

Laserwelle steuert Elektronenbewegung in Molekülen

Erstmals ist es einem niederländisch-deutschen Forscherteam gelungen, chemische Reaktionen über die Steuerung der Elektronenbewegung in den beteiligten Atomen zu beeinflussen

18.04.2006 - Ultrakurze Laserpulse im Femtosekunden-Bereich haben sich als effektive Werkzeuge bewährt, um photochemische Reaktionen kontrolliert zu steuern: Unter dem Einfluss des Lichtpulses ändern die Elektronen ihre Quantenzustände, was zum Aufbrechen einer chemischen Bindung oder auch zu ihrer Neubildung führen kann. Wissenschaftler des FOM Institute for Atomic and Molecular Physics (AMOLF), Amsterdam, des Max-Instituts für Quantenoptik (MPQ) in Garching sowie der Universitäten Bielefeld und Hamburg sind nun einen entscheidenden Schritt weiter gekommen. Wie die Forscher berichten, konnten sie mit "maßgeschneiderten" Wellenformen direkt die Bewegung der in die chemischen Bindungen involvierten Elektronen und damit auch das Reaktionsergebnis kontrollieren.

Der hier für Dissoziation von Deuterium-Molekülen erzielte Erfolg ebnet vielleicht den Weg, auch Elektronen-Transferprozesse in großen Biomolekülen wie etwa DNA-Basenpaaren zu steuern. Erst seit kurzem verfügen Forscher über Femtosekunden-Pulse mit präzise kontrollierten Wellenformen. 2002 gelang es Prof. Ferenc Krausz (damals Technische Universität Wien, heute Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik) in Zusammenarbeit mit Prof. Theodor Hänsch (ebenfalls Direktor am MPQ), mit Hilfe der Nobelpreis-gekrönten Frequenzkammtechnik, so genannte "phasenstabilisierte" Laser zu entwickeln. Diese Laser zeichnen sich dadurch aus, dass von Puls zu Puls nicht nur Intensität und Frequenz, sondern auch die Lage der Maxima und Minima der Lichtschwingungen identisch ist.

Die hochintensiven, perfekt kontrollierten Felder solcher Femtosekundenpulse üben auf die Elektronen in einem Atom vergleichbare Kräfte aus wie der positiv geladene Atomkern. Wie Wissenschaftler um Prof. Krausz in verschiedenen Experimenten gezeigt haben, lässt sich mit solchen Pulsen die Bewegung der um die Atome kreisenden Elektronen direkt steuern, was sowohl die kontrollierte Entfernung von Elektronen aus Atomen oder Molekülen als auch die Erzeugung von Attosekunden-Pulsen ermöglicht. Daher stellt sich die Frage, ob man auch die Elektronen, die in Molekülen die chemische Bindung vermitteln, durch solche Pulse kontrollieren kann, und ob sich dadurch die Dynamik von chemischen Reaktionen beeinflussen

lässt.

Ein Team um Dr. Matthias Kling hat nun am Max-Planck-Institut für Quantenoptik den Einfluss von linear polarisierten, fünf Femtosekunden langen Laserpulsen auf die Dissoziation von positiv geladenen Deuterium-Ionen untersucht. Die aus kommerziell erhältlichem D₂ durch Laser-Ionisation erzeugten D₂⁺-Ionen sind denkbar einfach aufgebaut: Sie enthalten zwei positiv geladene Kerne, die jeweils aus einem Proton und einem Neutron bestehen, und ein Elektron. Mit einem "Sensitive Imaging"-Detektor, einer Art Kamera, die eine Gruppe um Prof. Marc Vrakking am AMOLF entwickelt hatte, bestimmten die Wissenschaftler die Richtung, unter der die Molekülfragmente - ein Deuterium-Atom sowie ein positiv geladenes Deuterium-Ion - nach der Dissoziation ausgesendet wurden.

Solange sie Laserpulse ohne Phasenstabilisation verwendeten, war die Emissionsrichtung symmetrisch in Bezug auf die Polarisationsachse. Die Anwendung von Lichtpulsen, bei denen die Phase des elektrischen Lichtfeldes genau festgelegt war, führte hingegen dazu, dass die Bruchstücke - je nach Lage der gewählten Phase - bevorzugt in eine bestimmte Richtung flogen. Tatsächlich konnte die Emissionsrichtung über die Wahl der Phase gezielt gesteuert werden. Wurde die Phase so justiert, dass die Ionen nach rechts flogen, so bewirkte eine Phasenverschiebung um 180 Grad eine Umkehrung der Emissionsrichtung, d.h. die Ionen flogen nach links.

Quantenmechanische Rechnungen zeigten dann, dass sich dieses Phänomen folgendermaßen erklären lässt: Anfänglich ist das Elektron "delokalisiert", d.h. seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit - symbolisiert durch die blauen Wolken in der Abbildung - erstreckt sich über beide Atomkerne, wodurch die chemische Bindung zustande kommt. Durch die Wechselwirkung mit dem Laserfeld besetzt das Elektron gleichzeitig zwei Energiezustände des D₂⁺-Ions, im Fachjargon heißt dieser Vorgang "kohärente Überlagerung". Dies hat zur Folge, dass sich die Elektronenwolke, abhängig von der Phase des Feldes, auf der rechten oder der linken Seite der chemischen Bindung befindet.

Die Oszillation des Lichtfeldes zwingt das Elektron, zwischen beiden Seiten hin und her zu schwingen. Dadurch wird die chemische Bindung zwischen den positiv geladenen Kernen allmählich schwächer, ihr Abstand vergrößert sich, und das Molekül wird schließlich instabil. Wenn das Molekül in zwei Fragmente aufbricht, bleibt das Elektron an einem der beiden Ionen hängen, das dann zu einem neutralen D-Atom wird, während das andere Bruchstück als positiv geladenes Ion im Experiment nachgewiesen wird. Da die Dauer des Dissoziationsprozesses fest steht, lässt sich also durch Wahl der Phase des Lichtfeldes gezielt steuern, mit welchem Nukleon sich das Elektron zum Zeitpunkt des Zerfalls zusammen tut.

Elektronentransferprozesse spielen in der Chemie und Biologie eine außerordentlich wichtige Rolle. Schneller Elektronentransfer kann sowohl zur Schädigung als auch zur Reparatur von DNA-Basen-Paaren führen. Die hier für die Dissoziation von D2-Molekülen erhaltenen Resultate könnten einen Weg aufzeigen, wie sich solche Vorgänge auch in großen Biomolekülen durch elektrische Lichtfelder steuern lassen. Die Möglichkeit, den Ladungstransport gezielt durch einzelne Moleküle zu lenken, könnte auch zu einer weiteren Miniaturisierung von Bauelementen der molekularen Elektronik führen.

Originalveröffentlichung: M.F. Kling, Ch. Siedschlag, A.-J. Verhoef, J.I. Khan, M. Schultze, Th. Uphues, Y. Ni, M. Uiberacker, M. Drescher, F. Krausz, M.J.J. Vrakking; "Control of Electron Localization in Molecular Dissociation"; Science 2006.

www.chemie.de/news/d/53990

InfoService

Informationen zum Artikel anfordern:
www.chemie.de/news/d/info/53990

News

Weitere News zu diesem Thema:
www.chemie.de/news/d/more/53990

Impressum

Chemie.DE Information Service GmbH
Seydelstr. 28, 10117 Berlin

Tel. +49 30 20 45 68 -0
Fax +49 30 20 45 68 -70

www.Chemie.DE
info@Chemie.DE