

Caractérisation temporelle d'impulsions XUV ultrabrèves partiellement cohérentes

Charles Bourassin-Bouchet and Marie-Emmanuelle Couprie

Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

La métrologie temporelle est un besoin majeur pour les nouvelles sources ultrabrèves dans l'extrême-ultraviolet et les rayons X (XUV), telles que les sources attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) à génération d'harmoniques d'ordre élevé [1,2], ou les lasers à électrons libres (LEL) femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) [3,4]. Sur source harmonique, la technique de caractérisation temporelle la plus aboutie est la technique FROG-CRAB (*Frequency-Resolved Optical Gating for Complete Reconstruction of Attosecond Bursts*) [5], adaptée de la technique FROG utilisée sur les lasers ultrabrefs visibles et infrarouges (IR) [6]. En focalisant l'impulsion XUV à mesurer dans un jet de gaz en présence d'un champ laser IR, on induit un phénomène de photoionisation à deux couleurs IR/XUV. En mesurant le spectre des photoélectrons ainsi produits en fonction du retard entre les champs IR et XUV, on obtient une trace à deux dimensions appelée spectrogramme. Ce spectrogramme est ensuite traité avec un algorithme pour en extraire le profil de l'impulsion XUV. Idéalement, il faudrait pouvoir appliquer directement FROG-CRAB sur LEL. Cependant, à l'inverse des sources attosecondes, les impulsions LEL peuvent changer fortement tir-à-tir et souffrir de variations aléatoires de leur instant d'arrivée (*jitter*), ce qui les rend très difficile à synchroniser avec un laser IR extérieur. Ces fluctuations tir-à-tir brouilleraient un spectrogramme acquis dans ces conditions, rendant impossible l'utilisation de la technique FROG-CRAB. Le problème peut être compris en considérant l'impulsion XUV comme partiellement cohérente, et les fluctuations tir-à-tir comme une source de décohérence. Or la métrologie ultrabrève moderne repose sur l'hypothèse que l'impulsion à mesurer est pleinement cohérente, et échoue donc en présence de cohérence partielle.

Pour surmonter ce problème, nous proposons une solution basée sur les avancées récentes dans le domaine de l'imagerie par diffraction cohérente. Cette technique de microscopie consiste à reconstruire un objet en traitant numériquement sa tache de diffraction en champ lointain. La clé du succès est d'éclairer l'objet avec un faisceau lumineux pleinement cohérent, la qualité de l'imagerie diminuant très rapidement à mesure que la cohérence du faisceau se dégrade. Mais de nombreux efforts sont actuellement fait pour permettre la reconstruction de l'objet en présence d'un faisceau partiellement cohérent [7,8], et ce simplement en adaptant le traitement numérique utilisé pour l'inversion des figures de diffraction. En s'inspirant des algorithmes utilisés en imagerie par diffraction partiellement cohérente, nous avons développé un nouveau traitement numérique pour FROG permettant la reconstruction d'impulsions ultrabrèves même en présence de cohérence partielle [9]. Dans le contexte des LEL, cette nouvelle technique devrait permettre la caractérisation temporelle complète (en amplitude et en phase) d'impulsions ultrabrèves jusque dans la gamme des rayons X durs. Ces avancées vont également bénéficier à tous les domaines dans lesquels la technique FROG est utilisée. En métrologie attoseconde, cela permettra par exemple de sonder le phénomène de photoionisation, et d'observer dans quelle mesure la cohérence du paquet d'onde optique (l'impulsion XUV) est transférée au paquet d'onde électronique durant l'ionisation [10]. Dans le domaine visible-IR, cette technique permettra par exemple de

sonder la cohérence de processus non-linéaires complexes, tels que la génération d'impulsions supercontinuum obtenues dans des fibres à cristaux photoniques [11].

- [1] P. M. Paul et al., *Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation*, Science **292**, 1689-1692 (2001).
- [2] M. Hentschel et al., *Attosecond Metrology*, Nature **414**, 509-513 (2001).
- [3] P. Emma et al., *First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser*, Nat. Photonics **4**, 641-647 (2010).
- [4] E. Allaria et al., *Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet*, Nat. Photonics **6**, 699-704 (2012).
- [5] Y. Mairesse and F. Quéré, *Frequency-resolved optical gating for complete reconstruction of attosecond bursts*, Phys. Rev. A **71**, 011401(R) (2005).
- [6] R. Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses* (Springer, 2000).
- [7] P. Thibault and A. Menzel, *Reconstructing state mixtures from diffraction measurements*, Nature **494**, 68-71 (2013).
- [8] J. N. Clark et al., *Dynamic imaging using ptychography*, Phys. Rev. Lett. **112**, 113901 (2014).
- [9] C. Bourassin-Bouchet and M.-E. Couprie, *Partially coherent ultrafast spectroscopy*, Nat. Commun. **6**:6465 (2015).
- [10] M. Schultze et al., *Delay in Photoemission*, Science **328**, 1658-1662 (2010).
- [11] J. M. Dudley et al., *Supercontinuum generation in photonic crystal fiber*, Rev. Mod. Phys. **78** 1135-1184 (2006).