

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

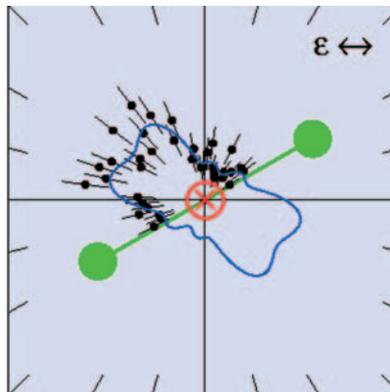
Die erste Beobachtung aller Fragmente eines explodierenden Deuterium-Moleküls liefert wichtige Erkenntnisse für die Vielteilchen-Physik.

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

dann der Impuls der Teilchen rekonstruieren. Werden von drei der vier Teilchen die Impulse gemessen, so ist aufgrund der Impulserhaltung das Ionisationsereignis in allen Variablen vollständig bestimmt.

Bei der Photoionisation von D_2 absorbieren die Elektronen in sehr guter Näherung das Photon vollständig und werden in das Kontinuum emittiert. Ohne die Präsenz der bindenden Elektronen „sehen“ die verbleibenden Deuteronen plötzlich (auf ihrer Zeitskala) ihre volle Coulomb-Abstoßung. Die potentielle Energie dieser Abstoßung wird dann in kinetische Energie umgewandelt; es kommt zu einer Coulomb-Explosion der Kerne. Dieses einfache Bild wird im Experiment bestätigt, da die Energieverteilung der Kerne eindrucksvoll deren Grundzustandswellenfunktion widerspiegelt. Durch die Messung des Relativimpulses der Deuteronen sind somit sowohl die Richtung als auch die Länge der Kernachse zum Zeitpunkt der Ionisation bekannt.

Zum Verständnis der gemessenen Impulsverteilungen ist es hilfreich, die Symmetrieeigenschaften des Ionisationsprozesses zu betrachten.

Die Symmetrien des gebundenen Anfangszustands und des Photons beschränken die Form des erreichbaren fragmentierten Endzustands, was sich in nicht erreichbaren Impulskonfigurationen äußert. Gerade bei Ereignissen gleicher Elektronenenergie bestimmen diese Symmetriebeschränkungen die Form des Wirkungsquerschnitts in weiten Bereichen [3].

Um die gemessenen Impulsverteilungen zu charakterisieren, hat es sich bewährt, zwei Impulse fest zu halten und die Aufbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des dritten unabhängigen Impulses zu studieren. Die Abbildung zeigt Ereignisse, bei denen der Relativimpuls der Kerne und der Impuls eines Elektrons in der Beobachtungsebene liegen. Zusätzlich wurde gefordert, dass das zweite Elektron senkrecht zu der gezeigten Ebene emittiert wird. In dieser Konfiguration hat die Coulomb-Abstoßung der Elektronen keinen Einfluss auf die in Abhängigkeit des Emissionswinkels gezeigte Aufbruchswahrscheinlichkeit (Winkelverteilung) des ersten Elektrons. Damit wird dessen Winkelverteilung durch zwei Effekte bestimmt:

► Die durch den Polarisationsvektor ε festgelegte Dipolverteilung. Ohne Präsenz der Kernachse, im Fall von Helium, wären symmetriebedingt keine Elektronen senkrecht zu ε zu erwarten.

► Die Präsenz der Kernachse, welche die Symmetrie bricht und die Winkelverteilung stark beeinflusst.

Bemerkenswert ist, dass im Experiment die bevorzugte Emission senkrecht zur Kernachse beobachtet wird. Dies ist im Widerspruch zu einem theoretischen Modell, das die Wechselwirkung aller Teilchen im Endkanal explizit berücksichtigt und eine bevorzugte Emission entlang der Molekülachse zeigt [2]. Diesen Widerspruch zu lösen bleibt eine spannende Aufgabe.

MICHAEL WALTER

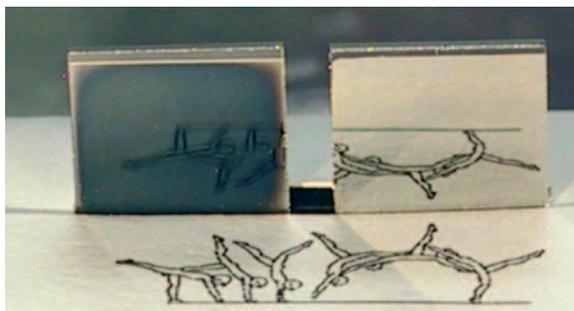
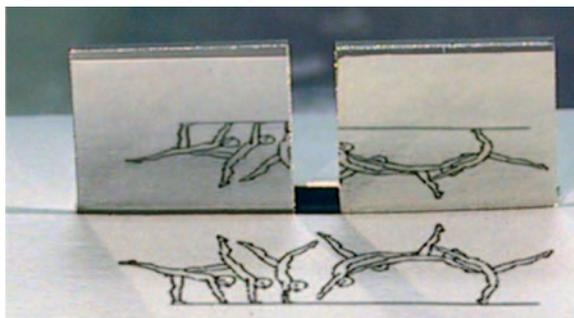
- [1] T. Weber et al., Nature **431**, 437 (2004)
- [2] M. Walter und J. Briggs, J. Phys. B **32**, 2487 (1999)
- [3] M. Walter und J. Briggs, Phys. Rev. Lett. **85**, 1630 (2000)
- [4] J. S. Briggs und V. Schmidt, J. Phys. B **33**, R1 (2000)

Spieglein, Spieglein ...

Die Überraschung war groß, als holländische Physiker vor fast zehn Jahren schaltbare Spiegel entdeckten, deren wesentlicher Bestandteil eine dünne Schicht eines Metallhydrids mit einem Selten-Erd-Element ist (YH_x oder LaH_x). Bei geringer Wasserstoffkonzentration x ist der Spiegel metallisch und macht seinem Namen alle Ehre. Mit wachsendem x tritt jedoch eine spektakuläre Änderung ein: Aus dem Spiegel wird ein durchsichtiger Halbleiter. Der Übergang geschieht schnell und ist reversibel – eine wichtige Eigenschaft für Anwendungen. In den folgenden Jahren wurden auch andere Verbindungen mit diesen Eigenschaften entdeckt, insbesondere Mg_2NiH_x , das bei mittlerer Wasserstoffkonzentration noch einen dritten Zustand aufweist: schwarz und absorbierend.

Dieser Zustand gab den Forschern bislang Rätsel auf, da er im Widerspruch zur gleichzeitig beobachte-

ten metallischen Leitfähigkeit und geringen Reflektivität steht. Wiebke Lohstroh und ihre Koautoren der Freien Universität Amsterdam



haben nun die Lösung dieses Rätsels präsentiert: Demnach verteilt sich der Wasserstoff nicht homogen

in der Schicht; stattdessen entsteht bei Wasserstoffzufuhr eine Doppelschicht unterschiedlichen Wasserstoffgehalts, die durch Interferenz den schwarzen Zustand verursacht. Das obere Foto zeigt zwei Proben mit einer 200 nm dünnen Mg_2Ni -Schicht, mit Blick auf das durchsichtige Saphir-Substrat (links) bzw. auf die 5 nm dünne katalytische Pd-Deckschicht (rechts). In einer Wasserstoffatmosphäre entsteht an der Substratseite eine transparente Mg_2NiH_4 -Schicht, an die eine metallische Mg_2Ni -Schicht anschließt – mit dem unten sichtbaren Ergebnis einer dunklen Seite einer spiegelnden Seite. Eine mögliche Anwendung dieses Systems könnte eine „intelligente“ Beschichtung von Sonnenkollektoren sein.

[W. Lohstroh et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 197404 (2004)] (SJ)