

- and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory, Springer, Berlin, 2. Aufl. (2003)
- [4] W. T. Strunz, G. Alber und F. Haahe, Physik Journal, Nov. 2002, S. 47
- [5] M. Arndt et al., Nature **401**, 680 (1999)
- [6] L. Hacker Müller et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 090408 (2003)
- [7] T. Pfau et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 1223 (1994); M. S. Chapman et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 3783 (1995); D. A. Kokorowski et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 2191 (2001)

## Der Schein kann trügen

**Kann das Lumineszenz-Spektrum eines Halbleiters die charakteristischen Eigenschaften eines Exzitons aufweisen, ohne dass diese Anregungen existieren?**

In der Halbleiterphysik wird seit vielen Jahren die Dynamik von so genannten Exzitonen untersucht, dem Analogon zum Wasserstoffatom im Halbleiter. In einem einfachen Bild ist das Exziton ein durch die Coulomb-Wechselwirkung gebundener Zustand aus einem negativ geladenen Elektron im Leitungsband und einem positiv geladenen Loch im Valenzband. Im Gegensatz zum Wasserstoff-Atom ist die Wirklichkeit in einem Festkörper aber ungleich komplizierter, da man es de facto stets mit dem Vielteilchen-System aller wechselwirkenden Elektronen zu tun hat.

Zur experimentellen Untersuchung von Exzitonen kommen vor allem zwei Methoden zum Einsatz: zum einen die zeitaufgelöste Anrege-

Abfrage-Spektroskopie, bei der ein ultrakurzer Laserpuls Elektronen und Löcher anregt. Anschließend untersucht man mit einem zeitverzögerten Abfragestrahl die optische Absorption als Funktion der Zeitverzögerung und erhält damit direkte Informationen über die Ladungsträgerbesetzung. Zum anderen bietet sich die zeitaufgelöste Lumineszenz an, welche die zeitaufgelöste Lichtemission nach einem ultrakurzen Anregepuls analysiert. Mehr oder weniger stillschweigend wurde dabei bislang angenommen, dass sowohl eine Absorption bei der Energie des Exzitons als auch die Emission eines Photons dieser Energie die vorherige Existenz eines Exzitons voraussetzt.

Dieses Paradigma bekam vor einigen Jahren Risse, als die Theoretikergruppe um Stephan Koch in Marburg die Idee aufbrachte, dass Lumineszenz bei der Energie des Exzitons auch von Elektron-Loch-Paaren herrühren könnte, die zwar Coulomb-korreliert sind, aber kein gebundenes Exziton bilden [1]. Die Behauptung, dass die Lumineszenz auch von einem Elektron-Loch-Plasma herrühren könne, wurde unter Halbleiterphysikern sehr kontrovers diskutiert.

Robert Kaindl und Mitarbeiter in Berkeley führten daraufhin ein Pionierexperiment durch, das zeitaufgelöste THz-Spektroskopie benutzte, um mit Hilfe der 1s-2p-Absorption (die im THz-Bereich liegt) herauszufinden, ob Exzitonen vorhanden sind. Zur Überraschung vieler legte ihr Ergebnis nahe, dass Exzitonen einige hundert Pikosekunden bis

## KURZGEFASST...

### ■ Auf Attogramm genau

Harold Craighead und seinen Mitarbeitern an der Cornell University ist es gelungen, kleinste Partikel mit einer Genauigkeit von Attogramm ( $10^{-18}$  g) zu messen. Sie bestimmten hierzu mithilfe eines Lasers die Oszillationsperiode eines freitragenden  $4 \mu\text{m}$  langen und  $500 \text{ nm}$  breiten Arms (Cantilever) aus Silizium, der lithografisch hergestellt wurde. Wenn ein Partikel auf dem Arm absorbiert wird, ändert sich die Oszillationsperiode messbar. Das Ziel besteht u. a. darin, einzelne Viren zu detektieren und zu identifizieren. (R. Illec et al., erscheint in J. Appl. Phys.)

### ■ Beschleunigung bestätigt

Beobachtungen von Typ-Ia-Supernovae durch das Hubble Space Telescope haben frühere Ergebnisse untermauert, dass sich das Universum derzeit beschleunigt ausdehnt. Zugleich liefern sie Hinweise auf eine frühere Epoche, in der die Ausdehnung

des Universums gebremst verlaufen ist.

Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese der „dunklen Energie“, die demnach für 71 Prozent des Energieinhalts des Universums verantwortlich ist.

(A. G. Riess et al., arxiv.org/astro-ph/0402512, erscheint in Astrophys. J.)

### ■ Stoppuhr für Elektronen

Im Bohrschen Atommodell benötigt das Elektron etwa 150 Attosekunden, um das Proton zu „umrunden“. Physikern aus Bielefeld, Garching und Wien ist es kürzlich gelungen, einzelne nur 250 Attosekunden kurze Lichtpulse im XUV-Spektrum zu erzeugen und damit Atome anzuregen. Mithilfe einer neuen Messtechnik, die auf dem bekannten Konzept der Schmierbildkamera beruht, ist es ihnen gelungen, die Elektronenbewegung tief im Inneren der Atome mit einer Auflösung in der Größenordnung von 150 as zu verfolgen.

(R. Kienberger et al., Nature 427, 817 (2004))

Nanosekunden Entstehungszeit benötigen [2], während in zeitaufgelösten Lumineszenz-Messungen [4] Exzitonresonanzen bereits 100 bis 300 fs nach der Kontinuumsanregung vorhanden waren. Andere Experimente lieferten auch Hinweise auf ein reines Elektron-Loch-Plasma [3].

Ein Experiment von Sangam Chatterjee aus der Gruppe von Hyatt Gibbs in Arizona hat nun eine neue Antwort auf die Frage vorgeschlagen: „Ab wann existieren Exzitonen?“ [5]. Dazu wurden die Methoden der zeitaufgelösten Anrege-Abfrage-Spektroskopie und der zeitaufgelösten Lumineszenzspektroskopie verbunden. Die erste Methode erlaubt es, die absorbierte Lichtmenge und somit die Ladungsträgerdichte sehr genau zu bestimmen; über die zweite Methode erhält man die Ladungsträgertemperatur. Das Experiment wurde in InGaAs bei 4 K und bei 50 K durchgeführt, und die Anregungsdichte wurde dabei über mehrere Größenordnungen variiert. Wie erwartet, zeigt sich in der Lumineszenz eine charakteristische Resonanzstruktur bei der Exzitonenergie. Die Frage, ob diese Struktur auf Exzitonen oder auf ein Elektron-Loch-Plasma zurückgeht, lässt sich nur durch einen Vergleich mit der Theorie beantworten. Die systematische und detaillierte Berücksichtigung aller Beiträge zur Lumineszenz zeigt, dass die Resonanzen, bei denen Lumineszenz auftritt, durch die Eigenenergien des Coulomb-wechselwirkenden Systems gegeben sind. Die Quellen der Lumineszenz sind daher sowohl das Elektron-Loch-Plasma als auch Exzitonen.

Gebundene (Wannier-) Exzitonen befinden sich in wasserstoffartigen Zuständen (1s, 2s, 2p, ...) mit Energien, die um die Exzitonbindungsenergie unter die Bandkante abgesenkt sind. Nicht-gebundene Elektron-Loch-Paare besetzen hingegen Zustände mit Energien oberhalb der Bandkante. Dennoch wechselwirken sie miteinander aufgrund der langreichweitigen Coulomb-Wechselwirkung. Wenn man nur die Energie (Einteilchenenergie) dieser Elektronen und Löcher ansieht, kann man nicht verstehen, warum sie an der Exzitonenergie zur Lumineszenz beitragen können. Vereinfachend kann man sagen, dass bei der Emission die Überschussenergie an das restliche Plasma abgegeben wird, das dadurch „aufgeheizt“ wird.

Diese Zusatzenergie wird von dem Plasma aber per Phononenkopplung an das Gitter abgegeben.

Die theoretische Betrachtung erlaubt es, die dichte- und temperaturabhängigen Messungen konsistent zu beschreiben. Die wesentlichen Erkenntnisse dabei sind, dass die Photolumineszenz an der Exzitonenergie bei niedrigen Dichten und niedrigen Temperaturen in der Tat durch die Rekombination von optisch aktiven Exzitonen dominiert wird, bei hohen Dichten und bei hoher Temperatur aber durch Plasma-Rekombination. Das Verhältnis von optisch aktiven zu optisch inaktiven Exzitonen und der Anteil der exzitonischen Lumineszenz sind dabei Fitparameter in der Theorie.

Nur ein noch aufwändigeres Experiment wäre wohl in der Lage, die Frage nach der Ursache der Photolumineszenz an der Exzitonenergie experimentell endgültig zu beantworten: dazu sollten die Methoden von Chatterjee und Kaindl kombiniert werden. Man müsste gleichzeitig bei ein und derselben Probe unter identischen Bedingungen zeitaufgelöste Anrege-Abfrage-, Lumineszenz-, und THz-Spektroskopie durchführen, und das für verschiedene Temperaturen und Anregungsdichten. Die Unsicherheit beim jetzigen Vergleich zwischen Theorie und Experiment liegt nämlich im Verhältnis von nicht-strahlenden und strahlenden Exzitonen sowie den Oszillator-

stärken der strahlenden Exzitonen. Da die THz-Spektroskopie in der Absorption sowohl dunkle als auch strahlende Exzitonen nachweist, ließe sich durch den Vergleich mit der Lumineszenzspektroskopie, die nur strahlende Exzitonen „sieht“, der Anteil der dunklen Exzitonen simultan messen und die noch vorhandene Unsicherheit ausräumen.

Weiterhin könnte ein Vergleich der bisherigen Experimente in III-V-Halbleitern mit zukünftigen in II-VI-Halbleitern (z. B. in ZnSe, Cu<sub>2</sub>O), in denen die Exzitonbindungsenergie größer und die Phononenanpassung stärker sind, Hinweise darauf geben, ob die Dynamik der Exzitenbildung und somit die emittierte Strahlung stark vom gewählten System abhängen. Hinweise darauf [7] deuten an, dass die Diskussion spannend bleiben wird, mit Leidenschaft geführt wird sie allemal.

HARALD GIESSEN

- [1] M. Kira et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 3263 (1998)
- [2] R. Kaindl et al, Nature **423**, 734 (2003)
- [3] R. Chari et al., Proceedings QELS-Konferenz 2003, Paper QPDThA8
- [4] G. R. Hayes et al., phys. stat. sol. (a) **190**, 3263 (2002)
- [5] S. Chatterjee et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 067402 (2004)
- [6] R. J. Elliott, Phys. Rev. **108**, 1384 (1957)
- [7] M. Umlauff und H. Kalt, Phys. Rev. B **57**, 1390 (1998)

Prof. Dr. Harald Giessen, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstraße 8, 53115 Bonn

## Ein Schmetterling wird dreißig

Während eines Forschungsaufenthalts an der Universität Regensburg berechnete Douglas Hofstadter 1974/75

das Energiespektrum von Elektronen, die sich in einem periodischen Kristallpotential sowie einem homogenen Magnetfeld bewegen. Mit dem Ergebnis, das aufgrund der Ähnlichkeit mit einem

Schmetterling fortan als Hofstadter-Butterfly bekannt wurde, führte Hofstadter die Begriffe Selbstähnlichkeit und Fraktale in der Festkörperphysik ein. Ein program-

mierbarer Tischrechner, genannt Rumpelstilzchen, unterstützte ihn bei den langwierigen Berechnungen und spinn

so gewissermaßen über Nacht Gold. Am Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte der Universität Regensburg wurde nun eine Broschüre zur Geschichte des Schmetterlings mit u. a.

Beiträgen von Hofstadter veröffentlicht, die über [broschuere@physikgeschichte.org](mailto:broschuere@physikgeschichte.org) bezogen werden kann. Weitere Infos finden sich unter <http://butterfly.physikgeschichte.org>.

