

Garching, 20.04.2008

Presse-Information

Unerwartet heißes Plasma

MPQ-Forscher entdecken mit neuer Technik unerwartete Eigenschaften von Laser-induzierten Stickstoff-Plasmen

Laserinduzierte Plasmen haben zahlreiche Anwendungen in der Kernfusion, der Teilchenbeschleunigung sowie für die Erzeugung von Röntgenstrahlung oder Attosekunden-Pulsen im extremen Ultraviolett. Um die für den jeweiligen Zweck optimalen Eigenschaften einzustellen, bedarf es einer genauen Kenntnis der zeitlichen Entwicklung dieses Zustandes. Dr. Martin Centurion, Peter Reckenthäler und Dr. Ernst Fill aus der Abteilung Attosekunden- und Hochfeldphysik (Leitung Prof. Ferenc Krausz) am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching) konnten nun mit einer neuartigen Abfrage-Technik die Plasma-Dynamik in Echtzeit verfolgen (Nature Photonics, DOI 10.1038/nphoton.2008.77). Dabei zeigte es sich, dass durch ein so genanntes OFI (durch optische Felder induziertes) -Plasma wider Erwarten hohe elektrische und magnetische Felder aufgebaut werden. Dieses Erkenntnis kann entscheidende Auswirkungen auf viele Anwendungen lasererzeugter Plasmen haben.

Ein Plasma ist ein heißer und dichter Materiezustand, in dem sich Atome gewissermaßen in ihre Bestandteile – Kerne und Elektronen – aufgelöst haben, so dass positiv geladene Ionen und negativ geladene Elektronen gleichberechtigt nebeneinander existieren. Nach gängigen Theorien ist das Innere eines Plasmas ein feldfreier Raum, in dem die elektrischen Ladungen gleichförmig verteilt sind. Nur innerhalb kleinster Dimensionen, der sogenannten Debye-Länge (etwa 0,1 Mikrometer) sollte es zu Fluktuationen von elektrischen Ladungen kommen. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass sich im Zentrum eines OFI-Plasmas offenbar ein positiv geladener Bereich herausbildet, den eine weit über die Debye-Länge herausreichende Wolke von Elektronen umgibt.

Zur Erzeugung eines OFI-Plasmas lassen die Wissenschaftler aus einer Düse Stickstoff strömen. Diesen Gasstrahl beschießen sie mit intensiven, nur 50 Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ sec}$) dauernden Laserpulsen aus dem sichtbaren Spektralbereich. Die hohen Feldstärken innerhalb der Pulse ionisieren die Atome und führen zur Plasmabildung im Laserbrennpunkt. Dieses Gasplasma wird anschließend mit drei Pikosekunden währenden Pulsen ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ sec}$) aus Elektronen bombardiert, die eine Energie von 20 Kiloelektronenvolt haben. Die Repetitionsrate der Laser- und Elektronenpulse beträgt 1 kHz (=1000 Pulse pro Sekunde). Nach dem Passieren des Plasmas wird der Elektronenstrahl (Durchmesser: 3 mm) auf einem Detektor nachgewiesen. Die Wirkung des Plasmas auf den „Abfragestrahl“ aus Elektronen spiegelt sich in deren Verteilung wieder: Für ein feldfreies Plasma würde man erwarten, dass die Elektronen den Detektor gleichmäßig bedecken und nur durch die Gasdüse abgeblockt werden. Die Experimente zeigten jedoch, dass auf dem Detektor ein interessantes, sich rasch veränderndes Muster entsteht.

Um die zeitliche Entwicklung des Plasmas zu verfolgen, wird die Zeit zwischen Laser- und Abfrage-Puls variiert. Die so im Abstand von wenigen Pikosekunden gewonnenen Aufnahmen (siehe Abbildung unten von links nach rechts) zeigen folgendes: zunächst – nach einigen wenigen Pikosekunden – entsteht im Bereich des Laserbrennpunkts ein „Loch“ im Elektronenstrahl. Die hier fehlenden Elekt-

Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit,
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: +49(0)8932 905-213
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de

Hans-Kopfermann-Str. 1
D-85748 Garching

Tel.: +49(0)8932 905-0
Fax: +49(0)8932 905-200

ronen sind offenbar in zwei keulenförmige Gebiete abgewandert, die sich entlang des Laserstrahls auf jeder Seite des Plasma-Gebietes ausbreiten. Diese Entwicklung hält etwa 80 Pikosekunden lang an. Dann häufen sich die Abfrage-Elektronen zu einem hellen „Fleck“ im Zentrum an, sodass ihre Dichte hier sogar größer als im ursprünglichen Strahl ist. Nach etwa 300 Pikosekunden werden diese Muster allmählich unscharf.

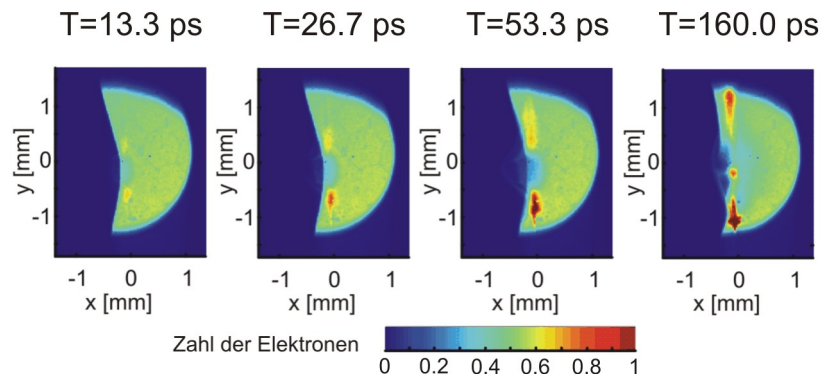


Abbildung: Anrege-Abfrage-Bilder der Plasma-Entwicklung. Die Abbildung zeigt die Änderungen in der Elektronenverteilung des Abfragestrahls in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung zwischen Elektronen- und Laserpulsen. Die Zeit T ist in Pikosekunden angegeben.

Für diese Beobachtungen haben die Wissenschaftler folgende Erklärung: Bereits kurz nach der Erzeugung des Plasmas durch den Laserpuls formt sich im Zentrum ein positiv geladener Bereich, den eine Wolke heißer Elektronen umgibt. Durch diese Ladungstrennung entstehen elektrische und magnetische Felder, die die Elektronen des „Abfragestrahls“ so ablenken, dass sich die oben beschriebene Verteilung ergibt. Die Elektronenwolke reicht über das ursprüngliche Plasma hinaus, nach 100 Pikosekunden ist ihr Radius etwa 1000 mal größer als die Debye-Länge. Unter diesen Bedingungen wird der Abfragestrahl jetzt auf das Zentrum des Detektors fokussiert, was das Auftreten des hellen Flecks erklärt.

Numerische Simulationen, die auf diesen Annahmen beruhen, geben die experimentellen Daten gut wieder und erlauben es, Parameter wie Feldstärken, Gesamtladung und Elektronentemperatur zu berechnen. Sie zeigen, dass die beschriebenen Ladungsverteilungen nur dann auftreten können, wenn sich einige der Plasma-Elektronen extrem aufheizen und viel heißer werden als das Plasma selbst. Ein Prozess, der dies bewirken kann, sind Stöße der zurückkehrenden oszillierenden Elektronen mit den Atomkernen.

Die hier demonstrierte „Deflektometrie“-Technik vermag Änderungen der Plasma-Entwicklung innerhalb von einigen Pikosekunden mit einer räumlichen Auflösung von 30 Mikrometern einzufangen. Ihre hohe Empfindlichkeit beruht darauf, dass kleine Ladungsverschiebungen innerhalb des Plasmas sich als Störungen im räumlichen Profil des Elektronenstrahls bemerkbar machen. Die neue Methode birgt das Potential, die Physik lasererzeugter Plasmen besser zu verstehen und eventuell auf Plasmen basierende Elektronen- und Ionenbeschleuniger gezielt zu verbessern. [O.M.]

Originalveröffentlichung:

M. Centurion, P. Reckenthaler, S. Trushin, F. Krausz und E. Fill
 “Picosecond electron deflectometry of optical-field ionized plasmas”
Nature Photonics, DOI 10.1038/nphoton.2008.77

Kontakt:

Dr. Ernst Fill

Max-Planck-Institut für Quantenoptik,
 Hans-Kopfermann-Straße 1
 85748 Garching
 Telefon: +49 - 89 / 2891 4110
 Fax: +49 - 89 / 2891 4141
 E-Mail: ernst.fill@mpq.mpg.de

Dr. Olivia Meyer-Streng

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik,
 Telefon: +49 - 89 / 32905 213
 Fax: +49 - 89 / 32905 200
 E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de