

Wettrennen im All

Das von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte gravitomagnetische Feld gilt als nachgewiesen.

Das gravitomagnetische Feld der Erde ist ein Anteil des Gravitationsfeldes, der sich nur im Rahmen der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie verstehen lässt.

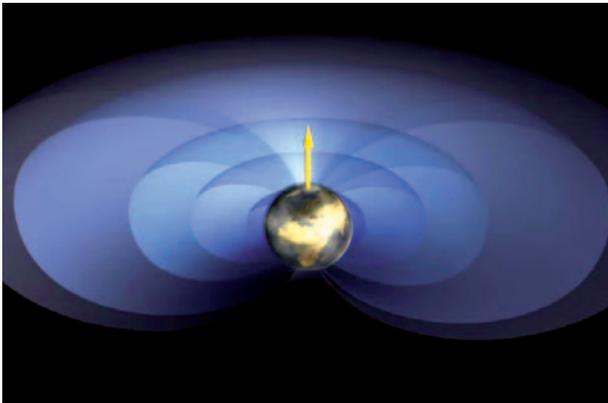


Abb. 1: Das gravitomagnetische Feld der rotierenden Erde ist eine Konsequenz der Einsteinschen Feldgleichungen.

Genauso wie eine rotierende homogen geladene Kugel neben dem Coulomb-Feld ein Magnetfeld erzeugt, so erzeugt eine rotierende Erde neben dem Newtonschen $1/r$ -Potential ein Gravitationsfeld, welches die Form eines Magnetfeldes hat (Abb. 1). Und genau wie das Magnetfeld die Präzession eines durch einen Kreisstrom gegebenen magnetischen Dipol bewirkt, so lässt auch das gravitomagnetische Feld rotierende Materie, d. h. Kreisel, präzedieren. Dies entspricht der Spin-Spin-Kopplung in der Atomphysik. Da man eine Satellitenbahn auch als einen großen Kreisel ansehen kann, führt das gravitomagnetische Feld zu einer Präzession ihrer Bahnnormalen. Den Effekt des gravitomagnetischen Feldes auf Kreisel nennt man nach dem Autor der ersten wissenschaftlichen Publikation darüber Schiff-Effekt [1] (oder auch auch „frame-dragging“), der Effekt auf die Bahn wird nach J. Lense und H. Thirring benannt, die in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts als erste den Einfluss auf Satellitenbahnen berechneten [2]. Beide Effekte sind sehr klein. Die Präzession eines Kreisels in 600 km Höhe beträgt 0,042 Bogensekunden pro Jahr, und bei einer elliptischen Satellitenbahn mit einem Apogäum bei ca. 12200 km wandert der erdfernste Punkt um ca 0,033 Bogensekunden pro Jahr, was etwa 1,9 m entspricht.

Dr. Hansjörg Dittus,
Priv.-Doz. Dr. Claus
Lämmerzahl, ZARM,
Universität Bremen
Am Fallturm, 28359
Bremen,
dittus@zarm.uni-
bremen.de,
laemmerzahl@
zarm.uni-bremen.de

Zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde wurden in den Jahren 1976 und 1992 die Satelliten LAGEOS (LASER GEOdynamic Satellite) und LAGEOS II gestartet. Beide sind passive rundum mit Retroreflektoren ausgestattete Satelliten, die nur als frei fliegende Massendienen, deren Bahn man mit Lasern von zahlreichen um den Globus verteilten Beobachtungsstationen aus verfolgt (Abb. 2). Mit dieser Methode lässt sich die Position der Satelliten bis auf einige Millimeter genau bestimmen, woraus man in erster Linie Informationen über das Gravitationsfeld der Erde gewinnt. Neben der Lense-Thirring-Präzession erfährt die Satellitenbahn aufgrund der Abweichungen der Erde von der sphärischen Gestalt eine Säkularpräzession, die für erdnahe Satelliten rund 1 Grad pro Tag beträgt. Diese dominante Präzession muss von der vermessenen Gesamtpräzession der Satellitenumlaufbahn abgezogen werden, wenn man den vergleichsweise winzigen Lense-Thirring-Effekt bestimmen will.

Seit den Neunziger Jahren analysieren I. Ciufolini und seine Mitarbeiter Messungen der LAGEOS-Satelliten. Die 1997 erstmals publizierten Ergebnisse

wiesen den gravitomagnetischen Lense-Thirring-Effekte mit einer Genauigkeit von 20 bis 30 % nach [3]. Das große Problem bleibt jedoch, die Säkularpräzession vom Lense-Thirring-Effekt zu trennen. Durch eine geeignete Kombination der Bahndaten von LAGEOS und LAGEOS II lassen sich diese konkurrierenden Effekte jedoch zu einem großen Teil eliminieren. Darüber hinaus kann durch neuere und genauere Vermessungen des Erdgravitationsfeldes durch die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführte Satellitenmission CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) und die NASA/DLR-Mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) die Genauigkeit der auf diese Weise nicht eliminierbaren Teile weiter gesteigert werden, was die systematischen Fehler weiter reduziert. Außerdem wird auch mit längerer Beobachtungsdauer der Satelliten die Genauigkeit der Resultate zunehmen. Damit gelang es Ciufolini und Mitarbeiter jetzt, den Lense-Thirring-Effekt mit einer Genauigkeit von 10 % nachzuweisen [4]. Die ersten Messungen dieser Art waren zwar anfangs etwas umstritten, werden aber doch inzwi-

KURZGEFASST...

■ Konstante Konstante

Theorien zur Vereinheitlichung aller Kräfte sagen unter anderem voraus, dass sich die Feinstrukturkonstante α im Laufe der Zeit ändern sollte. Auf der Suche nach einer solchen Variation haben Physiker der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ein Experiment innerhalb von knapp drei Jahren zweimal durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Mithilfe einer hochgenauen Cäsium-Atomuhr haben sie dazu einen optischen Übergang in einem ^{171}Yb -Ion gemessen. Sollte sich α tatsächlich ändern, dann um weniger als 2×10^{-15} pro Jahr.
E. Peik et al., Phys. Rev. Lett. 93, 170801 (2002)

■ Photonen auf Bestellung

Eine Lichtquelle, die einzelne Photonen zu definierten Zeitpunkten emittiert, haben Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching entwickelt. Das aktive Medium der Quelle besteht aus nur einem einzelnen Kalzium-Ion, das in einer Falle zwischen zwei hochreflektierenden Spiegeln eingesperrt ist. Angestoßen von einem externen Laser, sendet das Ion kontinuierlich einzelne Photonen aus, deren Eigenschaften genau festgelegt sind. Anwenden lässt sich eine solche Quelle in der Quantenkryptographie und -informationsverarbeitung.
M. Keller et al., Nature 431, 1075 (2004)

■ Supernova-Spuren in der Tiefsee

Eine Supernova, die vor 2,8 Millionen Jahren in unserer Galaxie ausgebrochen ist, hat auf dem Boden des Pazifik Spuren hinterlassen. In einer Eisen-Mangan-Kruste aus rund 5000 Metern Tiefe haben Münchner Physiker eine Schicht von zwei Millimetern Dicke gefunden, in der die Konzentration von ^{60}Fe signifikant erhöht ist. Dieses Isotop mit der Halbwertszeit von 1,5 Milliarden Jahren entsteht fast ausschließlich in Supernovae. Mithilfe der Beschleuniger-Massenspektrometrie war es möglich, die winzige Menge von nur 69 ^{60}Fe -Isotopen nachzuweisen.
K. Knie et al., Phys. Rev. Lett. 93, 171103 (2004)

■ Naturreaktor enträtselt

Rund 10^{14} Kilowattstunden an Energie bei einer durchschnittlichen Leistung von 100 kW lieferte ein natürlicher Kernreaktor, der vor zwei Milliarden Jahren in der Oklo-Mine in Gabun aktiv war. Im Gegensatz zu heute enthielt natürliches Uran damals noch 3% an ^{235}U . Amerikanische Physiker haben durch eine Isotopenanalyse nun vermutlich den Betriebsmodus des Reaktors aufgeklärt. Demnach folgte auf eine 30-minütige aktive Phase, während der das für die Neutronenmoderation notwendige Wasser verdampfte, eine 2,5-stündige Pause, bis der Reaktor wieder aktiv wurde.
A. P. Meshik et al., Phys. Rev. Lett. 93, 182302 (2004)

schen von der Allgemeinheit der Relativisten anerkannt. Aufgrund der Verbesserungen dieses Nachweises und auch, weil man den Lense-Thirring-Effekt bei Doppelsternen indirekt nachgewiesen hat, gilt die Existenz des gravitomagnetischen Feldes und damit diese Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie als gesichert.

Darüber hinaus soll nun mit dem im April 2004 gestarteten Satelliten GP-B [5] in einem kontrollierten Experiment die ebenfalls sehr kleine vom gravitomagnetischen Feld induzierte Präzession von vier frei fliegenden Kreiseln (Schiff-Effekt) erstmals mit einer Präzision besser als 1% *direkt*, d. h. ohne notwendige Kompensation konkurrierender Effekte, gemessen werden. Damit wird in einem für die Gravitationsphysik einmaligen Szenario innerhalb kürzester Zeit

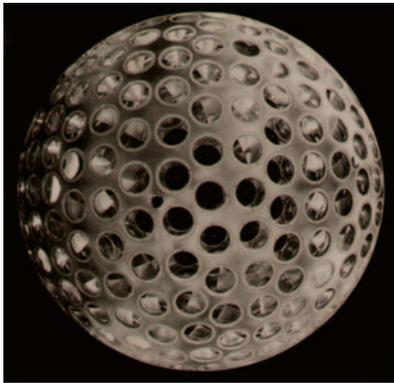


Abb. 2: Der LAGEOS-Satellit ist eine 410 kg schwere Kugel von 60 cm Durchmesser mit 426 Retroreflektoren (Katzenaugen) rundum (Quelle: NASA).

der Nachweis eines neuen Effektes mittels zweier vollkommen verschiedener Messmethoden geführt. GP-B wird aber zusätzlich noch die geodätische Präzession von Kreiseln (dies entspricht einer Spin-Bahn-Kopplung bzw. einer gravitativen Thomas-Präzession) mit einer bisher unerreichten Genauigkeit von 10^{-6} nachweisen.

Zusammengenommen werden beide Missionen, LAGEOS wie GP-B, die gesicherte Kenntnis über die Allgemeine Relativitätstheorie und damit unsere Anschauung über Raum und die Zeit und die Physik des Universums einen großen Schritt voranbringen.

HANSJÖRG DITTUS
CLAUS LÄMMERZAHL

- [1] L. I. Schiff, Phys. Rev. Lett. 4, 215 (1960)
- [2] H. Thirring und J. Lense, Phys. Z. 19, 156 (1918)

- [3] I. Ciufolini, D. Lucchesi, F. Vespe und F. Chieppa, Europhys. Lett. 39, 359 (1997)
- [4] I. Ciufolini und E. Pavlis, Nature 431, 958 (2004)
- [5] H. Dittus und C. Lämmerzahl, Physik Journal, Juni 2000, S. 10

Explosives Deuterium

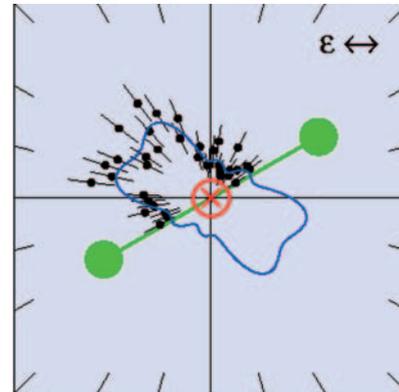
Die erste Beobachtung aller Fragmente eines explodierenden Deuterium-Moleküls liefert wichtige Erkenntnisse für die Vielteilchen-Physik.

Die korrelierte Bewegung von mehr als zwei wechselwirkenden Körpern lässt sich sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenmechanik nur näherungsweise beschreiben. Das einfachste quantenmechanische Beispiel eines Dreikörpersystems ist das Heliumatom, in dem die zwei Elektronen und der α -Kern durch ihre Coulomb-Wechselwirkung miteinander korreliert sind. Im Gegensatz zu Dreikörpersystemen im Großen, wie z. B. Sonne-Erde-Mond, sind hier die Kräfte zwischen den drei Paaren von der gleichen Größenordnung, da der α -Kern lediglich die doppelte Ladung der Elektronen trägt. Dennoch sind die Näherungsmethoden so weit ausgereift, dass sich z. B. die Grundzustandsenergie von Helium mit praktisch beliebiger Genauigkeit bestimmen lässt. Zum Test unseres Verständnisses solcher einfacher Systeme möchte man die korrelierte Bewegung jedoch auch direkt beobachten, was in atomaren Systemen nur durch den Aufbruch des Systems und die nachfolgende Messung der Fragmente möglich ist. An der Synchrotronstrahlungsquelle Advanced Light Source in Berkeley ist es nun unter der wesentlichen Beteiligung der Frankfurter Forschungsgruppe um Reinhard Dörner erstmals gelungen, alle Fragmente aus der Photodoppelionisation von D_2 in Koinzidenz zu detektieren [1].

Der Aufbruch eines atomaren Systems kann durch die Absorption eines einzelnen Photons ausreichender Energie initiiert werden, wobei durch die definierten Symmetrien des Photons (Drehimpuls 1, negative Parität) die Symmetrie des Anfangszustands auch im Endzustand noch klar zum Vorschein kommt. Die Teilchen sind jedoch auch im Endkanal durch die unendliche Reichweite des Coulomb-

Potentials in ihrer Bewegung nicht unabhängig. Die Theoretiker beherrschen aber die Beschreibung dieser Korrelation für drei Teilchen, sodass der Prozess im Fall von Helium praktisch verstanden ist [4].

Die naheliegende Frage ist, wie dies für den Fall des einfachsten neutralen Wasserstoffmoleküls aussieht. Im Experiment wird das D_2 -Molekül mit dem schweren Isotop



Mithilfe von raffinierten Detektoren ist es möglich, die Impulse von allen vier Fragmenten eines explodierenden Deuterium-Moleküls nachzuweisen. Die Abbildung zeigt die gemessene Winkelverteilung eines Elektrons, das andere wird senkrecht zur gezeigten Ebene emittiert (Energie jeweils 12,25 eV). Der grüne Balken deutet die Kernachse an, ϵ ist die Richtung des Polarisationsvektors. (aus [1]).

Deuterium verwendet, da es eine höhere Targetdichte bietet und den Hintergrund zufälliger Koinzidenzen durch Reste von Wasser verringert. Man kann sich das D_2 -Molekül vorstellen als Heliumatom mit gespaltenem Kern. Auch hier besteht kaum ein Zweifel, dass die Grundzustandseigenschaften wie Energie und Bindungslänge verstanden sind. Die aktuellen experimentellen Methoden ermöglichen jedoch einen viel direkteren Einblick. Während die Elektronen oder die Kerne aus diesem Prozess schon mehrfach bei Experimenten einzeln beobachtet wurden, war die Bestimmung aller Impulse und damit die vollständige Charakterisierung des Ionisationsereignisses bisher noch nicht gelungen. Im neuen Experiment wird ein Überschallgasstrahl von D_2 -Molekülen mit im Beschleuniger erzeugten linear polarisierten Photonen gekreuzt. Die Elektronen und Ionen aus der Fragmentation werden dann durch elektrische und magnetische Felder auf hochauflösende Vielkanalplattendetektoren projiziert. Durch die Messung von Auftreffposition und -zeit lässt sich

Dr. Michael Walter,
Department of Physics,
Nanoscience Center,
University of Jyväskylä,
Finland