

■ Kollisionen im Terahertztakt

Intensive Laserfelder können Elektronen aus einem Atom herausreißen und sie darauf zurückschmettern. Mit intensiver Terahertz-Strahlung lässt sich diese Idee auf Exzitonen übertragen.

Es ist interessant zu beobachten, wie Kinder die Welt erforschen. Sie stoßen Murmeln aneinander und verfolgen gespannt, wie sie voneinander abprallen. Lassen sich die Kugeln gar zerbrechen? Derselben Idee folgend suchen Wissenschaftler nach neuen Phänomenen in der Quantenphysik, indem sie Atome oder Elementarteilchen kollidieren lassen. Intensive Laser haben sich dabei als hilfreiches Werkzeug erwiesen, da ihr oszillierendes elektrisches Feld einem Atom Elektronen entreißen kann. Das Elektron entkommt zunächst aufgrund des quantenmechanischen Tunneffekts und wird rasch vom Laserfeld beschleunigt. Sobald dessen Vorzeichen wechselt, wird das Elektron jedoch mit hoher Geschwindigkeit auf den Ausgangspunkt zurück beschleunigt, wo es mit dem Ionenrumpf kollidiert. Bei dieser wiederholten „Rekollision“ entstehen energiereiche Photonen bei Vielfachen der Laserfrequenz, so genannte „höhere Harmonische“ [1]. Diese tragen Schlüsselinformationen über das Elektron und das Atom. Einer dreiköpfigen Arbeitsgruppe an den Universitäten in Santa Barbara und Hongkong ist es nun gelungen, dieses Konzept auf eine faszinierende neue Klasse von Rekollisionen bei niedriger Energie zu übertragen [2].

Anstelle eines nahinfraroten Laserfeldes, das Atome ionisieren kann, haben die Wissenschaftler das starke THz-Feld eines Freielektronen-Lasers verwendet, um damit die elementaren Bestandteile eines Exzitons in einem Halbleiter miteinander kollidieren zu lassen [2]. Ein Exziton ist ein Quasiteilchen, das entstehen kann, wenn ein Halbleiter ein Photon absorbiert und dieses ein Elektron von dem gefüllten Valenzband in ein leeres Leitungsband hebt. Zurück bleibt ein positiv geladenes Loch [3]. Bei tiefen Temperaturen (normalerweise unterhalb von 10 Kelvin) werden Elektron und Loch durch die Cou-

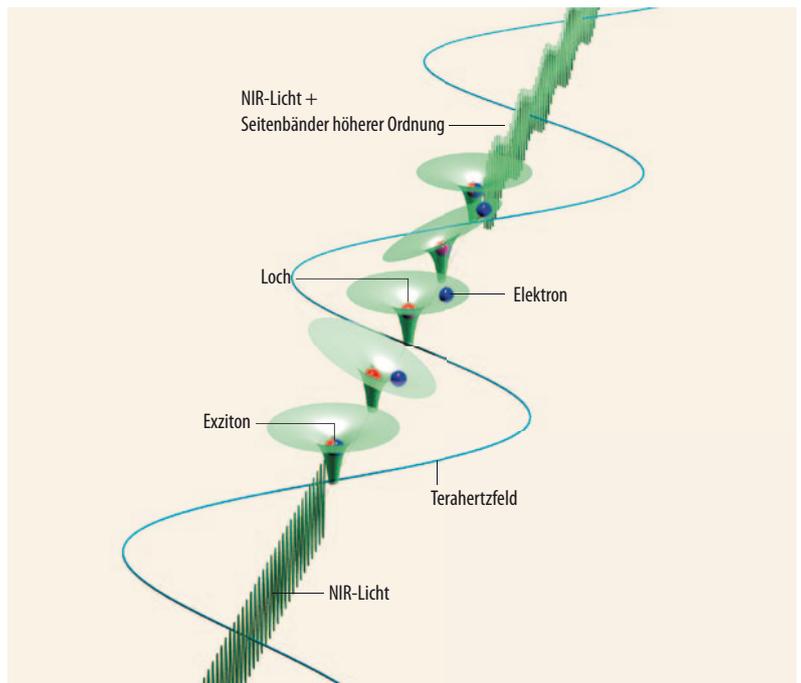


Abb. 1 Prinzip der Erzeugung von Seitenbändern höherer Ordnung: Exzitonen entstehen durch Beleuchtung eines Halbleiters (nicht gezeigt) mit nahinfrarotem Licht (NIR-Licht). Ein intensives THz-Feld dient dazu, den Potentialtopf zu verkippen, der durch die elektrostatische Anziehung zwischen Elektron und

Loch entsteht, Elektronen aus den gebundenen Zuständen herauszuziehen und anschließend auf das Loch hin zurück zu beschleunigen. Die wiederholte Rekollision von Elektronen und Löchern erzeugt neue Frequenzen, also Seitenbänder, die zusammen mit dem NIR-Licht den Halbleiter durchlaufen.

lomb-Kraft aneinander gebunden, ganz analog zu Elektron und Proton im Wasserstoffatom. Allerdings ist die Bindungsenergie in Exzitonen viel kleiner als in Atomen und beträgt typischerweise einige Millielektronenvolt [4]. Daher ist feldinduzierte Ionisation bei niedrigen Frequenzen zu erwarten – in dem schwer zugänglichen THz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen Mikrowellen und Infrarot.

In ihrem Experiment erzeugten Zaks et al. zunächst mit nahinfrarotem Laserlicht Exzitonen in Quantentrögen aus InGaAs/AlGaAs [2]. Intensive THz-Strahlung mit Feldstärken von 11,5 kV/cm induzierte Rekollisionen zwischen den Elektronen und den Löchern, aus denen die Exzitonen zusammengesetzt sind. Die Photonenenergie $\hbar \omega_{\text{THZ}}$ lag dabei deutlich unterhalb der Exziton-Bindungsenergie, analog zur Erzeugung höherer Harmonischer

in einem Atomgas. Anstatt jedoch Strahlung bei ganzzahligen Vielfachen der Frequenz des treibenden THz-Feldes zu detektieren, also höhere Harmonische, fanden die Autoren eine alternative Signatur von Elektron-Loch-Rekollisionen: Seitenband-Erzeugung höherer Ordnung [5].

In diesem Prozess entsteht Strahlung mit neuen Frequenzen (Seitenbänder), die zusammen mit dem NIR-Licht, das die Exzitonen erzeugt, durch den Halbleiter propagiert (Abb. 1). Die Seitenbandfrequenzen hängen von den Frequenzen des treibenden THz-Feldes sowie des NIR-Feldes ab: $\hbar \omega_{\text{Seitenband}} = \hbar \omega_{\text{NIR}} + n \hbar \omega_{\text{THZ}}$. n ist dabei eine gerade Zahl, welche die Ordnung des Seitenbandes bezeichnet [5, 6]. Zaks et al. wiesen eine beeindruckende Zahl von Spektrallinien bis zur 18. Ordnung nach. Besonders bemerkenswert ist, dass die Intensität der Seitenbän-

der nur langsam mit der Ordnung abnimmt. Ähnliche plateauartige Spektren treten auch bei der Erzeugung hoher Harmonischer auf. Ursache dort sind Interferenzen zwischen verschiedenen Trajektorien der Elektronen, die vom Atom weggerissen und beschleunigt werden.

Um zu zeigen, dass die nachgewiesenen Seitenbänder tatsächlich von Rekollisionen herrühren, variierten Zaks und Kollegen die Polarisation des THz-Feldes mit dem Ergebnis, dass die Seitenbänder bei linearer Polarisation am stärksten sind, während sie bei zirkularer Polarisation verschwinden. Dies legt auch eine klassische Analogie nahe: Bei linearer Polarisation wird dem Elektron eine Oszillation mit großer Amplitude aufgezwungen, bei der es wiederholt mit dem Loch kollidiert. Im Gegensatz dazu zerrt ein zirkular polarisiertes Feld das Elektron in ständig wechselnde Richtungen, ohne dass es je zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt.

Unter den Bedingungen dieses Experiments sollte man die Analogie zwischen Exziton und Atom jedoch nicht allzu selbstverständlich nehmen. Immerhin sind Exzitonen keine konventionellen Teilchen, sondern vielmehr transiente elementare Anregungen. So seltsam es auch klingen mag, die Wissenschaftler kollidieren hier

Elementaranregungen miteinander. Da Festkörper typischerweise aus 10^{23} Elektronen und Ionen pro Kubikzentimeter bestehen, die alle miteinander wechselwirken, beeinflussen Exzitonen einander und werden von anderen elementaren Anregungen beeinflusst [3, 7]. Solche Wechselwirkungen dürften sich auch auf die vorliegenden Ergebnisse ausgewirkt haben. Die Streuung der schnellsten Elektronen an benachbarten Exzitonen und Gitterschwingungen im Halbleiter begrenzte die Zahl der Seitenbänder bereits.

Die experimentelle Beobachtung von Elektron-Loch-Rekollisionen ist aus verschiedenen Gründen wichtig: Zunächst prägen die Seitenbänder höherer Ordnung dem NIR-Feld eine schnelle Modulation auf. Falls sich dieses Konzept mit modernen Transistorverstärkern kombinieren lässt, die als intensive, auf Platinen integrierbare THz-Quellen fungieren, wären Modulatoren mit Schaltraten von mehreren Terabit pro Sekunde für superschnelle optische Kommunikationssysteme im Prinzip denkbar.

Mindestens ebenso spannend dürfte die Möglichkeit sein, die Physik atomarer Rekollisionen nun auf eine Vielzahl wichtiger Quasiteilchen sowie auf neue Materialien auszudehnen. Schließlich erreichen moderne höchstintensive THz-

Quellen Amplituden weit jenseits von 1 MV/cm – konzentriert in ultrakurzen Blitzen [8]. Wie sich Exzitonen unter solch extremen Bedingungen verhalten, ist noch nicht ausgemacht. Insbesondere könnten ultraschnelle elektro-optische Detektoren in der Lage sein, höhere harmonische Strahlung direkt und mit einer Zeitauflösung zu betrachten, die selbst besser als eine einzelne Schwingung des Strahlungsfeldes ist. Werden es solche Detektoren ermöglichen, Teilchenkollisionen in Zeitlupe aufzunehmen? Das neue Experiment hat den Boden bereitet, um diese und viele weitere spannende Fragen der Vielteilchen- und Festkörperphysik anzugehen – an dieser Stelle ist erneut der Entdeckergeist der Wissenschaftler gefragt.^{#)}

Rupert Huber

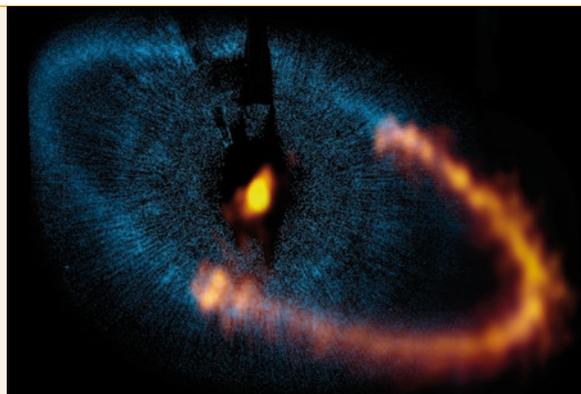
- [1] P. B. Corkum und F. Krausz, *Nature Phys.* **3**, 381 (2007)
- [2] B. Zaks et al., *Nature* **483**, 580 (2012)
- [3] M. Kira et al., *Nature Mat.* **5**, 523 (2006)
- [4] D. Golde et al., *Phys. Rev. B* **77**, 07330 (2008)
- [5] J.-Y. Yan, *Phys. Rev. B* **78**, 075204 (2008)
- [6] J. Kono et al., *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1758 (1997); M. Wagner et al., *Appl. Phys. Lett.* **94**, 241105 (2009)
- [7] V. M. Axt und T. Kuhn, *Rep. Prog. Phys.* **67**, 433 (2004)
- [8] J. Hebling et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, B6 (2008); A. Sell et al., *Opt. Lett.* **33**, 2767 (2008)

#) Dieser Text ist eine bearbeitete Übersetzung von „Terahertz collisions“, *Nature* **483**, 545 (2012)

SCHARF BEOBACHTET

Noch befindet sich das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) im Aufbau, und doch hat es mit nur einem Viertel der vorgesehenen Antennen bereits einen Durchbruch beim Verständnis des nahegelegenen Planetensystems um den Stern Fomalhaut ermöglicht. Die Astronomen stellten fest, dass Planeten, die den Stern Fomalhaut umkreisen, deutlich kleiner sind als bisher angenommen.

Diese Entdeckung beruht auf außergewöhnlich scharfen ALMA-Aufnahmen von Fomalhaut, die zeigen, dass der innere und der äußere Rand der Staubscheibe scharf begrenzt sind. Die Schwerkraft zweier Planeten hält die Staubteilchen in der Scheibe, wobei ein Planet den Stern innerhalb des Ringes, der andere außerhalb umläuft. ALMA beobachtet langwelliges Licht und kann Staubpartikel mit einem Durchmesser von etwa einem Millimeter nachweisen, die von der Strahlung des Sterns unbeeinflusst bleiben. Dies macht die scharfen Ränder und die ringförmige Struktur der Scheibe sichtbar, die genaue Rückschlüsse auf den Einfluss der Schwerkraft der zwei Planeten erlauben. Demnach misst der Ring vom inneren bis zum äußeren Rand etwa das 16-Fache des Abstands Erde-Sonne (Astronomische Einheit, AE), seine



ALMA beobachtet einen Ring (orange) um den hellen Stern Fomalhaut, wo Hubble kaum Struktur auflöst (blaue Punkte).

Dicke beträgt nur ein Siebtel davon. Der Ring befindet sich in einer Entfernung von etwa 140 AE. Das Ringsystem hat also viel größere Ausmaße als unser Sonnensystem. (ESO) A. C. Boley et al., *ApJ* **750**, L21 (2012)

Bild: ALMA (ESO/NAO/J/NRAO)
Visible light image: the NASA/ESA Hubble Space Telescope