

Optische Darstellung unendlicher Reflexionen von zwei dünnen Schichten in einer Spiegelkavität. Im Experiment werden Mößbauer-Kerne in den zwei dünnen Schichten durch Röntgenlicht angeregt. Die Anregungsenergie wird zwischen den Schichten mehrfach ausgetauscht, was zu sog. Rabi-Oszillationen führt.

R. Röhlsberger / DESY

HERTHA-SPONER-PREIS

Quantendynamik mit Kern

Kohärentes Röntgenlicht eignet sich ideal, um Atomkerne gezielt zu manipulieren.

Adriana Pálffy-Buß

Die Wechselwirkung von Licht und Atomkernen ermöglicht einige faszinierende Anwendungen: von der hochpräzisen Atomkernuhr über einen kompakten Energiespeicher bis zum Informationsträger im Quantencomputer. Entscheidend ist dabei, ob sich die Eigenschaften von Licht und Materie gezielt kontrollieren lassen.

1 859 gelang dem Chemiker Robert Bunsen zusammen mit dem Physiker Gustav Kirchhoff die Spektralanalyse chemischer Elemente. Dem Erhitzen der chemischen Substanzen in der Flamme des Bunsenbrenners folgten unkontrollierte Anregungen der Atome und die Emission von Licht in deren charakteristischen Spektrallinien. Die komplexe Kontrolle dieser Anregungen wurde erst durch den 1960 von Ted Maiman entwickelten Laser möglich. Der Laser revolutionierte die Atomphysik

und ermöglichte die Geburt der Quantenoptik und die gegenseitige Kontrolle von Licht und Materie mittels Atomübergängen [1].

Bis zur Inbetriebnahme der ersten Freie-Elektronen-Laser vor zehn Jahren spielte sich die Erfolgsgeschichte des Lasers im optischen und infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums ab. Nun lassen sich aber auch sehr intensive Röntgenpulse mit laserähnlichen Eigenschaften erzeugen [2]. Weitere Lichtquellen wie die im Bau befindliche Extreme Light Infrastructure könnten sogar kohärente Gammastrahlung erzeugen. Aufgrund der höheren Frequenz kann diese Strahlung resonant an Atomkerne gekoppelt werden, und eine gegenseitige Kontrolle von Licht und Atomkernen wird möglich. Passende Energiedifferenzen finden sich in vielen Kernen zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand.

Stabile Atomkerne können Quantensysteme mit hervorragenden Eigenschaften sein. Ihre Übergänge sind sehr schmal, woraus sehr hohe Kohärenzzeiten resultieren. Damit eignen sich die Übergänge als Basis für eine „Atomkernuhr“ oder um eine eventuelle zeitliche Veränderung der Naturkonstanten zu erforschen [3]. Zudem erlaubt es die Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Atomkernen, diese gezielt anzuregen und als kompakte Energiespeicher zu nutzen oder einzelne Röntgenphotonen mithilfe von Kernübergängen zu steuern und zu kontrollieren. Diese Anwendungen experimentell zu realisieren, stellt aber eine erhebliche Herausforderung dar.

Der Atomkern als Taktgeber

Seit 1967 ist die Sekunde als das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung definiert, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entspricht. Heute sind Cäsium-Uhren bereits überholt, und andere atomare Uhren haben neue Rekorde für die Präzision unserer Zeitmessung gesetzt [3]. 2003 kam die Idee auf, eine Uhr von höchster Genauigkeit mit der Übergangsfrequenz eines Atomkerns als Taktgeber zu entwickeln. Weil Kerne räumlich viel kleiner als die Elektronenhülle sind, beeinflussen Störungen von außen ihre Übergangsfrequenzen viel weniger. Allerdings liegen die Energien von Kernübergängen in einem Frequenzbereich, in dem es nicht die benötigten schmalbandigen Laser gibt. Die einzige Ausnahme stellt das Isotop ^{229}Th dar, das einen langlebigen angeregten Zustand bei etwa 8 eV besitzt, also im Vakuumultravioletten Frequenzbereich (**Infokasten**).

Aufgrund der sehr schmalen Übergangsbreite verspricht ^{229}Th eine relative Ungenauigkeit der Uhr von nur 10^{-19} . Ein solch hochwertiger Frequenzstandard wäre nicht nur für die Messung der Zeit nützlich, sondern könnte auch grundlegende Fragen beantworten: Sind die Naturkonstanten wirklich konstant? Gelten die Lorentz-Invarianz oder das Äquivalenz-Prinzip immer? Wie wird die Zeit-Umkehr-Symmetrie gebrochen? Außerdem sollte eine Thorium-Uhr besonders empfindlich für Variationen der Feinstrukturkonstante α und des Verhältnisses von Protonen- und Elektronenmasse sein. Daher ist das Interesse groß, eine solche Kernuhr zu verwirklichen.

Allerdings ist derzeit die Übergangsenergie nicht genau genug bekannt, um eine direkte Laseranregung und damit Übergangskontrolle zu versuchen. Zudem erfordert die Energie von 8 eV ein neues Laserkonzept, das vom genauen Wert der Übergangsenergie bestimmt wird.

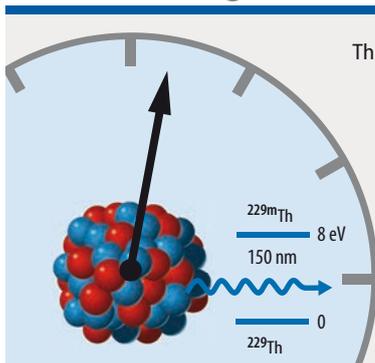
Ein sehr kompakter Energiespeicher

Die resonante Kopplung von Licht und Atomkernen besitzt auch großes ökonomisches Potenzial. Isomere Zustände, also langlebige Zustände, in Atomkernen könnten sehr große Energiemengen in verhältnismäßig wenig Material speichern [6]. Dazu müsste es gelingen, die Kerne kontrolliert anzuregen und die Isomere gezielt zur Emission der Energie zu bringen. Da der Zerfall der langlebigen Isomere direkt in den Grundzustand kaum zu beeinflussen ist, ist ein weiterer kurzlebiger Zustand nötig, der energetisch höher als das Isomer liegt. Sein Zerfall in den Grundzustand umgeht das Isomer und setzt die gesamte gespeicherte Energie frei. Dazu muss sich der Übergang des Isomers in diesen Zustand mit externen Feldern oder Elektronen leicht steuern oder „triggern“ lassen [6]. Ein geeigneter Kandidat ist das Molybdän-Isotop ^{93}Mo (**Abb. 1**). Eine verhältnismäßig kleine Anregung von 5 keV setzt die Gesamtenergie von 2,4 MeV als Gammastrahlung innerhalb weniger Nanosekunden frei, wie vor kurzem beobachtet [7]. Die brilliantesten Röntgenquellen unserer Zeit, wie der European XFEL, erzeugen bereits Photonen mit 5 keV Energie.

Theoretische Studien zeigen, was beim Entladen der Isomere $^{93\text{m}}\text{Mo}$ mit Röntgenlicht passiert [8, 9]. Überraschenderweise beeinflusst nicht das primäre, direkte Einwirken der Röntgenphotonen die Isomere am stärksten, sondern ein zunächst als Nebeneffekt angesehener elektronischer Prozess [3]. Die intensive Röntgenstrahlung erzeugt beim Auftreffen auf einen Festkörper ein Plasma. Die Kerne der darin vorliegenden hochgeladenen Ionen können angeregt werden, wenn das Atom ein Elektron in seiner atomaren Schale einfängt. Dafür müssen die beim Einfangen freigesetzte Energie und die Übergangsenergie im Kern übereinstimmen.

Was zunächst als störend erscheint, führt aber zu einer deutlich erhöhten Rate für die Anregung aus dem Isomer. Die theoretischen Rechnungen deuten an, dass die Röntgenphotonen genau die passenden Ionen und Elektronen im Plasma erzeugen, welche die Kernanregung durch Elektroneneinfang ermöglichen [8]. Das erhöht die Zahl der angeregten Kerne um sechs Größenordnungen im Vergleich zur reinen Photoabsorption. Weitere sechs Größenordnungen lassen sich gewinnen, wenn ein optischer Laser die Plasmatemperatur so erhöht, dass die Bedin-

Besondere Eigenschaften von ^{229}Th



Thorium wurde 1828 als schwarzes Mineral auf einer norwegischen Insel entdeckt und nach dem germanischen Gott Thor benannt. Mit 90 Protonen und 139 Neutronen ist ^{229}Th ein gerade-ungerade Kern. Schon 1976 ließen Gammaspktren vermuten, dass ^{229}Th einen aufgespaltenen Grundzustand besitzt. Der Wert dieser Aufspaltung wurde nach und nach genauer bestimmt: von 1 zu 3,5 zu 7,8 und schließlich zu 8,3 eV. Der Nachweis von Konversionselektronen gilt als stärkster Beweis für die Existenz des Isomers [4]. Dieser energetisch außergewöhnlich niedrig liegende Zustand ergibt sich aus der kollektiven Bewegung der 90 Protonen und 138 der Neutronen im Zusammenspiel mit der Einzelteilchendynamik des übrigen Neutrons [5].

gungen für die Kernanregung durch Elektroneneinfang optimal sind [9]. Allerdings bleibt die Wahrscheinlichkeit der gezielten Anregung immer noch zu gering, um von effizienter Kontrolle zu sprechen. Erste Experimente mit ^{93}Mo und anderen Kernen am European XFEL versprechen aber wichtige Erkenntnisse auf der Suche nach einer kompakten Form von Energiespeicherung.

Einzelne Röntgenphotonen kontrollieren

Auch die Kontrolle von Röntgenlicht mithilfe von Kernen eröffnet neue Perspektiven. Die viel kleinere Wellenlänge der Röntgenstrahlung im Vergleich zu sichtbarem Licht erlaubt einzigartige Anwendungen, beispielsweise um biologische Strukturen abzubilden. Grundlage ist die große Eindringtiefe der Röntgenstrahlung und das Übereinstimmen ihrer Wellenlänge mit dem interatomaren Abstand im Festkörper. Aufgrund der kleinen Wellenlänge ist Röntgenlicht sehr gut zu fokussieren, sodass sich im Prinzip einzelne Atome ohne störende Beugungseffekte anvisieren lassen.

Photonen könnten die schnellsten Informationsträger von morgen sein und Elektronen in den Schaltungen zukünftiger (Quanten-)Computer ersetzen. Bisherige Experimente zur Quanteninformation verwenden infrarotes oder sichtbares Licht. Beides lässt sich zwar gut kontrollieren, aber nicht gut genug auf den gewünschten Skalen fokussieren. Licht kürzerer Wellenlängen könnte noch deutlich kleinere Schaltungen ermöglichen. So stellt sich die Frage, ob die Vorteile der kurzwelligen Röntgenstrahlung mit der guten Kontrollierbarkeit optischer Photonen zu kombinieren sind. Idealerweise würden in der Quanteninformation einzelne Röntgenphotonen die elementaren Informationseinheiten transportieren. Die Fokussierbarkeit und Eindringtiefe dieser energiereichen Lichtquanten erlaubt es, räumlich lokalisierte Vorgänge robust zu steuern, falls einzelne Röntgenquanten und ihre Eigenschaften kontrollierbar sind.

Röntgenphotonen ließen sich bisher noch nicht unter Erhalt ihrer quantenmechanischen Eigenschaften speichern. Hierfür bieten sich Atomkerne mit niedrig liegenden angeregten Zuständen wie ^{57}Fe an. In diesen Mößbauer-Kernen können Anregung und Abregung des Kerns in einem Festkörper rückstoßfrei erfolgen, was eine verstärkte Streuung des Röntgenlichts in Vorwärtsrichtung ermöglicht [10]. Theoretische Rechnungen haben gezeigt, dass sich mithilfe eines Magnetfelds einzelne Röntgenquanten durch Vorwärtsstreuung an Eisenkernen einfangen und ohne Qualitätsverlust wiedergewinnen lassen [11].

In diesem Szenario befindet sich ein Edelstahlplättchen in einem Magnetfeld, das die Energieniveaus der ^{57}Fe -Kerne aufspaltet (Abb. 2). Schaltet man das Magnetfeld kurz nach dem Röntgenpuls ab, hebt sich die Aufspaltung der Energieniveaus auf, und der Rückweg der Photonen wird blockiert: Die Anregung ist einschließlich aller quantenmechanischen Eigenschaften des Photons eingefroren und die Information gespeichert. Erst wenn das Magnetfeld zu einem späteren Zeitpunkt wieder anliegt, wird das Photon mit seinen ursprünglichen Eigenschaften freigesetzt und die Information kann ausgelesen werden. Dies sollte Speicherzeiten von

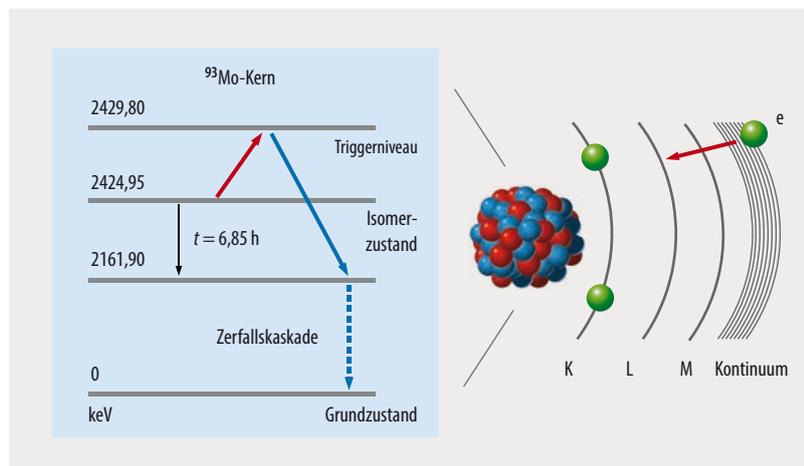


Abb. 1 Die Rekombination eines freien Elektrons aus dem Kontinuum in eine der atomaren Schalen (rot) liefert die Energie, um den ^{93}Mo -Kern aus dem Isomierzustand auf das Triggerniveau anzuheben. Das kurzlebige Triggerniveau gibt die Energie in Stufen ab bis zum Grundzustand (blau).

rund 100 Nanosekunden ermöglichen [11]. Die in einem Röntgenstrahl codierte Information wäre in einer Matrix aus Eisenatomen in einem Edelstahlplättchen sehr kompakt gespeichert.

Keht man die Richtung des Magnetfelds beim Wiedereinschalten um, verschiebt sich die Phase des freigesetzten Photons um einen halben Schwingungszyklus. Darüber hinaus können abrupte Magnetfeldrotationen die Schwingungsrichtung der Röntgenpulse bei der Kernvorwärtsstreuung an ^{57}Fe -Targets manipulieren. Damit ergibt sich ein neuartiges Schema für logische Operationen, die durch einzelne Röntgenphotonen gesteuert werden. Die Polarisation der Photonen spielt hierbei die Rolle des Informationsträgers, der Qubits. Magnetfeldrotationen erlauben es,

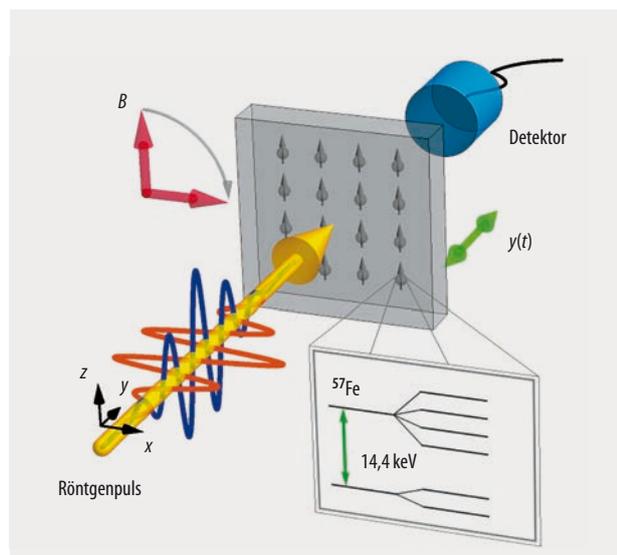


Abb. 2 Die Polarisation von Röntgenphotonen lässt sich mithilfe abrupter Rotationen des externen Magnetfelds B (rot) durch die Wechselwirkung mit Eisenkernen (grau) von x - (orange) auf z -polarisiert (blau) schalten. Piezoelemente, die mittels elektrischer Impulse präzise Bewegungen $y(t)$ ausführen (grün), erlauben die Kontrolle der Röntgenpulse.

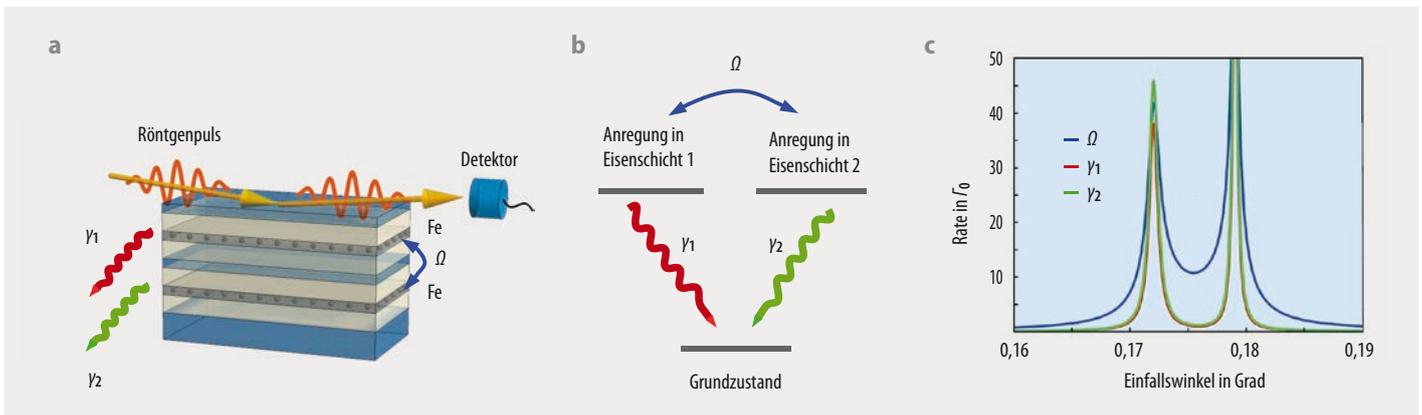


Abb. 3 Beim „Röntgen-Pingpong“ wechselwirkt ein Röntgenpuls (a, orange) mit zwei sehr dünnen Lagen Eisen (grau). Dabei wird ein Photon zwischen den Schichten ausgetauscht. In der Quantenoptik entspricht diese Dynamik einem Drei-Niveau-System aus einem Grundzustand und zwei angeregten Zuständen, die jeweils einen angeregten Kern in der einen oder der anderen Schicht haben (b). Die angeregten Zustände zerfallen mit den Raten γ_1 und γ_2 , während die beiden Eisenschichten mit der Rate Ω koppeln. Bei bestimmten Einfallswinkeln der Röntgenstrahlung wird diese Kopplung stärker als die Zerfallsraten, also $\Omega > \gamma_1$ und $\Omega > \gamma_2$ (c).

logische Elemente mit einem und sogar mit zwei Röntgen-Qubits zu realisieren [12]. Die besonderen Eigenschaften der Röntgenphotonen bezüglich Fokussierbarkeit und Messbarkeit machen solche logischen Elemente für zukünftige Anwendungen in der Informationswissenschaft interessant.

Experimentell nachgewiesen ist bereits die Kontrolle der Eigenschaften von Röntgenphotonen durch gezielte mechanische Verschiebungen. Zum Beispiel wurden die Wellenformen einzelner Röntgenphotonen geformt und manipuliert, um kürzere Pulse zu erzeugen [13]. Auch das Energiespektrum von spektral breiten Röntgenpulsen wurde bereits mechanisch „zugespitzt“ [14]. In Zukunft sollte es möglich sein, diese Methoden für den Einsatz im normalen Nutzerbetrieb an Röntgenlichtquellen weiterzuentwickeln. Sehr vielversprechend sind Nanostrukturen mit Eisenkernen, die als dünne Schicht zwischen anderen Lagen eingebettet sind, die das Röntgenlicht reflektieren (Abb. 3). Röntgenpulse im streifenden Einfall können an solche Dünnschicht-Kavitäten koppeln und die Eisenkerne anregen. Dabei lässt sich die Anregung besonders gut durch kollektive Effekte kontrollieren.

Diese Nanostrukturen eröffnen zum ersten Mal den Zugang zur Erforschung der starken Kopplung in diesem Frequenzbereich. Die starke Kopplung bei der Licht-Materie-Wechselwirkung tritt ein, wenn ein Atom oder resonantes System Energie mit dem elektromagnetischen Feld austauscht. Dabei muss diese Austauschrate Ω stärker sein als die konkurrierenden Zerfallsraten γ . Eine besondere Art starker Kopplung konnte in Dünnschicht-Kavitäten mit zwei dünnen Schichten aus ^{57}Fe theoretisch vorhergesagt und experimentell beobachtet werden [15]. Dabei kommt es zu einem „Röntgen-Pingpong“: In der Kavität wird ein einzelnes Röntgenquant immer wieder zwischen den zwei Eisenschichten ausgetauscht.

Das eröffnet neue Perspektiven für die Quantenkontrolle mit Röntgenphotonen in nanoskopischen Systemen. Solche Nanostrukturen könnten zusammen mit neuartigen kohärenten Lichtquellen die Zukunft der Röntgen-Photonik prägen und eine Reihe von Anwendungen mit

Röntgenquanten als Qubits ermöglichen. Damit würde mit Atomkernen ein besonderes Kapitel in der Geschichte der Quantendynamik und Quantenkontrolle geschrieben auf dem weiten und spannenden Weg vom Bunsenbrenner zum Röntgenlaser.

Literatur

- [1] S. Haroche und J.-M. Raimond, Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons, Oxford University Press, Oxford (2006)
- [2] B. McNeil, Nat. Photonics **3**, 375 (2009)
- [3] E. Peik und M. Okhapkin, C. R. Physique **16**, 516 (2015)
- [4] L. von der Wense et al., Nature **533**, 47 (2016)
- [5] N. Minkov und A. Pálffy, Phys. Rev. Lett. **118**, 212501 (2017)
- [6] P. M. Walker und G. D. Dracoulis, Nature **399**, 35 (1999)
- [7] C. J. Chiara et al., Nature **554**, 216 (2018)
- [8] J. Gunst et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 082501 (2014)
- [9] Y. Wu et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 052504 (2018)
- [10] R. Röhlberger et al., Science **328**, 1248 (2010)
- [11] W.-T. Liao, A. Pálffy und C. H. Keitel, Phys. Rev. Lett. **109**, 197403 (2012)
- [12] J. Gunst, C. H. Keitel und A. Pálffy, Sci. Rep. **6**, 25136 (2016)
- [13] F. Vagizov et al., Nature **508**, 80 (2014)
- [14] K. P. Heeg et al., Science **357**, 375 (2017)
- [15] J. Haber et al., Nature Photon. **11**, 720 (2017)

Die Autorin



DPC / Anscholl 2019

Adriana Pálffy-Buß hat Physik in Bukarest studiert und an der U Gießen in theoretischer Atomphysik promoviert. Anschließend wechselte sie an das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, wo sie – unterbrochen von Kurzaufenthalten in Großbritannien – seit 2011 mit ihrer Gruppe über atomare und nukleare Quantendynamik forscht.

Dr. Adriana Pálffy-Buß, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg