Une nouvelle source cohérente UVX : la génération d'harmoniques d'ordre élevé d'un rayonnement laser intense

A. L'Huillier et P. Balcou

Service des Photons, Atomes et Molécules, Centre d'Etudes de Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France

Noble gas atoms irradiated by intense laser pulses, in the range 10^{13} to 10^{15} W/cm², generate harmonics of the laser frequency up to a very high order. Radiations of about 150 eV have been demonstrated, and up to 400 eV are expected. As these harmonics are generated in short pulses (from 100 fs to 30 ps), large instantaneous powers may be obtained: 3kW have been measured in Saclay. This XUV source preserves the coherence properties of the pump laser and could find numerous applications thanks to its focusability, brightness and spectral narrowness.

Lorsqu'un laser de grande puissance est focalisé dans un jet atomique (à une pression d'une dizaine de Torr), des harmoniques impaires de la fréquence fondamentale sont générés. Ces processus de conversion de fréquence, étudiés dès les années 70, connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt avec l'utilisation de lasers de courte durée d'impulsion. Lorsque l'éclairement laser est peu intense, l'intensité des harmoniques décroît rapidement avec l'ordre du processus et il est difficile d'aller au delà des harmoniques 5 ou 7. Lorsque l'éclairement laser est suffisamment intense pour induire une réponse non-perturbative de l'atome au champ de radiation, l'intensité des harmoniques devient constante, jusqu'à un ordre extrêmement élevé [1-4]. L'ordre maximum observé est de 109 à l'université de Stanford [5], à partir d'un laser Titane-Saphir à 800 nm. L'énergie du rayonnement émis atteint 170 eV (7.3 nm). Un groupe de l'Université de Tokyo a observé l'harmonique 25 d'un laser excimère de longueur d'onde 248 nm [6], soit une énergie de 125 eV. A Saclay, nous en sommes à l'harmonique 53 d'un laser à Néodyme de 1 ps [4], soit 62 eV (20 nm). La figure ci-contre montre les nombres de photons obtenus dans le néon et le xénon:

Le rayonnement harmonique possède les mêmes propriétés de cohérence et de divergence que celles d'un laser. La durée de l'impulsion suit (en étant légèrement inférieure) celle du laser incident. Si l'on utilise des lasers de très courte durée d'impulsion comme les lasers Titane-Saphir, on obtient des impulsions UVX de durée très brève, inférieure à 100 fs. Le rayonnement peut être accordable si le laser de pompe l'est. Une des caractéristiques les plus intéressantes du rayonnement harmonique est sa puissance instantanée et par conséquent sa brillance. Nous avons pu mesurer une puissance d'environ 3000 Watts à 20 eV, avec un éclairage laser incident de seulement 2×10^{14} W/cm². Le rendement de conversion est de 5×10^{-7} . Partant d'un laser d'une puissance d'1 TéraWatt, on peut espérer produire un rayonnement harmonique d'une puissance de l'ordre d' 1 Mégawatt. Enfin, ce rayonnement possédant les mêmes propriétés de cohérence spatiale que celles d'un laser, va pouvoir être focalisé sur une tache très petite, proche de la limite de diffraction, c'est-à-dire bien inférieure au micron. Par exemple, le diamètre de cette tache sera d'une centaine de nanomètres pour un rayonnement de 100 eV focalisé à $f/10$. Dans la table, nous résumons les caractéristiques de l'émission à la 19^{ième} harmonique d'un laser à verre dopé au Néodyme généré dans un jet de xénon, en utilisant des données soit mesurées expérimentalement (pour le nombre de photons) soit calculées (pour les largeurs temporelles et les dimensions, et donc pour la brillance instantanée) [3]. Nous pensons que ces valeurs pourront être étendues à des harmoniques plus élevés (et donc à un rayonnement de plus courte longueur d'onde) en utilisant des gaz plus légers comme le néon ou l'hélium et en optimisant la géométrie de l'interaction. La génération d'harmoniques élevés pourra ainsi être prochainement utilisée comme source cohérente UVX.

Table: 19^{ième} harmonique généré dans le xénon
d'un laser Néodyme à dérive de fréquence (1,053 μ m).

Energie de photons	22 eV	Durée de l'impulsion	0,5 ps
Largeur spectrale	1 Å	$\Delta E / E$	2×10^{-3}
Divergence	1 mrad	Photons / impulsion	4×10^8
Photons/s.Å.(mrad) ²	10^{21}	Dimension de la source	1 μ m
Puissance instantanée	3 kW	Energie	1,5 nJ
Cadence	1 tir / 10 s	Eclairement	4×10^{11} W/cm ²

Références :

- [1] A. McPherson et al., J. Opt. Soc. Am. B **4**, 595 (1987).
- [2] X. F. Li, A. L'Huillier, M. Ferray, L. A. Lompré, G. Mainfray and C. Manus, Phys. Rev. A **39**, 5751 (1989).
- [3] A. L'Huillier et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **24** (1991) 3315-3341.
- [4] A. L'Huillier, L. A. Lompré, G. Mainfray and C. Manus, in "Atoms in Intense Laser Fields", Ed. M. Gavrilu, Academic Press, Orlando, Florida (à paraître dans la série "Advances in Optical, Atomic and Molecular Physics").
- [5] J. J. Macklin, J. D. Kmetec and C. L. Gordon III, à paraître.
- [6] N. Sarakura, K. Hata, T. Adachi, R. Nodomi, M. Watanabe and S. Watanabe, Phys. Rev. A **43**, 1669 (1991).