

■ Unerwartet aufgeladen

Experimente mit hochintensiver Strahlung am Freie-Elektronen-Laser in Hamburg zeigen eine überraschend hohe Ionisation von Xenon-Atomen.

Freie-Elektronen-Laser (FEL) wie FLASH in Hamburg und bald auch LCLS in Stanford (USA) erschließen einen bisher unerforschten Parameterbereich in der Wechselwirkung von Licht mit Materie [1]. Großforschungsanlagen dieser Art erzeugen kurzwelliges Licht mit einer Intensität, die diejenige aller existierenden Strahlungsquellen um viele Größenordnungen übersteigt. Das derzeit ambitionierteste Projekt ist der Europäische Röntgen-FEL (XFEL), der in Hamburg gebaut wird [1]. Er wird in seiner Endausbaustufe kohärente Strahlung mit bis zu 12 keV Photonenenergie liefern.

Schon auf dem Weg zum XFEL beschreiten die Wissenschaftler mit jeder Ausbaustufe Neuland. Das gilt nicht nur für die technische Realisierung, sondern auch für die Experimente, die dadurch möglich werden. Sie lassen immer wieder Überraschendes zutage treten. So trat 2001 in Messungen mit dem allerersten Licht des Hamburger FEL, das nur zwei Wochen zur Verfügung stand und aus Strahlung mit 12 eV Photonenenergie bestand, eine unerwartet hohe Energie-Absorption durch atomare Cluster auf [2]. Die aus dem gemessenen Ionenspektrum errechnete Energieaufnahme durch inverse Bremsstrahlung, bei der lasergetriebene Elektronen beim Stoß mit Ionen in einem Plasma beschleunigt werden, war viel kleiner als die Energie aller absorbierten Photonen. Erst im Laufe der folgenden Jahre einigte man sich auf eine der konkurrierenden theoretischen Erklärungen. Sie beruht darauf, dass das ver-

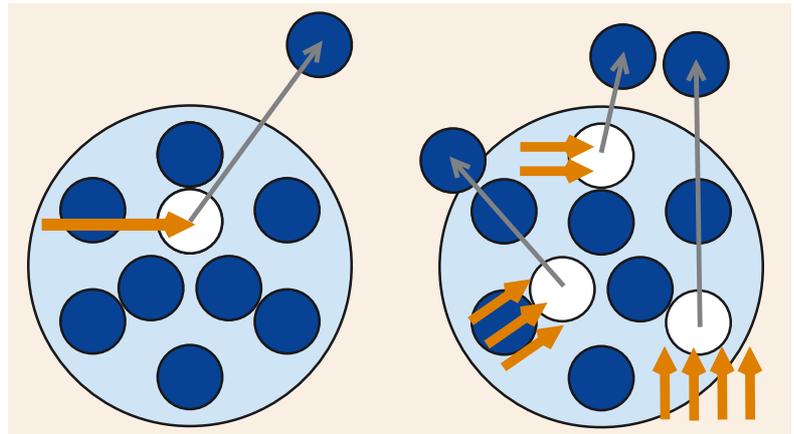


Abb. 1 Bei geringen Lichtintensitäten werden Atome (hellblau) durch den Photoeffekt einfach ionisiert, wobei ein Elektron (dunkelblau) das Atom verlässt

(links). Beim hochintensiven FEL-Licht kommt es durch Multiphotonen-Prozesse zur Vielfach-Ionisation der Atome (rechts).

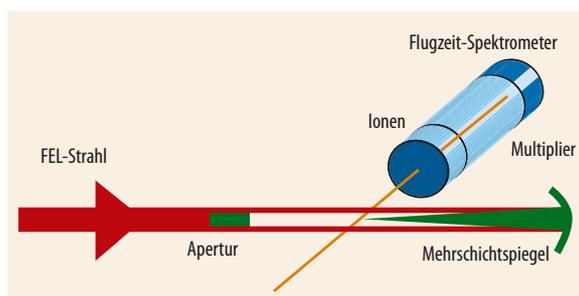
traute Konzept von inverser Bremsstrahlung durchaus korrekt ist, aber die tatsächliche Ladung der Ionen im Cluster während des FEL-Pulses signifikant größer ist als nach dem Puls gemessen [3].

Matthias Richter und sein Team haben nun am FLASH die scheinbar einfachsten Experimente gemacht, bei denen Licht mit Materie wechselwirkt: Sie beleuchteten verschiedene Edelgas-Atome wie Neon, Krypton, Argon und Xenon mit 90-eV-Strahlung. Tatsächlich erwarteten die Forscher von diesen Experimenten keinerlei Überraschungen, und genau das war eine wesentliche Motivation, sie durchzuführen: Sie wollten präzise Vergleichsdaten gewinnen, um das FLASH-Licht für spätere, kompliziertere Experimente kalibrieren zu können. Doch es kam anders: Bei den Messungen wurden Xenon-Atome unerwartet stark aufgeladen und nachweislich bis zu 21-fach ionisiert [4]. Solche Ladungszustände erfordern die Absorption von mindestens 57 Photonen, was bei den benutzten Intensitäten nicht zu erwarten war. Die Reaktionen auf diese Entdeckung fielen sehr unterschiedlich aus: Manche Wissenschaftler reagierten ungläubig, manche sind der Meinung, dass der FLASH-Puls in Wahrheit anders war als angenommen und manche vertreten die Auffassung, dass der spek-

takuläre Effekt auf die Verkettung vieler kleiner Ursachen zurückgeht, die – jede für sich – nicht außergewöhnlich sind. Um auszuschließen, dass unbekannte Eigenschaften des FLASH-Pulses zu der hohen Aufladung von Xenon führten, hat das Richter-Team nun das gleiche Experiment mit anderen Edelgasen wiederholt und die vorigen Ergebnisse zu Xenon bestätigt [5]. Zudem zeigten die anderen Edelgase das erwartete, normale Multiphoton-Ionisationsverhalten mit einer sehr viel geringeren Zahl absorbierten Photonen als bei Xenon (**Abb. 1**).

Im Gegensatz zu den übrigen Edelgasen besitzt Xenon bei einer Photonenenergie von etwa 90 eV eine kollektive Anregung, eine sog. Riesenresonanz, wie aus Messungen mit niedrigen Intensitäten bekannt ist [6]. Im Wesentlichen konzentriert sich daher die Frage nun darauf, ob diese Riesenresonanz in Xenon eine entscheidende Rolle für die hohe Aufladung im FLASH-Licht spielt, wie die Wissenschaftler um Richter in ihrer Veröffentlichung spekulieren [5]. Dem gegenüber steht bisher nur eine theoretische Veröffentlichung von Peter Lambropoulos und seinen Kollegen, die mithilfe von bekannten und skalierten Wirkungsquerschnitten den Aufladungsprozess von Xenon im

Abb. 2 Ein Mehrschichtenspiegel fokussiert den FEL-Strahl, der dann auf die Atome trifft. Ein Flugzeit-Spektrometer weist die erzeugten Ionen schließlich nach.



FLASH-Puls mit Ratengleichungen nachvollzogen haben [7]. Dabei resultierte ein ebenso hoher Ionisationsgrad von Xenon. Allerdings widersprechen die Berechnungen dem Experiment, vor allem bei geringer Lichtintensität. Dies ist erstaunlich, da man in diesem Parameterbereich gut versteht, wie gebundene Elektronen mit Photonen wechselwirken. Lambropoulos und seine Mitarbeiter vermuten daher, dass der FLASH-Puls doch anders war, als die experimentellen Kollegen angenommen haben.

Aber warum ist es so schwierig, den FLASH-Lichtpuls genau zu charakterisieren? Zum einen ist jeder Puls am FLASH anders, da er aus einem zufälligen Rauschen heraus verstärkt wird [1]. Zum anderen ist es schwierig zu bestimmen, wie viele Xenon-Atome von welcher Intensität des FLASH-Pulses getroffen werden. Vor allem bei Multiphotonen-Prozessen hoher Ordnung ist dies wichtig – also wenn die Absorption von n Photonen erforderlich ist, um einen

bestimmten Ladungszustand des Ions zu erreichen. Denn in der Störungstheorie skaliert der Prozess mit einer Wahrscheinlichkeit $P \sim I^n$, und schon kleine Fehler δI verstärken sich proportional zu n : $\delta P/P = n\delta I/I$. Schließlich ist die Anordnung, die den FLASH-Puls in das Gas-Target kollimiert und die hohen Intensitäten des Lichtes erst ermöglicht, ungewöhnlich. Der parallele FLASH-Strahl wird über einen Mehrschichtenspiegel in Reflexion auf eine kleines Volumen fokussiert (Abb. 2). Erst seit kurzem nutzen mehrere Teams, die mit FLASH-Licht arbeiten, diese Anordnung.

Mit anderen Worten: Die Unsicherheiten beim Betreten des Neulandes der Licht-Materie-Wechselwirkung sind noch zu groß, um schon entscheiden zu können, ob die hohe Aufladung von Xenon auf einen ungewöhnlichen Mechanismus hinweist oder auf das eher zufällige Zusammenspiel vieler kleiner Faktoren zurückzuführen ist. Erst eine theoretische Erklärung,

die auch überprüfbare Aussagen für andere Situationen macht, wird Sicherheit bringen und Hinweise darauf, inwieweit Details des FLASH-Lichtes relevant sind. Zwischen der Veröffentlichung des ersten überraschenden Cluster-Experiments und der heute akzeptierten Erklärung vergingen mehrere Jahre. Sollte dies jetzt auch so sein, müssen wir uns noch ein wenig gedulden, bevor wir verstehen, was Matthias Richter und sein Team gemessen haben.

Ulf Saalmann und Jan Michael Rost

Dr. Ulf Saalmann und Prof. Dr. Jan Michael Rost, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Nöthnitzer Str. 38, 01187 Dresden

- [1] J. Feldhaus, J. Rossbach und H. Weise, *Physik Journal*, April 2008, S. 37
- [2] H. Wabnitz et al., *Nature* **420**, 482 (2002)
- [3] C. Siedschlag und J. M. Rost, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 043402 (2004); U. Saalmann, C. Siedschlag und J. M. Rost, *J. Phys. B* **39**, R39 (2006)
- [4] A. A. Sorokin et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 213002 (2007)
- [5] M. Richter et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 163002 (2009)
- [6] R. Haensel, G. Keitel, P. Schreiber und C. Kunz, *Phys. Rev.* **188**, 1375 (1969)
- [7] M. G. Makris, P. Lambropoulos und A. Mihelić, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 033002 (2009)