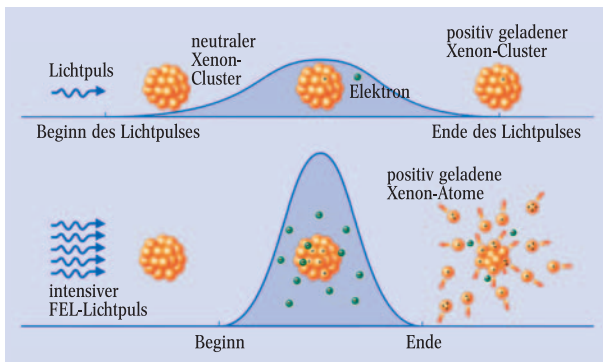


Feuerwerk im Edelgascluster

Röntgenlicht aus einem Freie-Elektronen-Laser kann Xenon-Atome in einem Cluster bis zu achtfach ionisieren, obwohl die Photonenenergie im Falle einzelner Xenon-Atome nur zur Einfachionisierung ausreicht.

Während auf forschungspolitischer Ebene noch hart um den Bau des Freie-Elektronen-Lasers (X-FEL) am DESY gerungen wird, befindet sich der Prototyp („TESLA Test Facility“, TTF) derzeit schon in der Testphase und wird vermutlich 2004 den offiziellen Nutzerbetrieb aufnehmen. Der Laser der TTF besteht aus einer insgesamt fast 15 m langen Struktur abwechselnder



Wird ein Xe-Cluster mit herkömmlicher Synchrotronstrahlung bestrahlt, nimmt er ein energiereiches Photon auf und ist meist einfach geladen (oben). Im extrem intensiven Lichtblitz aus dem Freie-Elektronen-Laser nimmt der Cluster ständig viele energiereiche Photonen auf (unten), wobei Elektronen den Cluster verlassen. In den hohen Feldern des entstehenden Plasmas führt Feldionisation zu bis achtfach positiv geladene - Xenon-Ionen. Der hochgeladene Cluster explodiert schließlich aufgrund der Abstoßung Ionen vollständig.

magnetischer Dipole (Undulator), durch den ein relativistischer extrem eng gebündelter Elektronenstrahl mit ultrakurzen Pulsen geschickt wird. Die Wechselwirkung zwischen dem Elektronenstrahl und der von ihm in der Magnetstruktur emittierten Strahlung führt schließlich zu einer weiteren Bündelung der Elektronenpakete und zu stimulierter Emission kohärenter Strahlung. Anders als bei herkömmlichen Lasern gibt es beim FEL keine Kavität mit Spiegeln, sondern die stimulierte Emission startet aus zunächst statistischer Photonenemission für jeden Elektronenpuls neu. Durch die Länge des Undulators wird an dessen Ende für jeden Elektronenpuls eine Sättigung der stimulierten Emission erreicht. Theoretisch könnten sich so im Röntgenbereich Photonenblitze mit über 10^{12} Photonen pro Puls und

Pulsängen im Bereich von 100 fs (10^{-15} s) erreichen lassen. Die Brillanz dieser Strahlung liegt um acht bis zehn Größenordnungen über der heutiger Synchrotronstrahlungsanlagen. Die erreichbaren Photonenenergien werden durch den Undulator und die Energie des Elektronenstrahls bestimmt. Die TTF soll Photonen mit Energien bis 200 eV und das vorgeschlagene TESLA-FEL-Projekt bis 12 keV liefern. Die TTF lieferte bereits im Februar 2000 zum ersten Mal Laserlicht [1], im September 2001 folgte der eigentliche Durchbruch, indem es gelang, gesättigte Emission (SASE, self amplified spontaneous emission) von Röntgenstrahlung zu induzieren [2].

Bereits das erste Experiment im Probebetrieb der TTF lieferte nun eine Überraschung [3]. Ein internationales Team unter der Leitung von Thomas Möller (Hasylab) konnte zum ersten Mal die Wechselwirkung von Materie – in diesem Fall Xenon-Atome und -Cluster – mit Röntgenstrahlung (98 nm) aus einem FEL bei extrem hohen Photonenflussdichten (bis 10^{14} W/cm²) untersuchen. Die Photonenenergie (12,7 eV) wurde so gewählt, dass ein Photon gerade hinreichend Energie hatte, um ein Xe-Atom einfach zu ionisieren.

Wie erwartet wurden bei der Bestrahlung von einzelnen Atomen in der Gasphase in diesem Experiment auch nur einfach geladene Xenon-Ionen beobachtet. Setzte man jedoch Cluster von bis zu 30000 Xenon-Atomen dieser Strahlung aus, so ergaben sich überraschende Beobachtungen: Die Cluster zerfielen vollständig und es wurden nur einzelne, bis zu achtfach ionisierte Atome mit Ionenenergien von bis zu 2 keV beobachtet (Abb.).

Es liegt nahe, dies mit den Ergebnissen von Clusterexperimenten mit konventionellen Femtosekunden-Lasern im sichtbaren Wellenlängenbereich zu vergleichen. Auch hier wurden hohe Ladungszustände und extrem hohe Ionenenergien (bis einige MeV) beobachtet, allerdings bei viel höheren Leistungsdichten ($> 10^{16}$ W/cm²). Für den optischen Wellenlängenbereich ist – zumindest im Prinzip – gut verstanden, wie die enorm hohe Energie in den Cluster gepumpt wird. Sind Elektronen erst einmal aus ihrer Bindung gelöst, beschleunigt sie das elektromagnetische Wechselfeld in einer Zitterbewegung. Die pondero-

motive Energie, d. h. die mittlere kinetische Energie dieser Zitterbewegung beträgt bei einer Lichtwellenlänge von 800 nm und einer Leistungsdichte von 10^{16} W/cm² schon etwa 500 eV. Mit der langwelligeren Strahlung konventioneller Laser und bei extrem hohen Intensitäten lässt sich durch die Beschleunigung der Elektronen im Feld also sehr effektiv Energie in ein Plasma einkoppeln. Das von den räumlich verteilten Elektronen erzeugte Potentialgefälle beschleunigt dann die Ionen so stark, dass der Cluster zerfällt (Coulomb-Explosion).

Die Ergebnisse des TTF-Experiments zeigen klar, dass die Coulomb-Explosion den Xe-Cluster vollständig zerlegte. Im Mittel wurden dabei 30 Photonen von jedem Atom im Cluster absorbiert. Der wohlbekannte Heiz- und Beschleunigungsmechanismus im optischen Bereich versagt jedoch völlig bei den Intensitäten und den Wellenlängen im Röntgenbereich, da die Elektronen zu träge sind, um dem hierbei sehr hochfrequenten Feld zu folgen. Außerdem war die verwendete Intensität viel geringer, so dass die ponderomotive Energie im Hamburger Experiment nur etwa 100 meV betrug. Wie also, wenn nicht über direkte Beschleunigung von Elektronen, wird die Energie im Cluster deponiert? Welcher Mechanismus erzeugt die hohen Ladungszustände und Ionenenergien bei Clustern, aber nicht bei isolierten Ionen?

Die Autoren von [3] schlagen folgendes Szenario vor: Der Wirkungsquerschnitt für die Einfachionisation von Xe durch Absorption eines Photons ist so groß und die Photonen-dichte so hoch, dass zunächst sehr effektiv Xe-Atome im Cluster einfach ionisiert werden. Durch die Aufladung des Clusters steigt jedoch die Bindungsenergie, sodass bald die Photonenenergie nicht mehr hinreichend ist, um die Atome aus dem Grundzustand zu ionisieren. Die Xe-Atome werden dann über angeregte Zwischenzustände ionisiert. Die Elektronen sind frei beweglich, und durch die zurückbleibenden, noch einfach geladenen Ionenrümpfe entstehen Feldstärken von bis zu 500 V/nm am Clusterrand. Diese enormen Feldstärken genügen, um eine Feldionisation von Xe bis zum Ladungszustand 8 zu bewirken. Die beobachteten hohen Ladungszustände erklären sich somit zwanglos.

Offen bleibt aber wie der Cluster 30 Photonen pro Atom aus dem Laserfeld absorbiert. Die Autoren schätzen die Absorption im Plasma des Xe-Clusters in einem Modell, das die bekannten Prozesse, wie die inverse Bremsstrahlung, berücksichtigt. Demnach sollte die Zahl der absorbierten Photonen einen Faktor 5 bis 10 unter den beobachteten Werten liegen. Ohne weiterführende Experimente wird sich dieses Rätsel wohl nicht lösen lassen.

Auf jeden Fall ist das neue Experiment die vorläufige Krönung des rasanten Fortschritts am weltweit führenden Projekt eines Freien-Elektronen-Lasers im Röntgenbereich. Das Hamburger Experiment hat schlaglichtartig gezeigt, dass selbst bei dem alten Thema der Wechselwirkung von Licht mit Materie noch viele Fragen offen sind. Ebenso wichtig wie die Ergebnisse dieses Experimentes ist die Tatsache, dass es überhaupt durchgeführt werden konnte. Mit der TESLA Test Facility wurde damit die Zukunft der Röntgen- und Synchrotronstrahlung eingeläutet. Im sichtbaren Bereich haben Laser viele Bereiche der Physik und der Technik revolutioniert. Im Röntgenbereich hat diese Entwicklung nun in Hamburg begonnen.

REINHARD DÖRNER

- [1] J. Andruszkow et al., Phys. Rev. Lett **85**, 3825 (2000)
- [2] V. Ayvazyan et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 104802 (2002)
- [3] H. Wabnitz et al., Nature **420**, 482 (2002)

■ Eine Hand voll Atome verzögern Licht

Mehr als 300 Jahre, nachdem der Niederländer Christiaan Huygens zum ersten Mal die reduzierte Lichtgeschwindigkeit in dichten Medien beschrieben hat, gibt es immer noch faszinierende und überraschende Forschungsergebnisse zur Lichtausbreitung in Medien. Nachdem es in den vergangenen Jahren gelungen war, Lichtpulse in Bose-Einstein-Kondensaten praktisch anzuhalten, haben japanische und amerikanische Physiker nun gezeigt, dass bereits eine Hand voll Atome in einem Resonator ausreicht, um Lichtpulse zu verzögern oder zu beschleunigen.

In den meisten Medien ist die Phasengeschwindigkeit, mit der sich eine Trägerwelle fortbewegt, ungefähr genauso groß wie die Gruppengeschwindigkeit, mit der sich Intensitätsmodulationen, wie z. B. Lichtpulse, ausbreiten. Die Gruppengeschwindigkeit ist mit $c/(n+\omega \, dn/d\omega)$ eine direkte Funktion der Brechungsindexänderung $dn/d\omega$, die auch als Dispersion bezeichnet wird. Ändert sich der Brechungsindex des Mediums in Abhängigkeit der Wellenlänge, dann weicht die Gruppengeschwindigkeit von der Phasengeschwindigkeit ab. Dies bedeutet, dass Lichtpulse im Medium verlangsamt oder beschleunigt werden. Dieser Effekt ist jedoch nur bei hinreichend großer Dispersion signifikant, die in

optisch aktiven Substanzen, wie beispielsweise in atomaren oder molekularen Gasen, typischerweise nur in unmittelbarer Nähe von Resonanzen auftritt. Daraus resultiert meist eine erhöhte Absorption, die einen experimentellen Zugang erschwert, wenn nicht unmöglich macht.

In atomaren Gasen lässt sich jedoch eine große Dispersion bei verschwindend kleiner Absorption erzielen, wenn neben den interessierenden schwachen Lichtpulsen ein weiterer, starker Lichtstrahl auf das Medium fällt, der eine elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT) des Gases bewirkt. Dies führt zur Ausbildung einer so genannten Dunkelresonanz, die mit einer erhöhten Transmission für ansonsten resonantes Licht einhergeht. L. V. Hau und Mitarbeiter konnten diesen Effekt nutzen, um Licht in einem Bose-Einstein-Kondensat auf Geschwindigkeiten von wenigen Metern pro Sekunde abzubremsen [1], und M. D. Lukin und Mitarbeitern gelang es sogar, Lichtpulse in atomaren Gasen anzuhalten und anschließend wieder in Bewegung zu setzen [2]. Diese Experimente beruhen auf Dispersionseffekten in mehr oder weniger homogenen Medien.

In dem neuen Experiment nutzen J. Shimizu und Mitarbeiter die verstärkende Wirkung eines optischen Resonators, der aus zwei ultrahoch reflektierenden Spiegeln aufgebaut ist [3]. In einem solchen Resonator hat ein einzelnes Atom

Prof. Dr. Reinhard Dörner, Institut für Kernphysik, Universität Frankfurt, August-Euler-Str. 6, 60486 Frankfurt