



## Optimisation d'une source d'électrons accélérés par interaction laser-plasma pour les applications

**Spécialité** Physique des milieux ionisés et des plasmas

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [LIDYL/PHI](#)

**Candidature avant le** 30/03/2022

**Durée** 6 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [DOBOSZ DUFRENOY Sandrine](#)  
+33 1 69 08 63 40  
[sandrine.dobosz@cea.fr](mailto:sandrine.dobosz@cea.fr)

### Résumé

Le groupe PHI étudie l'accélération de particules par interaction laser-matière à haute intensité, se tournant vers les applications depuis quelques temps. Nous proposons au stagiaire d'optimiser le couplage laser-cible pour permettre de stabiliser la source d'électrons produites sur notre installation laser UHI100 et de participer à une campagne expérimentale sur le laser APOLLON (PW) visant à utiliser la source d'électrons pour générer une source de positrons.

### Sujet détaillé

Le groupe de Physique à Haute Intensité (PHI) du LIDYL (CEA-Orme des Merisiers) étudie l'interaction des lasers à haute intensité avec la matière et en particulier l'accélération de particules par interaction laser-gaz.

Depuis une vingtaine d'années maintenant, les progrès dans ce domaine ont été spectaculaires, démontrant la possibilité d'atteindre plusieurs GeV en utilisant des cibles gazeuses de quelques centimètres de taille seulement, ou encore en obtenant des sources de plus en plus contrôlées (énergie, divergence, etc...) issues de schémas d'interaction innovants. Tout ceci a ouvert la voie vers leur utilisation dans différentes applications.

Plus particulièrement, nous nous intéressons depuis quelques temps au fort potentiel que ces accélérateurs laser-plasmas présentent dans la production de sources à haut débit de dose pour la radiothérapie. Les premières expériences réalisées sur notre laser de classe 100TW, UHI100, ont fourni des résultats très encourageants. Les pistes de travail que nous avons identifiées requièrent une forte stabilité et reproductibilité du processus d'accélération. Le stagiaire participera à la mise en place de solutions visant à optimiser le couplage laser-cible avec comme objectif l'utilisation de cette source de particules accélérées par laser.

Un deuxième volet applicatif sera exploré par le/la stagiaire lors de la campagne expérimentale de génération de positrons par interaction d'une source d'électrons accélérés par laser avec une cible de numéro atomique élevée, qui se déroulera sur le laser APOLLON (PW) au printemps et dans laquelle notre groupe est impliqué. Ce travail sera

---

réalisé en collaboration avec des équipes de L'université de Belfast, spécialistes de la génération de positrons, et des équipes du Plateau de Saclay. L'étudiant/e aura en charge l'analyse d'une partie des résultats de l'expérience.

Ces travaux s'inscrivent complètement dans la perspective d'un projet de thèse où les progrès réalisés sur la source d'électrons seront pleinement exploités.

### **Mots clés**

Accélérateur, laser fs

### **Compétences**

### **Logiciels**

---

## Optimization of a laser-driven electron source for applications

### Summary

The PHI group has been studying particle acceleration by high intensity laser-matter interaction, with a final objective oriented towards applications. We propose to optimize the laser-target coupling for increasing the stability of the laser-driven electron source on our UHI100 laser facility and to participate to an experimental campaign on the APOLLON (PW) laser whose goal is to use a laser-plasma accelerator to generate positrons source.

### Full description

The High Intensity Physics (PHI) group of LIDYL (CEA-Orme des Merisiers) studies the interaction of high intensity lasers with matter and, in particular, the particle acceleration by laser-gas interaction.

Since twenty years now, progress in this field has been spectacular, demonstrating the possibility of accelerating up to several GeV electrons using gas targets with only a few centimeters, or even by a increased control of the sources (energy , divergence, etc.) resulting from innovative interaction schemes. These have paved the way towards applications.

In PHI group, we are interested in the strong potential that these laser-plasma accelerators for the the production of high dose rate sources in the context of radiotherapy. The first experiments carried out on our 100TW class laser, UHI100, have provided very encouraging results. Among the different ideas to work on, the high stability and reproducibility of the acceleration process are crucial points, as especially for applications. The student will participate in the implementation of solutions aimed at optimizing the laser-target coupling with the objective of using this source of particles for applications.

Strongly linked to the application of laser-plasma accelerator, the student will participate to an experimental campaign on positron generation by interaction of a laser-driven electron source with a solid target, planned on APOLLON laser facility (PW) for spring 2022. We will collaborate with team from the University of Belfast (leader), specialist in positron generation, and teams from the Saclay Plateau. The student will be responsible for analyzing part of the results of the experiment.

This work can be pursued with a thesis project where the progress made on the electron source will be fully exploited.

### Keywords

Accelerator, fs laser

### Skills

### Softwares



## Imagerie attoseconde de paquets d'ondes électroniques dans les gaz moléculaires

**Spécialité** Interaction laser-matière

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [LIDYL/ATTO](#)

**Candidature avant le** 30/03/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [SALIERES Pascal](#)

+33 1 69 08 63 39

[pascal.salieres@cea.fr](mailto:pascal.salieres@cea.fr)

**Autre lien** <http://attolab.fr/>

### Résumé

L'étudiant-e produira des impulsions attosecondes à l'aide d'un laser Titane:Saphir intense. Ces impulsions ultrabrèves seront utilisées pour étudier la dynamique ultrarapide d'ionisation de gaz moléculaires, et en particulier, imager en temps réel l'éjection du paquet d'onde électronique.

### Sujet détaillé

Ces dernières années, la génération d'impulsions sub-femtosecondes, dites attosecondes ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ), a connu des progrès spectaculaires. Ces impulsions ultrabrèves ouvrent de nouvelles perspectives d'exploration de la matière à une échelle de temps jusqu'alors inaccessible. Leur génération repose sur la forte interaction non linéaire d'impulsions laser infrarouges brèves ( $\sim 20$  femtosecondes) et intenses focalisées dans des gaz. On produit ainsi les harmoniques d'ordre élevé de la fréquence fondamentale, sur une large gamme spectrale (160-10 nm) couvrant l'extrême ultraviolet (UVX). Dans le domaine temporel, ce rayonnement cohérent se présente comme un train d'impulsions d'une durée de  $\sim 100$  attosecondes chacune [1]. Pour produire des impulsions attosecondes isolées, il faut réduire la durée des impulsions IR fondamentales à  $\sim$  un cycle optique (

Avec ces impulsions attosecondes, il devient possible d'étudier les dynamiques les plus rapides dans la matière, celles associées aux électrons, qui se déroulent naturellement à cette échelle de temps. La spectroscopie attoseconde permet ainsi l'étude de processus fondamentaux tels que la photo-ionisation et s'intéresse à la question : combien de temps faut-il pour arracher un électron à un atome ou une molécule ? La mesure de ces délais d'ionisation est actuellement un sujet "chaud" dans la communauté scientifique. En particulier, l'étude de la dynamique d'ionisation près des résonances permet d'accéder à la construction en temps réel du profil des résonances [2,3], ainsi qu'aux réarrangements électroniques dans l'ion suite à l'éjection de l'électron (migration de charge). Un spectromètre récemment installé permet de mesurer également la distribution angulaire des électrons, nécessaire à la reconstruction du film 3D de l'éjection électronique, et à l'étude des effets de décohérence quantique dus notamment à l'intrication électron-ion [4].

---

Le travail expérimental comprendra la mise en œuvre d'un dispositif, installé sur le laser FAB1 de l'Équipement d'Excellence ATTOLab, permettant :

- i) la génération d'impulsions attosecondes ;
- ii) leur caractérisation par interférométrie quantique ;
- iii) leur utilisation en spectroscopie de photoionisation (détection d'électrons).

Les aspects théoriques pourront également être abordés. L'étudiant-e sera formé-e en optique ultrarapide, physique atomique et moléculaire, optique quantique, et acquerra une bonne maîtrise de la spectroscopie de particules chargées. La poursuite en thèse est souhaitée.

Références :

- [1] Y. Mairesse, et al., Science 302, 1540 (2003)
- [2] V. Gruson, et al., Science 354, 734 (2016)
- [3] L. Barreau, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 253203 (2019)
- [4] C. Bourassin-Bouchet, et al., Phys. Rev. X 10, 031048 (2020)

### **Mots clés**

Physique attoseconde, optique non linéaire, optique quantique

### **Compétences**

Laser femtoseconde intense, génération d'harmoniques d'ordre élevé, interférométrie optique et quantique, spectrométrie de photons UVX, spectrométrie d'électrons

### **Logiciels**

Labview, Python

---

## Attosecond imaging of electronic wavepackets in molecular gases

### Summary

The student will generate attosecond pulses using an intense Titanium:Sapphire laser. These ultrashort pulses will be used to investigate the ultrafast ionization dynamics of molecular gases, and in particular, to image in real time the ejection of electronic wavepackets.

### Full description

Recently, the generation of sub-femtosecond pulses, so-called attosecond pulses ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ), has made impressive progress. These ultrashort pulses open new perspectives for the exploration of matter at unprecedented timescale. Their generation result from the strong nonlinear interaction of short intense laser pulses ( $\sim 20$  femtoseconds) focused in gases. High order harmonics of the fundamental frequency are produced, covering a large spectral bandwidth in the extreme ultraviolet (XUV) range. In the temporal domain, this coherent radiation forms a train of 100-attosecond pulses [1]. The generation of isolated attosecond pulses requires shortening the fundamental laser pulses to single-cycle duration (

With such attosecond pulses, it becomes possible to investigate the fastest dynamics in matter, i.e., electronic dynamics that occur naturally on this timescale. Attosecond spectroscopy thus allows studying fundamental processes, e.g., photo-ionization, in order to answer questions such as: how long does it take to remove one electron from an atom or a molecule? The measurement of attosecond ionization delays is currently a “hot topic” in the scientific community. In particular, the study of the ionization dynamics close to resonances gives access to the buildup in real time of resonance profiles [2,3] and to electronic rearrangements in the ion upon electron ejection (charge migration). A recently installed spectrometer now gives access to the electron angular distribution allowing the reconstruction of the 3D movie of the electron ejection, as well as the investigation of quantum decoherence effects, e.g., induced by ion-photoelectron entanglement [4].

The experimental work will include the development/operation of a setup installed on the FAB1 laser of the ATTOLab Excellence Equipment allowing:

- i) the generation of attosecond XUV pulses,
- ii) their characterization using quantum interferometry,
- iii) their use in photo-ionization spectroscopy (electron detection).

The theoretical aspects could also be developed. The student will be trained in ultrafast optics, atomic and molecular physics, quantum optics and will acquire a good mastery of charged particle spectrometry. The continuation on a PhD project is advised.

[1] Y. Mairesse, et al., *Science* 302, 1540 (2003)

[2] V. Gruson, et al., *Science* 354, 734 (2016)

[3] L. Barreau, et al., *Phys. Rev. Lett.* 122, 253203 (2019)

[4] C. Bourassin-Bouchet, et al., *Phys. Rev. X* 10, 031048 (2020)

### Keywords

Attosecond physics, nonlinear optics, quantum optics

### Skills

Intense femtosecond laser, high-order harmonic generation, optical and quantum interferometry, spectrometry of XUV photons, electron spectrometry

### Softwares

---

Labview, Python



## Génération d'impulsions attosecondes portant un moment angulaire orbital dans des réseaux transitoires

**Spécialité** Interaction laser-matière

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [LIDYL/ATTO](#)

**Candidature avant le** 31/05/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [RUCHON Thierry](#)

+33 1 69 08 70 10

[thierry.ruchon@cea.fr](mailto:thierry.ruchon@cea.fr)

### Résumé

Au cours de ce stage, l'étudiant mettra en place, sur un laser femtoseconde intense, un dispositif interférométrique pour étudier, lors de la génération d'impulsions attosecondes, les couplages entre moment angulaires orbitaux et de spin de la lumière. Ce stage d'expérimentation met en jeu des concepts d'optique non linéaire, d'optique quantique et d'interaction laser matière.

### Sujet détaillé

#### Résumé

Ces dernières années, la génération d'impulsions sub-femtosecondes, dites attosecondes ( $1\text{as}=10^{-18}\text{s}$ ), a connu des progrès spectaculaires. Ces impulsions ultrabrèves ouvrent de nouvelles perspectives d'exploration de la matière à une échelle de temps jusqu'alors inaccessible. Leur génération repose sur l'interaction très fortement non linéaire d'impulsions laser brèves (10 à 50 femtosecondes) et intenses avec des gaz atomiques ou moléculaires. On produit ainsi les harmoniques d'ordre élevé de la fréquence fondamentale, sur une large gamme spectrale (160-10 nm) couvrant l'extrême ultraviolet (UUV). Dans le domaine temporel, ce rayonnement cohérent se présente comme un train d'impulsions d'une durée de quelques 100 attosecondes [MdF+03]. Une des voies d'application de ces impulsions est leur utilisation dans des schémas pompe-sonde. Un échantillon de gaz ou un solide est porté dans un état excité par une première impulsion IR et une deuxième, l'impulsion attoseconde, vient le sonder à un délai ajustable, moins d'une femtoseconde plus tard. L'impulsion attoseconde ayant un spectre dans l'XUV elle photoionise les échantillons. Il y a donc deux façons de "lire" l'interaction: en analysant le défaut de photons transmis ou réfléchis, ou les photoélectrons émis. Jusqu'à présent, ces techniques ont été utilisées en sondant la matière avec un rayonnement attoseconde polarisé linéairement et présentant un front d'onde à symétrie cylindrique. Récemment, nous avons étendu la gamme de ces expériences en utilisant d'une part des impulsions polarisées circulairement [FHD+15], d'autre part, des impulsions dont le front d'onde est hélicoïdal [GCA+16, GRA+17, CBA+19]. Alors que les premières sont associées à des photons portant un moment angulaire de spin, les secondes correspondent à des photons portant un moment angulaire orbital. Les perspectives sont à la fois appliquées, en particulier à la femtochimie de molécules chirales ou la magnétisation ultrarapide [FBV+21, FPP+21], et fondamentales, en particulier liées aux lois de conservation des



---

moments angulaires dans les processus d'optique non linéaire.

Au cours de ce stage, nous proposons de mettre en place un dispositif optique original permettant de tester les lois de conservation des moments angulaires au cours du phénomène extrêmement non linéaire à la base de la synthèse d'impulsions attosecondes, la génération d'harmoniques d'ordre élevé (GHOE). Celle-ci est maintenant établie pour des faisceaux courts ( $\approx 25$  fs) : l'harmonique  $q$  du faisceau généré porte simplement  $q$  fois la charge de moment angulaire orbital du faisceau pilote. En revanche, pour des impulsions ultracourtes ( $\lesssim 10$  fs), le spectre généré devient progressivement continu, faisant apparaître des harmoniques non entières du faisceau pilote. La question qui se pose est la forme et la distribution en moment du faisceau généré. Nous mettrons en œuvre deux faisceaux femtoseconde intenses, qui se croiseront dans un gaz atomique où aura lieu la GHOE. À cet endroit, les deux faisceaux formeront un réseau transitoire dont nous varierons l'épaisseur et la profondeur. Chacun des deux faisceaux pourra porter un moment angulaire de spin et/ou un moment angulaire orbital, ajustable rapidement. Le diagnostic de l'interaction se fera à la fois par polarimétrie du rayonnement XUV, et par mesure du moment angulaire orbital par interférométrie. Outre les aspects fondamentaux mis en jeu, la mise au point de cette technique ouvrira des champs d'explorations nouveaux comme par exemple l'étude de birefringences ou dichroïsmes transitoires attosecondes qui donneront une nouvelle image des processus à l'œuvre dans des systèmes asymétriques à cette échelle de temps. Ce stage sera effectué sur les lasers FAB1 & 10 d'Attolab

#### Compétences développées

Le ou la stagiaire acquerra une pratique de l'optique des lasers femtoseconde et des techniques de spectrométrie de particules chargées. Il ou elle étudiera également les processus de physique des champs forts sur lesquels se basent la génération d'harmonique d'ordre élevé. Finalement des développements théoriques pourront également être inclus selon les goûts du ou de la candidat(e). La poursuite en thèse est possible après un M2.

#### Compétences requises

Des compétences en optique, physique atomique et moléculaires seront appréciées pour un stage de M2.

#### Références :

- [CBA+19] Chappuis, C. et al., 2019. *Physical Review A*, 99(3). [10.1103/physreva.99.033806](#)
- [FBV+21] Fanciulli, M. et al., 2021. *Physical Review A*, 103(1). [10.1103/physreva.103.013501](#)
- [FHD+15] Ferré, A. et al., 2015. *Nature Photonics*, 9, 93. [10.1038/nphoton.2014.314](#)
- [FPP+21] Fanciulli, M. et al., 2021. Observation of magnetic helicoidal dichroism with extreme ultraviolet light vortices. [arxiv.org/abs/2103.13697](#)
- [GCA+16] Généaux, R. et al., 2016. *Nature Communications*, 7, 12583. [10.1038/ncomms12583](#)
- [GRA+17] Gauthier, D. et al., 2017. *Nature Communications*, 8, 14971. [10.1038/ncomms14971](#)
- [MdF+03] Mairesse, Y. et al., 2003. *Science*, 302(5650), 1540. [10.1126/science.1090277](#)

#### Mots clés

Physique attoseconde, magnéto-optique

#### Compétences

Laser femtoseconde, Optiques XUV Méthodes de caractérisation temporelles d'impulsions brèves Post-compression d'impulsions lumineuses

#### Logiciels

Python

---

## Generation of attosecond pulses carrying an Orbital Angular moment in transient gratings

### Summary

During this training, the student will set up, on an intense femtosecond laser, an interferometric device to study, during the generation of attosecond pulses, the couplings between angular orbital moment and spin angular moment of light. This experimental training will require concepts of nonlinear optics, quantum optics and laser-matter interaction.

### Full description

#### Summary

In recent years, the generation of sub-femtosecond pulses, so-called attoseconds ( $1\text{as} = 10^{-18}\text{s}$ ), has seen spectacular progress. These ultra-short pulses open up new prospects for the exploration of matter on a previously inaccessible scale of time. Their generation is based on the highly nonlinear interaction of short (10 to 50 femtosecond) intense laser pulses with atomic or molecular gases. The high-order harmonics of the fundamental frequency are produced over a wide spectral range (160-10 nm) covering the extreme ultraviolet spectral range (XUV). In the temporal domain, this coherent radiation appears as a train of light pulses lasting some 100 attoseconds [MdF+03]. One way of applying these pulses is their use in pump-probe schemes. A gas sample is brought into an excited state by a first IR pulse and a second attosecond pulse, is shine at an adjustable delay, less than one femtosecond later. The attosecond pulse having a spectrum in the XUV it photoionizes the samples. There are thus two ways of "reading" the interaction: by analyzing the defect of transmitted or reflected photons or the photoelectrons emitted. Until now, these techniques have been used by probing the material with linearly polarized attosecond radiation having a cylindrical symmetric wavefront. Recently, we have extended the range of these experiments using, on the one hand, circularly polarized pulses [FHD+15] and, on the other hand, pulses whose wave front is helical [GCA+16, GRA+17, CBA+19]. While the former are associated with photons carrying an angular spin moment, the latter correspond to photons carrying an orbital angular momentum. The prospects are both applied, in particular to the femtochemistry of chiral molecules or ultrafast magnetization [FBV+21, FPP+21], and fundamental, in particular related to the laws of conservation of angular moments in the processes of nonlinear optics.

During this training, we propose to set up a unique optical device to test the laws of conservation of the angular momenta during the extremely nonlinear phenomenon at the base of the synthesis of attosecond pulses, the generation of high order harmonics (HHG). This is now established for short beams ( $\approx 25\text{fs}$ ): the harmonic  $q$  of the generated beam simply carries  $q$  times the orbital angular momentum carried by the driving beam. On the other hand, for ultrashort pulses ( $\leq 10\text{fs}$ ), the generated spectrum becomes progressively continuous, causing non-integer harmonics of the driving beam to appear. The question which arises is the shape and the momentum distribution of the generated beam. We will implement two femtosecond intense beams, which will intersect in an atomic gas where the HHG will take place. At this point, the two beams will form a transient grating whose thickness and depth will be adjustable. Each of the two beams will carry an angular moment of spin and / or an orbital angular moment, adjustable rapidly. The diagnosis of the interaction will be carried out by both polarimetry of the XUV radiation and by measurement of the orbital angular momentum by interferometry. In addition to the fundamental aspects involved, the development of this technique will open new fields of investigation, such as the study of birefringences or transient attosecond dichroism which will give a new image of the processes at work in asymmetric systems at this time scale. This training will be hosted on Attabab FAB1 & 10 lasers

#### Acquired know hows

The trainee will acquire a practice of femtosecond lasers and charged particle spectrometry techniques. He or she will also study strong fields physics on which the high harmonic generation is based. Finally, theoretical developments may also be included depending on the candidate's tastes. The pursuit in PhD thesis is desired for a M2 internship.

#### Required skills

Skills in optics, atomic and molecular physics will be appreciated for a M2 student.

#### References :

---

[CBA+19] Chappuis, C. et al., 2019. Physical Review A, 99(3). [10.1103/physreva.99.033806](#)  
[FBV+21] Fanciulli, M. et al., 2021. Physical Review A, 103(1). [10.1103/physreva.103.013501](#)  
[FHD+15] Ferré, A. et al., 2015. Nature Photonics, 9, 93. [10.1038/nphoton.2014.314](#)  
[FPP+21] Fanciulli, M. et al., 2021. Observation of magnetic helicoidal dichroism with extreme ultraviolet light vortices. [arxiv.org/abs/2103.13697](#)  
[GCA+16] Géneaux, R. et al., 2016. Nature Communications, 7, 12583. [10.1038/ncomms12583](#)  
[GRA+17] Gauthier, D. et al., 2017. Nature Communications, 8, 14971. [10.1038/ncomms14971](#)  
[MdF+03] Mairesse, Y. et al., 2003. Science, 302(5650), 1540. [10.1126/science.1090277](#)

## **Keywords**

Attosecond physics, magneto-optics

## **Skills**

Femtosecond laser, XUV optics Short pulse temporal characterization methods Post-compression of light pulses

## **Softwares**

Python