

Apollon : une infrastructure de pointe pour explorer la physique de l'extrême

Dimitrios PAPADOPOULOS, Julien PRUDENT, Mathieu DUMERGUE, François MATHIEU*

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

* francois.mathieu@polytechnique.edu



<https://doi.org/10.1051/photon/202513518>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Apollon est une infrastructure laser d'Ultra-Haute Intensité fournissant des impulsions multi-PW pour la recherche en interaction laser-matière et physique des plasmas. Ouverte aux utilisateurs depuis 2021, elle comporte deux zones : SFA pour les interactions à très haute intensité et l'accélération d'ions, et LFA pour l'accélération d'électrons. Apollon a déjà dépassé 10^{22} W/cm² et poursuit sa montée en puissance vers de nouveaux régimes QED.

Du projet à la réalité

Le projet Apollon est né il y a une vingtaine d'années d'une ambition hors-norme : concevoir l'installation laser 10 PW de nouvelle génération. Les performances visées tenaient alors de la prospective : une puissance crête de $10 \cdot 10^{15}$ PW, correspondant à 150 Joules (J) d'énergie dans une impulsion de 15 femtosecondes (fs), focalisée sur quelques micromètres pour atteindre des intensités de 5×10^{22} W/cm² ou plus, avec une cadence d'un tir par minute. Au début des années 2000, de telles performances étaient tout simplement inatteignables au vu de l'état de l'art technologique. Apollon a donc dû jouer un rôle de précurseur, orchestrant les efforts conjoints de laboratoires de recherche et de partenaires industriels clés.

Une décennie de R&D intense a été nécessaire. Cet effort a permis de développer des sources laser innovantes, comme les injecteurs à très haute-fiabilité garantissant un contraste temporel extrême. De nouveaux traitements de surface pour des miroirs à seuil de dommage élevé, capables de transporter ces puissances crêtes, ont été conçus et testés. Enfin, la R&D a permis la production de cristaux de saphir dopé au titane (Ti:Sa) de taille et de qualité optique sans précédent, autorisant une amplification d'un ordre de grandeur supérieur à ce qui se faisait alors. En 2015, l'équipe Apollon a pris possession de son bâtiment, la partie nord du bunker scientifique de l'ancien Accélérateur Linéaire de Saclay (ALS), situé dans le centre du CEA de l'Orme des Merisiers à Saint-Aubin (91190), à côté du synchrotron

SOLEIL. Après des aménagements majeurs, l'installation dispose de plus de 2000 m² : 700 m² pour le système laser, 500 m² pour les deux zones expérimentales, ainsi que des espaces dédiés aux équipes de soutien technique et scientifique.

Le système laser débute par un « Front-End » de pointe, fournissant des impulsions à large bande spectrale (supportant des durées <10 fs) avec un contraste temporel extrême, dépassant 10^{14} au-delà de 50-60 ps (Figure 1a). Ces impulsions sont étirées temporellement dans un étireur Offner à faible aberration, avant d'entrer dans la chaîne d'amplification. Celle-ci comprend cinq amplificateurs Ti:Sa "quatre-passages" qui portent l'énergie de 10 mJ à près de 300 J, tout en élargissant le diamètre du faisceau de 5 mm à 140 mm. Ces amplificateurs sont pompés par des lasers dédiés,

fournissant au total plus de 700 J à 527-532 nm à 1 tir/minute. Le dernier étage d'amplification est une pousse en soi : s'étendant sur 40 mètres, il utilise l'un des plus grands cristaux Ti:Sa jamais produits (196 mm de diamètre, 44 mm d'épaisseur) et requiert à lui seul plus de 600 J d'énergie de pompage (Figure 1b).

Les impulsions amplifiées sont dirigées vers une zone de « séparation ». Là, des miroirs divisent le faisceau pour alimenter simultanément les différentes lignes : la ligne principale F1 (visant 10 PW), la ligne secondaire F2 (1 PW), la ligne F3 (faisceau non comprimé, 250 J) et une ligne sonde F4 (niveau TW). Les faisceaux F1 et F2 sont ensuite dirigés vers leurs compresseurs respectifs, équipés de réseaux de diffraction en or, pour retrouver leur durée minimale (idéalement 15 fs). Le compresseur F1 est une pièce maîtresse : il utilise quatre réseaux de diffraction uniques, d'un mètre de côté, fabriqués par le LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) et installés dans une chambre sous vide poussé (5.10^{-7} mbar) de plus de 50 m³ (Figure 1c). L'intégralité du trajet du faisceau post-compression se fait sous vide jusqu'aux zones expérimentales. En 2019, moins de quatre ans après la livraison du bâtiment, Apollon délivrait son premier faisceau laser, le F2, à une puissance crête de 1 PW. Ce faisceau laser F2 a été mis en service jusqu'à y être focalisé dans LFA avec les caractéristiques suivantes : 15 J, 21 fs, avec un excellent rapport de Strehl de 65%. Cette étape cruciale a permis d'ouvrir l'IR Apollon à la communauté scientifique en 2020. Cette première phase d'exploitation, avec plus de 15 campagnes expérimentales, a permis à l'équipe de fiabiliser l'installation et d'en améliorer la rentabilité scientifique, avec un retour très positif des utilisateurs.

Une étape majeure a été franchie fin 2023 avec la mise en service du dernier amplificateur et les premiers tirs multi-PW sur la zone SFA. Pompé à mi-régime, cet amplificateur a fourni 140 J de manière stable (Figure

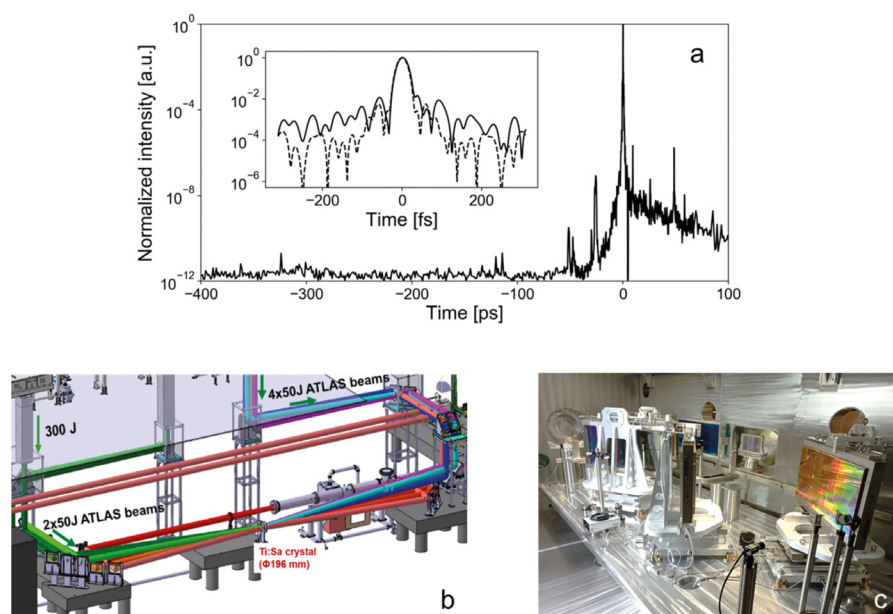


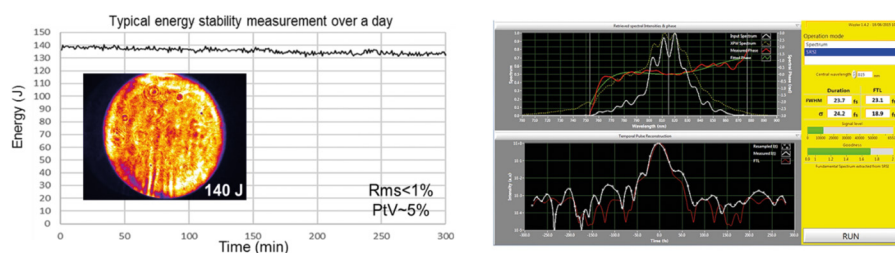
Figure 1. a) Une corrélation croisée de 3^e ordre typique du contraste d'intensité du Front End. Le contraste temporel représente le rapport d'intensité entre l'impulsion principale à $t=0$ et les pré-impulsions ou post-impulsions sur le piédestal de bruit d'intensité avant ou après ce pic. Plus la valeur du contraste est élevée, plus l'interaction de l'impulsion principale avec la cible est propre, sans effets de pré-ionisation indésirables. b) Représentation schématique du dernier étage d'amplification. En rouge est représenté le faisceau amplifié tandis que les autres couleurs montrent les 7 lignes de faisceaux de pompe transportant jusqu'à 600 J. c) Intérieur du compresseur 10 PW à réseaux. Chacun des réseaux en or mesure 910×455 mm².

2 gauche). Après compression, 90 J en 24 fs ont été obtenus (Figure 2 droite), soit une puissance crête de 3,7 PW. Des premières expériences à 2 PW focalisés sur cibles solides [1] ont démontré la capacité de l'installation à opérer à $>10^{22}$ W/cm². À ce jour, 7 campagnes utilisateurs ont été menées avec succès sur cette ligne F1, produisant des résultats scientifiques de premier plan.

Les perspectives

Aujourd'hui, Apollon trouve son équilibre entre son statut d'installation opérationnelle, garantissant un accès continu aux utilisateurs (environ 5 campagnes de 4 semaines par an) et une production scientifique de haut niveau, et la poursuite de l'amélioration de ses performances, le taux de disponibilité de l'installation étant déjà d'environ 90%. Deux ●●●

Figure 2. (gauche) Stabilité en énergie sur 5 heures de fonctionnement continu du dernier étage d'amplification. En encart, profil typique du faisceau amplifié. (droite) Durée d'impulsion à la sortie de la compression F1 à pleine puissance, montrant des impulsions de 23,7 fs pour une durée limite de Fourier (FTL) de 23,1 fs.



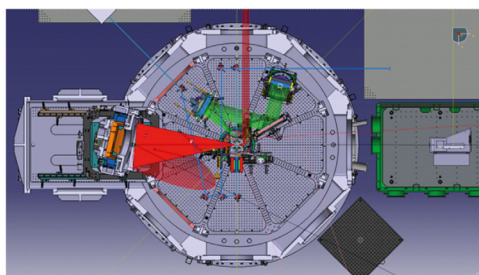
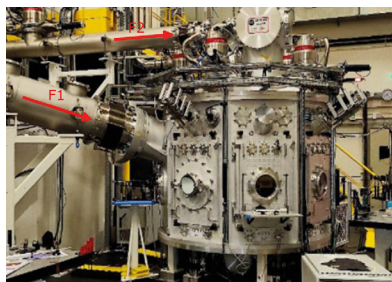


Figure 3. (Gauche) L'enceinte expérimentale de la salle courte focale (SFA). Le faisceau F2 entre par le toit de l'enceinte, tandis que le faisceau F1 arrive par le côté. (Droite) Exemple de conception assistée par ordinateur d'une campagne expérimentale.

mois par an sont dédiés au développement, visant l'objectif de 10 PW et l'amélioration de la stabilité [2] et de la fidélité temporelle des impulsions. Les prochaines étapes clés incluent l'ouverture de la ligne F1 à la zone LFA (octobre 2026), la montée en puissance à 5 PW (2026). Sur les années 2027-2028, l'énergie en sortie d'amplification sera amenée progressivement à 300 Joules, avec l'ajout des lasers de pompe sur le dernier étage et la mise en place de recyclage. Et pour atteindre les 10 PW, la durée d'impulsion sera amenée à 18 fs, puis 15 fs, avec l'ajout de filtres spectraux, le changement de certains miroirs pour avoir une largeur spectrale plus importante, et la mise en place d'un OPCPA-ns. Les expériences en salle courte focale (SFA) sont non seulement sensibles aux fluctuations des paramètres laser, mais aussi au profil temporel de l'impulsion, et plus particulièrement au contraste. La montée en puissance du laser devient un défi pour la bonne conduite des expériences, la présence d'impulsions précédant l'impulsion principale pouvant détruire la cible et ainsi signifier l'échec du tir. Un travail de fond est ainsi à l'œuvre sur l'installation pour continuer sa caractérisation à des niveaux toujours plus fins, mais aussi son amélioration pour satisfaire les contraintes toujours plus grandes liées aux intensités atteintes lors de l'interaction. Les expériences en salle longue focale (LFA) à deux faisceaux seront possibles en 2027. Enfin, le travail sur la stabilisation de l'intensité utile sur cible continuera.

Les applications

Les applications possibles des impulsions ultra-intenses disponibles sur l'IR* Apollon sont des domaines de recherche actifs dans le monde, avec plusieurs installations fournissant une puissance crête au niveau PW, voire plus. Ces domaines de recherches vont de la physique fondamentale (avec la compréhension des phénomènes physiques ayant lieu lors de l'interaction laser PW-matière) à de potentielles applications dans le domaine médical ou le monde industriel. La salle courte focale (SFA) a été conçue avec un objectif précis : atteindre les plus hautes intensités lumineuses possibles sur la cible (celle-ci pouvant être solide ou gazeuse). De plus, la

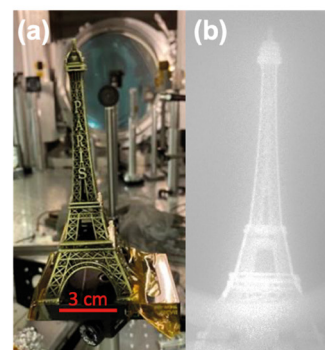
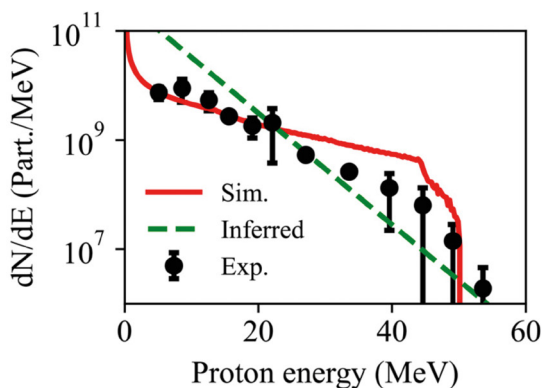
disponibilité de multiples faisceaux dans une même enceinte permet aux utilisateurs potentiels la conception d'une expérience complexe.

Les optiques de focalisation des deux faisceaux sont d'ouverture similaire, pour obtenir des tailles de faisceau de 5 μm de diamètre pour F1 et 6 μm pour F2, les deux foyers étant au centre de l'enceinte. Les deux optiques (des paraboles hors axe), du fait des distances focales réduites (100 et 42 cm pour F1 et F2 respectivement) entraîne leur présence dans l'enceinte d'interaction. L'intensité sur cible proposée par l'utilisation du faisceau F1, supérieure à 10^{22} W/cm^2 , permet de repousser les limites de l'interaction laser-plasma, les simulations prédisant des interactions spécifiques à ces niveaux d'intensité.

Sources de rayonnement ionisant et leurs applications

Du fait de l'interaction laser-matière à ultra-haute intensité (UHI) sur cible solide, une quantité importante de particules (électrons, protons et ions, photons gamma) est émise de la cible solide. Les sujets de recherche dans ce domaine concernent l'optimisation de l'émission, que ce soit en termes de gammes d'énergie, de nombre de particules et leurs

Figure 4. Spectre de protons obtenus lors de l'interaction entre le faisceau F1 au foyer, et une feuille d'aluminium d'épaisseur micrométrique. La coupure à 50 MeV est une conséquence du mécanisme d'accélération des protons. (droite) (a) une photographie de l'objet à photographier. (b) Le résultat de la radiographie par rayons X. La mesure est effectuée sur un tir laser. Le brouillard présent sur le bas de la radiographie est causé par la porte de l'enceinte, l'objet étant sous vide dans l'enceinte et le détecteur à l'air. La partie nette de l'image correspond au hublot de l'enceinte transparent aux X en comparaison de l'aluminium de la paroi. Les figures sont extraites de [1].



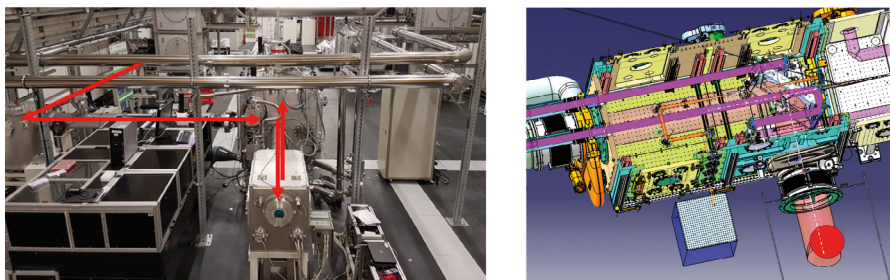


Figure 5. (Gauche) salle longue focale, avec ligne de lumière du faisceau F2. (Droite) Conception assistée par ordinateur de l'enceinte du miroir de repli du faisceau F1. Accolée à cette enceinte se situe l'enceinte expérimentale. Le faisceau F1 de 40cm de diamètre est réfléchi par un miroir troué en son centre, vers le miroir de focalisation vers la gauche de l'image. Le faisceau réfléchi converge en revenant vers le miroir troué, et est de taille suffisamment faible pour passer à travers le trou, en direction de la zone d'interaction.

propriétés spatiales. De plus, le rayonnement émis est une sonde indirecte de l'interaction. Ainsi sa caractérisation permet, couplée à des simulations numériques poussées, de décrire la dynamique de l'interaction laser-plasma.

L'utilisation du faisceau F1 (multi-PW) a permis de démontrer l'accélération de protons à des énergies supérieures à 50 MeV, le tout dans des conditions non-optimales [1]. L'utilisation des rayons X émis lors de l'interaction a permis la radiographie en un tir d'un objet complexe (voir figure 4).

Les sources de rayonnement ionisant conventionnelles, habituellement produites sur des accélérateurs de particules, ont des applications nombreuses dans l'industrie (par exemple pour le contrôle non destructif), la médecine (dans la recherche sur le traitement des tumeurs par exemple) et bien plus encore. La difficulté d'accès à ces sources (et leur coût) rend attractive l'utilisation des lasers pour la génération de ces rayonnements.

Néanmoins, les besoins pour ces applications requièrent un travail de fond sur la source, comme sur sa caractérisation poussée, ainsi que sur sa fiabilité. Il est à noter que certains domaines d'application sont encore « bloqués », car la source produite par le laser ne satisfait pas encore les besoins. Par exemple, la proton-thérapie pour le traitement de tumeurs,

nécessite des énergies de protons de l'ordre de 300 MeV, bien supérieures au record dans le domaine (150 MeV pour l'accélération par laser [3]).

Astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire est la tentative de reproduction à l'échelle du laboratoire de phénomènes se produisant dans le cosmos. Ainsi, l'utilisation d'un faisceau permet pendant un instant bref de recréer les conditions existant par exemple dans le cœur des étoiles.

Les campagnes expérimentales associées à ce domaine de recherche impliquent dans la majeure partie des cas les deux faisceaux, F1 étant utilisé pour préparer la cible dans un état proche d'un plasma astrophysique, tandis que le faisceau F2, en générant une source de rayonnement secondaire (rayons X ou particules) permet de sonder le plasma à un instant donné.

Contrairement à la salle courte focale, les intensités lumineuses atteintes en salle longue focale sont plus modestes (de l'ordre de 10^{19} W/cm²). En revanche, ce niveau d'intensité est maintenu sur des distances plus importantes (plusieurs millimètres voire centimètres).

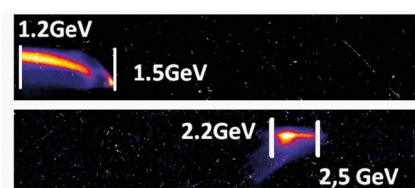
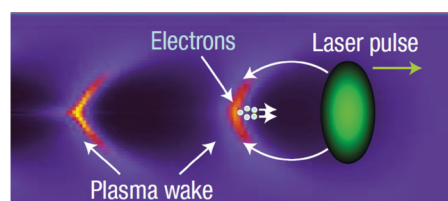
La différence majeure par rapport à la salle courte focale est l'utilisation de miroirs sphériques à longue distance focale, en lieu de paraboles hors axe. Les distances focales sont de plusieurs mètres (de 3 à 9m pour le F2), voire plusieurs dizaines de mètres (la ligne F1 sera dotée premièrement d'une focale de 15m, avec possibilité d'extension jusqu'à 30m). Les deux faisceaux ont chacun leur ligne dédiée. Actuellement seule la ligne F2 (1 PW) est en fonctionnement, la ligne F1 sera quant à elle qualifiée durant le deuxième semestre 2026, pour un accès ouvert aux utilisateurs en 2027.

De par sa conception, la salle longue focale est dominée par la thématique de l'accélération de faisceaux d'électrons, ainsi que des produits de l'interaction.

Accélération laser-plasma

L'accélération laser-plasma (dénommée Laser WakeField Acceleration (LWFA)) consiste en la propagation d'un faisceau laser intense dans un jet de gaz dense, potentiellement sur plusieurs millimètres voire centimètres en fonction des paramètres laser. Lors de l'interaction, les électrons provenant du gaz ionisé ●●●

Figure 6. (gauche) Principe de l'accélération laser-plasma. L'impulsion laser éjecte les électrons sur les côtés, et peuvent entrer dans la bulle chargée positivement dans le sillage de l'impulsion laser. Figure extraite de [4]. (droite) Exemple de spectre d'électrons obtenus lors de campagnes expérimentales avec le faisceau F2. Le spectre du haut est obtenu par LWFA classique, et le spectre du bas montre le cas d'utilisation de techniques avancées de focalisation (principe décrit dans [5])



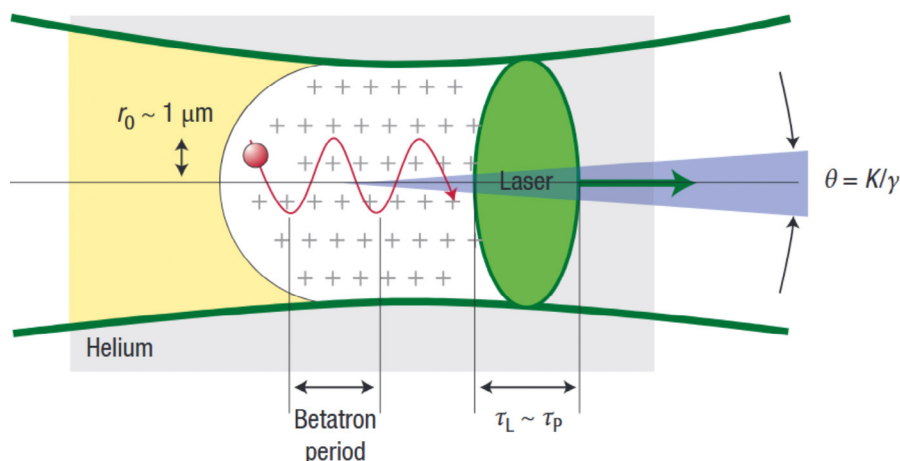


Figure 7. Schéma descriptif de l'origine du rayonnement Bêtatron (figure extraite de [4]).

sont déplacés sur les bords de l'impulsion laser. Une bulle d'ions positivement chargés se forme dans le sillage de l'impulsion, et les électrons injectés dans cette bulle sont accélérés [4].

Des faisceaux d'électrons de plusieurs centaines de mégaélectronvolts (MeV) à plusieurs gigaélectronvolts (GeV) peuvent être générés, avec des propriétés (durée, divergence spectre) désirables pour des applications diverses et variées. Les sujets de recherche liés à la LWFA ont pour but l'optimisation de ces paramètres.

Emission de photons par Rayonnement Bêtatron et Compton

Lors de la LWFA, les électrons en pleine accélération dans le sillage du faisceau laser ont une trajectoire oscillante, due à la force de rappel de la bulle sur l'électron vers le centre de la bulle [4]. Cette oscillation se traduit par l'émission de rayonnement dans l'axe du faisceau d'électrons, dont l'énergie de photon peut atteindre le MeV, un spectre large, avec un nombre de photons pouvant être important. L'utilisation d'une deuxième impulsion laser contre-propagatrice du faisceau d'électrons autorise la génération de photons gamma énergétiques, par le processus de diffusion Compton inverse. En utilisant le faisceau F2, et un système de rétro-réflexion de l'impulsion laser responsable de la LWFA, il a

été montré sur Apollon la génération de photons gamma dont l'énergie dépasse la centaine de MeV.

SF-QED

L'une des thématiques de recherche les plus actives dans la communauté est de sonder les limites des théories actuelles sur les propriétés quantiques de la lumière. Il est théorisé que pour des intensités lumineuses supérieures à 10^{28} W/cm² (la limite de Schwinger), le vide devient un milieu non-linéaire, ouvrant la voie à des phénomènes nouveaux. De telles intensités sont néanmoins hors de portée des installations laser actuelles et futures.

La parade à ce problème est l'utilisation d'un faisceau d'électrons énergétique entrant en collision avec une impulsion laser multi-PW, fortement focalisée (à quelques microns). Lors

de la collision, l'interaction électron-champ laser est telle que les effets non-perturbatifs de l'interaction quantique sont observables. Plusieurs expériences de ce type ont eu lieu sur des accélérateurs fournissant le faisceau d'électrons, auquel est adjoint un système laser plus modeste (de l'ordre de 100 TW, 1TW = 10^{12} W). Apollon, avec ses deux faisceaux PW, est capable de reproduire un tel schéma uniquement par laser.

Ici, le schéma d'interaction est le suivant : dans un premier temps, l'utilisation du faisceau F2 (1PW) permet la génération d'un faisceau d'électrons énergétiques par LWFA. L'utilisation de techniques avancées comme le guidage par ionisation et le contrôle de l'injection d'électrons lors de la phase d'accélération permet d'obtenir des énergies de plusieurs GeV. Le faisceau F1 (multi-PW) est lui fortement focalisé au deuxième point d'interaction séparé de la génération d'électrons. En réglant finement le délai entre les deux faisceaux laser, il est ainsi possible de faire entrer en collision les électrons avec le laser multi-PW, atteignant dans le repère local du faisceau d'électrons des intensités susceptibles de dévoiler les interactions non-perturbatives prédites par les différentes théories. ●

Pour plus d'informations :

Site web de l'IR Apollon :

<https://apollonlaserfacility.cnrs.fr/>

Vidéo CNRS de présentation de l'IR Apollon :

<https://youtu.be/M-UkowEvgOY>

RÉFÉRENCES

- [1] W. Yao, R. Lelièvre, I. Cohen *et al.*, *Phys. Plasmas* **32**, 043106 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0252874>
- [2] JB. Ohland, N. Lebas, V. Deo *et al.*, *High Power Laser Science and Engineering.*, **13**:e29 (2025) <https://doi.org/10.1017/hpl.2025.16>
- [3] T. Ziegler *et al.*, *Nature Physics* **20**, 1211 (2024)
- [4] V. Malka *et al.*, *Nature Physics* **4**, 447 (2008)
- [5] R. Lahaye, K. Oubrier, O. Kononenko, J. Gautier, I. A. Andriyash et C. Thaur, *Phys. Rev. Accel. Beams* **28**, 091301 (2025)