

Bromid und Iodid, vorschlagen [8].

Neueste, mit Synchrotronstrahlung durchgeführte Messungen der Röntgenreflektivität von NaI-Lösungen widersprechen allerdings der theoretisch vorhergesagten Anreicherung von Iodid-Ionen an der Wasseroberfläche. Die Messungen deuten sogar eher auf eine Dichteabsenkung hin. Dieser noch unverstandene Effekt wird derzeit in der DFG-Forschergruppe FOR 436¹⁾ von Metin Tolan detailliert untersucht.

DIETMAR PASCHEK

- [1] P. Ball, H₂O – Biographie des Wassers. Piper Verlag, München (2001)
- [2] I. Brovchenko et al., J. Chem. Phys. **118**, 9473 (2003)
- [3] D. Marx, Science **303**, 634 (2004)
- [4] E. A. Raymond et al., J. Phys. Chem. **B 107**, 546 (2003)
- [5] K. R. Wilson et al., J. Phys. Cond. Matter **14**, L221 (2002)
- [6] I.-F. Kuo und C. J. Mundy, Science **303**, 658 (2004)
- [7] K. R. Wilson et al., J. Chem. Phys. **117**, 7738 (2002)
- [8] P. Jungwirth und D. J. Tobias, J. Phys. Chem. **B 105**, 10468 (2001)

Wo beginnt die Quantenwelt?

Neue Experimente testen die Vorhersagen der Dekohärenztheorie an großen Molekülen und beleuchten so die Debatte um die Grenze der Quantenwelt neu.

Eines der grundlegenden und charakteristischen Phänomene der Quantentheorie ist die Interferenz von Materie, die sich z. B. beim Durchgang eines Elektronenstrahls durch einen Doppelspalt oder ein Interferometer zeigt. An makroskopischen Objekten unseres Alltags, die viel mehr innere Freiheitsgrade und eine ungleich große Masse als Elektronen haben, lässt sich dieses von klassischen Wellen vertraute Phänomen allerdings nicht beobachten. Diese Objekte verhalten sich weitgehend konform mit den Gesetzen der klassischen Physik. Woher kommt dies? Gelten die Gesetze der Quantentheorie nur für den „Mikrokosmos“, während der „Makrokosmos“ von den Gesetzen der klassischen Physik beherrscht wird? Wenn eine solche dualistische Betrachtungsweise zutreffen sollte, wo liegt dann die Grenze

zwischen der klassischen Makrowelt und der quantenmechanischen Mikrowelt? In der Gruppe von Markus Arndt und Anton Zeilinger an der Universität Wien kürzlich durchgeführte Experimente zeigen, dass diese bisher nur theoretisch diskutierten Fragen zur Gültigkeit der Quantentheorie auch dem Experiment zugänglich sind [1, 2].

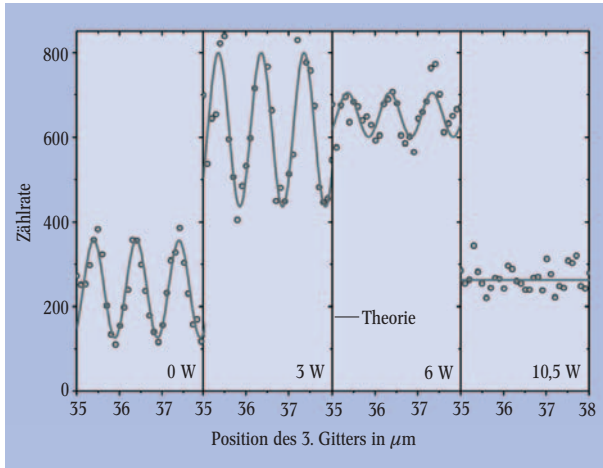
Auf theoretischer Seite gibt es verschiedene Ansätze, um das weitgehende Fehlen von makroskopischen quantenmechanischen Interferenzphänomenen zu begründen. Einige dieser Ansätze verlassen allerdings den traditionellen Rahmen der Quantentheorie, indem sie neue theoretische Grundelemente einführen, wie eine spontane Zerstörung des für die Quantentheorie charakteristischen linearen Superpositionsprinzips, das der Quanteninterferenz zugrunde liegt. Im Gegensatz dazu sieht die sog. Dekohärenztheorie die Ursache für die Reduktion von Quanteninterferenz, Dekohärenz genannt, in unkontrollierten Wechselwirkungen eines Quantensystems mit seiner Umgebung [3]. Dekohärenz tritt demnach auf, wenn sich zwei überlagerte

1) www.forschergruppe436.de

Dr. Dietmar Paschek
Physikalische Chemie,
Universität Dortmund,
Otto-Hahn-Str. 6, 44221
Dortmund

Quantenzustände aufgrund einer solchen Wechselwirkung und der daraus resultierenden Verschränkung mit der Umgebung im Prinzip allein durch Beobachtung der Umgebung unterscheiden lassen [4].

Die Wiener Experimente testen die theoretischen Vorhersagen der Dekohärenztheorie mit C_{70} -Molekülen, den bislang größten in diesem Zusammenhang untersuchten



Interferenzmuster von C_{70} -Molekülen nach Durchgang durch ein Talbot-Lau-Interferometer: Mit wachsender thermischer Anregung der inneren Vibrationsfreiheitsgrade (von links nach rechts) nimmt der Kontrast des Interferenzmusters konsistent mit der Dekohärenztheorie ab, da dadurch die Wahrscheinlichkeit für die Emission kurzwelliger Photonen zunimmt, welche die Quanteninterferenzen stören. Die Abhängigkeit der absoluten Zählrate von der thermischen Anregung ist eine Folge der Nachweismethode durch Ionisation und stimmt ebenfalls quantitativ mit der Dekohärenztheorie überein (aus [2]).

physikalischen Objekten. Diesen Experimenten war zunächst der Nachweis vorausgegangen, dass sich große Moleküle von ihrer Umgebung hinreichend isolieren lassen. Ein erster Durchbruch in dieser Richtung war die Beobachtung quantenmechanischer Interferenzphänomene bei C_{60} -Molekülen, den bis dahin massivsten molekularen Objekten [5]. In Fortsetzung dieser Experimente gelang es vor kurzem sogar, Quanteninterferenz bei noch größeren Biomolekülen und beim Molekül $C_{60}F_{48}$ mit 1632 amu¹⁾ zu beobachten [6]. Dass sich bei diesen Experimenten überhaupt Interferenz beobachten lässt, ist zunächst nicht selbstverständlich, da diese Moleküle eine große Anzahl innerer Freiheitsgrade besitzen, die in unkontrollierter Weise, ähnlich wie bei einem makroskopischen Objekt, thermisch angeregt sind. Die innere Energie entspricht bei diesen Experimenten einer Temperatur von ungefähr 1000 K. Dass quantenmechanische Interferenzphänomene dennoch beobachtet

wurden, ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die thermisch angeregten inneren Freiheitsgrade weitgehend entkoppelt waren von der Bewegung des Molekül-Schwerpunkts, dessen Dynamik somit wie bei einem strukturlosen Punktquant durch die Gesetze der Quantenmechanik bestimmt ist. Wenn dieses qualitative Bild zutrifft, dann sollte eine Kopplung der inneren Freiheitsgrade an den Schwerpunkt, z. B. durch die spontane Emission von Photonen, allmählich zum Verschwinden der Interferenz führen.

Dieser Dekohärenzmechanismus wurde nun in Wien mit C_{70} -Molekülen untersucht [2]. Im Gegensatz zu früheren Dekohärenzexperimenten [7] haben Hackermüller et al. ein Talbot-Lau-Interferometer zum effizienten Nachweis der Molekülinterferenzen benutzt. Dieses Interferometer nützt in geschickter Weise den von der Optik her bekannten Talbot-Effekt aus, dass nämlich bei der Beleuchtung eines periodischen Beugungsgitters mit Gitterperiode d durch Licht der Wellenlänge λ infolge von Interferenzeffekten im Abstand der Talbot-Länge $L_T = d^2/\lambda$ hinter dem Beugungsgitter ein Bild dieses Gitters mit eventuell vergrößerter Periode entsteht.

Wird die Interferenz jedoch gestört, so verringert sich der Kontrast dieses periodischen Bildes. Das im Experiment verwendete Talbot-Lau-Interferometer bestand aus drei identischen periodischen Beugungsgittern im Abstand der Talbot-Länge $L = d^2/\lambda_{dB} = 38$ cm. ($\lambda_{dB} = 2,6$ pm war die typische de-Broglie-Wellenlänge der Moleküle, $d = 991$ nm die Gitterperiode.) Dabei gab das mittlere Gitter den Ausschlag für das Entstehen des molekularen Interferenzmusters mit Periode d . Das erste Gitter diente lediglich zur Präparation eines periodisch modulierten, aber räumlich inkohärenten Molekülstrahls mit hinreichender Intensität. Vor dem Eintritt in dieses Interferometer wurde die innere Energie der C_{70} -Moleküle mittels eines Lasers kontrolliert. Hinter dem Interferometer wurde das statistisch entstehende Interferenzmuster als Funktion der transversal zum Molekülstrahl variierten Position des dritten Beugungsgitters aufgezeichnet. In sehr guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Dekohärenztheorie nahm dabei der Kontrast des Interferenzmusters mit wachsender Energie der angeregten inneren Freiheitsgrade ab (Abb.).

Mit wachsender Energie der inneren Anregung wächst nämlich auch die Wahrscheinlichkeit, dass kurzwellige Photonen emittiert werden, deren Wellenlängen kleiner sind als die Gitterperiodizität d . Der in einem solchen Emissionsprozess auf den Molekül-Schwerpunkt durch Rückstoß übertragene Impuls ist so groß, dass die Quanteninterferenzen im Talbot-Lau-Interferometer signifikant gestört werden. Gemäß der Dekohärenztheorie reduziert sich dadurch der Kontrast des Interferenzmusters [3, 4]. So zeigt die quantitativ sehr gut mit dem Experiment übereinstimmende, von Klaus Hornberger durchgeführte theoretische Beschreibung z. B., dass bei einer inneren Anregung, die einer Temperatur von 2500 K entspricht, insgesamt drei Photonen im sichtbaren Bereich emittiert werden. Hingegen ist die Wahrscheinlichkeit für die Emission von Photonen bei inneren Anregungsenergien von bis zu 1000 K vernachlässigbar klein, sodass sich, konsistent mit den durchgeführten Experimenten an C_{60} -Molekülen [5], bei diesen inneren Anregungen Quanteninterferenz nahezu ohne Kontrastverlust beobachten lässt.

Die in Wien durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Dekohärenz großer Moleküle zeigen in eindrucksvoller Weise, dass die Dekohärenztheorie imstande ist, auch subtile Details der Reduktion von Quanteninterferenz in Quantensystemen mit großer Masse (840 amu) und mit einer großen Zahl innerer Freiheitsgrade (204 Vibrationsfreiheitsgrade) in sehr guter Übereinstimmung mit dem Experiment zu beschreiben. Eine Grenze der Quantenwelt ist also noch nicht in Sicht. Die Wiener Gruppe hat sich deshalb das ehrgeizige Ziel gesetzt, diese Untersuchungen auf noch größere Systeme, z. B. Viren mit ungefähr 10^7 amu, auszudehnen. Eine Herausforderung wäre auch die theoretische Beschreibung solcher Experimente im Rahmen der Dekohärenztheorie. Ungleich größer wäre diese Herausforderung jedoch, wenn sich die Dekohärenztheorie dabei wider erwarten als inkonsistent mit dem Experiment herausstellen sollte.

GERNOT ALBER UND IGOR JEX

- [1] K. Hornberger et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 160401 (2003)
- [2] L. Hackermüller et al., Nature **427**, 711 (2004)
- [3] D. Giulini et al., Decoherence

1) 1 amu $\equiv 1,66054 \times 10^{-27}$ kg entspricht etwa einer Protonenmasse.

- 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 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))