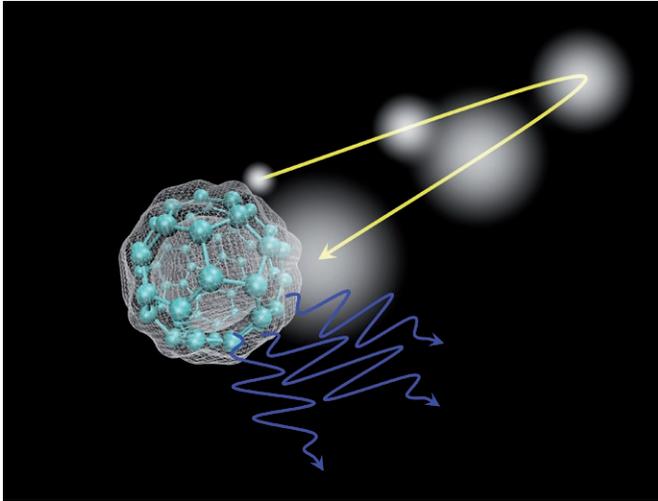


Kollektive Effekte

In größeren Ensembles nahe benachbarter Atome in starken Laserfeldern spielen kollektive Effekte eine Rolle, so z.B. wenn bei der Rekollision mit einem C_{60} -Fulleren dessen Elektronenhülle als ganzes zu Schwingungen angeregt wird. Dies wiederum beeinflusst die emittierte Strahlung, welche verwertbare Information über die innere Struktur eines solchen komplexen Objektes enthält.



In einem intensiven Infrarot-Laserpuls wird ein Teil der Elektronenhülle eines C_{60} -Fullerens freigesetzt und als „Wellenpaket“ (dargestellt durch die hellgraue Wolke) vom Laserfeld hin- und hergetrieben. Bei der Rekollision mit dem Fulleren werden sowohl dessen übrige Elektronen zu Schwingungen angeregt als auch hohe Harmonische des Laserlichts als kurzwellige Lichtpulse emittiert (blaue Wellenzüge).

Vielteilcheneffekte können dazu führen, dass die Intensität des Fluoreszenzlichts proportional zum Quadrat der Anzahl (statt direkt zur Anzahl) von Atomen ist oder dass Metallcluster sehr effizient infrarotes Laserlicht absorbieren. Cluster aus z. B. 1000 bis 100 000 Argonatomen werden von intensiven Lasern innerhalb von wenigen Femtosekunden in ein so genanntes Nanoplasma verwandelt, also Elektronen von den Atomen abgetrennt. Harmonische der Laserfrequenz werden darin resonant verstärkt, wenn deren Frequenz die Eigenfrequenz des Nanoplasmas trifft. Aufwendige „particle in cell“-Simulationen modellieren die komplizierte Expansionsdynamik und die Umwandlung von Laser- in Teilchenenergie.

Max-Planck-Institut für Kernphysik

Hausanschrift:
Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

Postanschrift:
Postfach 103980
69029 Heidelberg

Tel: 06221 5160
Fax: 06221 516601

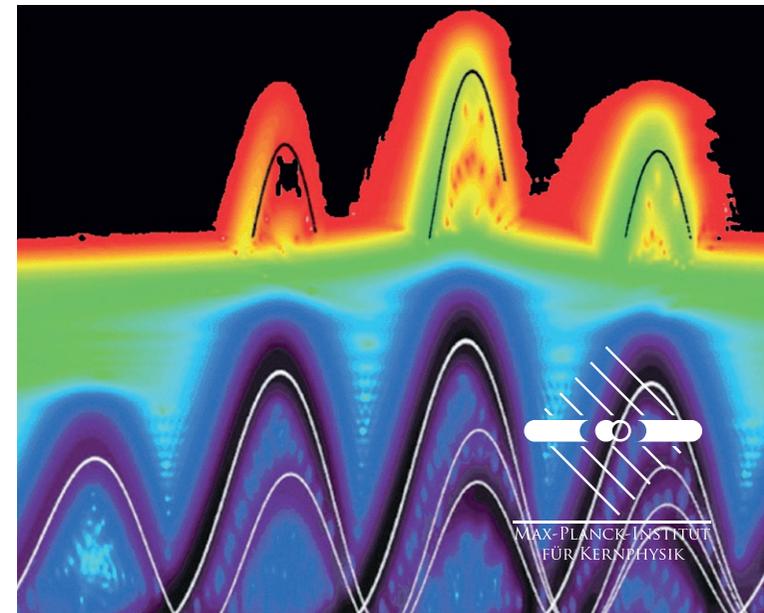
E-Mail: info@mpi-hd.mpg.de
Internet: <http://www.mpi-hd.mpg.de>

Ansprechpartner:
Prof. Dr. Christoph H. Keitel
Tel: 06221 516150
E-Mail: christoph.keitel@mpi-hd.mpg.de



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Theorie kollektiver und relativistischer Quantendynamik in starken Laserfeldern



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR KERNPHYSIK

Theorie kollektiver und relativistischer Quantendynamik in starken Laserfeldern

Bei der Interaktion von intensiven Laserfeldern mit Materie spielt das Verhalten der Elektronen eine bedeutende Rolle, da diese als leichte geladene Teilchen stark an das äußere Feld koppeln und auf diese Weise effizient aus diesem Energie aufnehmen. Sie können dabei so schnell werden, dass die Effekte der speziellen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielen. Dies erfordert es, Lösungen der zeitabhängigen Schrödinger- und Dirac-Gleichungen zu suchen, den Grundgleichungen der nichtrelativistischen bzw. relativistischen Quantenmechanik.

Rekollision

Der einfachste Fall der klassischen Bewegung eines geladenen Teilchens in einem linear polarisierten Laserfeld ist am Beispiel der Feldionisation eines Heliumatoms in nebenstehender Abbildung illustriert: Die beiden Elektronen sind anfänglich im elektrostatischen Coulomb-Potential gebunden, das in der hier auf zwei Raumdimensionen reduzierten Darstellung als „Trichter“ in einer ebenen Potentialfläche erscheint. Das elektrische Feld des Lasers (angedeutet durch die gelbe Sinuslinie) bewirkt eine Kippung der Ebene, welche mit der Laserfrequenz hin und her schwankt. Ein durch Feldionisation kurz nach dem Maximum des Feldes aus dem Atom gelöstes Elektron wird durch das Laserfeld zunächst von diesem weg und dann wieder zurück getrieben und kann dort z. B. weitere Elektronen herausschlagen. Ein anschauliches Maß für die Energie des Elektrons im Laserfeld ist die so genannte „ponderomotive Energie“ U_p , die der mittleren Bewegungsenergie des hin und her oszillierenden Teilchens entspricht. Die maximale Energie bei der Rekollision beträgt $3,17 U_p$. Bei sehr hohen Laserintensitäten erreicht das Elektron relativistische Geschwindigkeiten, wird aber durch die Wechselwirkung mit der magnetischen Komponente des Laserfeldes, den „Lichtdruck“, vom Atom weg getrieben, was die Rekollision verhindert. Die Theorie erlaubt nun, verschiedene Verfahren zu modellieren, welche diesen Effekt umgehen. So können Kollisionen bei weit höheren Energien erreicht werden, wodurch z. B. neue Teilchen entstehen können.

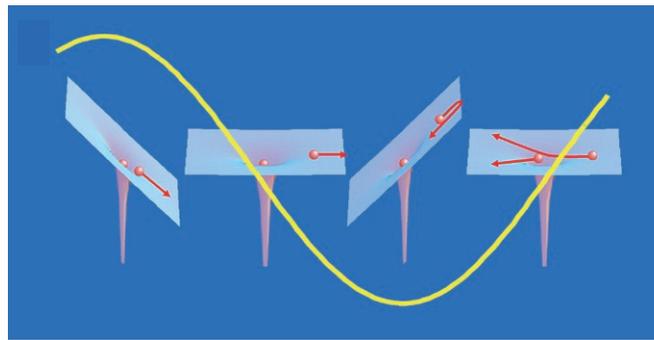


Illustration der Rekollision eines Elektrons in einem linear polarisierten Laserfeld. Dargestellt ist das Potential in zwei Dimensionen als durch das elektrische Feld des Lasers periodisch geneigte Fläche mit dem trichterförmigen Coulomb-Anteil des Kernfeldes. Ein durch Feldionisation freigesetztes Elektron wird vom Laserfeld hin und her getrieben und kann bei der Rekollision mit dem Mutterion ein weiteres Elektron herausschlagen.

Höhere Harmonische und doppelte Rekombination

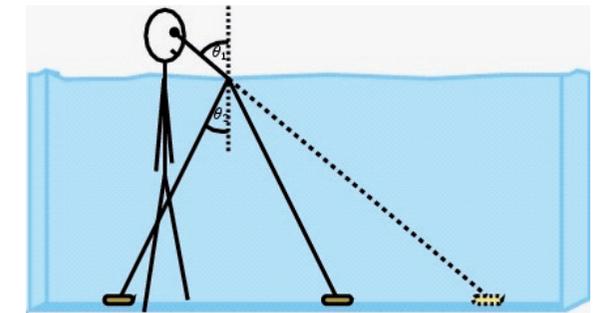
Ein Elektron kann bei der Rekollision seine Energie in Form kurzwelliger Strahlung abgeben, wenn es abgebremst wird oder im Extremfall mit dem Mutterion rekombiniert. Da der Elektronenbewegung die Oszillation des treibenden Feldes aufgeprägt ist, wird die Strahlung in Form von höheren Harmonischen der Laserfrequenz abgegeben. Höhere Harmonische finden inzwischen vielseitige Anwendung, so zur Erzeugung von kohärenter UV-Strahlung mit ultrakurzen Pulslängen bis in den Bereich von Attosekunden. Die maximale Energie der Strahlung ist für ein einzelnes Elektron durch die Summe aus Bewegungsenergie und Bindungsenergie (Ionisationspotential I_p) des Elektrons gegeben: $E_{max} = I_p + 3,17 U_p$. Werden zwei Elektronen nacheinander durch Feldionisation freigesetzt und dann simultan vom Ion eingefangen, können höhere Harmonische bis zu $2 \cdot 3,17 U_p + I_p(1) + I_p(2)$ erzeugt werden, wobei $I_p(1)$ und $I_p(2)$ den beiden Ionisationsstufen entsprechen. Die Abbildung auf der Titelseite zeigt das mit einem ab-initio-Verfahren berechnete Spektrum der emittierten Strahlung über zwei Laserzyklen in der Mitte eines Laserpulses mit 800 nm Wellenlänge. Zu sehen ist die erwartete Strahlung aus der Rekombination eines einzelnen Elektrons sowie – wenn auch deutlich schwächer (die Farbskala der Intensität ist logarithmisch) – die energetischere Strahlung aus der Zwei-Elektronen-Rekombination. Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung mit dem einfachen klassischen Modell (schwarze und weiße Linien).

Starke Beschleunigung durch intensive Laserpulse

Nach kürzlich durchgeführten theoretischen Berechnungen ermöglichen linear oder radial polarisierte, eng fokussierte und dadurch extrem starke Laserstrahlen die direkte Beschleunigung von leichten Atomkernen über mikrometerkleine Distanzen auf Energien, die Potenzial für medizinische Anwendungen aufweisen.

Quanteninterferenzen

Die optischen Eigenschaften eines Ensembles von Atomen lassen sich stark modifizieren, indem man diese mäßig intensiven Laserfeldern aussetzt, die durch resonante Kopplungen Quanten-Interferenzeffekte bewirken. Dazu gehören elektromagnetisch induzierte Transparenz, Lasen ohne die normalerweise erforderliche Besetzungsinversion der beteiligten Quantenzustände oder Kontrolle des Brechungsindex. In einem dichten Gas von metastabilen Neonatomen ist es theoretisch möglich, durch geeignete Laserfelder einen negativen Brechungsindex zu erzeugen. Es werden Bedingungen vorhergesagt, unter denen der abtastende infrarote Laserstrahl dabei nicht absorbiert, sondern im Gegenteil verstärkt wird.



neg. Wasser pos. Wasser virtuelles Bild

Illustration der negativen Brechung im Vergleich zur normalen positiven Brechung. Der Betrachter „sieht“ das virtuelle Bild.

Interferenzen ermöglichen auch, in der optischen Lithographie Strukturen zu erzeugen, die wesentlich kleiner als die Laserwellenlänge sind. Wie die Berechnungen zeigen, erzeugen phasenverschobene stehende Wellen mittels resonanter Atom-Laserfeld-Wechselwirkungen im Photolack ein Muster mit hohem Kontrast. Dies erfordert keine schwierig zu realisierende Mehrphotonen-Absorption und damit auch keine besonders hohen Laserintensitäten.