als sogenannte „Spin-offs“ Anwendung.

An die Hauptakteure des Experiments – vier tennisballgroße Kreisel aus Quarzglas (siehe Abb. 3), überzogen mit einer Schicht aus Niob, einem supraleitenden Metall – wurden höchste Anforderungen gestellt. Um kleinste Änderungen der Drehachse aufgrund mechanischer Effekte zu vermeiden, musste die Dichteverteilung im Inneren der Kugeln so homogen wie möglich sein. Für GP-B fertigte man Objekte,

die in ihrer perfekten sphärischen Symmetrie nur mehr von Neutronensternen übertroffen werden und mittlerweile sogar im Guinness Buch der Rekorde als die rundesten, je von Menschenhand gefertigten Objekte gelistet sind.



Abb. 3: Gyroskope in Quarzgehäuse

Aufgrund eines elektrostatischen Feldes ist jede der vier Kugeln in einem Quarzgehäuse frei gelagert. Nachdem sie durch einen Heliumstrahl in Drehung versetzt wurde, rotiert sie ohne weiteren Antrieb mit mehr als 4000 Umdrehungen pro Minute (siehe Abb. 3). Störfaktoren, wie externe elektrische und magnetische Felder, Sonneneinstrahlung und Reste der Erdatmosphäre, galt es ebenfalls bestmöglich auszuschalten – deshalb bildeten die „7-Near Zeros“ (siehe Tab. 1) die Voraussetzung des Experiments.

GP-B Seven Near Zeros

Temperature	1,8 Kelvin / -271,4° Celsius
Gravitational Acceleration	Less than $10^{-10}g$
Magnetic Field	Less than 10^{-6} gauss
Pressure	Less than 10^{-11} torr
Material Homogeneity	Less than 3 parts per million
Mechanical Sphericity	Less than 3 ten millionths of an inch
Electrical Sphericity	Less than 5 parts per ten million

Tab. 1: Minimierung der Fehlerquellen

Wie wird die Winkeländerung der Kreiselachsen nun tatsächlich gemessen, ohne die Drehachse der nahezu perfekten Kugeln in irgendeiner Form physikalisch zu markieren? Hier spielt eine weniger bekannte Eigenschaft von Supraleitern eine wesentliche Rolle. 1948 berechnete der Physiker Fritz London, dass ein rotierender Supraleiter ein magnetisches Moment besitzt, dessen Achse in der Drehachse des Objekts liegt. Dies wurde in den frühen 70er Jahren unter anderem in Stanford experimentell nachgewiesen. Durch die 1,27 nm dünne Niob-Schicht, mit der die Kreisel überzogen sind, wird solch ein schwaches magnetisches Moment erzeugt.

Ändert sich die Spinachse, so ändert sich auch das magnetische Feld des Supraleiters. Spezielle Magnetometer, so genannte SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices) messen diese geringe Abweichung und erlauben Rückschlüsse auf die Bewegung der Kreiselachsen.

Die Instrumente im Satelliten sind in einen Dewar eingebettet, der fast 2500 l flüssiges Helium enthält. Eineinhalb Jahre lang muss eine Temperatur von ca. -271°C gehalten werden, ein Bereich, in dem Helium suprafluide Eigenschaften zeigt.

Der Quarzblock, der die Kreisel umgibt, ist mit Bleiblech umschlossen. Durch die Kühlung wird dieser Mantel supraleitend und schirmt so die Gyroskope von äußeren magnetischen Feldern ab. Es konnte jedoch nicht verhindert werden, dass sich das Suprafluid innerhalb des Dewars im Laufe der Zeit etwas erwärmt und ein geringer Anteil in die gasförmige Phase übergeht. Die ausgeklügelte Technik, die entwickelt wurde, um dieses Gas aus dem Dewar zu leiten, ohne die Verhältnisse im Inneren weiter störend zu beeinflussen, fand bereits in anderen astronomischen Projekten wie IRAS (Satellit der Infrarotastronomie) und COBE (Messung der Anisotropien in der kosmischen Hintergrundstrahlung) wichtige Anwendung.

Knapp vor dem Ziel

Während das Gravity Probe B Projekt noch in vollem Gange war, machte ein italienisches Team den PhysikerInnen aus Stanford überraschende Konkurrenz. Ursprünglich hatte die Italian Space Agency (ASI) in Kooperation mit der NASA zwei Satelliten, LAGEOS 1 und 2, ins All geschickt, um das Schwerfeld der Erde präzise zu bestimmen. Aus den durch Lasermessungen erhaltenen Bahndaten der Satelliten (s. [3]) errechneten I. Ciufolini und E.C. Pavlis 2004 den Beitrag des Thirring-Lense Effekts zu den Bahnabweichungen mit einer Genauigkeit von 6% [5]. Das Ergebnis bezieht sich auf die Veränderung der Bahnebene der Satelliten – in seiner Konzeption unterscheidet sich dieses Projekt also wesentlich von dem Vorhaben der Stanfordphysiker. Für ihr Ergebnis benötigten die italienischen Forscher insgesamt nur elf Jahre und die Kosten waren im Vergleich zu dem amerikanischen Projekt bedeutend geringer.

Das GP-B Team hat sich als Ziel vor allem eine sehr hohe Genauigkeit ihres Experiments gesetzt. Nachdem der Satellit 18 Monate lang Daten geliefert hatte, wurden im April 2007 schließlich die ersten Ergebnisse präsentiert. Die jahrzehntelange Forschung nach optimalen Experimentierbedingungen hatte Früchte getragen - obwohl die Datenanalyse noch nicht vollständig abgeschlossen ist, verkündete F. Everitt die Messung der geodätischen Präzession bereits mit einer Genauigkeit von 1%. Etwas vorsichtiger waren die Äußerungen zu den Ergebnissen der Messung des 170 mal kleineren Thirring-Lense Effekts: in den Daten fand man zwei unvorhergesehene Fehlerquellen, die bis Dezember modelliert und herausgerechnet werden sollen, um den Nachweis des Effekts endgültig bestätigen zu können.

“Understanding the details of this science data is a bit like an archaeological dig. A scientist starts with a bulldozer, follows with a shovel, and then finally uses dental picks and toothbrushes to clear the dust away from the treasure. We are passing out the toothbrushes now.”

(W. Bencze, program manager)

Literatur

- [1] H. Thirring: Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie Phys. Zeitschr. 19, 33 (1918)
- [2] J. Lense und H. Thirring: Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Relativitätstheorie Phys. Zeitschr. 19, 156 (1918)
- [3] H. Rumpf und H. Urbantke: Der Thirring-Lense Effekt – Nach 80 Jahren jetzt im Experiment? Plus Lucis 2/99 (online abrufbar unter: <http://pluslucis.univie.ac.at/Plus-Lucis/992/s1417.pdf>)
- [4] L. I. Schiff: Motion of a Gyroscope according to Einstein's theory of Gravitation Proc. Nat. Acad. Sci. 46, pp. 871-882 (1960); also Phys. rev. Lett. 4, pp. 215-219(1960)
Online abrufbar unter: http://einstein.stanford.edu/content/sci_papers/papers/Schiff_LL_1960_110.pdf
- [5] I. Ciufolini and E.C. Pavlis: A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring Effekt, Nature, 431, 958 (21 October 2004)

Weiterführendes

GP-B at Stanford University: <http://einstein.stanford.edu/>

Allerhand zum Thirring-Lense Effekt:
<http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Rel/Thirring-Lense/>

Zu Satellitengeodäsie: Forschungseinrichtung Graz-Lustbühel des Instituts für Weltraumforschung (IWF) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften:
http://www.iwf.oew.ac.at/german/research/earth/lasertechnology/slmeasurements_d.html