

Stärker, kleiner, kürzer

Highlights aus dem Vortragsprogramm der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen

Rainer Scharf

Die SAMOP hatte zu ihrer diesjährigen Frühjahrstagung an die Leibniz-Universität Hannover eingeladen. Fast 2200 Teilnehmerinnen und Teilnehmer präsentierten ihre Arbeiten in rund 1150 Vorträgen und auf 600 Postern.

Optische Präzision

Ist die Feinstrukturkonstante α tatsächlich konstant oder ändert sie sich im Laufe von Jahrtausenden? Mithilfe von optischen Atomuhren lässt sich die Konstanz von α mit bisher unerreichter Genauigkeit überprüfen, wie Ekkehard Peik (PTB Braunschweig) berichtete. Anders als die gängigen Atomuhren wie die Cäsiumuhren, die mit atomaren Mikrowellenübergängen zwischen 1 und 10 GHz arbeiten, nutzen optische Atomuhren verbotene Übergänge mit Frequenzen um 10^{15} Hz und einer Linienbreite von nur 1 Hz. Damit könnten sie eine 100- bis 1000-fach größere Genauigkeit erreichen als bisherige Atomuhren. Vergleicht man verschiedene dieser optischen Übergangsfrequenzen über einen längeren Zeitraum, so lassen sich Rückschlüsse auf eine mögliche Änderung von α ziehen.

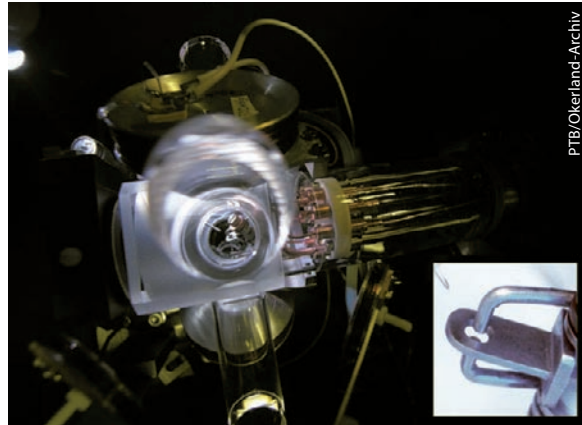


Abb. 1 Paul-Falle für die optische Uhr mit Yb^+ : Im Zentrum der Vakuumapparatur sind die Elektroden zu sehen (vergrößertes Teilbild).

Zwei optische Atomuhren, die an der PTB entwickelt werden, beschrieb Peik genauer. Bei der Ytterbiumuhr wird ein $^{171}\text{Yb}^+$ -Ion in einer Paul-Falle festgehalten und optisch gekühlt (Abb. 1). Der verbotene Quadrupolübergang des Ions von $^2\text{S}_{1/2}$ zu $^2\text{D}_{3/2}$ bei 688 THz hat eine Lebensdauer von 50 ms und dient als optische Uhr. Dazu stimmt man einen Laser auf die Frequenz des Übergangs ab und zählt sie mithilfe eines Frequenzkamms aus. Das derzeit genaueste Ergebnis ist 688 358 979 309 306,62(73) Hz, wobei die Konstanz dieser Frequenz bis auf eine relative Unsicherheit von $4 \cdot 10^{-16}$ pro Jahr überprüft werden konnte. Aus der Kombination mit andernorts gemessenen Frequenzen optischer Uhren mit Hg- oder Al-Ionen ergibt sich für die zeitliche Änderung der Feinstrukturkonstanten $(-2,5 \pm 2,7) \cdot 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$ und der Rydberg-Konstanten $(-0,6 \pm 2,9) \cdot 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$. Das Ytterbium besitzt neben dem Quadrupol- noch einen Oktupolübergang von $^2\text{S}_{1/2}$ zu $^2\text{F}_{7/2}$ bei 642 THz, der eine Lebensdauer von sechs Jahren und eine entsprechend kleine natürliche Linienbreite hat. Da relativistische elektronische Effekte aber in unterschiedlichem Maße zu den beiden Übergangsfrequenzen beitragen, ließe sich durch Vergleich der Frequenzen eine zeitliche Än-

derung von α mit großer Genauigkeit bestimmen. An der PTB haben Experimente dazu begonnen.

Die zweite optische Atomuhr, über die Peik berichtete, ist eine „nukleare Uhr“ mit $^{229}\text{Th}^{3+}$ -Ionen. Thorium-229 ist der einzige bekannte Kern, den ein UV-Photon anregen kann. Die Lebensdauer dieses Isomers liegt bei etwa 1000 s. Diesen optischen Mößbauer-Übergang will man als nukleares Chronometer nutzen. Dazu würde ein $^{229}\text{Th}^{3+}$ -Ion, das sich mit Lasern kühlen lässt, in einer Falle festgehalten und mit einem Laser bestrahlt, dessen Frequenz auf die Übergangsfrequenz abgestimmt ist. Sobald der Thoriumkern angeregt ist, ändert sich die Hyperfeinstruktur der Elektronenhülle des Ions. Das lässt sich an Änderungen der Intensität oder Polarisation der Fluoreszenzstrahlung des Ions ablesen. Wie theoretische Arbeiten gezeigt haben, liefert die nukleare Laserspektroskopie der Thoriumionen die bislang empfindlichste Nachweismöglichkeit für Änderungen der Feinstrukturkonstanten. Außerdem eröffnet sie ein neues, interdisziplinäres Forschungsgebiet zwischen Atom- und Kernphysik.

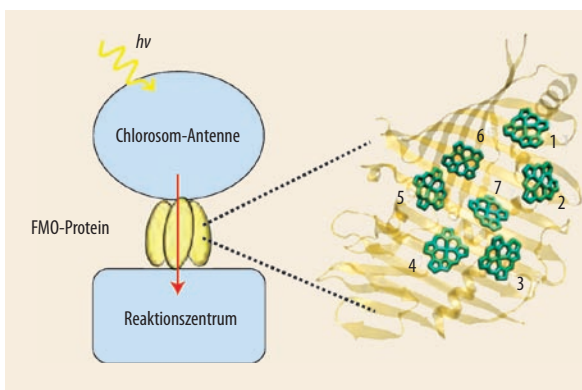


Abb. 2 Das FMO-Protein transportiert Energie von der Lichtantenne zum Reaktionszentrum. Dabei sind seine Chromophore (grün) in verschränkten Quantenzuständen.

Quantenkohärenz in Pflanzen

Quantenmechanische Kohärenz und Verschränkung scheinen bei der Photosynthese eine wichtige Rolle zu spielen, wie Graham Fleming (U California, Berkeley) berichtete. Algen, Pflanzen und manche Bakterien nutzen die Energie des Sonnenlichts, um Wasser in Sauerstoff, Elektronen und Protonen zu spalten. Die chemische Trennungenergie steht dann für die molekulare Synthese oder die Verrichtung von Arbeit zur Verfügung. Fleming und seine Mitarbeiter haben an grünen Schwefelbakterien untersucht, wie sich bei der Photosynthese Moleküle über große Entfernungen hinweg quantenmechanisch abstimmen können, obwohl sie im Zellinnern vielfältigen störenden Umwelteinflüssen ausgesetzt sind.

Die Bakterien besitzen licht-sammelnde Antennenkomplexe, mit denen sie Sonnenlicht absorbieren und die Photonenenergie in Exzitonen, also gebundene Elektron-Loch-Paare, umwandeln. Diese werden zu einem Reaktionszentrum weitergeleitet, wo die eigentliche Photosynthese stattfindet. Den Transport übernimmt ein Molekülkomplex, der aus drei gleichen Proteinen mit jeweils sieben Chlorophyllmolekülen besteht (Abb. 2). Da das Bakterium normalerweise nur wenig Licht zur Verfügung hat, durchlaufen die Anregungen den Molekülkomplex einzeln, wobei sie unterschiedliche Wege einschlagen können. Ob sich die Exzitonen dabei klassisch oder quantenmechanisch bewegen, lässt sich mit zweidimensionaler Elektronenspektroskopie untersuchen. Dazu setzt man die Molekülkomplexe einer Folge von drei Laserpulsen unterschiedlicher Frequenz aus. Der erste Puls regt die Moleküle an, der zweite verstärkt die Anregung oder schwächt sie ab, je nach seiner Frequenz und Zeitverzögerung. Nachdem der dritte Puls das Molekül erneut anregt, analysieren die Forscher die abgegebene Strahlung. Sie fanden, dass sich quantenmechanische Schwebungen zwischen den Anregungszuständen verschie-

dener Moleküle erzeugen lassen, die lange genug andauern, um bei der Weiterleitung eines Exzitons durch den Molekülkomplex eine wichtige Rolle zu spielen. Demnach hüpfen die Exzitonen nicht wie klassische Teilchen von einem Molekül zum anderen, sondern sie breiteten sich quantenmechanisch kohärent längs mehrerer Wege aus. Ob die Kohärenz für die Weiterleitung der Energie zum Reaktionszentrum wesentlich ist oder sich nur aus der dichten räumlichen Anordnung der Moleküle ergibt, ist noch unklar. Doch ohne Zweifel sei die Kohärenz hilfreich, meinte Fleming. Computersimulationen legen den Schluss nahe, dass die verschiedenen Chlorophyllmoleküle eines Komplexes über Distanzen von bis zu 3 nm quantenmechanisch verschränkt sind, wenn ein Exziton den Komplex durchläuft.

Licht „falsch“ gelenkt

Ihre ungewöhnlichen optischen und elektromagnetischen Eigenschaften bescheren Metamaterialien großes öffentliches Interesse: Es handelt sich dabei um künstliche Materialien aus nanostrukturierten Bausteinen unterschiedlicher Form und Zusammensetzung, die in einer vorbestimmten Weise angeordnet sind. Sie können u. a. infrarotes oder sichtbares Licht auf der Nanometerskala bündeln, in die „falsche“ Richtung brechen oder um Hindernisse herum lenken und diese so unsichtbar machen. Vladimir Shalaev (Purdue University) beschrieb die erzielten Fortschritte bei der Entwicklung von derartigen Elementen für den optischen Bereich.

Ein Beispiel für elektrische Metamaterialien sind Verbundstoffe aus Metallen und Dielektrika. An den Metall-Isolator-Kontaktflächen regt Licht Plasmonen an, die sich dann entlang der Fläche ausbreiten. Während die Plasmonen die Frequenz des anregenden Lichts haben, ist ihre Wellenlänge mit etwa 10 nm viel kleiner als die Lichtwellenlänge. Dies ermöglicht eine enorme Miniaturisierung optischer und elektronischer Komponenten. Neben Elektronik und Photonik tritt damit die Plasmonik, die den Bau nanometergroßer Elemente mit Arbeitsfrequenzen im THz-Bereich erlaubt, während die Elektronik bei etwa 10 GHz und die Photonik bei etwa 1 μm an ihre Grenzen stoßen. Shalaev und seine Kollegen entwickelten einen plasmonischen Nanolaser, der aus zahlreichen Goldnanopartikeln besteht, die von einer farbstoffdotierten Quarzhülle umgeben sind. Pumpet man die Teilchen mit blauem Licht, werden Plasmonen angeregt. Oberhalb einer bestimmten Lichtintensität strahlen die Partikel dann grünes Laserlicht ab.

Im optischen Frequenzbereich unterscheiden sich die magnetischen Eigenschaften natürlicher Substanzen kaum von denen des Vakuums. Magnetische Metamaterialien können hier Abhilfe schaffen. Sie bestehen z. B. aus übereinander gestapelten nanometerdicken Silberstreifen oder -balken, zwischen denen sich dielektrische Schichten befinden. Plasmonische Resonanzen führen darin zu asymmetrischen elektrischen Strömen, die eine starke magnetische Antwort über das ganze sichtbare Spektrum hervorrufen. Optische Metamaterialien besitzen elektrische und

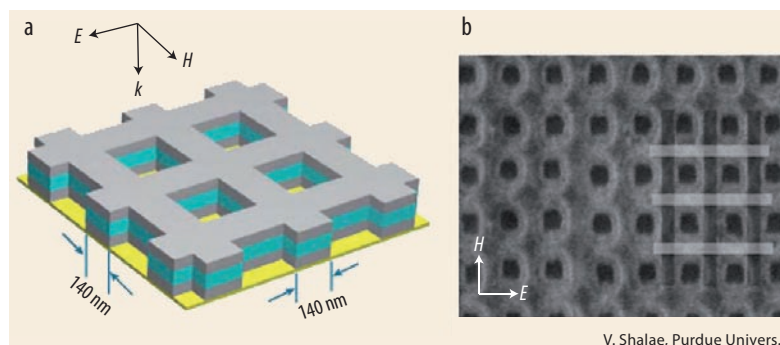
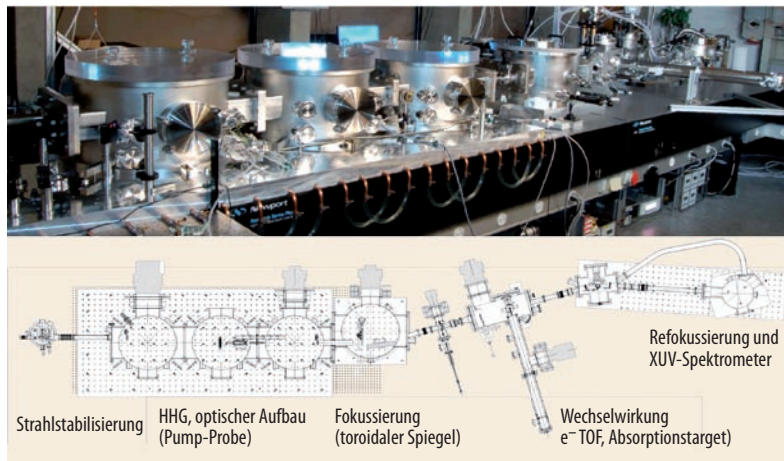


Abb. 3 Schemazeichnung (a) und Feldemissions-REM-Aufnahme (b) eines Metamaterials mit Fischnetzstruktur. Die Lagen und ihre Schichtdicken (in nm) sind Al_2O_3 (10), Ag (43), Al_2O_3 (45), Ag (43), Al_2O_3 (10), Substrat. Die Pfeile geben die Lage der Felder an.

Abb. 4 Die „harmonic Beamline“ an der ETH Zürich erlaubt Pump-Probe-Experimente mit einer Auflösung im Attosekundenbereich.



+) vgl. den Artikel von H. Schmidt-Böcking auf S. 39 in diesem Heft.

magnetische Eigenschaften nach Wunsch. So haben Shalaev und seine Kollegen ein Metamaterial mit negativer elektrischer Permittivität ϵ und magnetischer Permeabilität μ für Wellenlängen um 700 nm hergestellt. Es handelt sich um eine Fischnetzstruktur aus Silberstreifen mit Zwischenschichten aus Aluminiumoxid (Abb. 3). Mit ϵ und μ ist auch der Brechungsindex n des Materials negativ, sodass in ihm die Phase und Intensität des Lichts entgegengesetzt laufen und es das Licht beim Eintritt in das Material in die „falsche“ Richtung bricht. Mithilfe von Schichten aus Flüssigkristallen, deren elektrische Eigenschaften von der Ausrichtung der Moleküle abhängen, könnte man ein Material schaffen, dessen n sich zwischen positiven und negativen Werten schalten lässt. Bislang schwächen Materialien mit negativem Brechungsindex das Licht stark ab, doch Shalaev und seine Kollegen entwickeln gegenwärtig ein Metamaterial mit lichtverstärkenden Zwischenschichten, das dieses Problem lösen soll.

Harmonische Attosekunden

In intensivem Laserlicht zeigen Atome nichtlineare optische Eigenschaften, die zur Erzeugung von höheren Harmonischen der anregenden Laserfrequenz führen (Abb. 4). Ursula Keller (ETH Zürich) hat die dabei auf der Attosekundska ablaufenden Interferenz- und Tunnelprozesse beobachtet. Dazu wurde ein gasförmiges Target aus Neon-, Argon- oder Xenon-Atomen mit einem gepulsten infraroten Laserstrahl bei Intensitäten von 10^{13} bis 10^{15} W/cm² angeregt. Daraufhin trat extreme UV-Strahlung mit höheren Harmonischen bis weit über die 20. Ordnung auf. Deren Helligkeitsverteilung weist bei Erhöhung der Laserintensität eine periodische Modulation auf. Dahinter steckt eine Interferenz, wie Keller und ihr Team nachweisen konnten.

Die Vorgänge im Atom lassen sich mit einem semiklassischen Modell beschreiben. Demnach wird das atomare Coulomb-Potential eines Elektrons durch das elektrische Feld des Laserpulses so stark deformiert, dass sich eine Potentialbarriere bildet, durch die das Elektron aus dem Atom heraustunneln kann. Das nun freie Elektron oszilliert mit der Laserfrequenz und nimmt Energie auf, bis das Ion es wieder einfängt, wobei die EUV-Strahlung entsteht. Das Elektron kann auf unterschiedlich langen Bahnen zum Ion zurückkehren. Die entsprechenden Wellenpakete haben unterschiedliche Phasen und interferieren miteinander, wie sich

im Experiment zeigte. Durchlaufen die Elektronen nur eine kurze Bahn, gibt es keine Interferenz. Treten sowohl kurze als auch lange Bahnen auf, kommt es zu starken Interferenzen, wobei die erzeugten höheren Harmonischen von der Laserintensität abhängen. Somit lässt sich die schnelle Bewegung der Elektronen im Bereich von Attosekunden steuern.

Auch beim Durchtunneln der atomaren Potentialbarriere geht es um Attosekunden. Keller und ihre Mitarbeiter haben die zeitliche Verzögerung gemessen, mit der ein Elektron das vom Laserpuls getroffene Atom verlässt. Dabei setzten sie das so genannte Winkel-Streaking ein. Sie benutzten zirkular polarisierte Laserpulse von ca. 5 fs Dauer, deren elektrisches Feld so stark war, dass es die Atome alle 2,4 fs tunnelionisieren konnte. Die Richtung des *E*-Feldes drehte sich in der selben Zeit wie ein Uhrzeiger um 360 Grad. Da die Elektronen nach dem Tunneln in Feldrichtung davonflogen, ließ sich an ihrer Flugrichtung ablesen, wann sie die Potentialbarriere überwunden hatten. Wie die Messungen mit dem Frankfurter Impulsspektrometer COLTRIMS⁺ an Helium ergaben, war die Verzögerungszeit kleiner als 12 as, sie durchtunnelten die Barriere also fast instantan. Das ist die kürzeste bisher gemessene Zeitspanne.

Beschleunigung ultra

Nicht nur auf Elektronen wirken in intensivem Laserlicht starke Kräfte, sondern auch auf neutrale Atome, die dadurch enorme Beschleunigungen erfahren können, wie Ulrich Eichmann (Max-Born-Institut, Berlin) berichtete. Er und seine Kollegen haben einen Strahl von Heliumatomen einen fokussierten und gepulsten Laserstrahl senkrecht durchqueren lassen, der eine Intensität von 10^{16} W/cm² erreichte (Abb. 5). Als die Forscher die Wirkung des Lichts auf die Atome mit einem Detektor untersuchten, erlebten sie gleich mehrere Überraschungen.

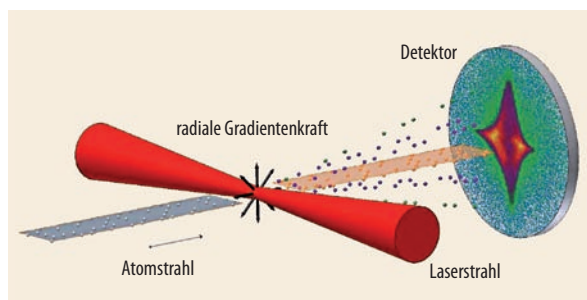


Abb. 5 Trifft ein Atomstrahl auf einen dazu quer verlaufenden intensiven Laserstrahl, versetzt dieser Atome in einen angeregten Zustand. Sie erfahren eine starke Beschleunigung und treffen deshalb mit einer bestimmten Verteilung auf den Detektorsschirm.

So wurden längst nicht alle Atome durch das intensive Licht ionisiert, sondern ein merklicher Teil gelangte in einem angeregten Zustand zum Detektor. Zudem erwartet man, dass die Verteilung der angeregten Atome auf dem ortsauflösenden Detektor ein Abbild des Laserfokus' ist und somit die Form eines schmalen rechteckigen Streifens hat, der parallel zum Laserstrahl ausgerichtet ist. Tatsächlich fächerte die Verteilung der Atome senkrecht zur Strahlrichtung jedoch weit auf. Die Atome hatten somit senkrecht zum Laserstrahl starke Kräfte erfahren, die sie innerhalb der kurzen Pulsdauer von nur etwa 40 fs auf eine Geschwindigkeit von 200 km/h brachten. Das entspricht 10^{14} g, einem rekordverdächtigen Wert für neutrale Atome.

Hinter dieser enormen Beschleunigung steckte die ponderomotorische Kraft, wie Eichmann erklärte. Im Laserfeld, das mehr als 10^9 V/cm erreichte, können Elektronen aus dem atomaren Coulomb-Potential heraustunneln. Doch nicht alle schafften es, während der kurzen Dauer des Laserpulses ihrem Atom völlig zu entkommen – bei ihnen fand nur eine „frustrierte Tunnelionisation“ statt. Dabei gelangte das Atom in einen angeregten Zustand, bei dem das Elektron locker an den Atomrumpf gebunden blieb. Im inhomogenen, oszillierenden Laserfeld wirkte auf das quasi-freie Elektron eine starke ponderomotorische Kraft, die es enorm beschleunigt, nicht jedoch auf das 10 000-mal schwerere Heliumion. Das Elektron zog indes mit ihm durch die Coulomb-Kraft verbundenen Rumpf mit sich fort, sodass letztendlich das gesamte Atom beschleunigt wurde. Die neue Methode eröffnet u. a. die Möglichkeit, die Bewegung atomarer Teilchen zu ganz genau festgelegten Zeitpunkten zu beeinflussen.

Der Weg zur Klassik

Der Übergang vom quantenmechanischen zum klassischen Verhalten lässt sich an mehratomigen Teilchen in idealer Weise studieren,

erklärte Klaus Hornberger (Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden). Einzelne Moleküle kann man so weit gegen Umwelteinflüsse abschirmen, dass an ihnen Quanteneffekte hervortreten. Sehr große Exemplare sollten sich jedoch wie mesoskopische Objekte verhalten, bei denen die klassische Physik zum Vorschein kommt. Dabei wird die Kohärenz der molekularen Quantenzustände und ihre Fähigkeit zu interferieren zerstört. Hornberger erklärte das Zustandekommen dieser Dekohärenz anhand der Lokalisierung von molekularen Materiewellen und des Hundschen Paradoxons der molekularen Chiralität (Abb. 6).

Die Welleneigenschaften großer Moleküle erforschte Hornberger zusammen mit Markus Arndt (U Wien) und dessen Kollegen. Dazu beugten sie Moleküle wie Fullerene (C_{60} und C_{70}) oder fluoriertes Diazobenzol ($C_{30}H_{12}F_{30}N_2O_4$), die teilweise mehrere Nanometer groß waren, an nanostrukturierten Gittern oder stehenden Lichtwellen. Die molekularen Materiewellen riefen ein deutlich sichtbares Beugungsmuster hervor. Durch Gaskollisionen, Emission von Wärmestrahlung oder Absorption von Photonen des Lichtgitters lokalisierten die Moleküle in Raum, und das Beugungsmuster schwächte sich ab oder verschwand gänzlich. Nach der von Hornberger entwickelten Theorie sollten sich 1500 K heiße Fullerene wie Quantenteilchen verhalten, 2900 K heiße jedoch wie klassische Partikel. Die Experimente haben dies eindrucksvoll bestätigt.

Auch an kleinen Molekülen macht sich Dekohärenz bemerkbar, wie ein 1927 von Friedrich Hund diskutiertes Paradoxon zeigt: Warum liegen chirale Moleküle, von denen es eine rechts- und eine linkshändige Konfiguration gleicher Energie gibt, nicht in einer symmetrischen Überlagerung der beiden Konfigurationen vor? Die von Hornberger gefundene Lösung beruht darauf, dass bei Kollisionen der chiralen Moleküle mit einem nichtchiralen Gas Streuzustände auftreten, bei denen spiegel-

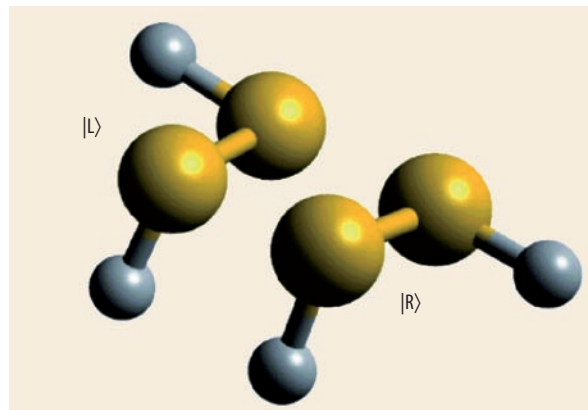


Abb. 6 Versuche mit chiralem Deuteriumdisulfid in Heliumgas sollen das Hundsche Paradoxon überprüfen.

symmetrische Prozesse dieselbe Amplitude, aber unterschiedliche Phasen haben können. Auch bei identischen Streuquerschnitten führt die über viele Kollisionen angesammelte Phasendifferenz zur Dekohärenz zwischen den rechts- und den linkshändigen Zuständen. Zerfällt die Phasenkohärenz der Konfigurationen schneller als das Molekül zwischen ihnen tunneln kann, so wird eine kohärente Überlagerung der beiden Konfigurationen verhindert: Das Molekül ist entweder rechts- oder linkshändig. Hornberger schlägt vor, diesen Dekohärenzeffekt an chiralem Deuteriumdisulfid in Heliumgas experimentell zu überprüfen.

SAMOP-DISSERTATIONSPREIS

Henning Vahlbruch (rechts, MPI für Gravitationsphysik und U Hannover), der in seiner Promotionsarbeit den Weg für die erste Anwendung gequetschten Lichts in Gravitationswellendetektoren bereitet hat, erhielt in Hannover den Dissertationspreis der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen aus den Händen des Sektionsvorsitzenden Jan-Michael Rost.

