

der gemessenen zeitlichen Korrelationsfunktionen  $C(t)$  bei Annäherung an die kritische Temperatur  $T_c$ . Während  $C(t)$  weit unterhalb von  $T_c$  exponentiell zerfällt (die gestrichelten Kurven in der Abb. sind Fits mit Exponentialfunktionen), genügt die Korrelationsfunktion in der Nähe von  $T_c$  dem erwarteten Potenzgesetz (durchgezogene Linie). Damit wurde durch das vorliegende Experiment der Übergang von nichtkritischer zu kritischer Dynamik in einer binären metallischen Legierung gezeigt.

Das Experiment von Mocuta *et al.* weist den Weg, wie mit Röntgenstrahlen wichtige Einsichten in die Dynamik von Phasenübergängen gewonnen werden können. In Zukunft wären hier neben der systematischen Untersuchung der kritischen Dynamik auch Experimente zur Phasenordnungskinetik denkbar.

JÜRGEN HORBACH

- [1] K. Binder, Statistical Theories of Phase Transitions, in: P. Haasen (Hrsg.), Materials Science and Technology, Vol. 5, VCH, Weinheim (1992)
- [2] P. C. Hohenberg und B. I. Halperin, Rev. Mod. Phys. **49**, 435 (1977)
- [3] S. Brauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2010 (1995)
- [4] C. Mocuta, H. Reichert, K. Mecke, H. Dosch und M. Drakopoulos, Science **308**, 1287 (2005)

## Atomuhr im optischen Gitter

**Eine neue Atomuhr, in der eine Atomwolke in ein optisches Gitter gesperrt wird, könnte eine 1000-mal präzisere Zeitmessung ermöglichen.**

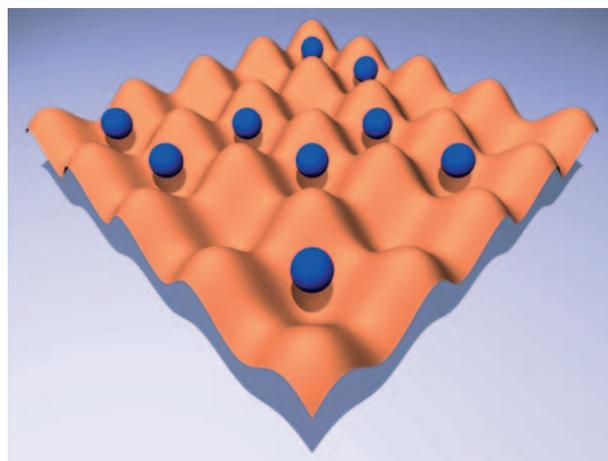
Jeder Uhr liegt ein periodischer Vorgang zugrunde, der möglichst gleichmäßig abläuft. Ein Zählwerk führt über die Anzahl der Perioden Buch und repräsentiert somit die vergangene Zeit seit seiner Initialisierung. Die Geschichte der Uhrentwicklung hat verschiedene auf diesem Prinzip basierende Uhren hervor gebracht, wie die 1656 von Christiaan Huygens erfundene Pendeluhr. Bei dieser übersetzt das Uhrwerk die Anzahl der registrierten Pendelschwingungen in eine bestimmte Zeigerstellung auf dem Ziffernblatt. Die in den 1920er-Jahren entwickelte Quarzuhr verwendete erstmals einen elektronischen Zähler. Der zur Schwingung angeregte Quarz vibriert in modernen Quarzuhren 32 786-mal in der Sekunde, damit sich der binäre Zähler beim Stand

von  $2^{15}$  selbst zurücksetzt und den Sekundenzeiger um eine Einheit weiter bewegt. Der heutige Stand der Technik sind hochentwickelte Cäsium-Atomuhren, die einen Hyperfein-Übergang des  $^{133}\text{Cs}$ -Atoms nutzen. Diese Hyperfein-Aufspaltung, die auf der Wechselwirkung des Kerns mit dem Magnetfeld seiner Elektronen beruht, wird mit einem von Norman Ramsey [1] entwickelten Verfahren möglichst genau detektiert. Die Übergangsfrequenz wurde 1967 bei der Neudefinition der SI-Sekunde auf exakt 9 192 631 770 Zyklen pro Sekunde festgelegt.<sup>1)</sup> Moderne Cs-Fontänenuhren erreichen eine relative Unsicherheit von weniger als  $10^{-15}$ .

Da sich die Zeit wesentlich genauer als alle anderen physikalischen Größen bestimmen lässt, bilden Atomuhren die Grundlage für alle hochpräzisen Messungen. Zur Charakterisierung einer Uhr sind zwei Größen entscheidend. Einerseits gibt die Stabilität einer Uhr an, wie stark die Frequenz des Oszillators schwankt, andererseits gibt die Genauigkeit Auskunft, wie gut die gemittelte Frequenz mit dem wahren Wert des Uhrenübergangs, z. B. zwischen den beiden Cs-Hyperfeinniveaus, übereinstimmt. Die Stabilität einer Uhr gibt also die statistische Unsicherheit an, und die Genauigkeit misst den Einfluss äußerer Störungen, die die Übergangsfrequenz systematisch verschieben können.

Eine höhere Oszillatorfrequenz ist für eine gute Uhr ein entscheidender Vorteil. Anschaulich ermöglicht es eine höhere Frequenz, die Zeit in feinere Teile zu zerlegen, ähnlich wie es ein Maßstab mit einer feineren Unterteilung erlaubt, kürzere Abstände zu messen. Eine höhere Frequenz steigert die Stabilität und ge-

stattet es, bereits nach kürzerer Zeit einen genaueren Wert der mittleren Oszillatorfrequenz anzugeben.<sup>2)</sup> Damit ist die Strategie zur Verbesserung der Uhren klar: Ein Oszillator mit noch höherer Frequenz muss her. Seit Ende der 1960er-Jahre



In den „Bäuchen“ eines optischen Gitters befinden sich Strontium-Atome (blau), deren Uhrenübergang mit einem Laser abgefragt wird. Während die bisherigen Experimente nur mit einem eindimensionalen optischen Gitter arbeiten [1], soll sich die Genauigkeit der Atomuhr mit dem hier dargestellten dreidimensionalen Gitter weiter steigern lassen.

denkt man ernsthaft über optische Oszillatoren nach, d. h. einen Uhrenübergang, der mit Laserlicht von einigen 100 oder 1000 THz getrieben wird. Als Oszillator kommen eine ganze Reihe von Atomen, Molekülen oder Ionen in Frage. Das Uhrwerk einer optischen Uhr, also ein sehr schneller Zähler für sichtbares Licht, war jedoch lange Zeit eine große Hürde. Die Zähler füllten ganze Hallen mit Lasern und funktionierten nur sporadisch. In der Tat gelang es erst 1995, den ersten Zähler für sichtbares Licht zu realisieren [2]. Diese Situation hat sich 1999 mit der Einführung von Frequenzkämmen als optische Zähler geändert [3]. Mit dieser Technologie lassen sich

1) Die Festlegung auf diese krumme Zahl war notwendig, um mit der alten Ephemeridensekunde kompatibel zu sein.

2) Dies kann ein entscheidender Vorteil sein: Würde man etwa die Zeit mit Hilfe einer Sonnenuhr bestimmen, die sich auf eine Minute genau ablesen lässt, so müsste man rund 2 Millionen Jahre warten, um eine relative Genauigkeit von  $10^{-12}$  zu erreichen. Dies ist übrigens ein Wert, den die Stabilität der Erdrotation durchaus erlauben würde.

## KURZGEFASST...

### ■ Totgesagte leben länger

Ein Astronomenteam hat entdeckt, dass der erloschene Stern im Zentrum des Supernova-Restes von Cassiopeia A doch noch aktiv ist. Mit dem Weltraumteleskop Spitzer beobachteten sie nicht nur das „Infrarotecho“ des Supernova-Ausbruchs von 1680, sondern auch das eines erst 1953 erfolgten Ausbruchs. Vermutlich handelt es sich daher bei Cassiopeia A um einen der ansonsten schwer zu findenden Magnetare, das sind Neutronensterne mit starkem Magnetfeld. Damit wäre erstmals ein Magnetar gefunden, von dem bekannt ist, wann und aus was für einem Stern er entstanden ist. O. Krause *et al.*, Science **308**, 1513 (2005)

### ■ Sauerstoff unter Druck

Bei Normaldruck ist Sauerstoff ein antiferromagnetischer Isolator, wandelt sich aber unter dem extremen Druck von ca. 96 Gigapascal zu einem Supraleiter und Metall. Seit Jahren vermutet man, dass Sauerstoff bereits bei wesentlich geringerem Druck seine magnetischen Eigenschaften verliert. Das konnte nun Igor Goncharenko (Laboratoire Léon Brillouin, Saclay nahe Paris) mit Hilfe von Neutronenstreuung an einer polykristallinen Probe festen Sauerstoff nachweisen. Damit zeigte er, dass die langreichweitige magnetische Ordnung in Sauerstoff bereits bei etwa 8 Gigapascal verschwindet. I. Goncharenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 205701 (2005)

Dr. Jürgen Horbach,  
Institut für Physik,  
Johannes Gutenberg-  
Universität Mainz,  
Staudinger Weg 7,  
55099 Mainz

mit einem mittlerweile auf Schuhkartongröße geschrumpften Apparat Frequenzen bis zu einigen  $10^{15}$  Hz fehlerfrei und kontinuierlich zählen. Auf dieser Basis gelang es, die ersten experimentellen optischen Uhren zu verwirklichen [4]. Nun ist der Ball wieder bei den Entwicklern der optischen Oszillatoren bzw. optischen Frequenzstandards.

In den vielen Jahren, in denen nach dem optimalen optischen Standard gefahndet wird, haben sich zwei Hauptlinien mit zum Teil komplementären Eigenschaften herauskristallisiert. Einzelne gespeicherte Ionen als Frequenzstandard lassen sich mit Hilfe von Laserstrahlen auf Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts abkühlen, sodass weder Stöße noch der Doppler-Effekt stören. Bei einer geschickten Wahl der Falle und des Ions lassen sich auch die Störeinflüsse durch die für das Speichern nötigen Felder weitgehend eliminieren, sodass eine relative Genauigkeit von  $10^{-18}$  zu erwarten ist. Problematisch ist jedoch das sehr schwache Signal eines einzelnen Ions, das zum Teil völlig unrealistische Mittelungszeiten notwendig machen würde, um diese Genauigkeit auch zu erreichen. Erschwerend kommt ein sehr schmaler Uhrenübergang mit einer entsprechend niedrigen Übergangsrate hinzu. Mit anderen Worten: Ionenfallen-Stan-

dards haben gewöhnlich eine gute Systematik (Genauigkeit), aber eine schlechte Statistik (Stabilität).

Im Gegensatz dazu gibt es optische Frequenzstandards mit Millionen von neutralen Atomen. Allerdings gelang es bislang nicht, so viele Atome einzusperren ohne große Störungen der Übergangsfrequenz. In Ionenfallen können nur einige wenige Teilchen am Feldnullpunkt sitzen, und bei Neutralatomen wirken sich die zum Fangen verwendeten Laserstrahlen aufgrund der AC-Stark-Verschiebung negativ aus. Bisherige Varianten dieser Frequenzstandards lassen die gekühlten Atome daher kurz vor dem Abfragen der Übergangsfrequenz fallen, indem die Fallen- und Kühllaser ausgeschaltet und der Uhrenlaser eingeschaltet wird. Die aufgrund der Gravitation beschleunigte Bewegung der Atome verursacht aber wiederum andere systematische Verschiebungen des Uhrenübergangs. Wie man es auch dreht: Bei den Standards mit neutralen Atomen hat man gewöhnlich eine gute Statistik, dafür aber eine schlechte Systematik; also genau andersherum wie bei den Ionenfallen-Standards.

Dieses Problem haben nun Masao Takamoto und Mitarbeiter gelöst [5]. Ihnen ist es gelungen, sehr viele Atome gleichzeitig zu fangen, ohne dass diese miteinander stoßen können oder sich

die Übergangsfrequenz durch das Einfangen verschiebt. Dazu werden Strontium-Atome durch Dipolkräfte in den Wellenbäuchen einer Stehwelle gefangen, die mit Hilfe zweier gegenläufiger Fallenlaserstrahlen erzeugt wird. Die Atome werden so, zumindest in Strahlrichtung, an der Bewegung gehindert und können in dieser Richtung auch nicht mehr stoßen. Im nächsten Schritt ist geplant, die Atome in einem optischen Gitter aus drei zueinander senkrechten Stehwellen einzusperren, sodass sie überhaupt nicht mehr stoßen können (Abb.). Wichtiger als die Unterdrückung von Stößen ist jedoch die Unterdrückung der AC-Stark-Verschiebung des Uhrenübergangs durch den Fallenlaser. Dies gelingt mit einem Trick: Die Frequenz des Fallenlasers  $\nu_F$  lässt sich über einen sehr großen Bereich verstimmen, ohne dass die Atome aus der Falle fallen. Takamoto und Mitarbeiter stellen ihren Fallenlaser genau auf eine „magische Wellenlänge“ ein, bei der die AC-Stark-Verschiebung der Übergangsfrequenz  $\Delta\nu$  das Vorzeichen wechselt. Rein rechnerisch müssen sie diesen Nullpunkt innerhalb von 1 MHz treffen, um den Uhrenübergang um weniger als 0,001 Hz oder  $4 \times 10^{-18}$  zu verschieben; ein leichtes Spiel, wenn man eine optische Uhr und einen Frequenzkamm zur Verfügung hat.

Mit diesen optischen Uhren werden bessere Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie möglich. Bei einer Präzision von  $10^{-18}$  wird der Einfluss, den die Gravitation nach der Relativitätstheorie auf den Uhrengang ausübt, bereits messbar, wenn man die Uhr um nur einen Zentimeter anhebt. Eine weitere wissenschaftliche Anwendung können diese Uhren bei der Suche nach einer möglichen langsamen Variation gewisser Naturkonstanten haben [6]. In der Technik könnten sie helfen, die Satellitennavigation und die Synchronisation von schnellen Computernetzen zu verbessern.

THOMAS UDEM

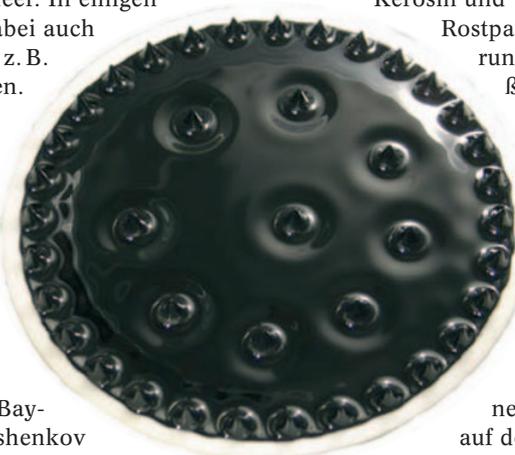
- [1] N. F. Ramsey, Phys. Rev. **78**, 695 (1950)
- [2] H. Schnatz et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 18 (1996)
- [3] Th. Udem, R. Holzwarth, T. W. Hänsch, Nature **416**, 233 (2002).
- [4] S. Diddams et al., Science **293**, 825 (2001)
- [5] M. Takamoto et al., Nature **435**, 321 (2005)
- [6] M. Fischer et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 230802 (2004)

Dr. Thomas Udem,  
MPI für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching

## Musterbildung ohne Dissipation

Regelmäßige Muster entstehen in der Natur sehr häufig, man denke nur an Sandmuster in Dünen oder im Meer. In einigen Fällen bilden sich dabei auch isolierte Strukturen, z. B. kleine Sandhügelchen. Damit solche Strukturen stabil bleiben, ist jedoch ein empfindliches Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und dissipativen Prozessen erforderlich.

Reinhard Richter von der Universität Bayreuth und Igor Barashenkov von der Universität Cape Town (Südafrika) haben nun gezeigt, dass isolierte Strukturen in einer magnetischen Flüssigkeit auch ohne Dissipation entstehen können. Das war bereits theoretisch vorhergesagt worden.



Für ihr Experiment gaben die beiden Physiker eine dickflüssige Mischung aus Kerosin und 10 Nanometer kleinen Rostpartikeln in eine flache, runde Schale. Anschließend legten sie ein äußeres Magnetfeld an. Bei bestimmten Feldstärken bildete sich ein ringförmiges Muster am Rand der Flüssigkeit. Unter ganz speziellen Bedingungen gelang es Richter und Barashenkov mit einem kleineren Magnet, isolierte Hügelchen auf der flachen Oberfläche zu erzeugen, die auch nach Abschaltung des Zusatzmagneten bestehen blieben, nur stabilisiert durch das Gleichgewicht aus Magnetfeld und Schwerkraft. [R. Richter und I. V. Barashenkov, Phys. Rev. Lett. **94**, 184503 (2005)]