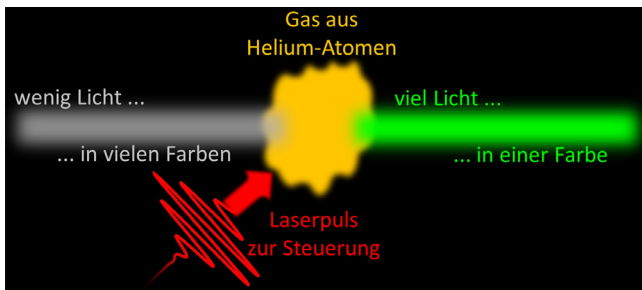




sie zu steuern. Dies geschieht z. B. indem man die Intensität des verwendeten Laserlichts, also seine Helligkeit, auf große Werte steigert. Durch Fokussierung mittels Linsen oder konkaver Spiegel können leicht Intensitäten erzeugt werden, die die Helligkeit der Sonne auf der Erde viele Billionen ( $10^{15}$ ) mal übertreffen. Wenn diese intensiven Pulse zum richtigen Zeitpunkt auf ein Molekül treffen, so können die Bindungselektronen beeinflusst und sogar gezielt von einem Atom zum anderen verschoben werden. Für die Zukunft erschließt dies einen gänzlich neuen Zugang zur Chemie: Nicht etwa durch Mischen von Stoffen und Temperaturerhöhung, sondern durch direktes Eingreifen in die mikroskopischen Bewegungsmuster der Molekülelektronen werden chemische Reaktionen bis hin zur Herstellung neuer Stoffe gesteuert.

Die Laser-Steuerung der quantenmechanischen Bewegung von Elektronen auf kleinsten Längenskalen öffnet insbesondere aber auch neue Perspektiven für die physikalische Grundlagenforschung: Atome und Moleküle entwickeln in starken Laserfeldern neue, noch zum Großteil unverstandene Eigenschaften. So konnte in unserer Forschungsarbeit am MPIK gezeigt werden, dass Atome, die im Normalfall Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbieren, diese Eigenschaft in starken und kurz gepulsten Laserfeldern verlieren. Besser noch: Man konnte die Atome mit einem Laserpuls innerhalb weniger Femtosekunden in einen Zustand „umschalten“, in dem sie Licht laserartig wieder aussenden (s. Bild unten). Dieses Prinzip könnte in der Zukunft für schnelle Schalter genutzt werden, die zur Informationsverarbeitung in mikroskopischen Schaltkreisen und Computern auf der Basis einzelner Moleküle zum Einsatz kommen. Es erschließen sich durch diese Kontrolle von Licht auf kürzesten Zeitskalen auch neue Lichtquellen im gesamten Bereich des Spektrums, vom langwelligigen Infraroten bis hin zum kurzwelligigen Röntgenbereich, sowohl für die Grundlagenforschung als auch für neue technologische Anwendungen.



#### Ansprechpartner:

Dr. Robert Moshhammer

Tel: 06221 516461

E-Mail: robert.moshhammer@mpi-hd.mpg.de

Dr. Christian Ott

Tel: 06221 516332

E-Mail: christian.ott@mpi-hd.mpg.de

Prof. Dr. Thomas Pfeifer

Tel: 06221 516380

E-Mail: thomas.pfeifer@mpi-hd.mpg.de



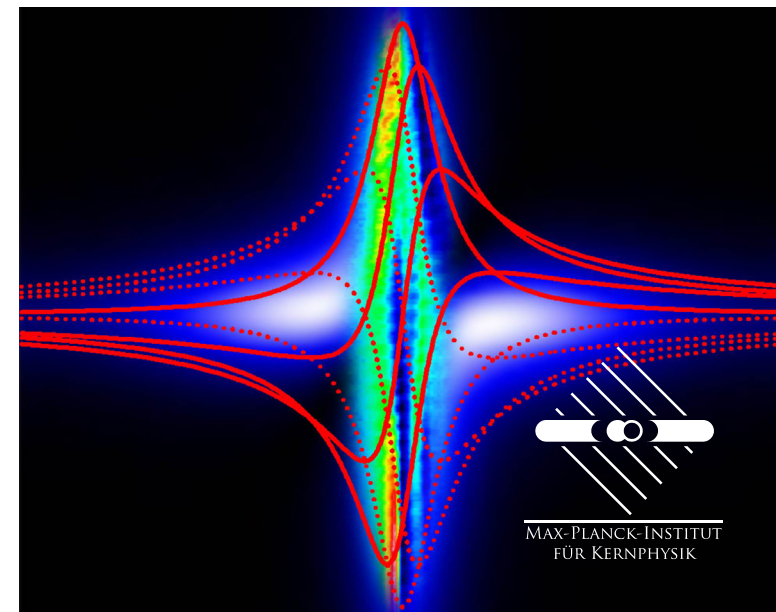
Saupfercheckweg 1  
69117 Heidelberg

[www.mpi-hd.mpg.de](http://www.mpi-hd.mpg.de)



Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK betreibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Gebieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.

## Filme und Klänge von Atomen und Molekülen



## Filme und Klänge von Atomen und Molekülen

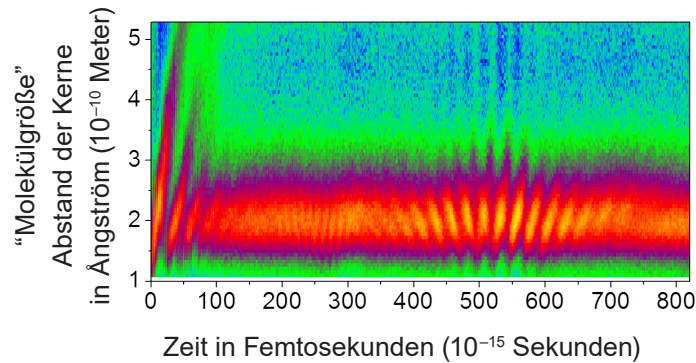
Die Luft, die wir in diesem Moment atmen, das Sonnenlicht, das wir sehen, das Papier, das wir in den Händen fühlen, die chemischen Reaktionen, die in unserem Körper Reize weiterleiten – alle diese Dinge und Abläufe beruhen auf dem natürlichen Zusammenspiel von Atomen und ihren Elektronen. Letztere bewegen sich innerhalb und zwischen den Atomen und wechselwirken dabei mit dem Licht, das sie trifft, oder welches sie abstrahlen. Können wir verstehen, wie diese elementaren mikroskopischen Vorgänge ablaufen? Können wir sie direkt beobachten oder auf andere Weise messbar machen?

### Bewegte Bilder aus dem Mikrokosmos

Um die unvorstellbar kleinen atomaren Teilchen zu „sehen“, bedient man sich spezieller abbildender Methoden. Herkömmliche Lichtmikroskope sind dazu nicht geeignet: Die kleinsten Längeneinheiten, die damit beobachtet werden können, sind auf der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts, also knapp 1 Mikrometer ( $10^{-6}$  m, ein tausendstel Millimeter). Atome und Moleküle sind noch zehntausendmal kleiner, die typische Längeneinheit ist das Ångström ( $10^{-10}$  m, ein zehntausendstel Mikrometer oder ein zehntel Nanometer).

Erschwerend hinzu kommt die unvorstellbar schnelle Bewegung dieser Teilchen. Zum Beispiel schwingen die beiden Atome in einem Stickstoffmolekül, dem Hauptbestandteil der uns umgebenden Luft, mehr als 80 Billionen mal ( $80 \times 10^{12}$ ) pro Sekunde gegeneinander, d. h. eine Schwingung dauert nur etwa 12 Femtosekunden (1 Femtosekunde ist  $10^{-15}$  s). Unser Auge könnte dieser Bewegung, selbst wenn es die Teilchen sehen könnte, nicht folgen.

Was wir also benötigen, ist daher nicht nur ein extrem hochauflösendes Mikroskop (sogenannte Reaktionsmikroskope), sondern auch eine extreme „Zeitlupe“. Diese wird mithilfe von sehr, sehr kurzen Lichtblitzen erreicht, deren Dauer kürzer als die oben genannten Schwingungen ist. Damit kann die schnelle Molekülbewegung, z. B. nach dem Anstoßen einer Schwingung, abgetastet werden.



Beobachtung eines schwingenden Wasserstoff-Moleküls mit einem Reaktionsmikroskop und Laserpulsen von Femtosekunden Dauer, durchgeführt am MPIK. Man erkennt das anfängliche Schwingen zur Zeit 0 nach dem „Anstoß“, das quantenmechanische „Zerfließen“ (unscharfe Region zwischen 150 und 350 Femtosekunden) und das „Wiederaufleben“ der Bewegung bei 500 Femtosekunden.

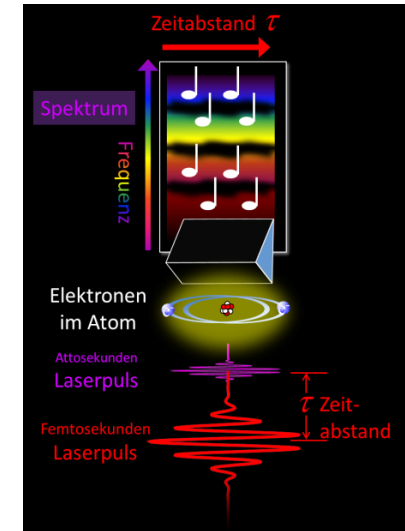
### Atome und Moleküle im Inneren „belauschen“: Spektroskopie

Im Inneren der Atome und Moleküle bewegen sich Elektronen, die mit ihrer negativen Ladung von der positiven Ladung der Atomkerne angezogen werden und diese neutralisieren. Die Elektronen stellen gewissermaßen den Klebstoff in Molekülen dar: sie bewegen sich anziehend zwischen den Atomen und ermöglichen so die chemische Bindung. Um Chemie und chemische Reaktionen von Grund auf zu verstehen, ist es also wichtig diese elektronische Bewegung, die zur Herstellung und dem Aufbruch von Molekülbindungen führt, zu untersuchen.

Die leichten Elektronen bewegen sich nochmals schneller als die im Vergleich mehrere 1000 mal schwereren Atomkerne. Elektronen zählen ihre Zeit im Takt von Attosekunden, einer Tausendstel Femtosekunde, oder  $10^{-18}$  s. Es vergehen in einer Sekunde etwa so viele Attosekunden wie Sekunden im gesamten Alter des Universums. Mit anderen Worten: Verglichen mit unserem menschlichen Zeitempfinden entsteht aus Sicht der Elektronen jede Sekunde ein neues Universum.

Was tun wir also, um in diese kleinsten Teile der Zeit einzudringen, um uns das Innenleben von Atomen und Molekülen zu erschließen? Direkte Beobachtung wird hier immer schwieriger, man ist verstärkt auf eine Methodik angewiesen, die man mit dem menschlichen Hören vergleichen kann: die zeitaufgelöste optische Spektroskopie.

Ähnlich wie beim Hören eines Musikstücks, wo wir eine Abfolge von Tönen unterschiedlicher Frequenz und Klangfarbe wahrnehmen, wird in der Spektroskopie die Farbe des Lichts, genauer gesagt sein Spektrum, analysiert. Hier wird mithilfe eines Prismas oder optischen Gitters das von Atomen oder Molekülen ausgesandte Licht in seine Frequenzbestandteile zerlegt. Da dieses Spektrum zunächst nur aus gleichzeitig erklingenden Tönen mit ihren charakteristischen Klangfarben (vgl. Obertonspektrum bei Instrumenten) besteht, muss zur Aufnahme des gesamten mikroskopischen „Musikstücks“ – gespielt vom Ensemble der sich bewegenden Elektronen – noch die zeitliche Abfolge der Töne gemessen werden. Dies geschieht wiederum mit kurzen und intensiven Laserpulsen. Indem sie zeitlich kontrolliert auf die Elektronen einwirken, geben sie gewissermaßen den Takt im optischen Spektrum vor.



Aus dieser hiermit hörbaren „mikroskopischen Melodie“ kann man wichtige Aufschlüsse über die Energie und Bindungsstärke der Elektronen erhalten, und in Verbindung mit unserem bereits vorhandenen Verständnis sogar die Bewegung der Elektronen in Atomen oder Molekülen bestimmen.

### Steuerung schnellster Bewegungen

Dieselben kurzen Laserblitze, die durch „Kurzzeitbelichtung“ den Einblick in schnellste Bewegungsabläufe ermöglichen, erlauben es auch in diese Abläufe einzugreifen und