

Vom Regenschirm zum chiralen Superrotor

Kürzlich gelang es einer Gruppe von Physikern, ein symmetrisches Molekül mit Licht in einen chiralen Superrotor zu verwandeln.

Olga Smirnova

Seit vielen Jahren dient Licht dazu, freie Rotationen ruheloser Moleküle zu zähmen und zu steuern. Ziel dabei ist es, die Struktur sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Moleküle zu verändern. 1975 erkannten Boris Zon und Boris Katsnelson, wie intensives Laserlicht einfache lineare Moleküle entlang der Richtung des elektrischen Laserfeldes ausrichten kann [1]. Später entwickelten Bretislav Friedrich und Dudley Herschbach die Methode weiter. Laser können leicht elektrische Felder bis zu einem Volt pro Ångström erzeugen – das ist mehr als genug, um den molekularen Dipol zu drehen. Das elektrische Feld eines optischen Laserpulses schwingt jedoch sehr schnell und ändert seine Richtung etwa jede Femtosekunde. Das ist viel zu schnell, als dass das träge Molekül ihm folgen könnte: Moleküle drehen sich tausend- bis zehntausendmal langsamer. Aber die Elektronen in einem Molekül sind viel leichter und schneller. Ein starkes Laserfeld kann sie leicht von einer Molekülseite zur anderen ziehen und damit ein Dipolmoment induzieren. Das gleiche elektrische Laserfeld wirkt auf diesen induzierten

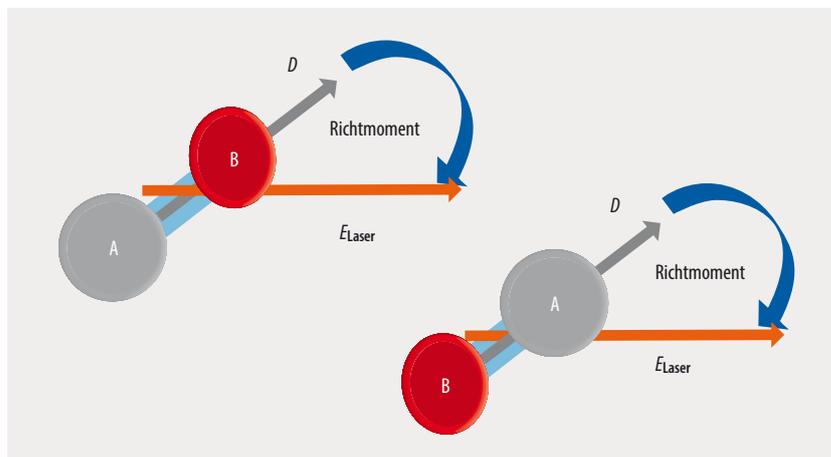


Abb. 1 Das Laserfeld induziert das Dipolmoment D , das sich in Richtung des elektrischen Feldes des Lasers dreht. Das oszillierende elektrische Feld unterscheidet jedoch nicht zwischen den beiden Orientierungen des Moleküls AB (Atom A unten) und BA (Atom A oben). Das Molekül ist ausgerichtet, aber nicht orientiert.

Dipol und richtet das Molekül entlang des elektrischen Feldes aus.

Wenn das elektrische Feld seine Richtung in der nächsten Hälfte des Laserzyklus ändert, folgen die Elektronen: Der induzierte Dipol schwingt gemeinsam mit dem Laserfeld. Folglich zieht das elektrische Feld in diesem Halbzklus den Dipol wieder in die gleiche Richtung, dreht den Dipol und das Molekül mit sich weiter und

richtet es entlang des elektrischen Feldvektors des Lasers aus. Bei infraroter, nicht-resonanter Laserstrahlung ist das elektrische Feld mit etwa einem halben Volt pro Ångström stark genug, um die Elektronen zu polarisieren und große Dipole zu induzieren. Aber es reicht noch nicht aus, um die Elektronen vom Molekül loszureißen. Das Molekül wird in seinem elektronischen Grundzustand ausgerichtet.

Die dafür verantwortliche Potentialsenke lässt sich leicht tiefer als die Rotationsenergie des Moleküls bei Raumtemperatur machen. Werden die Molekülrotationen weit unter Raumtemperatur abgekühlt, reicht die Tiefe des Potentials aus, um das Molekül auszurichten. Mittels moderner Verfahren zur Zustandsauswahl und Wahl des Moleküls in seinem Rotationsgrundzustand ist es möglich, das Molekül innerhalb weniger Grad zur Laserpolarisation auszurichten [2]. Fügt man ein vergleichsweise schwaches konstantes elektrisches Feld hinzu, bricht dies die Symmetrie zwischen den zwei möglichen Orientierungen des ausgerichteten polaren Moleküls (**Abb. 1**). In der Folge entsteht eine nahezu perfekte Ausrich-

Kurzgefasst

Wie Planeten entstehen

Das Radioteleskoparray ALMA hat es ermöglicht, die Staub- und Gasgürtel um junge Sterne mit bisher nicht erreichter Genauigkeit zu untersuchen. Innerhalb der protoplanetaren Scheiben ließen sich Details wie markante Ringe und Lücken beobachten. Zwei Ergebnisse der Beobachtungskampagne DSHARP beeindrucken besonders: Große Gasplaneten entstehen viel schneller als in Modellen vorhergesagt, und erdähnliche Planeten wachsen aus murmelgroßen Partikeln heran, die in sehr dichten Staubringen gefangen sind. Alle Ergebnisse finden sich in einer Sonderausgabe der *Astrophysical Journal Letters*.

ApJL 869 (2018), [bit.ly/2Mf1QL9](https://doi.org/10.3847/201801019)

Mit Neutrinos durchleuchtet

Das IceCube-Teleskop am Südpol dient dazu, hochenergetische Neutrinos nachzuweisen. Diese entstehen bei der Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit der Atmosphäre. Physiker aus Valencia und Barcelona nutzten die Energieverteilung dieser atmosphärischen Neutrinos aus, um auf die Strukturen im Erdinneren zu schließen. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zeigten sie, dass sich die Masse der Erde und ihr Trägheitsmoment aus IceCube-Daten ableiten lassen. Bei mehr als 20 Prozent Unsicherheit sind die Ergebnisse vergleichbar mit geophysikalischen, astronomischen und gravimetrischen Werten.

A. Donini et al., *Nat. Phys.* 15, 37 (2019)

tung mit nahezu perfekter Orientierung [2].

Auf diese Weise können nicht-resonante Laserfelder molekulare Rotationen steuern, um die Struktur und Eigenschaften des Moleküls zu ändern. Die „optische Zentrifuge“ ist ein scheinbar einfaches, rein optisches Werkzeug, das Misha Ivanov und Mitarbeiter erfunden haben [3] und das die Gruppe von Valery Milner perfektioniert hat [4]. Sie nutzt einen Laserpuls mit langsam rotierender Polarisation, die sich mit moderner Lasertechnologie recht einfach herstellen lässt. Sobald das Molekül ausgerichtet ist, zwingt die rotierende Laserpolarisation es dazu, sich in eine genau definierte Richtung zu drehen. Dreht sich die Laserpolarisation mit Beschleunigung, gelangt das Molekül in immer höhere Rotationszustände [3, 4]. Dadurch verwandelt sich ein einfaches lineares Molekül in einen molekularen Superrotor. Solche Moleküle drehen sich in einer genau definierten Richtung mit Energien weit über denen bei Raumtemperatur. Was aber geschieht in einer optischen Zentrifuge mit einem komplexeren, nicht-linearen Molekül?

Eine faszinierende Antwort auf diese Frage haben Forscher um Jochen Küpper jüngst gegeben [5]. Sie zeigten, wie ein symmetrisches achirales Molekül sich in einen chiralen Superrotor wandelt. Dazu nutzten sie den symmetrischen Kreisel Monophosphan (PH_3) im Rotations- und Schwingungsgrundzustand. Das Molekül ähnelt einem geöffneten Regenschirm, mit dem Phosphoratom an der Spitze. Die drei P-H-Beine bilden die Streben. Während sich das Dreibein zu drehen beginnt, geschehen mehrere Dinge: Eine Ebene, die zwei der drei P-H-Beine enthält, richtet sich so aus, dass sie die Polarisation des elektrischen Laserfeldes enthält. Das dritte P-H-Bein ist nun nahezu entlang der Rotationsachse ausgerichtet, um die sich die beiden anderen Beine drehen (Abb. 2). Dadurch präzediert das Molekül nur minimal, allerdings scheint seine Symmetrie gebrochen. Tatsächlich dehnt die Zentrifugalkraft die beiden rotierenden Beine, während das dritte, nahezu in Richtung der Drehachse angeordnete

Bein intakt bleibt. Da nicht klar ist, welche Beine gedehnt werden, wird die Gesamtsymmetrie der ursprünglichen Rotationswellenfunktion bislang nicht gebrochen.

Stellen wir uns zur Verdeutlichung vor, dass die Rotationsachse vertikal liegt, die Rotationsebene horizontal. Nichts zwingt das verbleibende dritte Bein, sich relativ zur Rotationsebene nach oben oder unten zu orientieren. Erst ein zusätzliches konstantes elektrisches Feld, das auf den permanenten Dipol des Moleküls wirkt, richtet das dritte Bein nach oben aus (Abb. 2). Jetzt wird das Molekül, das sich dreht und in genau definierten Richtungen orientiert ist, chiral. Ein Objekt ist chiral, wenn es nicht mit seinem Spiegelbild zur Deckung zu bringen ist – ähnlich unserer Hand oder der DNA-Helix. Die beiden Spiegelbilder einer chiralen Struktur sind als Enantiomere bekannt. Auch Monophosphan besitzt in einer optischen Zentrifuge zwei Enantiomere (Abb. 2).

Was aber geschieht, wenn ein intrinsisch chirales Molekül in einer optischen Zentrifuge eine einseitig gerichtete Drehung ausführt? Kürzlich gelang es, diese Frage zu beantworten [6]: Das Molekül orientiert sich ohne ein zusätzliches konstantes elektrisches Feld.

Rotationsinduzierte Chiralität bietet eine neue Plattform, um chirale

Strukturen mit Licht zu schaffen und zu steuern. Dies eröffnet einen neuen Weg zum Studium der molekularen Chiralität – eine äußerst wichtige Eigenschaft, die jeden Aspekt unseres Lebens durchdringt. Was intrinsisch chirale Moleküle betrifft, so bietet ihre unterschiedliche Reaktion auf eine kontrollierte unidirektionale Rotation neue Ansätze für den enantiosensitiven Nachweis und die Trennung von Enantiomeren.

*

Die Autorin dankt Dr. Maria Richter für die Übersetzung des Artikels.

- [1] B. Zon und B. Katsnelson, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69**, 1166 (1975) [Sov. Phys. JETP **42**, 595 (1976)]; B. Friedrich und D. Herschbach, Phys. Rev. Lett. **74**, 4623 (1995)
- [2] L. Holmegaard et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 023001 (2009)
- [3] J. Karczmarek et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 3420 (1999)
- [4] A. Korobenko, A. A. Milner und V. Milner, Phys. Rev. Lett. **112**, 113004 (2014)
- [5] A. Owens, A. Yachmenev, S. Yurchenko und J. Küpper, Phys. Rev. Lett. **121**, 193201 (2018)
- [6] E. Gershnel und I. Sh. Averbukh, Phys. Rev. Lett. **120**, 083204 (2018); I. Tutunnikov et al., J. Phys. Chem. Lett. **9**, 1105 (2018)

Autorin

Prof. Dr. Olga Smirnova, Max-Born-Institut, Max-Born-Str. 2A, 12489 Berlin und TU Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

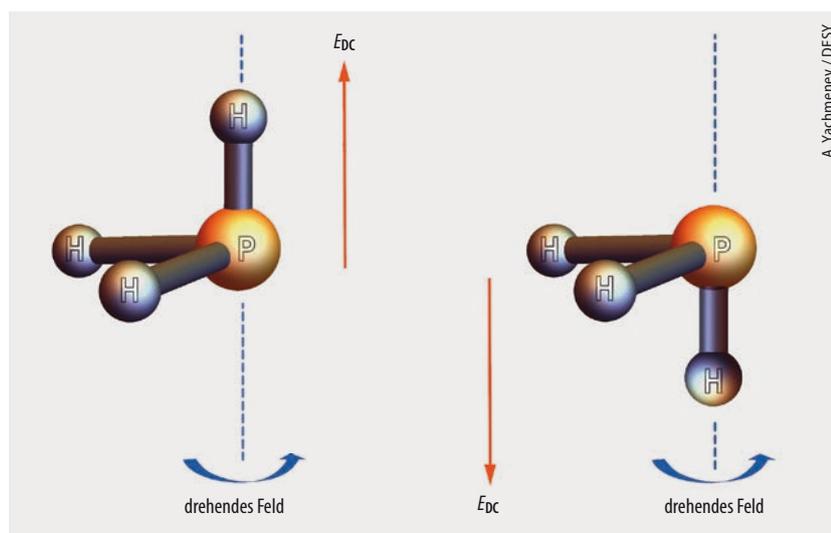


Abb. 2 In einer optischen Zentrifuge dreht sich ein PH_3 -Molekül um eine seiner drei Achsen im Kreis. Die Zentrifugalkraft dehnt die beiden sich drehenden Verbindungen. Ein konstantes elektrisches Feld E_{DC} orientiert die dritte Bindung bezüglich der Rotationsebene. Das orientierte, sich drehende Molekül ist nun chiral. Die Abbildung zeigt die beiden Enantiomere, die der Ausrichtung der dritten Bindung nach oben beziehungsweise nach unten relativ zur Rotationsebene entsprechen.