

Faisceaux d'électrons attosecondes portant du moment angulaire orbital

Romain Gêneaux¹, Antoine Camper², O. Gobert¹, Thierry Auguste¹ et Thierry Ruchon¹

¹CEA, IRAMIS, Laboratoire Interactions, Dynamique et Lasers - LIDyL, CEA-SACLAY, F-91191 Gif-sur-Yvette, FRANCE

² Now in Department of Physics, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, USA

Le moment angulaire orbital (MAO) est une propriété générale des ondes qui peut être transmise à la fois à des faisceaux d'électrons [1] et de photons [2]. Dans sa réalisation la plus courante, il se manifeste comme un front d'onde hélicoïdal avec une singularité de phase en son centre. Le contrôle de faisceaux photoniques portant un MAO est devenu possible en 1992 et a mené à de nombreuses applications. En particulier, ils ont été appliqués aux protocoles d'information quantique, où leur nombre quantique non borné a amélioré les schémas de multiplexage de données (p. ex. [3]), en microscopie, où leur singularité de phase a permis de révéler des dislocations ou encore en manipulation de nanoparticules. Dernièrement, deux articles ont étudié la génération d'harmoniques d'ordre élevé (GHOE) avec des faisceaux portant du MAO, ouvrant de nouvelles perspectives d'applications dans l'extrême ultraviolet (XUV) et dans le domaine femtoseconde [4,5]. Ces deux travaux sont cependant en fort désaccord et appellent à d'autres études. Gariépy et al. ont confirmé la théorie de [5], observant que le MAO de la q -ième harmonique, noté ℓ_q , vaut $\ell_q = q\ell_{IR}$. Au contraire, Zürich et al. observent $\ell_q = \ell_{IR}$ sur une harmonique. Les faisceaux *électroniques* portant du MAO ont également été le sujet de nombreuses recherches récentes, motivées par les possibilités d'application en spectroscopie de la matière condensée, en microscopie et en physique des particules [6,7]. Ils ont même été générés il y a peu sur des lasers à électrons libres [8], avec la perspective d'études de dynamiques femtosecondes dans l'XUV.

Nous confirmons ici la loi multiplicative de transfert du MAO dans la GHOE sur une gamme spectrale extrêmement large, et nous proposons puis démontrons une méthode pour générer des faisceaux d'électrons attosecondes portant du MAO grâce à la photoionisation dans le domaine XUV. Le faisceau électronique est caractérisé temporellement via une expérience de corrélation croisée, révélant une structure temporelle attoseconde.

Pour étudier la GHOE avec des faisceaux lumineux portant un MAO, nous avons utilisé le laser Ti:Sa LUCA (20Hz, 30 mJ, 50 fs) du CEA-Saclay. Le profil quasi-gaussien du faisceau nous a permis de produire des modes de Laguerre-Gauss au foyer d'une lentille en utilisant des lames de phase en spirale. Nous avons ensuite pu générer des harmoniques à partir de faisceaux infrarouges portant un moment de $\ell_{IR} = 1, 2$ ou 3 . Un spectre typique, ici pris avec $\ell_{IR} = 1$, est présenté sur la Fig. 1. Une simulation numérique macroscopique tridimensionnelle de la GHOE utilisant l'approximation du champ fort a été réalisée avec différentes hypothèses sur la loi de conservation. La seule hypothèse reproduisant les résultats expérimentaux est $\ell_q = q\ell_{IR}$, résultat qui peut également être retrouvé en utilisant un modèle simple des lois de la GHOE, confirmant ainsi le résultat de Gariépy et al. pour une gamme de paramètres largement étendue.

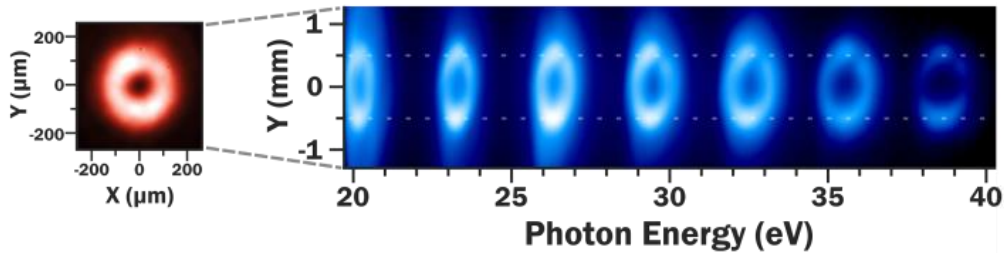


Figure 1: (Gauche) Profil d'un faisceau infrarouge portant un quantum de MAO au foyer d'une lentille de 1m. (Droite) Harmoniques d'ordre élevé générées dans l'argon et observées en champ lointain.

Disposant de cette nouvelle source de lumière XUV bien caractérisée, nous l'avons utilisée pour étudier la photoionisation (PI) dans un dispositif à deux couleurs (XUV+IR) avec un délai temporel contrôlé. Nous avons réalisé la PI de l'argon en conditions paraxiales dans un spectromètre de temps de vol d'électron à bouteille magnétique, et nous avons pu observer des traces RABBIT lorsque l'infrarouge porte le même MAO que le laser de génération. Cela constitue une confirmation des règles récemment établies théoriquement concernant la PI par des faisceaux lumineux portant du MAO [9,10]. La reconstruction du paquet d'onde électronique émis suite à la PI présente une structure hélicoïdale de "ressort optique", conformément aux prédictions de [11]. Cette nouvelle source secondaire de faisceaux électroniques ultra-brefs, qui est compacte, relativement peu coûteuse et très modulable, devrait ouvrir de nouvelles voies en physique ultrarapide, en utilisant par exemple de nouvelles formes de dichroïsme [12].

Références

- [1] M. Uchida et al., *Generation of electron beams carrying orbital angular momentum*, Nature 464, 737–739 (2010).
- [2] L. Allen et al., *Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*, Phys. Rev. A 45, 8185–8189 (1992).
- [3] A. Nicolas et al., *A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits*, Nat. Phot. 8, 234–238 (2014).
- [4] M. Zürch et al., *Strong-field physics with singular light beams*, Nat. Phys. 8, 743–746 (2012).
- [5] G. Gariépy et al., *Creating High-Harmonic Beams with Controlled Orbital Angular Momentum*, Phys. Rev. Lett. 113, 153901(2014).
- [6] V. Grillo et al., *Highly efficient electron vortex beams generated by nanofabricated phase holograms*, Appl. Phys. Lett. 104, 043109 (2014).
- [7] Don Monroe. *Big Twist for Electron Beam*, Physics 8, 7 (2015).
- [8] E. Hemsing et al., *Coherent optical vortices from relativistic electron beams*, Nat. Phys. 9, 549 (2013).
- [9] A. Picón et al., *Photoionization with orbital angular momentum beams*, Opt. Express 18, 3660–3671 (2010).
- [10] O. Matula et al., *Atomic ionization of hydrogen-like ions by twisted photons: angular distribution of emitted electrons*, J. Phys. B 46, 205002 (2013).
- [11] C. Hernández-García et al., *Attosecond Extreme Ultraviolet Vortices from High-Order Harmonic Generation*, Phys. Rev. Lett. 111, 083602 (2013).
- [12] M. van Veenendaal and I. McNulty, *Prediction of Strong Dichroism Induced by X Rays Carrying Orbital Momentum*, Phys. Rev. Lett. 98, 157401 (2007).