

einen Faktor von 2 bis 5; der Unterschied zu den Vorhersagen hierarchischer Modelle macht allerdings einen Faktor von etwa 20 aus.

Heißt das nun: zurück zu den klassischen Modellen mit „monolithischem Anfangskollaps“? Wohl nicht, denn die Beobachtungen zeigen auch eine große Zahl noch junger, kaum entwickelter und weniger massereicher sowie wechselwirkender und verschmelzender Galaxien bei  $z \leq 2$ . Ist das hierarchische Paradigma ernstlich erschüttert oder lässt es sich vielleicht durch ein Anpassen seiner Parameter noch retten? Hier sind sicher noch Spielräume, handelt es sich doch um Modelle mit einem Satz einfachster Annahmen. Insbesondere könnten z. B. der sog. Bias-Parameter oder die Sternentstehungseffizienz keine Konstanten, sondern abhängig von der Masse der DM-Halos sein. Oder deuten diese Beobachtungen etwa auf eine neue Physik? In jeden Fall erleben wir Astrophysiker gegenwärtig eine äußerst spannende Epoche, in der extragalaktische Beobachtungen zusammen mit detaillierten Modellrechnungen zur Galaxienentstehung und -entwicklung das Weltbild der Physik entscheidend mitgestalten.

UTA FRITZE-VON ALVENSLEBEN

- [1] L. Searle und R. Zinn, *Astrophys. J.* **225**, 357 (1978)
- [2] K. Glazebrook et al., *Nature* **430**, 181 (2004)
- [3] A. Cimatti et al., *Nature* **430**, 184 (2004)
- [4] C. C. Steidel et al., *Astrophys. J.* **492**, 428 (1998)
- [5] A. M. Wolfe und J. X. Prochaska, *Astrophys. J.* **494**, L15 (1998)

## Mikroskopische Kapillarwellen sichtbar gemacht

**Konfokale Mikroskopie von kolloidalen Flüssigkeiten macht Oberflächenwellen und andere hydrodynamische Prozesse im Mikrometerbereich beobachtbar.**

Die Oberflächenspannung verursacht wohl die bekanntesten physikalischen Phänomene an Wasseroberflächen. Sie bewahrt Wasserläufer davor unterzugehen, sie lässt Wasser in engen Röhren hochsteigen und macht Wassertropfen rund. Weniger bekannt ist, dass die Oberflächenspannung für Längenskalen kleiner als die sog. Kapillarlänge  $L_{\parallel}$  deutlich stärker ist als die Gravitationskraft und damit zur entscheidenden

rückstellenden Kraft für Wasserwellen mit Wellenlängen zwischen wenigen Millimetern bis zu molekularen Abständen wird. Denn für molekulare Flüssigkeiten wie Wasser findet man Kapillarlängen  $L_{\parallel} = \sqrt{\gamma/\Delta\rho g}$  im Millimeterbereich aufgrund der großen Oberflächenspannung  $\gamma$ .<sup>\*)</sup> Im Unterschied zu Gravitationswellen, die man am Meeresstrand beobachten kann, rührt die Anregungsenergie bei diesen sog. Kapillarwellen mit Wellenlängen  $\lambda < L_{\parallel}$  nicht vom Wind her, sondern von der thermischen Molekülbewegung. Die mittlere Amplitude dieser Wellen ist durch das Verhältnis der rückstellenden Oberflächenspannung  $\gamma$  zur treibenden thermischen Energie  $k_B T$  gegeben:  $L_{\perp} \sim \sqrt{k_B T/\gamma}$ .

Solche thermisch angeregten Kapillarwellen sorgen z. B. dafür, dass dünne Flüssigkeitsfilme aufreissen und „entnetzen“. Die Kontrolle der Oberflächenspannung ist daher eine wesentliche Voraussetzung für zahlreiche mikro- und nanotechnologische Anwendungen wie die Präparation dünner Schichten oder die Herstellung von Microchips.

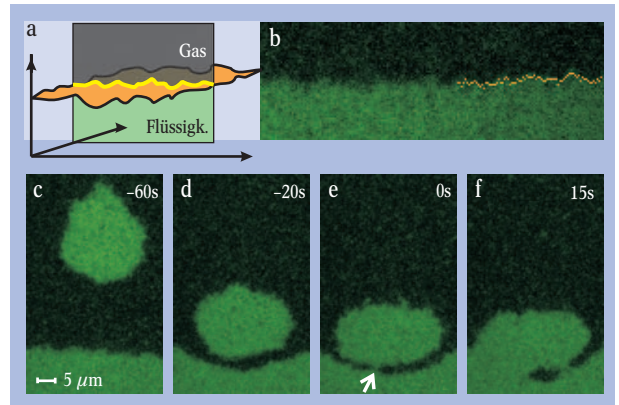
Allerdings sind für molekulare Flüssigkeiten die Amplituden  $L_{\perp}$  nur einige Nanometer groß und die auftretenden Geschwindigkeiten  $\gamma/\eta \approx 10$  m/s aufgrund kleiner Viskositäten  $\eta$  sehr hoch. Deshalb ist zur detaillierten Untersuchung dieser Wellen in der Regel hochauflösende Röntgenstrahlung notwendig.

Dirk Aarts, Matthias Schmidt und Henk Lekkerkerker (Universität Utrecht) haben nun gezeigt, dass Grenzflächen von kolloidalen Flüssigkeiten mit modernen Mikroskopietechniken studiert werden können und dass sich die Oberflächenspannung und damit die charakteristischen Längen- und Zeitskalen über mehrere Größenordnungen verändern lassen [1]. Dies ist vor allem dem Umstand zu verdanken, dass sich kolloidale Teilchen (fluoreszierende PMMA-Kügelchen in einer Polystyrol-Lösung) wie extrem große Atome verhalten können [2]. Bereits Albert Einstein und Jean Baptiste Perrin konnten zeigen, dass die bekannte barometrische Höhenformel nicht nur für die Dichte molekularer Gase, sondern aufgrund der thermischen Brownschen Bewegung auch für Kolloide gilt. Aufgrund der durch die Polymere in der Lösung erzeugten attraktiven entropischen Wechselwirkung („Depletion“-Kraft) [3] gibt es kolloidale Suspensionen aber nicht nur in

der Gasphase mit niedriger Kolloiddichte, sondern als Flüssigkeiten mit hoher Dichte, sodass sich auch eine Grenzfläche koexistierender Phasen ausbilden kann (Abb. 1).

Die Oberflächenspannung  $\gamma \sim k_B T/L^2 \sim 1 \mu\text{N/m}$  ist aber extrem klein, da der Teilchendurchmesser  $L \sim 100$  nm der Kolloide im Gegensatz zu Atomen sehr groß ist (Abb. 2a). Sowohl die Kapillarlänge  $L_{\parallel}$  als auch die Wellenamplituden  $L_{\perp}$  dieser kolloidalen Oberflächen sind dementsprechend einige Mikrometer groß und damit mittels konfoka-

\*) Diese liegt im Bereich  $\gamma \sim 10 - 100$  mN/m, bei einer Dichtedifferenz  $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g \sim 100 - 1000$  kg/m<sup>3</sup> zwischen der fluiden und gasförmigen Phase, Erdbeschleunigung  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.



**Abb. 1:** Kapillarwellen auf kolloidalen Flüssigkeitsoberflächen lassen sich mit konfokaler Mikroskopie nun direkt im Ortsraum sichtbar machen (a, b). Die Helligkeit ist proportional zur Dichte der mit einem fluoreszierenden Farbstoff markierten Kolloide. Damit ließ sich erstmals detailliert beobachten, wie ein Tropfen in drei dynamischen Stadien mit einer Oberfläche verschmilzt: Der trennende Gasfilm wird dünner (c, d); eine Flüssigkeitsbrücke (Pfeil) entsteht durch Kapillarwellen (e); der Tropfen zerfließt in die fluide Phase, wobei Gasblasen eingeschlossen werden können (f) [1].

ler Mikroskopie direkt im Ortsraum sichtbar (Abb. 1a,b). Da auch die Geschwindigkeiten ( $\gamma/\eta \approx 1 \mu\text{m/s}$ ) sehr klein sind, ist es möglich, hydrodynamische Prozesse in Echtzeit zu beobachten und z. B. die lange diskutierte Frage zu beantworten, wie wichtig Kapillarwellen für die Verschmelzung von Tröpfchen sind (Abb. 1c-f).

Flüssigkeiten und damit fluide Oberflächen sind nur in einem engen Temperatur- und Druckbereich thermodynamisch stabil. Seit sich van der Waals 1873 die Frage stellte, warum es überhaupt eine flüssige Phase gibt und nicht vielmehr nur Gase und Festkörper, blieb die Erforschung der mikroskopischen Struktur von Flüssigkeiten eine zentrale Aufgabe der statistischen Physik. Van der Waals' Antwort, dass eine attraktive Kraft zwischen den Teilchen eine notwendige Bedingung für einen fluiden Phasenübergang ist, stellte zwar einen Meilenstein im Verständnis kondensierter Materie

Priv.-Doz. Dr. Uta Fritze-von Alvensleben, Universitätssternwarte Göttingen, Geismarlandstr. 11, 37083 Göttingen

dar, ließ aber viele weitere Phänomene unbeantwortet. Bei Molekülen ist diese attraktive Wechselwirkung die disperse (van der Waals) Kraft. Erst 1954 entdeckten jedoch Asaku-

das Verschwinden der Grenzfläche in der Nähe eines kritischen Phasenüberganges sind fundamentale Fragen der statistischen Physik von Flüssigkeiten. Die direkte Beobach-

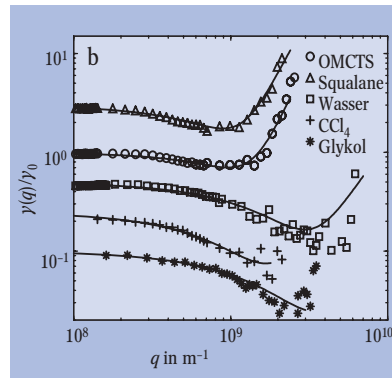
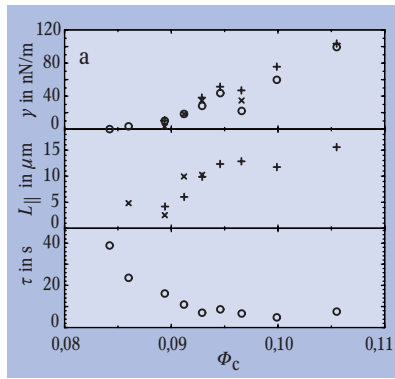
lässt sich der Überlagerungszustand als Linearkombination  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  ausdrücken. Eine einzelne Messung projiziert das System irreversibel auf einen der Basiszustände, wobei der Überlagerungszustand zerstört wird und sich keine weitere Information mehr über ihn gewinnen lässt. Die Kunst der Quanten-Teleportation besteht also darin, die Übertragung ohne eine direkte Messung des Ausgangszustands zu erreichen.

In den kürzlich veröffentlichten Experimenten [1, 2] werden als Basis zwei langlebige atomare Zustände verwendet (metastabile Zustände von Kalzium-Ionen in Innsbruck, Grundzustände der Hyperfein-Struktur von Beryllium-Ionen in Boulder). Die Ionen werden in einer Radiofrequenzfalle festgehalten und mittels Laserkühlung auf Temperaturen von wenigen  $\mu\text{K}$  abgekühlt. Zur Übertragung beliebiger Quantenzustände benutzen beide Gruppen ein Verfahren, das im Jahr 1993 vorgeschlagen wurde [3]. Es beruht auf der „Verschränkung“ von Quantenbits. In einem verschränkten Zustand zweier Teilchen A und B ist das Ergebnis einer separaten Messung an A und B zwar völlig unbestimmt, der Messwert für A ist jedoch stets mit dem für B korreliert. Wird für A etwa der Zustand  $|0\rangle$  gemessen, findet man B in  $|1\rangle$  und umgekehrt. Die Quanten-Teleportation nutzt diese Korrelation zwischen den Teilchen, die instantan und unabhängig von der Entfernung auftritt.

Im ersten Schritt der Teleportation (siehe Skizze auf S. 22) müssen zunächst die Zustände zweier Ionen A und B miteinander verschränkt werden. Dies erreichen beide Gruppen mittels Manipulation der internen Ionenzustände durch Laserpulse, verbunden mit der Anregung ihrer Eigenschwingung in der Falle. Als Ergebnis liegen die beiden Ionen in dem gewünschten verschränkten Zustand vor. Der zu übertragende Zustand wird im zweiten Schritt in einem weiteren Ion C präpariert, das mit den Ionen A und B eine lineare Kette bildet. Mit Hilfe von Laseranregung wird eine beliebige Überlagerung der Basiszustände  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  erzeugt, wobei die beiden Gruppen unterschiedliche Techniken zur selektiven Anregung des Start-Ions C verwenden.

Im entscheidenden dritten Schritt führt man eine gemeinsame Messung an den Ionen A und C so durch, dass sich anhand des Messergebnisses der ursprüngliche

**Abb. 2:**  
 ► a) Durch statistische Analyse der Position der Oberfläche lassen sich Oberflächenspannung  $\gamma$ , Kapillarlänge  $L_{\parallel}$  und Relaxationszeit  $\tau = L_{\parallel}\eta/\gamma$  von Kapillarwellen kolloidalen Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Kolloiddichte  $\Phi_c$  bestimmen [1].  
 ► b) Bei molekularen Flüssigkeiten hängt die Oberflächenspannung  $\gamma(q)$  vom Wellenvektor  $q$  ab, ein molekularer Effekt, der nun vielleicht bei Kolloiden näher untersucht werden kann [4, 5].



ra und Osawa die attraktiven Depletion-Kräfte zwischen Kolloiden [3], ohne die es die in [1] nun sichtbar gemachten fluiden Grenzflächen gar nicht geben würde.

Vor allem der Einfluss dieser attraktiven Kräfte auf die mikroskopische Struktur von fluiden Grenzflächen wird bis heute studiert, da Oberflächen besonders sensitiv auf molekulare Wechselwirkungen reagieren und die involvierten Längenskalen ( $L_{\parallel} \gg L_{\perp} \gg L$ ) bei molekularen Flüssigkeiten um Größenordnungen auseinander liegen. Dies macht eine theoretische Beschreibung von fluktuierenden Grenzflächen, die alle Längenskalen umfaßt, sehr schwierig. So ist z. B. erst kürzlich theoretisch vorhergesagt [4] und durch Röntgenstreuung gemessen [5] worden, dass die Oberflächenspannung keine Konstante ist, sondern aufgrund der attraktiven van der Waals-Kraft vom Wellenvektor der Kapillarwelle abhängt und bei molekularen Abständen deutlich kleiner wird (Abb. 2b). Es wäre außerordentlich interessant, ob ein ähnlicher Effekt auch bei Grenzflächen kolloidalen Flüssigkeiten aufgrund der attraktiven Depletion-Kraft auftritt, obwohl die Längen  $L_{\parallel} \approx L_{\perp} \approx L$  bei Kolloiden ähnlich groß sind. Die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von mikroskopischen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen könnte dann im Detail untersucht werden, da im Unterschied zu Molekülen die Wechselwirkung zwischen Kolloiden in einem weiten Bereich gezielt verändert werden kann. Vor allem die Gültigkeit hydrodynamischer Gleichungen und die Tragfähigkeit des Kapillarwellenkonzeptes bei mikroskopischen Abständen sowie

Die Ionen werden in einer Radiofrequenzfalle festgehalten und mittels Laserkühlung auf Temperaturen von wenigen  $\mu\text{K}$  abgekühlt. Zur Übertragung beliebiger Quantenzustände benutzen beide Gruppen ein Verfahren, das im Jahr 1993 vorgeschlagen wurde [3]. Es beruht auf der „Verschränkung“ von Quantenbits. In einem verschränkten Zustand zweier Teilchen A und B ist das Ergebnis einer separaten Messung an A und B zwar völlig unbestimmt, der Messwert für A ist jedoch stets mit dem für B korreliert. Wird für A etwa der Zustand  $|0\rangle$  gemessen, findet man B in  $|1\rangle$  und umgekehrt. Die Quanten-Teleportation nutzt diese Korrelation zwischen den Teilchen, die instantan und unabhängig von der Entfernung auftritt.

KLAUS MECKE

- [1] D. G. A. L. Aarts, M. Schmidt und H. N. W. Lekkerkerker, *Science* **304**, 847(2004)
- [2] C. Bechinger, *Phys. Blätt.*, Juli 2000, S. 75; W. C. K. Poon, *J. Phys. Condens. Matter* **14**, R859 (2002)
- [3] C. Bechinger et al., *Phys. Blätt.*, Dez. 1999, S. 53; R. Roth et al., *Phys. Rev. E* **62**, 5360 (2000)
- [4] K. Mecke und S. Dietrich, *Phys. Rev. E* **59**, 6766 (1999)
- [5] C. Fradin et al., *Nature* **403**, 871 (2000); S. Mora et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 216101 (2003)

## „Beamten“ mit Atomen

Die Teleportation (auch bekannt als Beamen) ist ein aus der Science-Fiction-Welt des Raumschiffs Enterprise entlehener Begriff, der die instantane Übertragung einer Person an einen entfernten Ort bezeichnet. Dieser Transportweg bleibt zwar weiterhin Fiktion, aber den Arbeitsgruppen von Rainer Blatt an der Universität Innsbruck [1] und von Dave Wineland am National Institute of Standards and Technology in Boulder [2] ist jetzt unabhängig voneinander ein ähnlich erstaunliches Experiment gelungen: die kontrollierte Übertragung eines Quantenzustands von einem Atom zu einem anderen.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass sich das Atom in einer unbekanntem Überlagerung von Basiszuständen befinden kann. Im einfachsten Fall eines zweidimensionalen Systems (Quantenbit) mit den Basiszuständen  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$

Dr. Klaus Mecke,  
 Max-Planck-Institut  
 für Metallforschung,  
 Heisenbergstr. 3,  
 70569 Stuttgart  
 und Institut für  
 Theoretische und  
 Angewandte Physik,  
 Fakultät für  
 Physik Universität  
 Stuttgart, Pfaffen-  
 waldring 57, 70569  
 Stuttgart