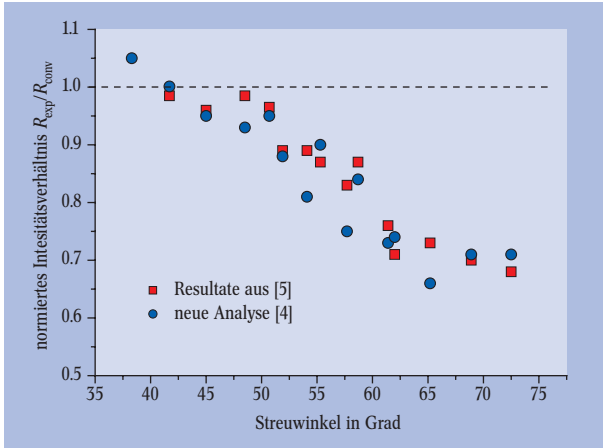


## Attosekunden-Verschränkung versteckt Protonen

So genannte Compton-Streuxperimente mit Neutronen ermöglichen neue Einsichten in die Dynamik kondensierter Materie. Dabei werden schnelle (epithermische) Neutronen an Protonen flüssiger bzw. fester Systeme gestreut. Das erlaubt es, bisher unbekannte Prozesse sichtbar zu machen, die innerhalb weniger hundert Attosekunden (as)



Die Resultate des Neutronen-Compton-Streuxperiments am Metallhydrid  $\text{NbH}_{0,8}$  [4, 5] weichen von der Vorhersage der Standardtheorie der Neutronenstreuung (gestrichelte Linie) deutlich ab und belegen das „Verschwinden“ von Protonen infolge einer ultrakurzen Verschränkung mit ihren benachbarten Elektronen.

ablaufen [1, 2]. Einer dieser Prozesse ist das teilweise „Verschwinden“ von Protonen beim Streuprozess. Wasser erscheint dann z. B. als  $\text{H}_{1,5}\text{O}$  statt  $\text{H}_2\text{O}$  [1]. Ursache dafür ist, so die Vermutung, dass die Protonen in der Materie auf der ultrakurzen Zeitskala eine komplexe quantenmechanische Verschränkung mit ihren benachbarten Elektronen eingehen. Da dieser Effekt im Widerspruch zur konventionellen Theorie der Neutronenstreuung steht, wurde seine Existenz zunächst stark bezweifelt (vgl. [3]). Nun gelang es Bruno Dorner vom Institut Laue-Langevin in Grenoble mit einer qualitativ neuen Auswertungsmethode [4], bisherige, am Metallhydrid  $\text{NbH}_{0,8}$  gewonnene Ergebnisse [5] eindrucksvoll zu bestätigen.

Die bei den Streuxperimenten verwendeten schnellen Neutronen haben eine sehr kleine de Broglie-Wellenlänge,  $\lambda < 0,1\text{Å}$ . Der Streuprozess erscheint dann einfach als eine elastische Zweiteilchen-Kollision. Bei der Neutron-Proton-Streuung haben die beiden Teilchen auch

noch fast die gleiche Masse, sodass der Stoßprozess dem Stoß von Billardkugeln ähnelt.

Die Experimente [1, 2, 5] wurden an der gepulsten Spallationsquelle ISIS (Rutherford Appleton Laboratory) durchgeführt. Das Flugzeitspektrometer Vesuvio [6] von ISIS misst dabei die Flugzeit eines Neutrons vom ersten Monitor (ca. 10 m vor der Probe) bis zum jeweiligen Detektor, der sich unter einem Streuwinkel  $\theta$  ca. 0,7 m hinter der Probe befindet. Die typischen Flugzeiten liegen im Bereich 50 bis 500  $\mu\text{s}$ . Bei Vesuvio handelt es sich um ein sog. „inverse-Geometrie-Spektrometer“, d. h. die Anfangsenergien der Neutronen variieren und von den gestreuten Neutronen werden nur solche mit der Energie von 4,9 eV selektiert. Dieses Verfahren liefert grundsätzlich dieselbe Information wie die konventionelle Flugzeitspektrometrie, erlaubt es aber, hohe Energien (etwa 1–100 eV) und damit große Impulse  $\hbar q$  (mit  $q = 20\text{--}200 \text{Å}^{-1}$ ) effizienter auf die Protonen der Probe zu übertragen.

Bei dem Metallhydrid  $\text{NbH}_{0,8}$  bestehen die Spektren als Folge des großen Massenunterschiedes von H und Nb und des daraus folgenden Unterschieds im Energietransfer aus zwei sehr gut getrennten Peaks. Diese Peak-Separation ist von entscheidender Bedeutung, sowohl für das Experiment als auch für die Anwendung der Methode von Dorner. Bei diesen Experimenten interessiert nur die Gesamtfläche  $A$  des jeweiligen Peaks, weil sie proportional zur Streuintensität ist. Aus der Standardtheorie der Neutronen-Compton-Streuung (NCS) folgt:

$$\frac{A_{M1}}{A_{M2}} = \frac{N_{M1}\sigma_{M1}}{N_{M2}\sigma_{M2}}$$

Dabei sind  $N_M$  die Teilchenzahl-dichte der Atome (Isotope) der M-ten Sorte und  $\sigma_M$  der zugehörige totale Streuquerschnitt. Während das Verhältnis  $N_{M1}/N_{M2}$  durch die Probenpräparation bekannt ist, wird das Verhältnis  $R_{\text{exp}} = A_{M1}/A_{M2}$  der Flächen unter den Peaks zweier verschiedener Atome aus den gemessenen Flugzeitspektren bestimmt.

Im krassen Gegensatz zur Standardtheorie weichen die gemessenen Verhältnisse  $R_{\text{exp}}$  [1, 2, 5, 6] und viele andere in beträchtlichem Maße von der rechten Seite der obigen Beziehung ( $R_{\text{conv}}$ ) ab. Im Falle des  $\text{NbH}_{0,8}$  wurde eine ano-

male Abnahme des Verhältnisses  $R_{\text{exp}} = A_H/A_{\text{Nb}}$  relativ zu  $R_{\text{conv}} = 0,8 \sigma_H/\sigma_{\text{Nb}}$  von bis zu 30 % beobachtet [5], welche interessanterweise stark vom Streuwinkel  $\theta$  und somit auch vom Impulstransfer  $\hbar q(\theta)$  abhängt (Abb.). Nun gilt nach der Standardtheorie, dass die relevante Streuzeit  $\tau_{\text{str}}$  – d. h. die „Dauer“ des Neutron-Kern-Stoßes – umgekehrt proportional zu  $\hbar q(\theta)$  ist [5, 6]. Im Falle des Experiments von Karlsson et al. [5] liegt  $\tau_{\text{str}}$  des Neutron-Proton-Stoßes im Bereich 200–1000 as. Die genannte Anomalie erscheint erst in einem „Zeitfenster“ kleiner als 600 as. Unter der naheliegenden Annahme, dass sich die schweren Nb-Kerne gemäß der konventionellen Theorie verhalten, folgt somit, dass bei  $\tau_{\text{str}} \approx 200\text{--}300$  as etwa ein Drittel der Protonen in der Probe „verschwinden“.

Die Ergebnisse der neuen Auswertung nach Dorner [4] bestätigen die Originalarbeit [5] eindrucksvoll (Abb.). Entscheidend ist, dass es sich nun aber um eine „modell-freie Methode“ handelt. Sie setzt im Gegensatz zu den bisherigen Auswertungen nur die oben genannte Peak-Separation voraus und kommt völlig ohne Annahmen über die genaue Form der Auflösungsfunktion des Spektrometers und die spezifische Form eines Peaks aus.

Das überraschende „Verschwinden“ von Protonen lässt sich nicht nur mit Hilfe der Neutronenstreuung beobachten, sondern auch mit der davon völlig unabhängigen Methode der Compton-Streuung zwischen Elektronen und Protonen [2]. Dieser Effekt muss daher unabhängig von der zugrunde liegenden fundamentalen Wechselwirkung (starke bzw. elektromagnetische) sein – ein weiterer Hinweis auf die theoretisch vorhergesagte Relevanz der Verschränkung im Streuprozess.

Hier sei kurz auf eine vorgeschlagene Interpretation des Effektes eingegangen [7]: Demnach kommt in dem offenen Quantensystem „gestoßenes Proton + naheliegende Elektronen“ die Verschränkung z. B. durch die Coulomb-Wechselwirkung „von allein“ zustande, da ja der entsprechende Operator mit den Hamilton-Operatoren der „freien“ Protonen bzw. Elektronen nicht kommutiert. In kondensierter Materie unterliegt sie jedoch einer ultraschnellen Dekohärenz, weil das System stark mit seiner „Umgebung“ wechselwirkt. Der hergeleitete Ausdruck

für die Streuintensität enthält eine Integration über das „Zeitfenster“  $0 \leq t \leq \tau_{\text{str}}$ . Anschaulich betrachtet, führt das Zusammenspiel von „schneller“ Streuung mit „zeitabhängiger“ Verschränkung dazu, dass sich die streuenden Partikel (hier: Protonen) „verstecken“. Überraschenderweise spielt dabei die (üblicherweise „unerwünschte“) Dekohärenz eine „konstruktive“ Rolle, was einem für die Quantendynamik bisher unbekanntem Vorgang entspricht [7]. Diesen kann man sich weiterhin, im Lichte des neuartigen „Doppelspaltexperimentes in der Zeit“ [8], als „Interferenz in der Zeitdomäne“ (statt im Ortsraum) veranschaulichen.

Die erwähnten Attosekunden-Experimente und ihre überraschenden Befunde dürften weitreichende Bedeutung auf ganz verschiedene Gebiete haben, wie z. B. Neutronenphysik, Streuung an offenen Quantensystemen, kondensierte Materie und Molekülphysik. Insbesondere deuten sie darauf hin, dass Verschränkung und Dekohärenz eine wichtige Rolle bei der Bildung

und dem Zerfall chemischer Bindungen zu spielen scheinen.

C. ARIS CHATZIDIMITRIOU-DREISMANN

- [1] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 2839 (1997); Physik in unserer Zeit, Juli 2004, S. 174
- [2] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 057403 (2003)
- [3] J. J. Blostein et al., Physica **B 334**, 257 (2003); Phys. Rev. **B 71**, 054105 (2005)
- [4] B. Dorner, Nucl. Instr. Meth. **B**, im Druck (2006); J. Neutron Research **13**, 267 (2005); vgl. dazu M. Krzystyniak et al., Phys. Rev. **B 72**, 174117 (2005)
- [5] E. B. Karlsson et al., Europhys. Lett. **46**, 617 (1999)
- [6] J. Mayers und T. Abdul-Redah, J. Phys. Cond. Matter **16**, 4811 (2004)
- [7] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann und S. Stenholm, in: V. M. Akulin et al. (Hrsg.), Decoherence, Entanglement and Information Protection in Complex Quantum Systems, Springer, Dordrecht (2005), S. 555
- [8] F. Lindner et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 040401 (2005); W. P. Schleich, Physik Journal, Aug. 2005, S. 22

## Mit vereinten Kräften

**Eine über 30 Jahre alte Vorhersage, nach der drei identische Teilchen gebunden sein können, obwohl jedes Paar für sich genommen ungebunden ist, wurde nun in kalten Bose-Gasen bestätigt.**

Aus der klassischen Mechanik ist bekannt, dass für das Dreikörper-Problem keine analytische Lösung existiert. Daher lassen sich auch über die Quantenphysik dreier paarweise wechselwirkender Atome nur wenige allgemeine Aussagen treffen. Eine Ausnahme bilden identische Bose-Teilchen für den Fall, dass in jedem der drei Paar-Potentiale nur ein gebundener Zustand mit beliebig geringer Bindungsenergie besteht. Bereits 1935 hat Thomas gezeigt, dass selbst in diesem Fall das zugehörige Dreikörper-System immer mindestens einen Bindungszustand besitzt [1]. Im Jahr 1970 hat Vitali Efimov dieses Resultat in bemerkenswerter Weise erweitert [2]. Demnach

Prof. Dr. C. Aris Chatzidimitriou-Dreismann, Institut für Chemie (Sekt. C2), TU Berlin, 10623 Berlin