

Rotlicht verhilft zu Röntgenlicht

QUANTENOPTIK Ein bayerisch-österreichisches Wissenschaftlerteam weiss hochenergetische Pulse laserähnlichen Lichts von der Wellenlänge weicher Röntgenstrahlung zu erzeugen. Damit eröffnet sich ein weites Anwendungsfeld. Und zwar schon vor 2012, wenn der Hamburger Röntgenlaser XFEL in Betrieb gehen soll.

Laserartige Röntgenstrahlen? Eine derartige Leuchtquelle haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching unter der Leitung von Professor Ferenc Krausz in Zusammenarbeit mit Forschern der Technischen Uni Wien, der Uni Würzburg und der Uni München jetzt erstmals erzeugt. Mit der Wellenlänge von 1 nm (Photonenenergie 1 keV) und einer erwarteten Pulsdauer von 100 Attosekunden der neuartigen Strahlung ist die Tür weit aufgestossen für medizinische Röntgenbilder nie gekannter Auflösung, zudem bei viel geringerer Strahlenbelastung. Und nicht nur das. Auch für die vielen Anwendungen, wo Ort- bzw. Zeitmessungen, also zum einen in den einstelligen Nanometerbereich und zum anderen im Attosekundenbereich erwünscht sind, hat ein neues Zeitalter begonnen.

Der Weg zum Röntgenlaserlicht aus Garching beginnt mit einem Titan-Saphir-Oszillator. Der erzeugt einen Laserstrahl im nahen Infrarot mit Pulsen von etwa 10 Femtosekunden Dauer. Nachteil dieser Strahlung: Sie ist noch viel zu schwach. In verschiedenen Ti-Saphir-Verstärkerstufen reift dieses Leichtgewicht zu einem millionenfach nachverstärkten Schwergewichtler (von Nanojoule auf Millijoule). Erkauft wird das aber mit einer Verengung des Frequenzbandes der Laserpulse. Nach den Gesetzen der Quantenoptik bedeutet eine Abnahme der Bandbreite aber eine Zunahme der Pulsdauer, im vorliegenden Falle auf 20 bis 30 Femtosekunden. Das wäre aber Gift für das am Ende des Prozesses erwünschte Röntgenlaserlicht.

Die erwünschte Verbreiterung des Laserspektrums gelingt besonders gut in Systemen, in denen die «Laser»-Atome im Kristallgitter durch Energiezufuhr zu Eigenschwingungen angeregt werden. Die Frequenz des Laserlichts, das beim Zurückfallen eines Elektrons aus einem angeregten «Laserniveau» auf ein Grundniveau abstrahlt, erfährt durch diese Atomschwingungen Modulationen. Aus der einen Laserfrequenz entsteht ein ganzes Frequenzband. Solche Kristalle nennt man vibronische Kristalle. Zu diesen zählt der Ti-Saphir-Kristall. Die laseraktiven Zentren sind dabei

Titanatome, mit denen der Saphir-Wirtskristall so schwach dotiert ist, dass die Atomorbitale dieser weit voneinander entfernten Atome nicht zu breiten Energiebändern überlagern können. Isolierte Energieniveaus sind die Grundvoraussetzung für die Entstehung von Laserlicht.

Auch in Gas-Lasersystemen lässt sich aus oben genanntem Grund eine Spektrumserweiterung erzwingen. Deshalb leiten die Forscher das noch zu langpulsige Laserlicht anschließend durch einen mit Gas gefüllten Hohlwellenleiter. «Der Brechungsindex des atomaren Gases ist geringfügig abhängig von der Intensität des einfallenden Lichts. Dieser an sich schwache Effekt wird bei den hohen Intensitäten unserer Laserpulse aber so weit verstärkt, dass die Veränderung des Brechungsindex zu einer Phasenmodulation und dadurch spektralen Verbreiterung des Laserpulses führt», erklärt Krausz.

Für den Fachmann sei der Vollständigkeit halber nur noch Folgendes erwähnt: Zwischen so genannten «gechirpten» dispersiven Breitbandspiegeln erfährt der fast schon perfekte Laserpuls eine letzte Kompression und kann endlich sein Werk verrichten. Seine Kenndaten sind jetzt: rotes Laserlicht, Wellenlänge 720 nm, Pulslänge 5 Femtosekunden, Leistung 0,2 Terawatt, Pulsfrequenz 1 kHz.

Mit dieser hohen Energie schießt der Laserstrahl in einen 0,4 mm dicken Heliumstrom, und mit einer im Vergleich zu den Abmessungen im Atom gigantischen Amplitude überflutet er die Heliumatome, setzt die lineare Optik ausser Kraft und bringt statt dessen das Chaos nichtlinearer Optik in die Attosekunden-Nanowelt: Elektronen schwingen plötzlich in den «unmöglichsten» Frequenzen vom Atomkern weg und wieder auf ihn zu. Und weil da

eine elektrische Ladung schwingt, strahlt das System Atomkern-Elektron wie eine Antenne Wellen ab. Und weil eine Welle im Takt des Rotlichtlasers auf die nächste folgt, strahlen auch alle daraus entstehenden Wel-



Das violette Licht entsteht durch Heliumatome, angeregt durch Laserlicht. Den gleichen Weg nimmt der nicht sichtbare, auf wenige 100 Mikrometer gebündelte Röntgenstrahl.

len aus dem Heliumatom in diesem Gleichakt und in der Richtung dieser ursprünglichen Laserwelle.

Eine der in der linearen Optik unmöglichen Frequenzen konnte von Krausz als ein Röntgenlaserlicht mit 1 nm Wellenlänge,

Anzeige

TECHEMA AG

Pumpen Dosierpumpen Berstscheiben

Berstscheiben

Graphit- und Metallberstscheiben
ab NW 15 und 0.017 bar
Bruchüberwachungen, Spezialausführungen

Besuchen Sie uns
an der Ilmac
Halle 1.0, Stand C56.
Wir freuen uns auf Sie.

Tel. 061 381 45 09
www.techema.ch



einer Pulslänge von 100 Attosekunden und immerhin einer Photonenenergie von 1,3 keV identifiziert werden. Das erste jemals hergestellte Röntgenlaserlicht der Welt erblickte seine Art: das Licht der Welt.

Konkurrenz bleibt bei harter UV-Strahlung stecken

Mit 1,3 keV hat es für viele Anwendungen zwar noch eine zu kleine Photonenenergie, aber der Weg ist der richtige. Denn die Konkurrenz, die mit solchen rein optischen Systemen versuchte, Röntgen-Laserlicht zu erzeugen, musste sich bislang mit weniger als 100 eV begnügen und blieb auch dann nur im Bereich harter UV-Strahlung (100 bis 10 nm) hängen. Das Problem, das sich nämlich bislang auftat, wenn zu hohe Laserintensität auf die Heliumatome einwirkte, war, dass zum Zeitpunkt der höchsten Intensität an der Spitze des Laserpulses die Elektronen bereits längst durch die lange Vorderflanke des Laserpulses freigesetzt wurden und für den Prozess der Röntgenemission nicht mehr verfügbar waren.

Krausz und seine Mannen kannten natürlich dieses Problem und konnten es lösen, weil Krausz Spezialist für speziell eine Sache ist: Intensives Laserlicht mit

wird mit seinem «ausgeflippten» Elektron zu einem periodisch sich verändernden Dipol. «Der wichtigste Vorteil unserer extrem kurzen Pulse besteht darin, dass die hohe Feldstärke abrupt eingeschaltet wird und daher das Elektron bei der höchsten Intensität an der Pulsspitze abgerissen und zum Atomkern zurückgeschleudert werden kann. Dieses Abreißen und Zurückschleudern des Elektrons ist im Wesentlichen auf einen einzigen Schwingungszyklus beschränkt. «Daraus resultiert auch die extreme Kürze des Röntgenlichts», so Krausz. Neben der erstaunlichen Tatsache, dass es sich mit 1 nm wirklich schon um Röntgenstrahlung handelt, kommt eine weitere fast noch erstaunlichere hinzu: die Pulse dieses Quasi-Laserlichtes haben eine Dauer von wohl nur 100 Attosekunden, das heisst 0,1 Femtosekunden.

Und der zweite Weltrekord: So kurze Laser-Pulse hat vorher noch niemand realisiert. Mit solchen Lichtblitzen könnte man eine Femtosekunde in immerhin zehn Aufnahmen teilen. Von dem ursprünglichen Rotlicht der Wellenlänge 720 nm, was einer Frequenz von etwa 2,5 Femtosekunden entspricht, gelangen pro Schwingungsperiode also 25 Schnappschüsse. Bei einer Pulsdauer des zu vermessenden Lichtes von

gen in einem elektrischen Feld auf einen Detektor zu. Senkrecht zu dieser Flugrichtung strahlt aber das Rotlicht durch die Flugbahn und beeinflusst die beschleunigten Elektronen durch sein zusätzliches elektromagnetisches Wechselfeld: Trifft das Elektron auf einen Wellenberg, wird es zusätzlich beschleunigt, im Wellental abgebremst. In 100-Attosekunden-Zeitintervallen kann so die Energie der Elektronen (in eV) in Beziehung zu der Zeitdifferenz zwischen Rotlichtwelle und Röntgenpuls ermittelt werden. Das Resultat: der 720nm-Lichtpuls wird als eine gedämpfte Schwingung mit der Frequenz von 2,5 Femtosekunden sichtbar.

Das Anwendungsfeld, das sich mit dieser Technik auftut, ist kaum hoch genug einzuschätzen: Denn wer Lichtpulse so genau vermessen kann, der kann auch umgekehrt jeden wohldefinierten Lichtpuls damit komponieren. Solche Lichtpulse werden irgendwann die Fähigkeit haben, von einer Vielzahl möglicher chemischer Reaktionen in einer Lösung genau die und nur die auszulösen, die auf diesen Puls reagiert wie ein Autotürschloss auf seinen Entriegelungspuls aus dem Autoschlüssel. Wenn das Röntgenlaser-System einmal so ausgereift sein wird, wie Krausz das für die nächsten

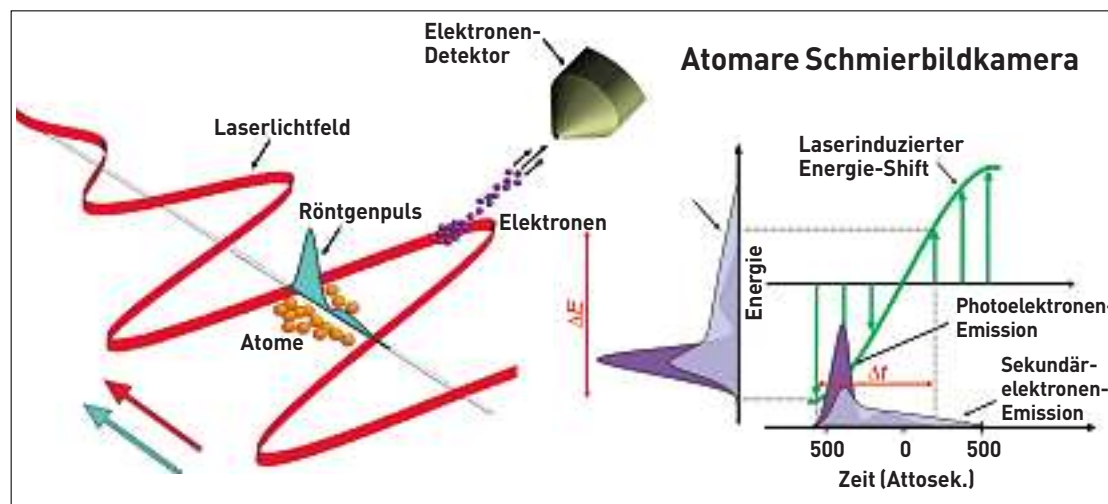
Jahre schon prognostiziert, wird das einen Wissensschub auslösen wie schon lange nicht mehr. Röntgenstrukturanalyse gelänge in solchem Röntgenlicht an einzelnen Molekülen in ihrer natürlichen Umgebung. Das (oft genug vergebliche) Züchten von Einkristallen wäre endlich Vergangenheit.

Chemische Reaktionen könnten in letztgültiger Auflösung und Geschwindigkeit verfolgt werden. Die Cluster-Chemie hätte endlich ein brauchbares Auge, das sie auf sich selbst werfen

könnte. Auch biologische Prozesse könnten ihre letzten Schamwinkel verlieren, in den sie sich bislang vor neugierigen Forscheraugen zurückziehen.

Garchinger Röntgenlaser ergänzt das im Bau befindliche XFEL

Die Miniaturisierung von Mikrochips, die auf der Siliziumtechnologie beruht, die der mit lithographischen Verfahren Struk-



Licht misst Licht: Energieänderungen von Elektronen, die zeitabhängig in der Lichtwelle des roten Laserpulses gebremst oder beschleunigt werden.

extrem kurzen Pulsdauern. So geartetes Licht gönnt dem davonjagenden Elektron immer wieder eine Erholungspause, während der es den Entschluss zu verschwinden immer wieder revidieren kann. Kaum ist es aber Richtung Kern wieder zurückgeschwungen, kommt das nächste Wellenbündel an und verpasst dem Elektron einen weiteren Stoss. So flippt das Elektron ständig hin und her, und der positive Atomkern

5 Femtosekunden macht das 50 Momentaufnahmen. Und genau die haben Krausz und die Forscher aus Garching und Wien auch gemacht, schon Ende letzten Jahres.

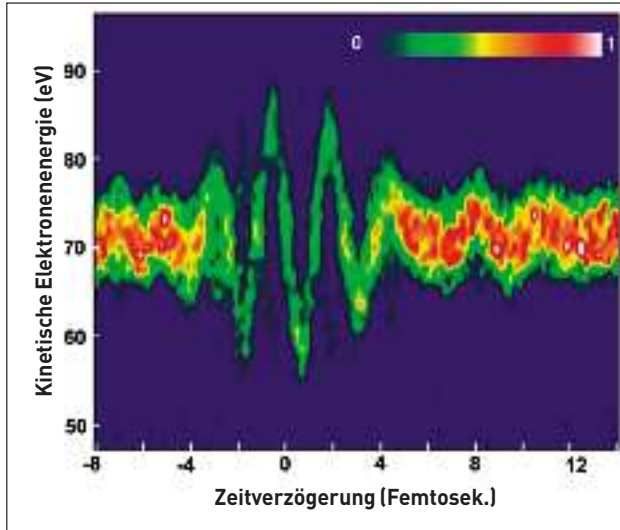
Das Prinzip ist so einfach wie genial: Das rote Laserlicht erzeugt wie beschrieben ein Röntgenlaserlicht mit 100-Attosekunden-Pulsen. Dieses Röntgenlicht ist hart genug, um Elektronen aus einer Metalloberfläche zu schlagen. Diese Elektronen beschleuni-

turen für Leiterbahnen eingätzt werden, hätte im harten Röntgenlicht ihre feinstmögliche Auflösung erreicht. «Im Bereich von einigen Nanometern könnten wir heute schon einen Demonstrator mit interessanter Leistung anbieten, für den Bereich der Röntgenmikroskopie biologischer Strukturen etwa. Für den eigentlichen Röntgenbereich, unter 1 nm also, bedarf es noch weiterer Entwicklungsschritte»,

resümiert Krausz den Stand seiner Forschung.

Bescheidenheit wäre trotzdem fehl am Platz. Denn laserähnliches Licht von der Wellenlänge weicher Röntgenstrahlung zu erzeugen, war bislang noch niemandem gelungen. Und wenn es die Fachwelt jemandem zugetraut hätte, dann eher dem Grossprojekt XFEL am DESY, dem Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg; dies geschieht aber planmässig nicht vor 2012. Das X steht dabei für Röntgenstrahlung, FEL dagegen für Freie-Elektronen-Laser. Denn anders als der rein optische Versuchsaufbau von Krausz sind in Hamburg hochbeschleunigte Elektronen das Ausgangsmaterial für Röntgenlaserlicht. Gemeinsam haben die Verfahren nur, dass ihre Brillanz mit der Fähigkeit, hochenergetische Pulse zu erzeugen, steht und fällt.

In Hamburg werden dazu supraleitende Resonatoren zum Schluss Elektronenpakete durch die Bahn jagen, die bei einem Durchmesser von 0,1 Millimeter mehrere Milliarden Elektronen enthalten werden, mit gleicher Geschwindigkeit und gleicher Energie. Nur damit wird dann anschlies-



Bilder: zvg

Alle 100 Attosekunden neu: Die Zeitdifferenz zwischen Rotlichtwelle und Röntgenpuls wird als gedämpfte Schwingung sichtbar.

send Röntgenlaserlicht entstehen können. Diese Elektronenbündel kommen nach einer Beschleunigungsstrecke von etwa 3 Kilometern in den sogenannten Undulator. Periodisch angeordnete Magnete ziehen dort die vorbeifliegenden Elektronen senkrecht zu ihrer Flugrichtung an oder stossen sie ab. Das Elektron fängt dadurch an, auf seiner Bahn zu schwingen. Und genau wie im Krauszschen Experiment wird auch hier eine Lichtwelle abgestrahlt. Und stimmen die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen und die Länge des Undulators, so wird diese Strahlung am Ende der Strecke eine Frequenz von 6 bis 0,085 nm haben.

Und noch ein Effekt kommt hinzu: Diese Wellen sind, weil Lichtwellen, mit ihrer Lichtgeschwindigkeit deutlich schneller unterwegs als die sie auslösenden oszillierenden Elektronen. Sie überholen deshalb diese Elektronen und wirken auf sie ein: sie beschleunigen die einen, die anderen bremsen sie ab. Es entstehen dadurch Scheibchen gleicher Energie, und alle Elektronen einer Scheibe strahlen im

Gleichtakt. So entstehen extrem kurze und intensive Röntgenblitze mit den Eigenschaften von Laserlicht. Doch das ist alles noch Zukunftsmusik. Wesentlich kürzere Pilotanlagen (die aktuelle heisst TESLA und ist 300 Meter lang), die Schritt für Schritt bis 2012 zu XFEL erweitert werden sollen, haben bislang nur eines gezeigt, dass die Anlage vom Prinzip her funktioniert. Aber mehr als die Erzeugung von hartem UV-Laserlicht ist nicht gelungen. Konnte auch nicht, denn der Röntgenbereich wird der voll ausgebauten Endstufe vorbehalten sein.

4D-Bildgebung als Ziel

Die Elektronenenergie des XFEL wird 10 bis 20 GeV betragen. Dies wird die Garching-Wien-Methode natürlich nicht erreichen. Dafür aber wird das XFEL in einer anderen Sache unterlegen bleiben: die Röntgenlaserpulse werden nicht kürzer als etwa 100 Femtosekunden sein. Das können Krausz & Co. heute schon besser. Aus diesem Grund wird auch nur ihr System die ganz schnellen Reaktionen wie etwa die Elektronenbewegungen in einem Atom beobachten können.

«Doch das XFEL wird ungleich intensivere, leistungsstärkere Röntgenstrahlung bereitstellen, als unsere Methode jeweils bieten wird. Dank der hohen Leistung wird eine Reihe von Anwendungen möglich sein, für die unsere Quelle ungeeignet ist. Daher ergänzen sich die beiden Technologien», so Krausz. «Wir wollen die Strahlung noch härter machen und wollen im Angströmbereich Röntgenbeugung mit Attosekunden-Zeitauflösung erreichen. Eine Art 4-D-Bildgebung also», kommt Krausz ins Schwärmen. «Dazu muss aber die Leistung des Lasers um mehrere Grössenordnungen erhöht werden. Das kann aber noch einige Jahre dauern», so Krausz.

Joachim Stubenrauch

Technisches-Email

email 250 email 350

email 800 email 850P

Dücker

ILMAC, Basel – Halle 1.0, Stand D 65

Rohstoffchemie und Lohnabfüllung
Alles aus EINER Hand!

Herstellung
 Abfüllung
 Verpackung
 Lieferung

von Fest- und Flüssigprodukten

Bilgram Chemie

Bilgram Chemikalien GmbH - Tiefweg 4 - 88398 Oßau
 Telefon: ++4875559212-0 - Telefax: ++4875559212-64