

Grenzgänger: Welle-Teilchen Dualismus von C₆₀

Markus Arndt und Olaf Nairz

Zum Ende dieses Milleniums feiert Max Plancks Hypothese Geburtstag, dass die Energie schwarzer Körper nur diskret, in Form von Quanten, abgestrahlt werden kann. Aus der Quantenhypothese wurde durch die Arbeiten von Schrödinger, Heisenberg und vielen anderen eine fundierte Theorie, deren Vorhersagekraft in unzähligen Experimenten mit enormer Präzision bestätigt wurde. Ist sie damit aber, nach nun gut hundert Jahren, schon wirklich verstanden? Richard Feynman, einer der Väter der modernen Quantenmechanik, behauptete gar, dass wohl niemand diese Theorie wirklich verstehe. Dies liegt vor allem daran, daß ihre Gesetze sich von denen unserer täglichen Erfahrung drastisch zu unterscheiden scheinen.

In der *Quantenwelt* findet man die Möglichkeit zur Superposition von Zuständen, Komplementarität, Unschärfe, Nicht-Lokalität und Verschränkung. Demgegenüber steht die klassische oder *Alltagswelt*, in der ein Objekt mit Sicherheit nur an einem Ort zu finden ist, einen gleichzeitig wohldefinierten Ort und Impuls besitzt und meist als vom Beobachter unbeeinflusst betrachtet werden kann. Wenn aber nun die Quantenmechanik eine universell gültige Theorie ist, warum sehen wir keine ihrer seltsamen Eigenschaften im täglichen Leben?

Um diese Frage zu beleuchten, greifen wir einen der vielen Aspekte der Theorie heraus, nämlich die Behauptung, dass jedem Objekt ein Wellenphänomen zugeordnet ist, das die Bewegung im Raum bestimmt. Dessen charakteristische Periode, die de Broglie Wellenlänge, $\lambda_{dB} = h/p$, ist durch den Impuls des Objekts bestimmt. Diese Hypothese, 1923 von Louis de Broglie aufgestellt, hat sich in zahlreichen Experimenten mit Elektronen, Neutronen, Atomen und sehr einfachen Molekülen als richtig herausgestellt. Nachgewiesen wird die Wellennatur typischerweise in Beugungs- und Interferenzexperimenten in Anlehnung an den berühmten Young'schen Doppelspalt, von dem schon R. Feynman behauptete, dass an ihm alle wesentlichen Eigenschaften der Quantenmechanik darstellbar seien [1] (Abb. 1):



Abb. 1: Funktionsskizze des Young'schen Doppelspaltversuchs

Eine Quelle emittiert Teilchen, die längs ihres Weges auf eine Wand mit zwei vertikalen Schlitzen treffen. In einiger Distanz von diesem Doppelspalt befindet sich ein Detektor, der registriert, an welcher horizontalen Position die Objekte einlaufen. Verschließt man einen der beiden Spalte, so findet man nur Teilchen hinter dem anderen und umgekehrt. Man kann also eindeutig sagen, dass die Objekte durch den geöffneten Spalt geflogen sein müssen. Öffnet man jedoch beide Spalte, so findet man nicht etwa die einfache Summe der beiden Einzelspaltbilder sondern eine Ortsverteilung mit mehreren Maxima.

Dr. Markus Arndt und Dr. Olaf Nairz, Institut für Experimentalphysik der Universität Wien

Wichtig ist, dass es bei einem solchen Experiment typischerweise auch zur Intensitätsreduktion an einigen der Orten kommt, die im Falle nur eines offenen Spaltes hohe Intensität aufwiesen, was im Teilchenbild völlig unerklärbar, im Wellenbild hingegen durch destruktive Interferenz leicht zu deuten ist. Im Wellenbild können auch weite Bereiche des Raumes vom Quantenobjekt gleichzeitig exploriert werden und so das Resultat auf dem Schirm beeinflussen.

Wovon hängt nun aber ab, ob die Wellennatur eines Objekts sichtbar wird? Sicher spielen die Größenverhältnisse eine Rolle. Zur Abschätzung rufe man sich in Erinnerung, dass bei der Beugung einer monochromatischen Welle am Doppelspalt das erste Nebenmaximum unter dem Winkel $\sin \theta = \lambda/g$ zum Hauptmaximum zu finden ist. Dabei ist g der Abstand der Spalte, bzw. bei einem vollständigen Gitter die Gitterkonstante. Nehmen wir als Alltagsbeispiel einen Tennisball von 80 g, der sich nach dem Aufschlag mit 50 m/s auf das Tennisnetz zubewegt, so finden wir eine de Broglie Wellenlänge von nur etwa 10^{-34} m. Beugung am Netz mit einer Maschenweite von 10 cm, erzeugt dann eine Aufweitung von $\theta \sim 10^{-33}$ rad, und kann sicher niemals nachgewiesen werden.

Gehen wir also wieder zurück zu den Objekten, deren Interferenzfähigkeit schon demonstriert wurde, den Atomen und fragen uns, was passiert, wenn wir mehrere von ihnen gemeinsam, in Form eines Moleküls untersuchen, oder grosse Cluster nehmen. Gibt es fundamentale Grenzen für die Kohärenz von de Broglie Wellen, noch weit vor der Relevanz des simplen Größenarguments? Wo ist die Grenze? Kann man sie verschieben? Wie vollzieht sich der Übergang? Wird eventuell die Beschränkung nicht durch die Eigenschaften des Objekts sondern eher durch seine Wechselwirkung mit der Umgebung¹ verursacht, wie Wojciech Zurek es in seinen Dekohärenzmodellen errechnet [2]? Könnte die Gravitation eine Rolle spielen, wie Roger Penrose spekuliert [3]?

Durch diese Fragen und durch Diskussionen mit Roger Penrose stimuliert, initiierten Anton Zeilinger und einer der Autoren (M.A.) ein Experiment zur Beugung und Interferenz grosser Moleküle. Im Frühsommer dieses Jahres konnte dann unsere Gruppe am Institut für Experimentalphysik der Universität Wien erstmalig erfolgreich Beugung von Fullerenen demonstrieren [4]. Von den Details dieses Experiments soll im folgenden die Rede sein.

Unter den vielen möglichen Kandidaten, stellten sich bei eingehender Betrachtung die Fullerene C₆₀ und C₇₀ als besonders geeignete Objekte für Kohärenzexperimente mit Molekülen heraus. Sie sind kommerziell in ausreichenden Mengen verfügbar und haben aufgrund ihrer inneren Struktur eine sehr hohe Stabilität. Diese ist wichtig für die Erzeugung eines in-

¹Tatsächlich war die hohe interne Anregung der Fullerene in unserem Versuch ein Argument der meisten befreundeten Theoretiker und mancher Gutachter für die Prognose, dass unser Experiment scheitern müsse. Dabei wurde aber stets übersehen, dass die externe und interne Dynamik noch weitgehend entkoppelt sind. Die kontrollierte Verstärkung der Kopplung gibt uns jedoch die Möglichkeit, die Dekohärenz systematisch zu studieren.

tensiven Molekularstrahls in einer effusiven Quelle. Das Buckminsterfulleren C_{60} (Abb. 2), wegen seiner Fußballform oft auch als "buckyball" bezeichnet, besteht aus 60 Kohlenstoffatomen, die 12 Fünfecke und 20 Sechsecke auf einem gekappten Ikosaeder von 0.7 nm Durchmesser formen.

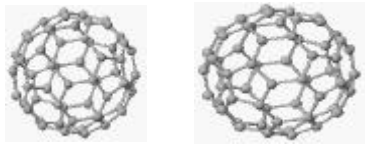


Abb. 2: Struktur der Fullere C₆₀ (links) und C₇₀

Die Fullere sind etwa eine Größenordnung massiver als alle bislang verwendeten Moleküle. Vor allem aber unterscheidet sie ihre komplexe innere Struktur von einfacheren Systemen. 174 verschiedene Schwingungsmoden sind bei typischen Molekulartemperaturen von etwa 600°C angeregt. Mit der hohen Anregung ist Schwarzkörperstrahlung und IR-Fluoreszenz verbunden, Phänomene, die bei allen Vorgängerexperimenten gänzlich irrelevant waren, die aber auch zeigen, dass beim Übergang vom Atom zum Fulleren eine neue Qualität hinzugekommen ist.

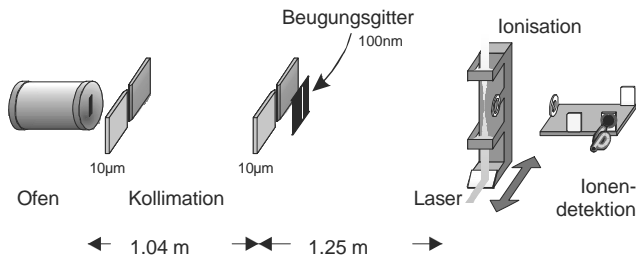


Abb. 3: Funktionsskizze der Apparatur zum Nachweis der Fullerenbeugung

Das Fullerenexperiment ist in völliger Analogie zum Doppelspaltexperiment aufgebaut (Abb. 3). Es gibt eine Quelle, eine beugende Struktur und einen ortsauflösenden Detektor. Alle gemeinsam sind in eine Vakuumapparatur bei $5 \cdot 10^{-7}$ mbar eingebaut um sicherzustellen, dass Stöße mit dem Hintergrundgas keine Rolle spielen. Die thermische Quelle ist ein 600°C heißer Stahlöfen, der Fullerenpulver sublimiert und so einen breiten Molekularstrahl erzeugt. Die Moleküle in diesem Strahl sind heiß und mithin auch schnell. Bei der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit von rund 220 m/s kann einem C_{60} Molekül somit eine de Broglie Wellenlänge von 2.5 pm zugeordnet werden. Dies ist etwa 400 mal kleiner als der Durchmesser des Moleküls! Die komplette Geschwindigkeitsverteilung und damit auch das de Broglie-Spektrum wurde mittels Flugzeitmessungen aufgenommen und ist in Abb. 4 wiedergegeben. Man sieht, dass die Quelle bei weitem nicht monochromatisch ist. Für den Versuch ist vor allem aber die transversale Kohärenz von Bedeutung, welche ein Maß für die laterale "Ausdehnung" der Wahrscheinlichkeitswelle eines Moleküls über die Stäbe des Beugungsgitters ist. Sie wird durch die beiden Kollimationsspalte bestimmt, die etwa einen Meter voneinander getrennt zwischen der Quelle und dem Beugungsgitter angeordnet sind. Durch diese nur etwa 10 Mikrometer breiten Spalte, wird die maximale transversale Geschwindigkeit auf wenige mm/s beschränkt. Man erhält damit eine kohärente Ausleuchtung einiger weniger Gitterstriche.

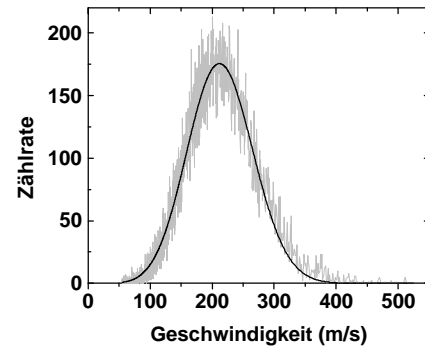


Abb. 4: Geschwindigkeitsspektrum von C₆₀ bei 605 °C

Das der Kollimation folgende SiN Gitter (Abb. 5) hat eine Gitterkonstante von 100 nm und ein nominelles Steg-/Lücke Verhältnis von etwa 1:1. Bei Beugung ebener Wellen an einem solchen Gitter erwartet man im Fernfeld, den Zentralpeak sowie die beidseitigen ersten Nebenmaxima unter einem Winkel von etwa 25 μ rad zu sehen. Die zweiten und höheren Nebenmaxima der Gitterbeugung werden vor allem durch das überlagerte Minimum der Einzelspaltbeugung unterdrückt.

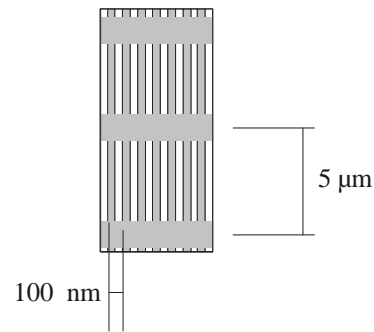


Abb. 5: Skizze des Beugungsgitters. Es wurde am MIT von T. Savas in der Gruppe von Prof. H. Smith photolithographisch hergestellt. Es hat eine Dicke von etwa 200 nm im Bereich der Gitterstriche. Die 5 μ m Überstruktur dient nur zur Stabilisierung des Gitters.

Die mikroskopisch kleinen Beugungswinkel sowie die kleinen erwarteten Zählraten ($< 100/s$) erfordern einen extrem empfindlichen, ortsauflösenden Fulleren-detektor rund 1.25 μ m hinter dem Gitter. Dazu wird ein 25 W-Argon-Ionenlaser (bei einer Wellenlänge von 488 nm und 514 nm) mit einem kurz-brennweitigen Spiegel/Linsensystem auf den Molekularstrahl fokussiert. Moleküle, die den Laserfokus passieren, absorbieren bis zu 30 grüne Photonen und werden dadurch so stark aufgeheizt, dass sie schliesslich einige 10 μ s nach der Passage durch den Laserstrahl ein Elektron emittieren. Die verbleibenden positiven Ionen werden nachbeschleunigt und lösen auf einer Konverterplatte Elektronen aus, die dann ihrerseits in einem Sekundärelektronenvervielfacher mit Nachfolgeelektronik verstärkt und registriert werden. Um das Beugungsbild abzutasten, wird die Fokussiereinheit mit Mikrometeregenauigkeit über den Molekularstrahl gefahren.

Das Ergebnis eines solchen Abtastdurchlaufs ist in Abb. 6 dargestellt. In Abb. 6a und b sind zwei solcher Scans zunächst *ohne* und dann *mit* Beugungsgitter gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt deutlich die Aufweitung des Strahls durch die Beugung sowie klare erste Nebenmaxima rechts und links vom zentralen Maximum an den erwarteten Positionen. Die durchgezogene Kurve im oberen Diagramm ist ein Fit der Theorie an die Daten. Dabei ist vor allem erwähnenswert, dass

die gefundene Einzelspaltbreite erheblich kleiner ist (ca. 38 nm) als die vom Gitterhersteller angegebene (55 ± 5 nm). Dafür gibt es verschiedene einleuchtende Erklärungen. Zum einen besitzt C_{60} eine große Polarisierbarkeit und damit auch eine starke van der Waals Wechselwirkung mit dem Gitter. Diese führt zu Phasenverschiebungen der de Broglie Wellen bei der Passage durch die SiN-Struktur, von denen man erwartet, dass sie den Spalt effektiv verkleinern. Zum anderen gibt es Imperfektionen und Ablagerungen auf dem Gitter.

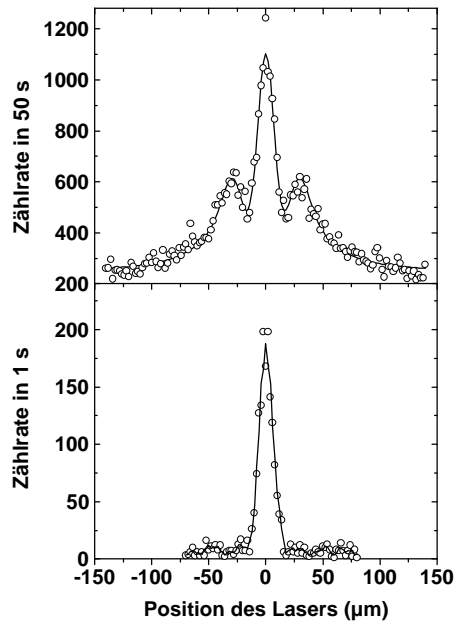


Abb. 6: Fullersignal als Funktion der Detektorposition. unten: kollimierter Strahl ohne Gitter; oben: kollimierter Strahl aber mit Beugungsgitter im Strahlengang. Man sieht deutlich die Aufweitung und die erwarteten Seitenmaxima zu beiden Seiten des Zentralpeaks.

Zusammenfassend kann man sagen, dass selbst bei so komplexen Molekülen wie den Fullerenen die Messungen in voller Übereinstimmung mit der quantenmechanischen Erwartung sind. Es wurde bislang keine signifikante "Dekohärenz" beobachtet. Unsere Abschätzungen weisen aber darauf hin, dass der Übergang von quantenmechanischem zu klassischem Verhalten schon bei den Fullerenen über die thermische Photoemission (Anzahl und Wellenlänge der Photonen) kontrolliert werden kann. Es befindet sich gerade ein Experiment in Vorbereitung, das diesen Übergang quantitativ studieren soll.

Bis zu welcher Größe kann man noch gelangen, wenn man über die Fullerene hinaus die Wellenmechanik testen will? Das ist eine noch völlig offene Frage. Unsere Abschätzungen zeigen aber, dass man kinematisch (s. Tennisballargument) erst bei etwa 10^7 Protonenmassen, also der Masse kleiner Viren, auf ernste Barrieren trifft. Die technischen Herausforderungen bei der Strahlerzeugung, Detektion und Isolation der Objekte von der Umwelt sind bis dahin aber enorm.

Danksagung

Jeder Experimentalphysiker weiß, dass gute Experimentalphysik meist eine Gemeinschaftsleistung ist, die einen hohen persönlichen Einsatz aller Beteiligten erfordert. Bei der Durchführung der hier vorgestellten Experimente waren unsere Kollegen Julian Voss Andreae, Claudia Keller und Gerbrand van

der Zouw unter der inspirierenden und kollegialen Leitung von Anton Zeilinger beteiligt.

Das Experiment wurde vom FWF im Rahmen des Projekts S6504 sowie des SFB "Control and Measurement of Coherent Quantum Systems" unterstützt.

Literatur

- [5] Richard Feynman "Vom Wesen physikalischer Gesetze", Piper (1993)
- [6] Roger Penrose "On gravity's role in quantum state reduction", Gen. Rel. Grav. 28, 581-600 (1996)
- [7] Wojtek Zurek, "Decoherence and the transition from quantum to classical", Physics Today, 36-44 (October 1991)
- [8] Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Voss Andreae, Claudia Keller und Gerbrand van der Zouw, Anton Zeilinger, "Wave-particle duality of C_{60} molecules", Nature 401, 680-682, 14. Oct. (1999).

Ein Blick und Klick ins Netz

Weitere Bilder zum oben beschriebenen Experiment sind zu finden unter: www.quantum.univie.ac.at

Die Physikseiten von Andrea Mayer findet man nun schnell unter: physik.asn-graz.ac.at. Ideen zu Kriterien zur Erstellung eines Versuchsprotokolls von H.-J. Kunze: physik.asn-graz.ac.at/physik/quellen/kunze2.htm.

Ein hervorragende Astronomieseite zur Benutzung von Sternkarten stellt Gerhard Rath zur Verfügung unter: linux.brgkepler.asn-graz.ac.at/comenius/sterne/ue_sternk.htm

Schrödinger war das Thema eines Projekts am Akademischen Gymnasium Innsbruck: www.asn-ibk.ac.at/schulen/agi/schroedinger

Auch die Zentralbibliothek für Physik bietet unter: www.zbp.univie.ac.at/Schrodinger Bilder und Töne zum Leben des Nobelpreisträgers.

