
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

ACCELERATION D'ELECTRONS AVEC APOLLON

Auteur principal

Nom : Brigitte Cros

Affiliation : CNRS LPGP Université Paris Sud Université Paris Saclay, UMR8578

Email et coordonnées : brigitte.cros@u-psud.fr

Co-auteurs

S. Dobosz Dufrénoy, P. Monot, LIDYL

Nicolas Delerue, LAL

Olivier Leroy, Gilles Maynard, LPGP

François Matthieu, LULI

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019**

1. Informations générales

Titre : Accélération d'électrons avec APOLLON

Acronyme : AccElApollon

Résumé (*max. 600 caractères espaces compris*)

L'exploration de concepts d'accélération d'électrons avec les faisceaux PW et multi-PW d'Apollon permettra d'atteindre des gammes de paramètres inaccessibles à la plupart des autres installations laser existantes au niveau international. En particulier le développement d'un injecteur constitué d'une source d'électrons transportée et focalisée à l'entrée d'un deuxième étage plasma permettra de tester les différents concepts nécessaires à l'accélération laser plasma multi-étages pour des faisceaux jusqu'à quelques GeV.

Préciser le domaine de recherche (*plusieurs choix possibles*)

X Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)

X Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées

○ *Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)*

X Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux

○ *Technologies RF innovantes (structures haut gradients, alimentations RF...)*

X Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent

○ *Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...)*

○ *Autre R&D spécifique : (préciser)*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

○ *Accélérateurs pour la physique nucléaire*

○ *Accélérateurs pour la physique des particules*

○ *Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons*

○ *Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

○ *Autre : (préciser)*

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

Après plusieurs années de conception puis de mise en place dans le cadre de l'EquipEx CILEX [cros2014], la salle longue focale de l'installation APOLLON va permettre de réaliser des sources d'électrons de forte charge (10pC/MeV/mrad), dans une gamme d'énergie ajustable entre la centaine de MeV et quelques GeV. Ces sources pourront être utilisées pour un certain nombre d'applications comme la génération de particules secondaires, de rayonnement ou leur utilisation directe sur échantillon. La possibilité d'utiliser les deux faisceaux PW et multi-PW synchronisés permettra en particulier l'étude des schémas d'accélération laser plasma multi-étages jusqu'à des énergies de l'ordre de la dizaine de GeV.

Objectifs scientifiques :

Démontrer la faisabilité de réalisation de sources d'électrons de forte charge et piquées spectralement ; étudier et démontrer leur transport et leur focalisation pour injection dans un étage d'accélération plasma permettant d'obtenir un faisceau d'électrons de plusieurs GeV et caractériser la qualité du faisceau.

Ces objectifs pourront être atteints grâce à l'exploration de **nouveaux concepts** pour :

- Tester les différents mécanismes d'injection d'électrons du plasma en régime non linéaire pour mettre au point une source d'électrons de forte charge (10pC/MeV ou plus), d'énergie pouvant être ajustée à la demande dans la gamme 150MeV à 1GeV)
- Concevoir et tester une ligne de transport et de focalisation de cette source
- Concevoir et tester des milieux plasmas longs permettant la réalisation d'un étage plasma accélérateur pour l'injection externe
- Concevoir et tester les diagnostics faisceaux nécessaires à la caractérisation spatiale à l'échelle du micron et temporelle à l'échelle de 10fs, à la synchronisation des faisceaux laser et électrons à l'entrée du 2^e étage plasma.

Ces objectifs scientifiques nécessitent des **développements techniques** à la frontière de l'existant en matière de qualité et stabilité des faisceaux laser, transport de faisceaux d'électrons, synchronisation et guidage laser de haute intensité.

Des expériences préliminaires sur des installations existantes aux USA et en Europe ont permis d'illustrer un certain nombre de points durs comme le couplage du faisceau d'électrons entre deux étages [steinke2016], ou la nécessité de développer des méthodes de guidage sophistiquées pour obtenir des énergies de faisceau d'électrons élevées [gonsalves2019] ; l'augmentation de la charge des faisceaux liée à la qualité du laser et une énergie de plusieurs joules a également été montrée [couperus2017]. Le travail proposé s'inscrit au niveau international dans le cadre du projet Eupraxia [eupraxia2019] dont il

permettra de tester des schémas étudiés lors de la phase de conception. L'échelle de l'installation Apollon et sa capacité à accueillir des utilisateurs serviront de modèle/base de test pour affiner la proposition d'Eupraxia. Une démonstration d'accélération laser plasma multi-étages à cette échelle et dans le cadre d'une installation utilisateurs comme Apollon permettra d'impliquer de nombreux acteurs nationaux et internationaux.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

NB : Les partenaires envisagés pour la réalisation sont ceux du projet CILEX impliqués sur l'accélération d'électrons (DACM, LAL, LIDYL, LLR, LOA, LPGP, LULI, SOLEIL). Les coûts sont indiqués lorsque les partenaires les ont communiqués.

Les coûts indiqués incluent uniquement les développements spécifiques à une expérience et ne prennent pas en compte le fonctionnement de l'installation Apollon. Les durées de réalisation sont conditionnées par l'obtention de créneaux expérimentaux sur l'installation.

Résultats attendus/Travaux envisagés/ échéance/financement nécessaire

Attendus : **Démonstration de sources d'électrons laser plasma 150-300MeV**

Travaux : Exploration de concepts (simulations) ; expériences avec le faisceau laser 1PW d'Apollon focalisé sur différentes cibles (cellules) pour explorer différents schémas ; utilisation du faisceau pour des applications.

Premières expériences en attente de démarrage installation, période estimée pour le développement de la source 3 ans, 2020-2022

Coût complet LIDYL-LPGP : **515 keuros**, (dont personnel permanent 213keuros, personnel non permanent 232keuros, équipement et consommables 70keuros)

Attendus : **Démonstration de sources d'électron laser plasma jusqu'à quelques GeV**

Travaux : Exploration de concepts (simulations) ; expériences avec le faisceau laser 1PW d'Apollon focalisé sur différentes cibles (jets de gaz) pour explorer différents schémas ; utilisation du faisceaux pour des applications.

Premières expériences en attente de démarrage installation, période : 2020-2025

Coût complet LIDYL: **180 keuros**, (dont personnel permanent 130keuros, équipement et consommables 50keuros)

Attendus : **Stabilisation des paramètres du faisceau laser et des paramètres électrons**

Travaux : évaluation de la faisabilité des systèmes de stabilisation passive et active sur les propriétés du faisceau d'électrons, mise en place des systèmes sur l'installation laser et expériences de caractérisation du faisceau d'électrons.

Stabilisation faisceau 2020- 2022, test électrons dès que stabilisation démontrée

Coût complet LULI : **330 keuros** (dont personnel permanent 120keuros, équipement et consommables 120keuros)

Attendus : **Conception et construction de la ligne de transport et focalisation**

Attendus : **Milieux plasmas long pour le guidage laser et l'accélération d'électrons externes**

Travaux : simulation et mise au point expérimentale de milieux plasmas, tests de concepts par ionisation laser et de nouveaux types de décharges pour créer un canal de plasma long (10cm à 50cm), démonstration de guidage laser intense sur des distances pertinentes pour un étage accélérateur plasma à haute énergie (5 à 10 GeV).

2020-2022 : développement, construction et test du plasma, implantation sur Apollon à partir de 2022 ou quand le deuxième faisceau sera disponible.

Coût complet LPGP : **949** keuros (dont personnel permanent 429keuros, personnel non permanent 320 keuros, équipement et consommables 200 keuros)

Attendus : **diagnostics monocoups de caractérisation et de synchronisation des faisceaux d'électrons avec les résolutions souhaitées**

Travaux : développement, construction et test des diagnostics pour la mesure de longueur du paquet par système CTR (Coherent Transition Radiation), synchronisation en utilisant un système Smith-Purcell, mesure de la taille, position et charge du faisceau en deux positions sur la ligne et à l'entrée du deuxième étage.

Période 2020-2023

Coût complet LAL : **727** keuros (dont personnel permanent 407keuros, équipement et consommables 320 keuros)

Attendus : **démonstration d'applications en collaboration avec partenaires français ou européens.**

Utilisation de la source d'électrons dans une des gammes d'énergie testées entre 150MeV et quelques GeV ; Possible dès que la source est testée, optimisée

Attendus : **Accélération multi-GeV d'électrons externes dans l'étage plasma long**

Travaux : Expérience d'injection externe après la démonstration des étapes précédentes et la mise en place d'une ligne de synchronisation des deux faisceaux PW d'Apollon.

Démarrage au plus tôt à partir de 2023

4. Impact

La démonstration de l'accélération multi-étages avec deux faisceaux laser est une étape clé du développement des accélérateurs laser plasma [cros2017], et constitue la base du projet EuPRAXIA. La réalisation d'une démonstration d'un étage accélérateur multiGeV sur Apollon permettra d'explorer l'accélération laser plasma dans un domaine de paramètres qui n'a pas été réalisé à ce jour. L'énergie disponible dans les faisceaux laser

d'Apollon permet aussi d'augmenter la charge des faisceaux produits et d'ouvrir la voie aux démonstrations d'applications qui peuvent en bénéficier (biologie, génération de particules ou de rayonnement secondaire).

Le fonctionnement de l'installation Apollon comme installation laser ouverte aux utilisateurs ne permettra pas d'optimiser le fonctionnement d'un accélérateur. Cependant c'est une installation très attractive pour des collaborateurs extérieurs, qui permettra d'attirer des compétences supplémentaires à celles de la communauté française.

Références

[couperus2017] J.P. Couperus, J. P., R. Pausch, A. Köhler, O. Zarini, J. M. Krämer, M. Garten, A. Huebl, R. Gebhardt, U. Helbig, S. Bock, K. Zeil, A. Debus, M. Bussmann, U. Schramm and A. Irman (2017). " *Demonstration of a beam loaded nanocoulomb class laser wakefield accelerator.*" Nature Communications 8, 487.

[cros2014] B. Cros, B.S. Paradkar, X. Davoine, A. Chanc_e, F.G. Desforges, S. Dobosz-Dufrénoy, N. Delerue, J. Ju, T.L. Audet, G. Maynard, L. Gremillet, P. Mora, J. Schwindling, O. Delferri_ere, C. Bruni, C. Rimbault, T. Vinatier, A. Di Piazza, M. Grech, C. Riconda, J.R. Marquès, A. Beck, A. Specka, Ph. Martin, P. Monot, D. Normand, F.Mathieu, P. Audebert, F. Amirano_, Laser plasma acceleration of electrons with multi-PW laser beams in the frame of CILEX, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 740, 27 (2014).

[cros2017] B. Cros and P. Muggli, Towards a Proposal for an Advanced Linear Collider, Report on the Advanced and Novel Accelerators for High Energy Physics Roadmap Workshop (CERN, Geneva, 2017), ISBN 978-92-9083-468-7 (paperback), ISBN 978-92-9083-469-4 (PDF).

[eupraxia2019] Link to the CDR

<http://www.eupraxia-project.eu/eupraxia-conceptual-design-report.html>

[gonsalves2019] A. J. Gonsalves, K. Nakamura, J. Daniels, C. Benedetti, C. Pieronek, T. C. H. de Raadt, S. Steinke, J. H. Bin, S. S. Bulanov, J. van Tilborg, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, C. Tóth, E. Esarey, K. Swanson, L. Fan-Chiang, G. Bagdasarov, N. Bobrova, V. Gasilov, G. Korn, P. Sasorov and W. P. Leemans (2019). " *Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide.*" Physical Review Letters 122, 084801.

[steinke2016] S. Steinke, J. van Tilborg, C. Benedetti, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, J. Daniels, K. Swanson, A. J. Gonsalves, K. Nakamura, N. H. Matlis, B. H. Shaw, E. Esarey & W. P. Leemans (2016) " *Multistage coupling of independent laser-plasma accelerators*", Nature volume 530, p. 190–193.