

## ■ Wenn Eisen transparent wird

Moderne Röntgenquellen machen elektromagnetisch induzierte Transparenz in Atomkernen möglich.

Priv.-Doz. Dr. Jörg Evers, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg

Wenn Autos oder Raumschiffe einfach unsichtbar werden, denkt wohl jeder an James Bond und Star Trek. Und doch ist es kürzlich gelungen, mithilfe von künstlich hergestellten Materialien Tarnkappen herzustellen, die Objekte in bestimmten Frequenzbereichen verbergen können [1]. Etwas Ähnliches passiert auf der atomaren Skala bei einem der Schlüsseffekte der Quantenoptik, der elektromagnetisch induzierten Transparenz (EIT) [2]. Darunter versteht man die Tatsache, dass Atome, die bei resonanter Anregung Licht normalerweise stark absorbieren, durch Interferenz mit einem zweiten Lichtfeld transparent werden können (Abb. 1a, b). Das zweite Lichtfeld koppelt dabei einen weiteren stabilen Grundzustand an den angeregten Zustand. Dadurch ergeben sich von beiden Grundzuständen aus Pfade zum angeregten Zustand, die destruktiv interferieren, sodass das Atom in den Grundzuständen bleibt. Ralf Röhlsberger und Mitarbeitern an der Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III am DESY in Hamburg ist es nun gelungen, EIT in der Wechselwirkung von harter Röntgenstrahlung mit Atomker-

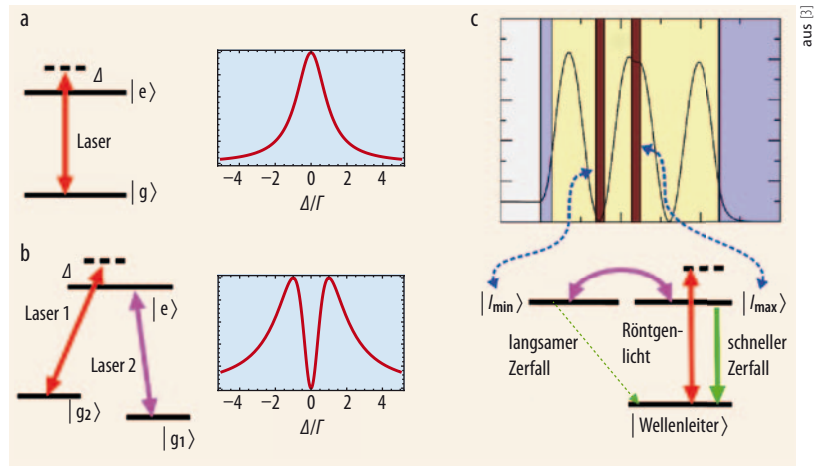


Abb. 1 Atome absorbieren monochromatisches Licht normalerweise stark, wenn es resonant mit einem atomaren Übergang ist (a).  $\Gamma$  ist hier die Breite der Resonanz,  $\Delta$  die Laserverstimmung. Bei der elektromagnetisch induzierten Transparenz (EIT) wird das Atom durch die Ankopplung eines zweiten Grundzu-

stands transparent (b). Das Experiment mit Atomkernen besteht aus zwei Eisenschichten (braun) in einem Wellenleiter (gelb, c). Da die Kerne in den beiden Schichten unterschiedlich schnell zerfallen, ergibt sich effektiv das EIT-Schema mit drei Quantenzuständen, obwohl die Kerne selbst nur zwei Zustände haben.

nen zu beobachten [3]. Dies ist ein wesentlicher Schritt hin zu einer Röntgen-Quantenoptik.

Die moderne Quantenoptik wäre nicht denkbar ohne den Laser, der es ermöglicht, die Dynamik der äußeren Elektronenschalen von Atomen weitreichend zu kontrollieren. Daher überrascht es nicht, dass inzwischen eine Vielzahl von Quellen entwickelt wurden, die über einen weiten Spektralbereich Strahlung mit laserartigen Eigenschaften erzeugen. Vor allem bei harten Röntgenstrahlen gibt es derzeit große Fortschritte. Am bekanntesten sind sicherlich Freie-Elektronen-Laser (FEL), wie sie etwa in Stanford (USA) und Harima (Japan) bereits in Betrieb oder in Hamburg mit dem European XFEL in Bau sind. Aber auch bei den seit Jahrzehnten genutzten Synchrotron-Strahlungsquellen ist es durch kontinuierliche Weiterentwicklung gelungen, die Strahlqualität erheblich zu steigern. Wie bei den optischen Lasern ist zu erwarten, dass die neuen Maschinen eine Vielzahl von Ideen, Methoden und Anwendungen im Röntgenbereich stimulieren.

Diese Fortschritte werfen insbesondere die Frage auf, ob sich quan-

tenoptische Methoden auch im Röntgenbereich realisieren lassen. Solche Experimente sind derzeit jedoch herausfordernd – etwa, wenn verschiedene gegeneinander stabilisierte Frequenzen zur gleichen Zeit nötig sind. Daher ist es in der Regel nicht möglich, Methoden aus der atomaren Quantenoptik direkt zu übertragen. Somit sind neue Ideen und Ansätze gefragt.

In ihrem Experiment haben die Hamburger Forscher nun die Wechselwirkung von Synchrotronstrahlung mit  $^{57}\text{Fe}$ -Atomkernen untersucht. Die Röntgenstrahlung koppelte dabei an die traditionelle Mößbauer-Resonanz in Eisen mit einer Anregungsenergie von 14,4 keV. Dies ist mehr als drei Größenordnungen höher als in typischen quantenoptischen Experimenten. Allerdings stand nur eine monochromatische Lichtquelle zur Verfügung und nicht zwei verschiedenfarbige Felder wie beim optischen EIT. Zudem weisen die Atomkerne im Experiment nur zwei Niveaus auf und nicht drei. Um diese Herausforderungen zu überwinden, haben die Physiker einen Wellenleiter verwendet, in dem das Röntgenlicht eine stehende

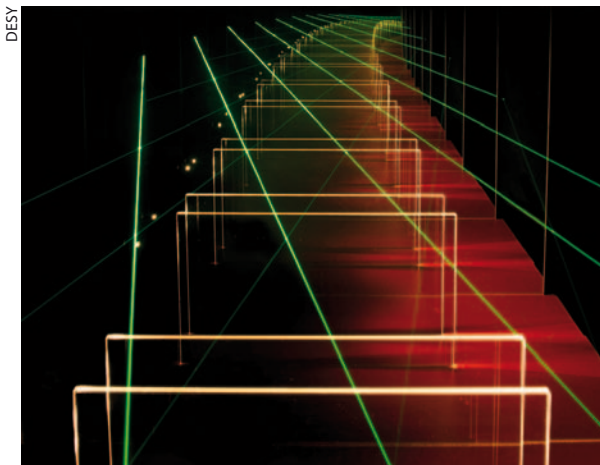


Abb. 2 Zwei durch die weißen Konturen erkennbare Glasplatten stehen für die beiden Schichten von Atomkernen aus Abb. 1c. Die Glasplatten befinden sich zwischen zwei Spiegeln, die den Wellenleiter simulieren. Ein grüner Laserstrahl symbolisiert das Röntgenlicht. Durch Reflexionen im Wellenleiter wechselwirkt das Röntgenlicht vielfach mit den Eisenschichten, was hier durch die Spiegelbilder angedeutet ist. Durch Interferenz der Reflexionen entsteht das Wellenleiterfeld, welches die Realisierung des EIT-Schemas ermöglicht.

Welle bildet (Abb. 1c, Abb. 2). In dem Intensitätsminimum bzw. -maximum der stehenden Welle sind zwei dünne Eisenschichten mit vielen Atomkernen platziert.

Dieser Aufbau hat zwei entscheidende Konsequenzen: Zum einen tritt eine kollektive Beschleunigung des spontanen Zerfalls vom angeregten Zustand des Eisenatoms in den Grundzustand auf – die sog. Superradianz. Ursache hierfür ist, dass in dem Experiment kohärent gestreute Photonen untersucht werden und somit nicht bekannt ist, welcher der Atomkerne an dem Streuprozess beteiligt ist. Zum anderen koppeln die Atomkerne in einem Intensitätsmaximum stärker an das Wellenleiterfeld als die im Minimum. Dieser Purcell-Effekt führt gemeinsam mit der Superradianz dazu, dass Anregung und Abregung für die Atomkerne im Intensitätsmaximum stark beschleunigt ablaufen. Der Zerfall der Kerne im Minimum bleibt hingegen praktisch unverändert, sodass diese Kerne auf der neuen Zeitskala stabil sind.

Mit diesem Trick sind in dem System aus einem Photon, dem Wellenleiter und den beiden Schichten drei mögliche Quantenzustände realisiert: (1) Photon im Wellenleiterfeld, alle Kerne im Grundzustand; (2) Schicht im Minimum hat Photon absorbiert, und (3) Schicht im Maximum hat Photon absorbiert. Die ersten beiden Zustände können nun die beiden Grundzustände für EIT bilden, da sie auf der beschleunigten Zeitskala des dritten Zustands stabil sind. Somit entsteht mithilfe des Wellen-

leiters effektiv das Drei-Niveau-System für EIT. Die Messdaten belegen eindrucksvoll, dass dieser Effekt tatsächlich auftritt, in guter Übereinstimmung mit theoretischen Vorhersagen. Analytische Rechnungen zeigen dabei auch die Analogie zur atomaren Quantenoptik.

Mit ihrem Ansatz legen Röhlsberger und seine Kollegen den Grundstein für weitere Untersuchungen von quantenmechanischen und nichtlinearen Effekten mit Atomkernen. Hierdurch könnten sich eine Vielzahl von Anwendungen z. B. in der nichtlinearen Spektroskopie, der Quanteninformationstheorie oder der Quantenmetrologie ergeben. Auch ein Rücktransfer von Ideen zur atomaren Quantenoptik ist denkbar, wo z. B. EIT ebenfalls mit einzelnen Photonen erforscht wird [4]. Eine interessante Zukunftsperspektive ist die Verwendung von Freie-Elektronen-Lasern als Lichtquelle. Diese lassen sich derart erweitern, dass sie eine große Zahl von resonanten Photonen in einem kohärenten Puls erzeugen [5]. Damit würden sich weitere quantenoptische Methoden für den Röntgenbereich eröffnen.

Jörg Evers

- [1] M. Wegener et al., *Physics Today* **63** (10), 32 (2010)
- [2] M. Fleischhauer et al., *Rev. Mod. Phys.* **77**, 633 (2005)
- [3] R. Röhlsberger et al., *Nature* **482**, 199 (2012)
- [4] H. Tanji-Suzuki et al., *Science* **333**, 1266 (2011)
- [5] J. Feldhaus et al., *Opt. Commun.* **140**, 341 (1997)

## KURZGEFASST

### ■ Antiwasserstoff hyperfein vermessen

Eines der großen Rätsel der Physik ist die Frage, warum Materie im Universum überwiegt. Aufschluss darüber könnte z. B. die sehr genaue Untersuchung von Antiwasserstoff geben. Der Alpha-Kollaboration am CERN ist es nun gelungen, die Hyperfeinstrukturaufspaltung von Antiwasserstoff zu messen. Im Rahmen der noch recht geringen Messgenauigkeit von  $4 \cdot 10^{-3}$  stimmt sie mit der Hyperfeinstrukturaufspaltung von Wasserstoff überein. C. Amole et al. (ALPHA Collaboration), *Nature*, DOI: 10.1038/nature10942 (2012)

### ■ Magnetisieren braucht seine Zeit

Die Computerindustrie benötigt Materialien, die sich möglichst schnell magnetisieren lassen. Eisen-Rhodium ist für neue Datenspeicher im Gespräch. Ein internationales Forscherteam hat am Paul-Scherrer-Institut in Villigen (Schweiz) gemessen, dass diese Metalllegierung in etwa 300 ps magnetisiert wird, der umgekehrte Prozess aber 300-mal schneller abläuft. Die Ergebnisse zeigen, welche Prozesse die magnetische Datenspeicherung begrenzen. S. O. Mariager et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 087201 (2012)