

Der Thirring-Lense-Effekt - nach 80 Jahren jetzt im Experiment?

Helmut Rumpf und Helmuth Urbantke

Mach - Einstein - Thirring

So uneindeutig die genaue Aussage des sogenannten "Machschen Prinzips" auch scheinen mag, so anregend war das Prinzip doch für die Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) durch A. Einstein und für viele weitere Untersuchungen dazu. Das wohl bedeutendste "Ergebnis" des Machschen Prinzips ist, daß Einstein nach einem ausgedehnten Briefwechsel mit dem holländischen Astronomen W. de Sitter über das Machsche Prinzip zur relativistischen Kosmologie geführt wurde, die heute unser Bild des Universums prägt. Ein anderes "Ergebnis" der Auseinandersetzung mit dem Machschen Prinzip ist die theoretische Entdeckung des Thirring-Lense-Effektes (1918) im Rahmen der ART, der nun - nach 80 Jahren! - wie es scheint tatsächlich beobachtet werden kann.

Wegen der Uneindeutigkeit des Inhalts des Machschen Prinzips, dessen Diskussion ein ganzes Buch füllen könnte, wollen wir hier keine Ideen aus dem unmittelbaren Dunstkreis des Machschen Prinzips heranziehen, um zum Thirring-Lense-Effekt zu gelangen, sondern nur weiter unten einen Teilaspekt kurz streifen. Vielmehr können wir direkt vom bekannten Äquivalenzprinzip ausgehen, nach welchem Schwerfelder in nicht zu großen Raumgebieten und Zeitintervallen durch Übergang zu geeignet beschleunigten Bezugssystemen wegtransformierbar oder auch im schwerefreien Raum simulierbar sind. Illustriert wird dies gerne anhand der Einsteinschen Gedankenexperimente mit frei fallenden Aufzügen, oder heutzutage durch wirkliche Experimente in ballistisch fliegenden Satelliten. Das Schwerfeld, das bei solchen translativen Beschleunigungen der Bezugssysteme wegtransformiert wird, ist das Newtonsche, beschreibbar durch das (konservative) Schwerkraftfeld. Nun fragen wir: welche Schwerkraftwirkungen werden durch rotative Beschleunigung eines Bezugssystems (Eigendrehung) lokal simuliert bzw. wegtransformiert? Die auftretenden Scheinkräfte sind

1. die nur ortsabhängige Zentrifugalkraft (Kraftfeld) und
 2. die (auch geschwindigkeitsabhängige) Corioliskraft.
- Die Frage lautet also genauer: welche Schwerfelder verursachen geschwindigkeitsabhängige Kräfte von der Art der Corioliskraft, oder - formal-mathematisch - der Lorentzkraft? Man spricht hier auch von *gravimagnetischen* Kräften zum Unterschied von *gravielektrischen* (= Newtons Schwerkraftfelder).

Derartige Schwerwirkungen treten in der Newtonschen Theorie überhaupt nicht auf und sind ein Spezifikum der ART mit ihrer "tensoriellen" statt skalaren Beschreibung des Schwerfeldes. Wo sind solche Felder nun anzutreffen? Die Antwort ist: sie werden von *rotierenden* Massenverteilungen verursacht, also vom Vorhandensein einer *Massenströmung*. Ist dabei insbesondere diese Strömung stationär, sodaß die Massendichteverteilung zeitlich konstant bleibt, so wäre nach

Das Machsche Prinzip

Ernst Mach (1838-1916) formulierte 1883 die Hypothese, daß die Trägheitskräfte durch die Gesamtheit der im Universum vorhandenen Materie verursacht werden. Dementsprechend sollte in einem Gedankenversuch die Trägheit eines Körpers verschwinden, wenn sämtliche übrige Materie entfernt wird. Entsprechend dem Newtonschen Eimerversuch kennzeichnet die parabolische Wölbung der Oberfläche eines mit Wasser gefüllten, rotierenden Eimers ein gegen den absoluten Raum rotierendes Bezugssystem. Da es aber nach Mach keinen absoluten Raum gibt, entsteht die Zentrifugalkraft als Ursache der Wölbung aufgrund der Rotation relativ zu den Fixsternen. Die umgekehrte Situation, nämlich die Rotation der Fixsterne um den ruhenden Eimer, ist nach Mach weder gedanklich noch experimentell vom Newtonschen Eimerversuch unterscheidbar, deshalb muß die Wasseroberfläche auch hier gewölbt sein. Das Machsche Prinzip war einer der Ausgangspunkte der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Newton dasselbe Schwerfeld zu erwarten wie bei einer Situation ohne Massenströmung, aber gleicher Dichteverteilung. Nach der ART hingegen sollte es die genannten Zusatzkräfte geben.

Rechnerisch hat das H. Thirring in seiner Originalarbeit 1918 nachgewiesen, wobei er der Fragestellung eine "Machsche" Einkleidung gibt, wie eingangs erwähnt: Beweist das Auftreten von Scheinkräften in rotierenden Bezugssystemen die Existenz eines absoluten Raumes, relativ zu welchem die Rotation stattfindet (Newtons Standpunkt - vgl. seinen Eimer-Versuch), oder ist die Rotation relativ zu fernen Massen zu verstehen, wie Mach vorschlägt?

Im zweiten Fall müßten dieselben Kräfte auch auftreten, wenn man das Bezugssystem als ruhend, die fernen Massen dagegen als rotierend annimmt (Relativität der Trägheit(skräfte)). Diese letztere Situation setzt nun Thirring im Rahmen der ART an und bestätigt das Auftreten der genannten Kräfte als Auswirkungen der Gravitation der fernen Massen, die er durch eine große, dünne rotierende Kugelschale repräsentiert und deren Schwerfeld er nach der ART berechnet.

Nach der Newtonschen Theorie wäre das Schwerfeld in dieser "Innenraumsituation" Null. Das Auftreten gravimagnetischer Kräfte in der beschriebenen Situation im Einklang mit Machs Ideen wurde von Einstein bereits 1913 in einer Vorläufer-Version der ART festgestellt¹⁾ - vgl. seinen Vortrag "Zum gegenwärtigen Stand des Gravitationsproblems" anlässlich der 85. Naturforscherversammlung zu Wien, abgedruckt in Phys. Z. 14 (1913) 1249; insbes. p.1261: "Auch dieses Resultat ist

¹⁾Wir danken Herrn Prof. W. Pfister (Universität Tübingen) für diesen Hinweis.

im Sinne der Auffassung von der Relativität der Trägheit [Machsches Prinzip] vorauszusehen und längst vorausgesehen worden. Es ist bemerkenswert, dass die Theorie [d.i. die Vorläuferversion!] auch in diesem Punkte jener Auffassung entspricht; leider ist der zu erwartende Effekt so gering, dass wir nicht hoffen dürfen, ihn durch terrestrische Versuche oder in der Astronomie zu konstatieren".

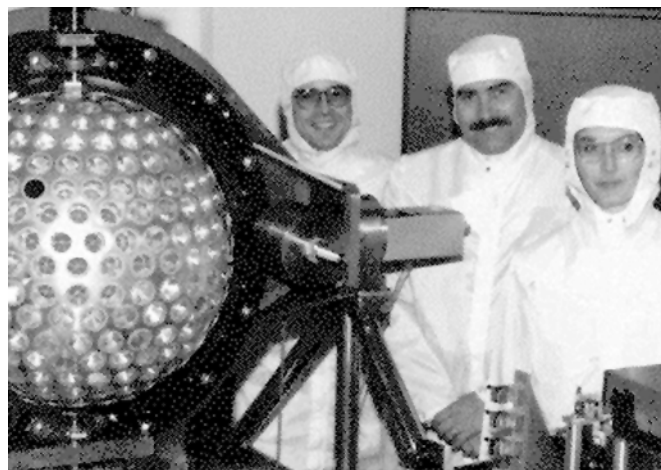
In Zusammenarbeit mit dem Astronomen (und späteren Mathematiker) J. Lense wandte sich Thirring in einer Folgearbeit der Frage nach *beobachtbaren* Konsequenzen der genannten Kräfte zu, wobei nun weniger an Mach als an realisierbare Situationen gedacht wurde. Dementsprechend wurde die große rotierende Kugelschale durch einen rotierenden Himmelskörper ersetzt und der Einfluß von dessen Schwerefeld auf die Bahn von (kleineren) Körpern studiert, die den Himmelskörper umlaufen ("Außenraumsituation"). Die Bahnstörungen, die gegenüber der Umlaufung eines nichtrotierenden Zentralkörpers auftreten, wurden unter dem Namen Lense-Thirring-Effekt oder, historisch richtiger²⁾, Thirring-Lense(TL)-Effekt zusammengefaßt. Die relativistische Bahnstörung im nichtrotierenden Fall besteht bekanntlich in einer Drehung der Perapsis (Perihel, -gäum, -jovium, -astron etc.), während die Bahnebene noch erhalten bleibt. Im rotierenden Fall werden weitere Bahnelemente gestört: Exzentrizität, Neigung der Bahnebenen, Länge des aufsteigenden Knotens. Selbst die säkulären Störungen unter ihnen erweisen sich als numerisch klein, am größten für gewisse Jupiter- und Saturnmonde, und bei den damaligen Meßgenauigkeiten als unmeßbar. (Hoffnung geben hier einige durch die Voyager-Mission neu entdeckte Monde dieser Planeten).

Am Ende seiner ersten Arbeit bestimmte Thirring die Winkelgeschwindigkeit jenes lokalen Koordinatensystems, in dem der Effekt des gravitomagnetischen Feldes gemäß dem Äquivalenzprinzip wegtransformiert ist. Angesichts der erwähnten Ungenauigkeiten bei der Beobachtung der vorhergesagten Bahnstörungen schlug 1959 L. Schiff vor, ein Präzisionsexperiment, in dem die Thirring'sche Winkelgeschwindigkeit in der Außenraumsituation direkt mittels eines Gyroskops gemessen wird. (Im folgenden wird dieser Effekt als Thirring-Schiff-Effekt bezeichnet.) Trotz der unvorstellbaren Präzision, die dazu erforderlich ist, wurde dieses Projekt noch in den sechziger Jahren von W.M. Fairbank und C.W.F. Everitt in Angriff genommen. Dabei soll ein Satellit in eine Erdumlaufbahn gebracht werden, in dem mehrere frei rotierende Kreisel magnetisch "aufgehängt" sind. Deren Präzession soll gegenüber einem statischen Bezugssystem gemessen werden, bezüglich welchem die Erde stationär rotiert³⁾.

Während sich der Realisierung dieses einfachen Grundgedankens große technische und finanzielle Schwierigkeiten in den Weg stellten, die den Start des jetzt "Gravity Probe B" genannten Satelliten zumindest bis zum Jahr 2000 hinauszögern, gibt es nun Anzeichen dafür, daß durch die Fortschritte sowohl der astrophysikalischen Beobachtungsmethoden als auch der Sa-

tellitentechnik und -geodäsie der TL-Effekt im Sinn von Bahnstörungen der oben geschilderten Art tatsächlich gesehen wird.

Laservermessung von umlaufenden Satelliten



LAGEOS-Satellit

Die Satelliten LAGEOS (Laser Geodynamics Satellite, NASA, Start 1976) und LAGEOS II (NASA und Agenzia Spaziale Italiana, Start 1992) umkreisen die Erde in etwa 6000 km Höhe mit einer Bahnneigung von $109,9^\circ$ bzw. $52,65^\circ$ zum Äquator und einer Bahnexzentrizität von 0,004 bzw. 0,014. Sie sind nahezu baugleich (Kugeln von nur ca. 60 cm Durchmesser bei einer Masse von 406 kg), völlig passiv und mit aus Würfecken zusammengesetzten Reflektoren umhüllt, um Laserpulse, die von der Erde durch Teleskope gezielt zu den Satelliten gesandt werden, zum Ausgangsort zu reflektieren. (Ähnliche Reflektoren wurden während der Apollo-Missionen auch auf dem Mond deponiert.) Durch Messung der Laufzeit eines Laserpulses ist es möglich, die Satellitenentfernung bis auf wenige Millimeter genau zu bestimmen. Der ursprüngliche Zweck der Satelliten war die genaue Vermessung ihrer Bahn, um (geophysikalisch-lagerstättenkundlich bedeutsame) Unregelmäßigkeiten des Gravitationsfeldes der Erde zu bestimmen. Durch die kompakte Bauweise der Satelliten wird die Bahnstörung durch den Strahlungsdruck der Sonne und den Restluftwiderstand gering gehalten, sie muß aber dennoch berücksichtigt werden. Für die Messung des TL-Effektes wäre es ideal, wenn eine Satellitenbahn das Spiegelbild der anderen wäre, weil bei umgekehrter Bahnneigung die Newtonschen Effekte des nicht kugelsymmetrischen Erdkörpers (s.u.) dem Spiegelbild entsprechen würden, nicht jedoch der gravitomagnetische Effekt der Erdrotation. Ein solcher Effekt könnte dann unmittelbar aus dem asymmetrischen Verhalten der beiden Bahnebenen abgelesen werden. Natürlich stellt auch die geringe Exzentrizität der Bahn des ersten Satelliten eine Erschwernis für den Nachweis der Verschiebung des Perigäums dar.

Auch das derzeit beste Modell des Gravitationsfeldes der Erde ("EGM-96"; an seiner Erstellung waren die LAGEOS-Satelliten selbst wesentlich beteiligt) enthält Unsicherheiten, die den TL-Effekt verdecken können. Die maßgeblichen Parameter sind das aus der Abplattung der Erde resultierende Quadrupolmoment J_2 der Massenverteilung und das nächsthöhere gerade Multipolmoment J_4 . Allein die Unsicherheiten in diesen beiden Momenten und ihrer zeitlichen Veränderung⁴⁾ führen gemäß der Newtonschen Theorie auf säkuläre Effekte von der-

²⁾Wir danken Herrn Prof. F.W. Hehl (Universität zu Köln) für die Überlassung der Kopie eines Briefes von J. Lense an ihn, aus der dies klar hervorgeht. Es sei bemerkt, daß J. Lense in dieser Zusammenarbeit vor allem seine "handwerkliche" Kenntnis der himmelsmechanischen Störungsrechnung einbrachte, andererseits aber schon vorher mit der ART vertraut war.

³⁾Detaillierte technische Informationen über diesen Satelliten sind unter der Internet-Adresse <http://einstein.stanford.edu> abrufbar.



Ein Netzwerk von Laser Ranging Stationen vermißt die Bahnen der LAGEOS-Satelliten auf besser als 1 cm.

selben Größenordnung wie die auf Grund des Gravimagnetismus zu erwartenden (das gilt nicht für die höheren Momente), sodaß ein Nachweis des letzteren über diese Effekte ziemlich hoffnungslos erscheint. I. Ciufolini und seine Mitarbeiter an der Universität "La Sapienza" in Rom haben 1997 jedoch erkannt, daß die beiden Satelliten drei Meßgrößen (die Präzessionsgeschwindigkeit ihrer Bahnebenen und die Präzessionsgeschwindigkeit des Perigäums von LAGEOS II) bereitstellen, die sich durch die 3 Unbekannten J_2 , J_4 und μ ausdrücken lassen, wobei der dimensionslose Parameter μ die Stärke des TL-Effekts mißt ($\mu = 0$ für die Newtonsche Gravitation und $\mu = 1$ in der ART). Es ist also im Prinzip nur ein System von 3 Gleichungen für 3 Unbekannte zu lösen. Allerdings muß zuvor eine Reihe von störenden Effekten eliminiert werden, die nichts mit EGM-96 zu tun haben. Zwei davon wurden bereits erwähnt, weitere sind kleine Variationen der Reflektivität der Satelliten auf Grund thermischer Effekte und der nicht konstanten Ausrichtung ihrer Rotationsachse, die Variation der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und die Wanderung ihrer Pole, die Bewegung der Bodenstationen durch die Kontinentalverschiebung und die gravitativen Störungen durch Mond, Sonne und Planeten. Nach Berücksichtigung dieser Faktoren sind in der Tat die größten Fehlerquellen für die Bestimmung von μ ausgeschaltet, und es verbleiben - zumindest theoretisch - nur noch die vergleichsweise kleinen Unbestimmtheiten der höheren Multipolmomente J_{2n} mit $n \geq 3$.

Die Präzession der Bahnebene kann für beide Satelliten mit einer Genauigkeit von etwa 1 Millibogensekunde/Jahr (mas/a) gemessen werden, während der TL-Effekt ca. 31~mas/a ausmachen sollte. Während des vierjährigen Beobachtungszeitraumes konnte auch das Perigäum von LAGEOS II mit einer Genauigkeit von ca. 25 mas verfolgt werden, was im Vergleich zu der gemäß dem TL-Effekt zu erwartenden Verschiebung von -57 mas/a ebenfalls günstig ausfällt. Man beachte, daß in der Höhe der Satelliten 1 mas einer Strecke von etwa 6 cm entspricht! Das Endresultat der Analyse von vier Jahren Beobachtung ist $\mu_{\text{exp}} = 1,1 \pm 0,2$, wobei die Fehlerangabe auf einer Abschätzung der verbleibenden Unsicherheiten, insbesondere bezüglich nichtgravitativer Störungen und der Bahnneigung der Satelliten, beruht. Damit scheint dem Team aus Rom der erste direkte Nachweis des TL-Effekts und seiner Übereinstimmung

⁴⁾Neben dem Effekt der Gezeiten und Jahreszeiten gibt es hier auch eine säkuläre Komponente.

mit der Vorhersage der ART bis auf 10 %, mit einem Gesamtfehler von ± 20 %, gelungen zu sein.

Es soll aber nicht verschwiegen werden, daß es seitens Fachkollegen auch kritische Meinungen zur Fehlerabschätzung gibt.

Präzedierende Akkretionsscheiben

Der TL-Effekt fällt für Erdsatelliten deswegen so schwach aus, weil die gravimagnetische Kraft proportional zur gravimagnetischen Feldstärke und zur Geschwindigkeit des Satelliten ist, und beide sind vergleichsweise klein. Es gibt jedoch eine Klasse von astrophysikalischen Objekten, für die diese Einschränkungen nicht gelten, nämlich Materie in der Umgebung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, die durch den Gravitationskollaps massereicher Sterne entstehen. Ist so ein kollabiertes Objekt Bestandteil eines Doppelsternsystems, so entzieht es seinem Partner Materie, die allerdings auf Grund der Drehimpulserhaltung nicht radial überströmen kann, sondern sich in Form einer Scheibe um das kollabierte Objekt anordnet. Diese sogenannte Akkretionsscheibe heizt sich auf Grund von Reibungsvorgängen so sehr auf, daß thermische Röntgenstrahlung emittiert wird. Die Scheibenbestandteile spiralen wegen der Reibung immer weiter nach innen und stürzen letztlich in das Zentralobjekt. Innerhalb der Scheibe durchlaufen sie aber eine quasistationäre Bahn, die durch den Gravimagnetismus wesentlich beeinflusst werden kann. Denn einerseits ist wegen der Nähe zum Zentralobjekt und der Stärke seines (zum Drehimpuls proportionalen) gravimagnetischen Dipolmoments das gravimagnetische Feld schon beträchtlich, und andererseits ist die Bahngeschwindigkeit nicht mehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit. Ist nun der innere Abschnitt der Akkretionsscheibe relativ zur Äquatorebene des Zentralobjekts geneigt, dann wird die Scheibe wegen des TL-Effekts um das Zentrum präzedieren und dieses, falls es sich um einen Neutronenstern handelt, möglicherweise periodisch verfinstern. Dies sollte sich in einer Periodizität des auf der Erde eintreffenden Röntgenstrahlungsflusses äußern. Gemäß der ART gibt es innerhalb von 3 Schwarzschildradien vom Zentrum keine stabile Kreisbahn mehr. Dieser Wert markiert daher im einfachsten Fall den Innenrand der Akkretionsscheibe; u. U. liegt er aber auch weiter außerhalb. (Der Schwarzschildradius ist proportional zur Masse des Zentralobjekts und beträgt ca. 3 km für 1 Sonnenmasse). Im Fall eines Neutronensterns von etwa 1,5 Sonnenmassen ist die Bahnfrequenz eines Teilchens am Innenrand ca. 1 kHz, und die TL-Präzessionsfrequenz sollte einige 10 Hz betragen.

Seit Ende 1995 steht mit dem NASA-Satelliten RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) erstmals ein Instrument zur Verfügung, das zeitliche Variationen des Röntgenspektrums mit der für den Nachweis der TL-Präzession erforderlichen Genauigkeit auflösen kann (sogar bis zu einer Zeitskala von 0,1 ms). Tatsächlich hat "Rossi" quasiperiodische Oszillationen mit typischen Frequenzen im kHz-Bereich entdeckt, die Phänomene in der Umgebung von kollabierten Objekten zugeschrieben werden. 14 dieser Objekte sind Neutronensterne in Doppelsternsystemen. Ihre Partner sind allerdings so schwer zu beobachten, daß eine Massenbestimmung bisher nicht möglich war. Typisch für das Fourierspektrum des Röntgenflusses von diesen Quellen ist das Auftreten von Doppelpeaks. Ihre Fre-

quenz von ca. 1 kHz driftet mit der Zeit, aber der Frequenzabstand zwischen den beiden Peaks bleibt konstant. Im "magnetosphärischen Schwebungsfrequenzmodell" wird die höhere der beiden Frequenzen der Keplerbewegung von Inhomogenitäten am inneren Rand der Akkretionsscheibe zugeordnet und der Frequenzabstand mit der Rotationsfrequenz des Neutronensterns (entsprechend einer Rotationsperiode von ca. 3 ms) identifiziert. In einigen Fällen wird letztere Interpretation dadurch bestätigt, daß Röntgen-Ausbrüche dieselbe Rotationsperiode verraten. Neuere Beobachtungen widersprechen allerdings diesem Modell und deuten eher darauf hin, daß das Doppelpeak-Phänomen durch die relativistische Präzession des Periastrons entsteht. (Dieser Effekt hat nichts mit der Rotation des Zentralsterns zu tun und entspricht der berühmten (und viel kleineren!) Perihelpräzession des Merkur.) Der Frequenzabstand wäre dann gleich der Präzessionsfrequenz, während sich an der Bedeutung des höherfrequenten Peaks nichts ändert.

L. Stella (Astronomisches Observatorium Rom) und M. Vietri (Universität Rom 3) haben 1997 als erste darauf hingewiesen, daß in den Fourierspektren auch jeweils ein Peak in dem von der TL-Präzession zu erwartendem Frequenzbereich auftritt. Da nach dem 3. Keplerschen Gesetz die Keplerfrequenz wie $r^{-3/2}$, die TL-Präzessionsfrequenz aber wie r^{-3} (entsprechend dem Abfall eines gravimagnetischen Dipolfelds) variiert, sollte die Frequenz des "Präzessions-Peaks" wie das Quadrat jenes des "Kepler-Peaks" variieren. Dieser Trend findet sich auch grob in den Daten wieder. Ist man darob gewillt, die Präzession der Akkretionsscheibe als erwiesen anzusehen, so stellt sich immer noch - ähnlich wie schon im Fall des Satellitenexperiments - die Frage, inwieweit die Präzession nur ein Newtonscher Effekt der Asphärizität des Neutronensterns ist. Es stellt sich heraus, daß je nach Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie das Quadrupolmoment einen geringen bis beträchtlichen Beitrag zur Gesamtpräzession liefern kann und innerhalb einer halb-Newtonschen Näherung Übereinstimmung mit den Daten erreicht werden kann. Dies scheint jedoch durch eine genauere Rechnung im Rahmen der ART wieder in Frage gestellt, wonach das Quadrupolmoment und höhere Multipolmomente die Gesamtpräzession sogar signifikant auf etwa die Hälfte der beobachteten Frequenzreduzieren. Vielleicht läßt sich diese Diskrepanz um einen Faktor 2 aber auch mit der Scheibengeometrie erklären. Ein weiterer Zweifel, ob tatsächlich die TL-Präzession für die beobachtete Frequenz verantwortlich ist, ergibt sich daraus, daß eine typische Akkretionsscheibe gerade wegen der gravimagnetischen Kraft und ihrer eigenen Viskosität dazu tendiert, sich in der Äquatorebene des Sterns zu etablieren. Es bedarf also einer gesonderten Kraft, um den Innenrand der Scheibe wieder aus dieser Ebene herauszukippen. Als Ursache dieser Kraft bietet sich natürlich das i.a. nicht symmetrisch zur Rotationsachse liegende Magnetfeld des Neutronensterns an, das auch dem Pulsarphänomen zugrundeliegt. Der TL-Effekt wurde aber aus der Annahme hergeleitet, daß die Teilchen nur gravitativ beeinflusst sind. Unter allgemeineren Bedingungen ist zumindest eine Modifikation der Präzessionsfrequenz zu erwarten. Aus diesem Grunde ist die Frage, ob der beobachtete "Präzessions-Peak" in der Tat den TL-Effekt widerspiegelt, wohl noch als offen anzusehen.

Dieselbe Vorsicht ist auch bei der Deutung der quasiperiodischen Oszillation im 10-Hz-Band angebracht, die man im

Falle von Schwarzen Löchern (SL) mit Doppelsternpartnern beobachtet. (Die SL-Natur des unsichtbaren Partners folgt daraus, daß seine Masse sich dynamisch zu mehr als 3 Sonnenmassen bestimmt, was über der Stabilitätsgrenze für Neutronensterne liegt). Hier kommt noch erschwerend hinzu, daß im Gegensatz zu Neutronensternen eine direkte Bestimmung der Rotationsperiode des SL nicht möglich ist. Andererseits erzeugt das SL kein eigenes Magnetfeld, und das von der Akkretionsscheibe selbst erzeugte stört nicht so sehr. Deutet man eine quasiperiodische Oszillation als Folge der TL-Präzession, kann man aus ihrer Frequenz und der dynamisch bestimmten Masse den Drehimpuls des SL herleiten. Dies haben W. Cui (MIT) und S.N. Zhang (NASA Marshall Space Flight Center) 1997 für eine Reihe von stellaren SL durchgeführt und Übereinstimmung mit den Resultaten einer ebenfalls von ihnen stammenden anderen indirekten Methode zur Drehimpulsbestimmung gefunden. Interessant ist, daß demnach die 1994 in unserer Galaxis entdeckten beiden "Mikroquasare" (so genannt wegen der von ihnen mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit ausgestoßenen "Jets") nahezu mit der theoretisch möglichen Höchstgeschwindigkeit rotieren.

Zusammenfassend scheint es für alle Experimente verfrüht, von einer endgültigen Bestätigung des TL-Effekts zu sprechen. Es ist aber zu hoffen, daß mit dem Sammeln weiterer Beobachtungsdaten in den nächsten Jahren eine Klärung eintreten wird. Unabhängig davon verspricht das eingangs erwähnte, im Bau befindliche Satellitenexperiment "Gravity Probe B" eine Messung des Thirring-Schiff-Effekts mit einer Genauigkeit im Prozentbereich.

Peter Häußler
Wolfgang Bündler
Reinders Duit
Wolfgang Gräber
Jürgen Mayer

NATURWISSENSCHAFTSDIDAKTISCHE
FORSCHUNG

Perspektiven für die Unterrichtspraxis

Kiel: IPN, 1998, 256 S., ISBN 3-89088-124-6

Naturwissenschaften im Unterricht Physik

Anders unterrichten

Heft 46, August 1998, Erhard Friedrich Verlag

**Buch bzw. Zeitschrift sind zum Sonderpreis von
ÖS 160,- bzw. ÖS 80,- beim Verein erhältlich.
Bestellung per Fax (01 / 4277 9515) erbeten.**