

ten kurzer Bursts, was inkonsistent mit der langen Dauer ist.

Fynbo et al. diskutieren einen weiteren Burst, GRB 060505, der ebenfalls lang und nah ist (Dauer ca. 4 s,  $z = 0,089$ , entsprechend 332 Mpc). Auch bei ihm wurde keine SN entdeckt und die Leuchtkraft mit ca. 250-mal schwächer als SN 1998bw angegeben [3]. Dieser Burst wurde in einer normalen Muttergalaxie gefunden, aber leider war es wegen des Datenformats nicht möglich, den Zeitverzug zwischen energieärmeren und energiereichen Photonen zu messen.

Es ist offensichtlich, dass GRB 060614 und GRB 060505 ungewöhnlich waren. Gehrels et al. schlagen deshalb u. a. vor, eine neue Klasse von GRBs langer Dauer einzuführen, die nicht von massereichen Sternen produziert würden [2]. Ob dies wirklich nötig ist, wird sich jedoch erst zeigen müssen. Derzeit existieren mehrere alternative Erklärungen, die zwar teilweise

als unwahrscheinlich erscheinen, aber durchaus wahrscheinlicher sind als die Notwendigkeit einer dritten GRB-Klasse, nachdem für alle ca. 4000 bislang beobachteten GRBs zwei Klassen ausgereicht haben. Eine dieser Alternativen ist eine größere Entfernung, sodass die Zuordnung des GRB zu der derzeit favorisierten Muttergalaxie falsch wäre. Bereits eine um den Faktor 3 bis 5 größere Entfernung reicht aus, um sowohl die Leuchtkraft der Muttergalaxie in den „normalen“ Bereich zu bringen als auch die Nicht-Entdeckung der Supernova plausibel erscheinen zu lassen. Die Röntgen- und UV-Daten erlauben eine um bis einen Faktor 10 größere Entfernung ( $z = 1,3$ , Vertrauensbereich 99,99 %) [2]. Eine andere Alternative wäre, dass die zu GRBs führenden Hypernovae durchaus unterschiedlich hell sind – im Gegensatz zu den Standard-Supernovae, die alle die gleiche Energiemenge abstoßen, sodass man aus

deren beobachteter Helligkeit die Entfernung und sogar die Existenz der dunklen Energie ableiten kann. Eine solche geringere Leuchtkraft ließe sich z. B. durch eine sehr schwache Explosion erklären, in der die Geschwindigkeit der abgestoßenen Sternhülle nicht groß genug zum vollständigen Entweichen ist. Daher würde die Hülle wieder zurück auf das Schwarze Loch fallen und könnte keine optische Strahlung aussenden. Welches Szenario zutrifft, wird erst die Beobachtung weiterer GRBs zeigen.

Sheila McBreen und Jochen Greiner

Dr. Sheila McBreen,  
Dr. Jochen Greiner,  
Max-Planck-Institut  
für extraterrestrische  
Physik, 85748 Gar-  
ching

- [1] S. Klose, J. Greiner und D. H. Hartmann, *Physik. Blätter*, Dezember 2001, S. 47
- [2] N. Gehrels et al., *Nature* **444**, 1044 (2006)
- [3] J. P. U. Fynbo et al., *Nature* **444**, 1047 (2006)
- [4] M. Della Valle et al., *Nature* **444**, 1050 (2006)
- [5] A. Gal-Yam et al., *Nature* **444**, 1053 (2006)

## ■ Clockwork Optik

**Mit kalten Strontiumatomen wurde ein Rekordwert für die spektrale Auflösung eines optischen Übergangs erreicht – ein vielversprechendes Ergebnis für eine neue Generation optischer Atomuhren.**

In einer konventionellen Atomuhr wird ein Mikrowellenoszillator auf einen Referenzübergang von Cäsium-Atomen stabilisiert und bildet so das „Pendel“ der Uhr. Ein elektronisches „Uhrwerk“ zählt die Schwingungen und setzt diese in eine Zeitangabe um. Eine wesentlich höhere Genauigkeit versprechen die in den letzten Jahren durchgeführten Entwicklungen für eine optische Atomuhr, bei der ein Laser auf einen optischen Referenzübergang stabilisiert wird. Mit dem von Theodor Hänsch entwickelten optischen Frequenzkamm als Uhrwerk lässt sich die verglichen mit Mikrowellen um Größenordnungen höhere Pendelfrequenz des Lasers präzise herunterteilen und elektronisch zählen. Entscheidend für die insgesamt geringere Unsicherheit ist letztlich, dass die atomare Linie möglichst schmal und

ungestört ist und mit einem hohen Verhältnis von Signal zu Rauschen aufgenommen werden kann. Um Störungen durch die Bewegung der Atome zu vermeiden, müssen diese über eine längere Zeit in einem Bereich lokalisiert bleiben, dessen Ausdehnung kleiner als die Wellenlänge der anregenden Strahlung ist. Diese Forderung ist offensichtlich für Laserlicht schwieriger zu erfüllen als für Mikrowellen.

### Die „magische“ Wellenlänge

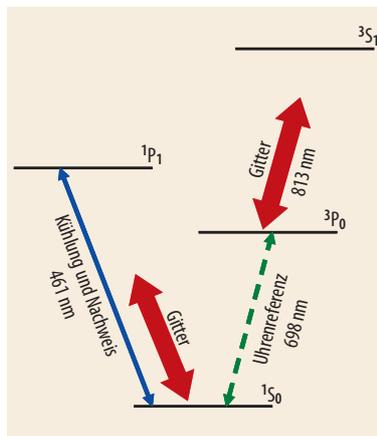
Große Fortschritte in der Entwicklung optischer Atomuhren ergaben sich in den letzten Jahren durch die Kombination von Techniken der Laserkühlung und der Speicherung von Atomen in Fallen. Als besonders geeignet haben sich lasergekühlte Ionen in Paul-Fallen erwiesen. Hier lässt sich die Bewegung des Ions bis in den Grund-

zustand des Fallenpotentials abkühlen, und die Falle selbst hat praktisch keinen Einfluss auf die innere Niveaustuktur des Ions. Da aber jeweils nur ein einzelnes Ion betrachtet wird, ist das Signal schwach und mit einem relativ starken Rauschen behaftet. Neutrale Atome dagegen lassen sich wegen der Abwesenheit der Coulomb-Abstoßung in großer Zahl und bei hohen Dichten kühlen und speichern. Fallen für neutrale Atome funktionieren jedoch immer über eine Verschiebung der inneren Energieniveaus, die für eine hochauflösende und präzise Spektroskopie sehr nachteilig ist. Eine Lösung dieses Dilemmas hat H. Katori vorgeschlagen: die Speicherung von Atomen in einem „optischen Gitter“ bei einer „magischen“ Wellenlänge [1].

In einer stehenden Laserwelle (dem optischen Gitter), deren Fre-

Dr. Ekkehard Peik,  
 Fachbereich Zeit und  
 Frequenz, Physika-  
 lisch-Technische  
 Bundesanstalt,  
 Bundesallee 100,  
 38116 Braunschweig

quenz unterhalb der niedrigsten vom Grundzustand aus anzuregenden Resonanzlinie liegt, werden Atome im Grundzustand durch den dynamischen Stark-Effekt in die Intensitätsmaxima gezogen, da dort ihre innere Energie am stärksten abgesenkt wird. Es entsteht eine räumlich periodische Anordnung der Atome. Die Stärke der Niveaushiftung hängt von der Frequenz des Lasers und von der lokalen Intensität ab, also im Allgemeinen von der Position des Atoms im Gitter. Je nach Frequenzlage der weiteren Resonanzlinien relativ zum Gitterlaser werden höhere Zustände der Atome dabei angehoben oder ebenfalls abgesenkt. Ist man nun an einem bestimmten Referenzübergang interessiert, lässt sich die Frequenz des Gitterlasers so wählen, dass die von ihm erzeugte Verschiebung in den beiden am Übergang beteiligten Niveaus identisch ist. Dies definiert die „magische“ Wellenlänge des Gitterlasers, bei der die Bewegung der Atome in der Falle nicht mehr zu einer spektralen Verbreiterung des Übergangs führt.



Vereinfachtes Schema der niedrigsten Energieniveaus von Strontium mit den wichtigsten Übergängen für Kühlung und Speicherung im optischen Gitter und dem Referenzübergang der optischen Uhr.

Besonders gut eignet sich diese Idee für Atome mit zwei Valenzelektronen (Abb.), denn diese besitzen in ihrem Singulett- und im Triplettssystem praktisch zwei Grundzustände  $1S_0$  und  $3P_0$ , die vom Gitterlaser ähnlich beeinflusst werden. Ein direkter elektrischer Dipolübergang zwischen den

beiden Niveaus mit  $J = 0$  ist bei Erhaltung des Drehimpulses verboten, aber bei Berücksichtigung der Hyperfeinwechselwirkung mit dem Kernspin oder eines äußeren Magnetfelds erlaubt. Dadurch kommt die für eine optische Uhr benötigte geringe natürliche Linienbreite des Übergangs zustande.

Mithilfe dieses Verfahrens und aufbauend auf ihrer Expertise im Bau frequenzstabiler Laser mit sub-Hertz-Linienbreite ist der Gruppe von Jun Ye am JILA (Boulder, USA) jetzt ein Fortschritt in der höchstauflösenden Laseranregung kalter Atome gelungen [2]. Dazu wurden Atome des Isotops  $^{87}\text{Sr}$  (Kernspin  $9/2$ ), dessen  $3P_0$ -Zustand eine Lebensdauer von etwa 150 s besitzt, auf etwa  $1\ \mu\text{K}$  gekühlt und in eine Stehwelle bei der magischen Wellenlänge von 813 nm gebracht. Die etwa  $10^4$  Atome sind dabei auf 100 Potentialtöpfe verteilt. Da die Atome besonders gut entlang der Achse der Stehwelle lokalisiert werden, wird der Referenzlaser bei 698 nm dem Gitterlaser parallel überlagert. Nach einem Puls des

DAS DUNKLE GERÜST DES UNIVERSUMS

Die „dunkle Materie“ bereitet den Astrophysikern großes Kopfzerbrechen. Zwar macht sie vermutlich 80 Prozent der gesamten Masse des Universums aus, aber sie bleibt, wie der Name schon sagt, unsichtbar und ihre Natur ist nach wie vor ungeklärt. Nun hat ein Forscherteam erstmals die Verteilung der dunklen Materie in einem großen Ausschnitt des Universums kartogra-

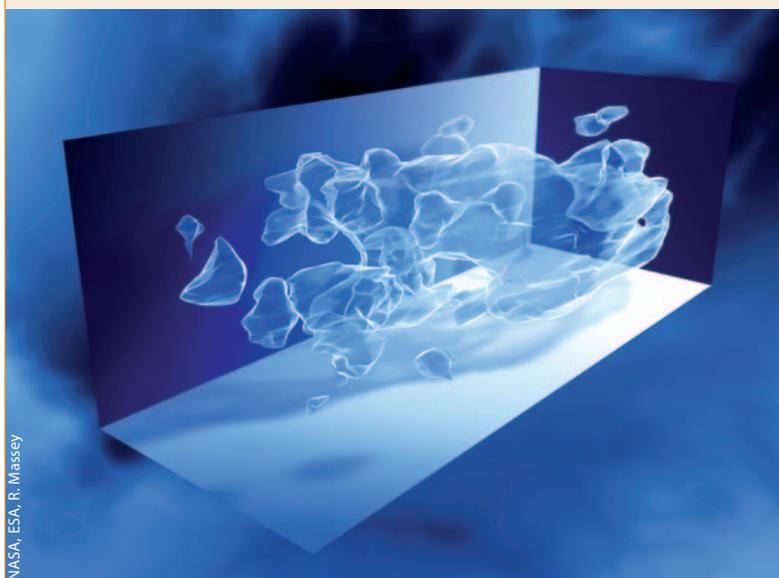
fiert. Dafür durchmusterte das Weltraumteleskop Hubble im Rahmen des Cosmic Evolution Survey (COSMOS) hochauflösend einen Himmelsausschnitt, der mit einer Kantenlänge von 1,6 Grad etwa achtmal so groß ist wie der Mond.

Dabei machen es sich die Forscher zunutze, dass sich sowohl die dunkle Materie als auch die gewöhnliche

„baryonische“ Materie über die Gravitation bemerkbar machen: Infolge des schwachen Gravitationslinseneffekts lenken beide Materiearten das Licht weiter entfernt liegender Objekte ab und ermöglichen es so, auf die ablenkende Masse zu schließen. Die Masse der sichtbaren Materie ergibt sich dabei aus der emittierten Strahlung und der Entfernung.

Auf diese Weise lässt sich die Verteilung der dunklen Materie kartografieren. Es zeigt sich eine Netzstruktur, die an den Stellen besonders dicht ist, wo auch normale Materie, also Galaxien und interstellares Gas, konzentriert sind. In der dreidimensionalen Karte blickt man dabei von links nach rechts in immer entferntere Bereiche und damit in immer frühere Phasen des Universums. Deutlich zu erkennen ist, wie die „Verklumpung“ der dunklen Materie mit zunehmenden Alter des Universums ausgeprägter wird. Das bestätigt die bisherige Vorstellung, dass sich die anfangs gleichmäßig verteilte dunkle Materie während der Entwicklung des Universums an bestimmten Stellen verdichtet hat, und dass die baryonische der dunklen Materie folgt. (AP)

R. Massey et al., Nature 445, 286 (2007)



NASA, ESA, R. Massey

698 nm-Lasers lässt sich die Umbeziehung zwischen den Niveaus mit  $J = 0$  nachweisen, indem man die Fluoreszenz auf dem Kühlübergang bei 461 nm beobachtet. Mit Pulsdauern von 480 ms wurden noch Fourier-limitierte Resonanzen mit einer Linienbreite von nur 1,8 Hz beobachtet. Dies entspricht einer Auflösung (dem Verhältnis von Frequenz zu Linienbreite) von  $2,4 \cdot 10^{14}$ , dem höchsten bisher in kohärenter Spektroskopie erreichten Wert. Etwa um einen Faktor zehn höher ist noch die Auflösung der schmalsten Mößbauer-Linien [3], deren Strahlung aber nicht kohärent ist und sich nicht elektronisch zählen lässt.

Die Unsicherheit des am JILA realisierten Frequenznormals wird mit  $9 \cdot 10^{-16}$  angegeben, limitiert hauptsächlich durch einen verbleibenden Einfluss des Stark-Effekts durch den Gitterlaser, durch den Zeeman-Effekt und durch eine mögliche Stoßverschiebung. Hiermit steht das System „Strontium im optischen Gitter“ neben den gespeicherten Ionen  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Yb}^+$  und  $\text{Hg}^+$  aktuell in der ersten Reihe präziser optischer Frequenznormale. Katoris Idee der „Gitteruhr“ hat sich schnell weit verbreitet. So arbeiten zur Zeit weltweit sechs Arbeitsgruppen (darunter auch die PTB) mit Strontium [1, 2, 4], und weitere Experimente werden mit Ytterbium und Quecksilber durchgeführt.

In den letzten zehn Jahren ist es gelungen, die Genauigkeit optischer Frequenznormale um mehr als drei Größenordnungen zu steigern. Damit wurde das Niveau der besten Cäsiumatomuhren erreicht und in einigen Experimenten bereits übertroffen [5, 6]. Die schon in den 1970er-Jahren von H. Dehmelt (für das gespeicherte Ion) vorausgesagte Unsicherheit von  $10^{-18}$  ist damit in greifbare Nähe gerückt. Eine solche Atomuhr würde hypothetisch über das Alter des Universums eine Unsicherheit von etwa einer Sekunde aufweisen. Bei dieser Genauigkeit wird die Kontrolle relativistischer Einflüsse auf den Uhrengang (durch Höhendifferenzen und Relativbewegungen) neue Herausforderungen an die Experimente stellen, gleichzeitig werden sich daraus aber auch neue Möglichkeiten für Präzisionstests der Grundlagen der Physik ergeben.

**Ekkehard Peik**

- [1] *M. Takamoto et al.*, Nature **435**, 321 (2005)
- [2] *M. M. Boyd et al.*, Science **314**, 1430 (2006)
- [3] *W. Potzel*, Hyperfine Interactions **40**, 171 (1988)
- [4] *R. Le Targat et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 130801 (2006)
- [5] *T. Schneider, E. Peik und Chr. Tamm*, Phys. Rev. Lett. **94**, 230801 (2005)
- [6] *W. H. Oskay et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 020801 (2006)

## KURZGEFASST

### ■ (Nichts) Neues von der Gravitation

Da die Newtonsche Gravitationskonstante  $G$  noch immer nur mit einer Genauigkeit im Promille-Bereich bekannt ist, wird weltweit an Methoden gearbeitet, sie auf neuartige Weise zu bestimmen. Das Potenzial für eine Genauigkeit von  $10^{-4}$  verspricht nun eine Messung, die darauf beruht, dass ein rund 500 kg schwerer Bleiklotz die quantenmechanische Phase von kalten Atomen beeinflusst. Die Phasenverschiebung wird dabei mit einem Atominterferometer gemessen. – Mit einer traditionellen Torsionswaage hat derweil ein anderes Team das Newtonsche Gravitationsgesetz bei kleinen Abständen bis hinunter zu 55  $\mu\text{m}$  verifiziert. Theoretiker sagen bei diesen Abständen Abweichungen vom Gravitationsgesetz aufgrund der Dunklen

Energie voraus, die die Gravitationskraft abschwächen soll. Davon war im Experiment jedoch nichts zu sehen. *J. B. Fixler et al.*, Science **315**, 74 (2007); *D. J. Kapner et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 021101 (2007)

### ■ Strahlendes Neutron

Freie Neutronen zerfallen normalerweise nach einer Lebensdauer von rund 15 Minuten in ein Proton, ein Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino. Amerikanische Physiker haben nun gezeigt, dass bei jedem etwa tausendsten Zerfall aufgrund der sog. inneren Bremsstrahlung zusätzlich ein Photon erzeugt wird. Dieses Experiment eröffnet neue Möglichkeiten, um Parameter des Standardmodells der Teilchenphysik zu bestimmen. *J. S. Nico et al.*, Nature **444**, 1059 (2006)