

Langlebig trotz flüssiger Umgebung

Die Echtzeitbeobachtung von Quantenkohärenzen in supraflüssigem Helium zeigt, dass außergewöhnlich lange Zerfallszeiten auftreten.

Frank Stienkemeier

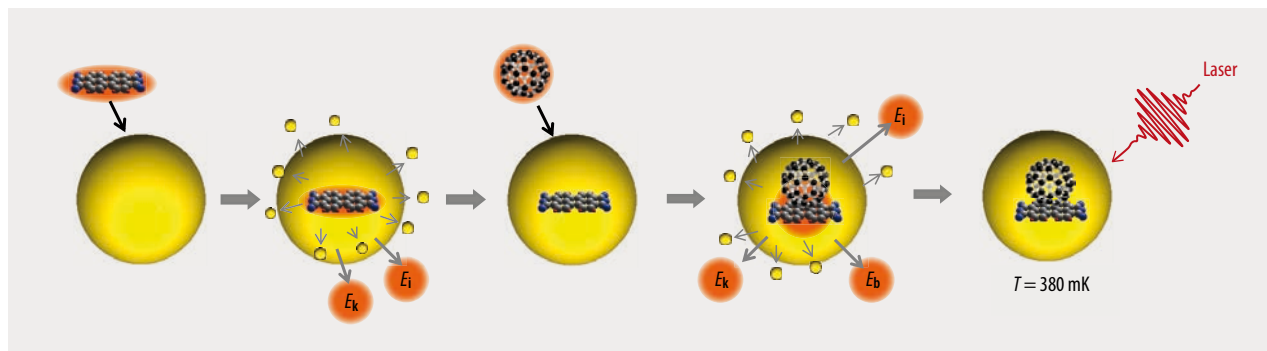


Abb. 1 Der Strahl aus Helium-Nanotropfen sammelt einzelne Moleküle, hier zunächst ein Perylen-Farbstoff und anschließend ein C₆₀-Fulleren, nacheinander durch inelastische Stöße auf. Heliumatome geben durch ihr Verdampfen an der Oberfläche des Tropfens die kinetischen Energien E_k , die Energien interner Freiheitsgrade E_i der Moleküle sowie die Bindungsenergie E_b bei der Aggregation ab. So stabilisiert sich der dotierte Tropfen bei einer Temperatur von 380 mK vor dem Pump-Probe-Experiment. Die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu.

Die Kohärenzeigenschaften genau präparierter Quantensysteme spielen für die Quantentechnologien eine wichtige Rolle. Zentral dabei ist es, Interferenzerscheinungen in speziell überlagerten Zuständen auszunutzen. Dephasierung und Dissipation stören allerdings eine reine Beobachtung dieser Systeme. Abseits der Quantentechnologien sind kohärente Messtechniken beispielsweise bei

den FEL-Strahlungsquellen mit XUV-Wellenlängen immer mehr von Bedeutung: Anlagen wie FERMI in Trieste liefern kohärente Strahlung durch das Einbringen optischer Laserstrahlung in den XUV-Laserprozess. All diese Aktivitäten benötigen Proben, um Quanteninterferenzstrukturen adäquat zu beobachten. In flüssigen Umgebungen tritt schnell Dekohärenz beziehungsweise Dissipation auf, so

dass Interferenzen nicht über längere Zeiten beobachtbar sind. Entscheidend sind dabei die Temperatur und die resultierende thermische Besetzung von Zuständen. Ideal sind ultrakalte Systeme mit Temperaturen im Mikro- bis Nanokelvinbereich. Allerdings sind betreffende Laserkühlverfahren auf Atome und wenige zweiatomige Moleküle beschränkt und stehen nicht für komplexe molekulare Strukturen zur Verfügung.

Der Arbeitsgruppe um Markus Koch an der TU Graz ist es nun gelungen, langlebige Kohärenzen innerhalb einer flüssigen Heliumumgebung in Echtzeit zu beobachten [1]. Mit einem Strahl aus Helium-Nanotropfen im Vakuum präparierten die Wissenschaftler Proben mit Temperaturen im Bereich von Millikelvin. Durch die natürliche Verdampfungskühlung des äußerst schwach gebundenen Heliums lassen sich Moleküle und molekulare Komplexe in den Nanotropfen aggregieren und als kalte Probe bereitstellen (Abb. 1). Die Methode erlaubt es auch, größere Biomoleküle einzulagern [2] oder größere Aggregate aus praktisch beliebigen Atomen oder Molekülen zu synthetisieren und zu kühlen. Das Helium geht dabei durch Bose-Einstein-Kondensation in einen supraflüssigen Zustand über. Dessen

Kurzgefasst

Fokus auf das Update

Noch in diesem Jahr soll ein Update der European Strategy for Particle Physics erscheinen. Daher hat Nature Physics den Vorschlägen für zukünftige Beschleunigeranlagen eine Fokus-Ausgabe gewidmet. Der Future Circular Collider (FCC) schließt an die Erfahrungen mit LEP und LHC an: Nach einer ersten Phase mit Kollisionen von Elektronen und Positronen soll ein Upgrade die Kollision von Protonen erlauben. Dagegen beschleunigt der Compact Linear Collider (CLIC) die Teilchen auf gerader Strecke und erlaubt ein komplementäres Forschungsprogramm. Außerdem erklären zwei Fachartikel eine Studie zur Physik jenseits der Collider und die Vorschläge für neue Anlagen in den USA und Japan.

Nature Physics 16, April 2020
www.nature.com/collections/heigibehfc

Weniger einheitlich als gedacht

Untersuchungen von Bonner Astronomen und Astrophysikern des Harvard & Smithsonian Center in den USA zeigen, dass sich das Universum nicht in allen Raumrichtungen einheitlich verhält. Dazu analysierten sie 800 Galaxiencluster mithilfe von Daten, welche die Weltraumobservatorien XMM-Newton, Chandra und ROSAT gesammelt haben. Anders als angenommen, unterschied sich die Leuchtkraft von Clustern mit ähnlicher Temperatur um etwa 30 Prozent – je nach Beobachtungsrichtung. Daraus ergeben sich verschiedene Entfernungen: Das Universum ist nicht einheitlich expandiert. Andere Ursachen für die Unterschiede, z. B. bisher nicht detektierte Gas- oder Staubwolken, konnte das Team ausschließen.

K. Migkas et al., Astronomy & Astrophysics 636, A15 (2020)

außergewöhnliche Eigenschaften, wie der Verlust von Reibung und ein unendlicher Anstieg der Wärmeleitfähigkeit, sorgen für eine isotrope, wenig wechselwirkende flüssige Umgebung mit effizienter Kühlung [3].

Nun gelang es erstmals, die zeitliche Entwicklung eines Vibrationswellenpakets über einen langen Zeitraum zu verfolgen und so gezielte Aussagen über Dekohärenz und Dissipation in der flüssigen Heliumumgebung zu machen. Als Modellsystem kam ein Indium-Dimermolekül mit wohlbekanntem Anregungsschema zum Einsatz (**Abb. 2a**). Ein intensiver ultrakurzer Femtosekunden-Laserpuls ermöglichte es, den kohärenten Überlagerungszustand mehrerer Vibrationsniveaus im elektronisch angeregten Zustand zu erzeugen (Pump-Prozess). Ein zeitlich verzögerter Abfragepuls diente dazu, die Oszillation des Wellenpakets zu verfolgen (Probe-Prozess).

Selbst in diesem einfachen System aus Dimer und Heliumtropfen sind mehrere dynamische Mechanismen aktiv und lassen sich zeitlich auflösen. Beispielsweise spuckt der Tropfen das Molekül nach der Anregung aus, was den Nachweis eines freien Dimers erlaubt. Dazu sind Zeitverzögerungen von etwa 50 ps zwischen Pump- und Probe-Prozess nötig – sonst fallen die Ionen aufgrund der verstärkten Anziehung durch ihre Ladung zurück in den Tropfen [4]. Das Wellenpaket oszilliert dabei im elektronisch angeregten Zustand mit einer Periode von 0,42 ps. Das zeigt sich sowohl in der Energie der Photoelektronen (**Abb. 2b**) als auch in der integralen Signalstärke (**Abb. 2c**).

Die Amplitude nimmt ab, weil die unterschiedlichen Frequenzanteile aufgrund der Anharmonizität des Potentials dephasieren und weil die Ankopplung an die Helium-Umgebung die Schwingung dämpft. Letzteres entfällt, sobald sich die Moleküle vom Tropfen lösen. Dadurch kommt es zu sogenannten Revivals, also der Rephasierung beteiligter Frequenzanteile, die sich noch bis zu Hunderten von Pikosekunden lang quantifizieren lassen. Verglichen mit dem Verhalten freier Moleküle bewirkt die Dämpfung durch die Helium-

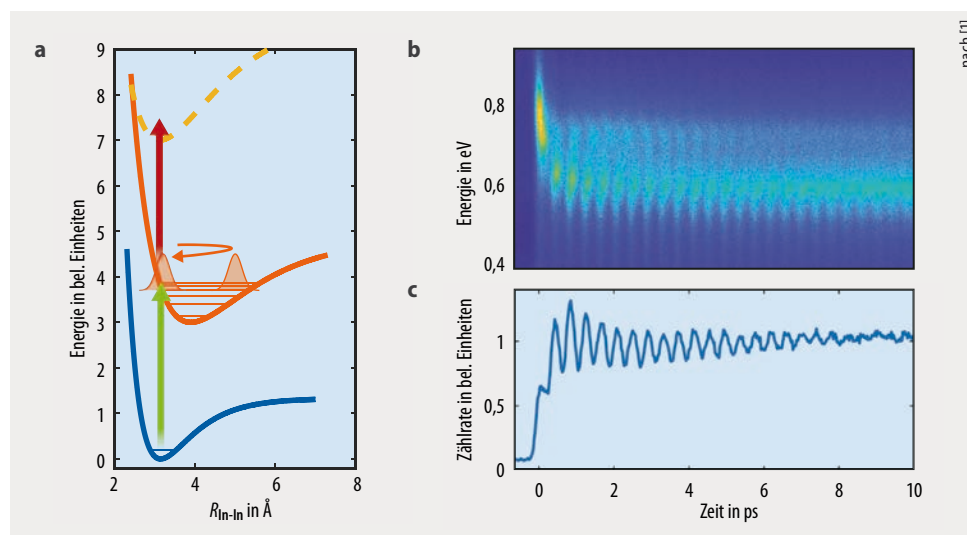


Abb. 2 Das Wechselwirkungspotential ist als Funktion des internuklearen Abstands zweier Indiumatome für den Grundzustand (a, blau) und den elektronisch angeregten Zustand (orange) gezeigt. Der Pump-Puls (grün) präpariert ein Wellenpaket, dessen Bewegung der Molekülschwingung im angeregten Zustand entspricht. Am inneren Umkehrpunkt ist die Ionisationswahrscheinlichkeit nach der Wechselwirkung mit dem zeitverzögerten Probe-Puls (rot) erhöht. Die Molekülschwingung führt zu Oszillationen in der Energie der emittierten Photoelektronen (b). Die integrierte Signalamplitude zeigt deutlich die Vibrationsoszillation des detektierten Wellenpakets mit einer Periode von 0,42 ps (c).

Flüssigkeit eine lange Abfallzeit von mehr als 10 ps. Aus Vergleichen mit anderen Systemen folgert die Gruppe um Koch, dass nicht die Vibrationsrelaxation, sondern die Dephasierung ursächlich ist: Die Besetzung der Zustände bleibt im Wesentlichen erhalten. Das ist erstaunlich, weil Flüssigkeiten bei Zimmertemperatur in der Regel im Bereich von Femtosekunden dephasieren und selbst klassische kryogene Matrizen bereits nach wenigen Pikosekunden.

Die Methode könnte sich für die Untersuchung komplexer Systeme, wie organischen molekularen Strukturen, eignen. Spektrale Breiten hochaufgelöster Fluoreszenzspektren legen nahe [5], dass auch dort langlebige Kohärenzen zu erwarten sind. Mehrdimensionale kohärente nichtlineare Spektroskopiemethoden eröffnen vielfältige Möglichkeiten. So hat die zweidimensionale kohärente Spektroskopie in der „Quantenbiologie“ viel Aufmerksamkeit, aber auch Kritik erfahren [6, 7], beispielsweise bei der Interpretation von Oszillationen als elektronische Kohärenzen. In komplexen natürlichen Systemen sind Kohärenzen oft nur schwer aufzuschlüsseln. Hier könnten die besser definierten Strukturen und Zustände in den Helium-Nanotröpfchen hel-

fen, offene Fragen zu klären. Vielversprechend sind auch neue Ansätze zur kohärenten mehrdimensionalen Spektroskopie an kalten oder ultrakalten Systemen in der Gasphase oder in Clusterstrahlen [8]. Diese auf extrem geringe Dichten anzuwenden, gelang kürzlich in einer Kombination aus Phasenmodulation mit sehr effizienten Nachweismethoden einzelner Teilchen [9]. Auch hier eröffnen Experimente mit Helium-Nanotröpfchen neue Möglichkeiten.

- [1] B. Thaler et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 115301 (2020)
- [2] F. Birau et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 133402 (2010)
- [3] J. P. Toennies und A. F. Vilesov, Angew. Chem. Int. Ed. **43**, 2622 (2004)
- [4] J. von Vangerow et al., J. Chem. Phys. **143**, 034302 (2015)
- [5] N. Pörtner et al., Mol. Phys. **110**, 1767 (2012)
- [6] N. Lambert et al., Nat. Phys. **9**, 10 (2013)
- [7] J. Cao et al., Sci. Adv. **6**, eaaz4888 (2020)
- [8] L. Bruder et al., Nat. Commun. **9**, 4823 (2018)
- [9] L. Bruder et al., J. Phys. B **52**, 183501 (2019)

Der Autor

Prof. Dr. Frank Stienkemeier, Physikalisches Institut, Universität Freiburg, Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg