

Dekohärenz großer Moleküle

Gernot Alber ⁽¹⁾ und Igor Jex ⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt

⁽²⁾ Fakultät für Kernphysik, Technische Universität Prag

March 13, 2004

Abstract

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

Eines der grundlegenden charakteristischen Quantenphänomene ist die Interferenz von Materie. So kann z.B. ein Elektronenstrahl beim Durchgang durch einen Doppelspalt oder ein Interferometer Interferenzphänomene statistischer Natur zeigen, ähnlich wie wir sie von Wellen von der klassischen Physik her kennen. An massiven physikalischen Objekten unseres Alltags, deren Anzahl von inneren Freiheitsgraden und Massen ungleich größer sind als bei Elektronen, ist dieses charakteristische Quantenphänomen allerdings üblicherweise nicht beobachtbar. Physikalische Objekte unseres Alltags 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 vor kurzem durchgeführte Experimente [1, 2] zeigen, dass diese die Gültigkeit der Quantentheorie betreffenden Problemstellungen, die bisher nur theoretischer Argumentation zugänglich waren, nunmehr auch experimentell hinterfragt werden können.

Auf theoretischer Seite gibt es verschiedene Ansätze, um das weitgehende Fehlen quantenmechanischer Interferenzphänomene im makroskopischen Bereich zu begründen. Einige dieser Ansätze [3] 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 verläßt der Ansatz der Dekohärenztheorie den traditionellen Rahmen der Quantentheorie nicht. Die Dekohärenztheorie sieht die Ursache für die Reduktion von Quanteninterferenz, Dekohärenz genannt, in unkontrollierten Wechselwirkungen eines Quantensystems mit seiner Umgebung [4]. Dekohärenz tritt dann auf, wenn zwei sich überlagernde Quantenzustände aufgrund einer solchen Wechselwirkung und der daraus resultierenden Verschränkung mit der Umgebung im Prinzip allein durch Beobachtung der Umgebung unterschieden werden können [5].

Die Wiener Experimente stellen experimentelle Tests für die theoretischen Vorhersagen der Dekohärenztheorie dar. Die dabei betrachteten C_{70} Moleküle sind die größten physikalischen Objekte, die in diesem Zusammenhang bisher untersucht wurden. Diesen Experimenten war zunächst die Demonstration vorausgegangen, dass große Moleküle von ihrer Umgebung hinreichend isoliert werden können. Ein erster Durchbruch in dieser

Richtung war die Beobachtung quantenmechanischer Interferenzphänomene bei C_{60} Molekülen, den bis dahin massivsten molekularen Objekten [6]. In Fortsetzung dieser Experimente konnte vor kurzem sogar Quanteninterferenz bei noch größeren Biomolekülen und beim Molekül $C_{60}F_{48}$ mit 1632amu, beobachtet werden [7]. ($1\text{amu} \equiv 1,66054 \times 10^{-27}\text{kg}$ entspricht in etwa einer Protonenmasse.) Dass bei diesen Experimenten quantenmechanische Interferenzphänomene überhaupt beobachtbar waren, 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 waren. Die innere Energie entsprach bei diesen Experimenten einer Temperatur von ungefähr 1000K. Dass quantenmechanische Interferenzphänomene dennoch beobachtet wurden, ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die thermisch angeregten inneren Freiheitsgrade weitgehend entkoppelt waren von der molekularen Schwerpunktsbewegung, deren Dynamik somit wie bei einem strukturlosen Punkttquant durch die Gesetze der Quantenmechanik bestimmt wurde. Wenn dieses qualitative Bild zutrifft, dann sollte eine Kopplung dieser angeregten inneren Freiheitsgrade an die molekulare Schwerpunktsbewegung, z.B. durch spontane Emission von Photonen, allmählich zum Verschwinden dieser Interferenzphänomene führen.

Ein Experiment, das die Reduktion von Quanteninterferenz bei C_{70} Molekülen infolge dieses Dekohärenzmechanismus untersucht, wurde vor kurzem von der Wiener Gruppe erfolgreich durchgeführt [2]. In der Art und Weise, wie dieser Dekohärenzmechanismus kontrolliert werden konnte, unterscheidet sich dieses Experiment wesentlich von früheren Dekohärenzexperimenten [8]. Um die Molekülinterferenzen effizient nachweisen zu können, wurde in diesem Experiment ein Talbot-Lau Interferometer [9] benutzt. Dieses Interferometer nützt in geschickter Weise den von der Optik her bekannten Talbot-Effekt aus, dass nämlich bei 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. Werden jedoch die Interferenzen der Lichtwellen gestört, so verringert sich der Kontrast dieses periodischen Bildes. Das im Experiment verwendete Talbot-Lau Interferometer bestand aus drei identischen periodischen Beugungsgittern, deren Abstand voneinander jeweils gleich der Talbot-Länge $L = d^2/\lambda_{dB} = 38\text{ cm}$ war. ($\lambda_{dB} = 2.6\text{ pm}$ war die typische de Broglie Wellenlänge der Moleküle, $d = 991\text{ nm}$ die Gitterperiode.) Dabei war das mittlere Gitter für das Entste-

hen des molekularen Interferenzmusters mit Periode d ausschlaggebend. Das erste Gitter diene lediglich zur Präparation eines periodisch modulierten aber räumlich inkohärenten Molekülstrahls mit hinreichender Intensität. Die Position des dritten Gitters wurde transversal zum Molekülstrahl variiert. Vor dem Eintritt in dieses Interferometer wurden die C_{70} Moleküle mittels eines Lasers angeregt. Die innere Anregungsenergie der C_{70} Moleküle wurde dabei durch die Laserleistung kontrolliert. Nach dem Durchgang jedes Moleküls durch das Interferometer wurde das statistisch entstehende Interferenzmuster als Funktion der Position des dritten Beugungsgitters aufgezeichnet. Dabei wurde in sehr guter Übereinstimmung mit den theoretischen Vorhersagen der Dekohärenztheorie ein Abnehmen des Kontrastes des Interferenzmusters mit wachsender Energie der angeregten inneren Freiheitsgrade beobachtet (vgl. mit Abb. 1). 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 molekularen Schwerpunkt durch Rückstoß übertragene Impuls ist so groß, dass die Quanteninterferenzen, die im Talbot-Lau Interferometer zur Ausbildung des molekularen Interferenzmusters mit Periode d führen, signifikant gestört werden. Gemäß der Dekohärenztheorie führt dies zu einer Reduktion des Kontrastes des Interferenzmusters [4, 5], die auch quantitativ in sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden ist. So zeigt die theoretische Beschreibung dieses Experiments z.B., dass bei einer inneren Anregung, die einer Temperatur von 2500K entspricht, insgesamt drei Photonen im sichtbaren Bereich emittiert werden. Hingegen ist die Wahrscheinlichkeit für die Emission von Photonen bei inneren Anregungsenergien von bis zu 1000K vernachlässigbar klein, sodass, konsistent mit den durchgeführten Experimenten an C_{60} Molekülen [6], bei diesen inneren Anregungen Quanteninterferenz nahezu ohne Kontrastverlust beobachtbar ist.

Die von der Wiener Gruppe 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 (840amu) 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 arbeitet allerdings daran, ihre Untersuchungen auf noch größere Systeme, wie z.B. Viren mit ungefähr 10^7 amu auszubauen. Ex-

perimentell ist dies allerdings eine große Herausforderung. Auch auf theoretischer Seite stellt die Beschreibung solcher Experimente im Rahmen der Dekohärenztheorie eine Herausforderung dar. Ungleich größer wäre diese Herausforderung allerdings, wenn sich unterwegs zu diesem Ziel die Dekohärenztheorie wider Erwarten als inkonsistent mit dem Experiment herausstellen sollte.

References

- [1] K. Hornberger, S. Uttenthaler, B. Brezger, L. Hackermüller, M. Arndt, A. Zeilinger, Phys. Rev. Lett. **90**, 160401-1 (2003).
- [2] L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt, Nature **427**, 711 (2004).
- [3] G.C. Girardi, A. Rimini, T. Weber, Phys. Rev. D **34**, 470 (1986); I.C. Percival, Proc. Roy. Soc. Lond. A **451**, 503 (1995); R. Penrose, Gen. Relativ. Grav. **28**, 581 (1996).
- [4] D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, J. Kupsch, I.-O. Stamatescu, H. D. Zeh, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Springer, Berlin, 1996).
- [5] W.T.Strunz, G. Alber, F. Haake, Phys. J. **1** (11), 47 (2002).
- [6] M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, A. Zeilinger, Nature **401**, 680 (1999).
- [7] L. Hackermüller, S. Uttenthaler, K. Hornberger, E. Reiger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt, Phys. Rev. Lett. **91**, 090408-1 (2003).
- [8] T. Pfau, S. Spälter, Ch. Kurtsiefer, C. R. Eckstrom, J. Mlynek, Phys. Rev. Lett. **73**, 1223 (1994); M. S. Chapman, T. D. Hammond, A. Lenef, J. Schmiedmayer, R. A. Rubenstein, E. Smith, D. E. Pritchard, Phys. Rev. Lett. **75**, 3783 (1995); D. A. Kokorowski, A. D. Cronin, T. D. Roberts, D. E. Pritchard, Phys. Rev. Let. **86**, 2191 (2001).
- [9] B. Brezger, M. Arndt, A. Zeilinger, J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. **5**, S82 (2003).

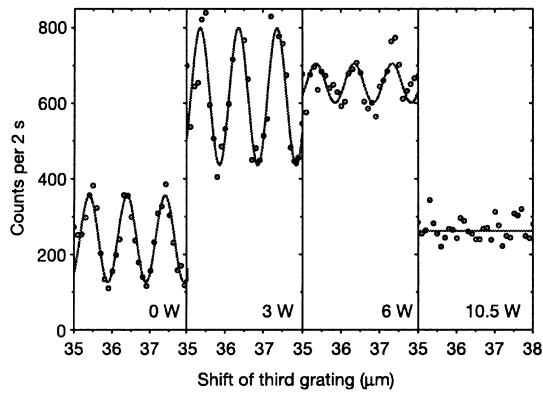


Figure 1: Molekulare Interferenzmuster von C_{70} Molekülen nach Durchgang durch ein Talbot-Lau Interferometer für vier verschiedene Energien der angeregten inneren Vibrationsfreiheitsgrade (Fig.2 aus Ref. [2]; durchgezogene Linien: Theorie). Die Geschwindigkeit der Moleküle betrug 190ms^{-1} , die Durchflugszeit durch das Interferometer 4ms . Mit wachsender thermischer Anregung der inneren Freiheitsgrade (von links nach rechts) nimmt der Kontrast des Interferenzmusters konsistent mit der Dekohärenztheorie ab, da dadurch die Wahrscheinlichkeit für die Emission kurzweilliger Photonen zunimmt, die die Quanteninterferenzen signifikant stören. Die Abhängigkeit der absoluten Zählrate von der thermischen Anregung ist eine Folge der Nachweismethode durch Ionisation und ist ebenfalls in quantitativer Übereinstimmung mit der Dekohärenztheorie.