

---

# Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

## *Accélérateurs et instrumentation associée*

---

### **MOCAA (MEGAWATT OPTICAL CAVITY FOR ACCELERATOR APPLICATIONS)**

---

#### **Auteur principal**

Nom : Nutarelli Daniele

Affiliation : LAL Université Paris-sud

Email et coordonnées : [nutarelli@lal.in2p3.fr](mailto:nutarelli@lal.in2p3.fr), Bat 208 centre universitaire d'Orsay

#### **Co-auteurs**

J. Bonis, K. Cassou, R. Chiche, D. Douillet, K. Dupraz, G. Iaquaniello, C. Magueur, A. Martens,  
H. Monard, C. Pascaud, Y. Peinaud, V. Soskov, F. Zomer

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à [PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR](mailto:PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR)  
avant le **1<sup>er</sup> novembre 2019**

## 1. Informations générales

**Titre : MegaWatt Optical Cavity for accelerator applications**

**Acronyme : MOCAA**

### Résumé

Le groupe ILE du LAL a développé depuis une quinzaine d'années une R&D au long cours sur la réalisation de résonateurs optiques de hautes finesses dédiés au stockage de fortes énergies laser dans l'environnement d'accélérateurs. Cette R&D, qui a permis la construction du système optique de ThomX [1] ainsi que d'autres projets par le passé [2], nous permet aujourd'hui de contribuer à la conception de projets innovants [3.a-d] et de participer à d'ambitieux projets [3.e-f]. MOCAA est donc un projet de R&D visant à dépasser 'le MégaWatt' dans un résonateur optique et à développer de 'longues' et 'mini' cavités de hautes finesses.

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

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

**Préciser la motivation principale visée par la contribution :**

- Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons

## 2 Description des objectifs scientifiques et techniques

Les projets [3] font appel à des cavités optiques qui doivent fonctionner dans des régimes extrêmes que personne n'a encore réussi à atteindre et qui nécessite donc que l'on prolonge notre effort de R&D sur les cavités optiques. Une puissance record intra cavité de 600kW a été obtenue en laboratoire [4] mais durant un bref instant (nous avons atteint 400kW au LAL [5]). Le contrôle des instabilités thermoélastiques induites par une telle puissance moyenne nous a permis d'obtenir une puissance moyenne stable de 200kW [6] (il semble que la machine Lyncean ait atteint 300kW). Le but de notre R&D est de dépasser le seuil 'du MégaWatt stable' dans l'environnement bruyant d'un accélérateur. Notons que le 'gain' de puissance intra cavité est donné par l'expression  $G \sim F/\pi$ , où  $F$  est la finesse de la cavité qui dépend de la qualité des miroirs. La précision avec laquelle il faut contrôler la fréquence  $\nu_L$  de notre oscillateur laser et  $\Delta(\nu_L)/\nu_L = \lambda/(LF)$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde du faisceau laser et  $L$  la longueur du chemin optique dans la cavité. Pour nos applications, nous avons  $\Delta(\nu_L)/\nu_L \sim 10^{-13}$ . Notre R&D consiste donc à appliquer les techniques de la métrologie temps/fréquences à l'environnement d'un accélérateur et pour des résonateurs optiques soumis à une puissance moyenne extrême.

En marge de nos développements scientifiques, nous collaborons avec l'entreprise Amplitude avec laquelle nous avons le projet de création d'un LabCom. Nous développons une 'mini-cavité' de quelques centimètres d'encombrement optimisée pour fonctionner en mode 'burst' (nous avons démontré qu'il existait un point de fonctionnement optimum dans ce mode [7]). Ce type de cavité optique trouve son intérêt pour des sources Compton de rayons X/gamma basées sur un LINAC. C'est dans ce cadre que nous avons répondu dernièrement à un appel d'offre de la DARPA avec UCLA, Stanford Univ. et l'entreprise Radiabeam [3.e]. Toujours dans ce même cadre nous démarrons une étude avec l'INFN (Frascati, Roma Sapienza) pour installer 2 lignes de lumières en Tchéquie [3.f].

Les projets [3.a-d], ainsi que le développement des mini-cavités en mode burst, devraient donc raisonnablement démarrer sur les bases de notre savoir-faire actuel et pouvoir bénéficier d'améliorations éventuelles survenant parallèlement à leur mise en œuvre. Nous proposons donc de maintenir un montage de R&D dédié à l'amélioration des performances des cavités optiques. Notre expérience des difficultés rencontrées dans le passé nous a permis d'identifier deux axes de R&D :

- a. Un aspect ingénierie qui concerne un contrôle strict de la propreté et de la pollution chimique des miroirs de cavité. Cela implique de définir des processus de qualité dans le stockage et la manipulation des miroirs mais aussi un outillage et une conception mécanique adaptés aux contraintes imposées par ce problème.
- b. Lorsque de fortes puissances moyennes sont stockées dans les cavités optiques plusieurs phénomènes apparaissent et viennent altérer ou détruire les performances du stockage d'énergie. Qualitativement, par ordre croissant d'énergie stockée :
  - i. Aberrations optiques du mode de la cavité induite par les déformations thermoélastiques des miroirs
  - ii. Instabilités modales liées aux déformations thermoélastiques des miroirs. Dommages induits par une trop forte intensité laser par unité de surface en régime impulsionnel, problèmes auxquels nous avons déjà été confrontés pour le recirculateur optique d'ELINP [2].
  - iii. Instabilités paramétriques (couplage non linéaire entre le mode optique de la cavité et les modes propres acoustiques des miroirs excités par la pression de radiation) qui ont été 'vus' par LIGO [8].
  - iv. Apparition d'une contamination de surface dominée par des chaînes carbonées, il faut concevoir et tester des procédés de 'nettoyage' in situ.

Pour éliminer ces problèmes il faut poursuivre notre travail de longue haleine sur la modélisation, l'analyse des surfaces optiques et de leur composition (systématiser des diagnostics de surface et tester de nouveaux revêtements diélectriques de miroirs), la mise en place de tests et de méthodes de corrections des instabilités. Il faut aussi faire évoluer nos expertises en optique instrumentale (caractérisation de la qualité des miroirs), électronique et opto-mécanique.

D'autres groupes sont confrontés à ces problèmes (LIGO/VIRGO, ALPS à DESY, Tsinghua, KEK) avec lesquels il faudra continuer d'échanger. Jusqu'à présent nous nous sommes concentrés sur les cavités en régime impulsionnel mais le besoin se fait maintenant sentir [3.d] d'utiliser

aussi des faisceaux continus. Certains projets [3.b.d] nécessitent aussi de contrôler ‘ultra précisément’ (plus que pour nos précédentes réalisations [2]) la position de l’axe optique et la longueur de longues cavités optiques.

### 3 Développements associés, calendrier et budget indicatifs

Il s’agit d’un travail de R&D au long cours où toutes personnes (cf. liste auteur et co-auteurs) contribuant à ce projet vont intervenir ponctuellement. Depuis 2011, nous encadrons aussi continûment deux thésitifs sur nos travaux de R&D, dont un en cotutelle avec Tsinghua University avec qui nous partageons un FCPPL. Nous comptons continuer cette activité d’encadrement.

Nous disposons de plusieurs salles optiques et d’un ensemble conséquent d’instruments de mesure, flux laminaire, lasers et matériel optique. Nos besoins en équipements et consommables sont ponctuels et pourront être, pour part, pris en charge par ThomX.

Les tâches suivantes sont envisagées :

- **Modélisation** réaliste des déformations thermoélastiques de notre cavité optique, calculs des modes propres associés. Simulation des instabilités paramétriques pour une cavité optique monolithique en mode continu et impulsionnel.
- **Etudes expérimentales MW** : définir et tester une méthode pour éliminer les instabilités à haute puissance moyenne ; tests de revêtements de miroirs pour les hautes fluences. Monter en puissance pour atteindre le MW intra cavité.
- **Démonstration stockage mode burst** : Essais d’amplificateur laser en mode burst dans le cadre du LabCom avec Amplitude et asservissement d’une cavité GHz en mode burst. Modélisation global pour optimiser le système global LINAC+cavité.
- **Etude des effets thermiques** sur de très longues durées (semaines) et des systèmes d’asservissements correspondants.
- **Contrôle avancé** avec étude d’ingénierie pour simplifier le contrôle/commande de la cavité optique.
- **Caractérisation et mesure systématique** des états de surface des miroirs et mise en place de procédés de décontamination des surfaces ex-situ et in-situ (sous vide).
- **Conception opto-mécanique** et **micromécanique** (mini cavité) pour simplifier et pour réduire la contamination de poussières et chaînes carbonées des surfaces de miroirs.

Echéance : Il s’agit d’une activité de R&D où, par expérience, les problèmes rencontrés peuvent prendre beaucoup de temps pour être résolus. Ce travail de R&D s’échelonne en parallèle avec nos projets [3] et s’étalera sur les dix prochaines années. Hors investissements d’équipements lourds tels qu’un laser ou un ampli laser, nous avons besoin d’environ 10k€/an pour effectuer des missions techniques (multiples collaborations et salons). Nous avons aussi un besoin récurrent d’environ 10k€/an pour des consommables et petits équipements. Il

restera à trouver des sources de financements au long cours pour les plus gros équipements (miroirs de cavité, environ 40k€, oscillateur laser continu de référence, environ 30k€, modulateurs électro et acousto optiques, environ 5k€, etc...).

Pour les cavités en mode burst nous avons gagné un appel d'offre auprès du DARPA (USA). Nous avons effectué une demande financière pour un développement hardware qui va faire l'objet d'une négociation avec le DARPA [3.e]. Nous pourrions aussi bénéficier d'un financement dans le cadre de l'installation des lignes de lumière en Tchéquie sur ELI BEAMLINES [3.f].

## 4 Impact

La R&D sur les résonateurs optiques que l'on a démarrée au LAL dans le contexte des sources de positrons polarisés pour l'ILC, nous a permis d'acquérir des compétences et un savoir-faire qui nous permettent aujourd'hui de participer à des recherches sur de nouvelles techniques d'accélération et sur des nouvelles sources de rayonnement synchrotrons et rayons gamma. Des cavités optiques soumises à des puissances moyennes extrêmes sont en effet l'un des éléments clef de ces nouvelles recherches et leurs réalisations nécessitent une activité de R&D dédiée. En plus de ces développements à fort potentiel technique et scientifique nous travaillons aussi à la construction d'un Laboratoire Commun avec l'entreprise Amplitude autour de la conception de sources de rayons X Compton basées sur des LINACS et des cavités optiques fonctionnant en 'mode burst'. Nous avons deux projets de développement de ce type de cavité, l'un est presque financé et devrait démarrer en février 2020 en collaboration avec UCLA et Stanford Univ. [3.e], l'autre est en cours de discussion avec l'INFN [3.f].

## Références

[1] C. Bruni et al., *ThomX : un démonstrateur de source compacte de rayons X*, **images de la Physique** **50 (2016) 14**

[2] S. Baudrand et al., A high precision Fabry-Perot cavity polarimeter at HERA, *J. Inst.* **5 (2010) P06005**. V. Brisson et al., *Per mill level control of the level of the circular polarization of the laser beam for a Fabry-Perot cavity polarimeter at HERA*, **J. Inst.** **5 (2010) P06006**. J. Bonis et al., *Non-planar four-mirror optical cavity for high intensity gamma ray flux production by pulsed laser beam Compton scattering off GeV-electrons*, **J. Inst** **7 (2012) P01017**. T. Akagi et al., *Production of gamma rays by pulsed laser beam Compton scattering off GeV-electrons using a non-planar four-mirror optical cavity*, **J. Inst** **7 (2012) P1021**. R. Chiche et al., *External cavity enhancement of picosecond pulses with 28,000 cavity finesse*, **Appl. Opt** **52 (2013) 8377**. C. Fall Ndiaye et al., *Low power commissioning of an innovative laser beam circulator for inverse Compton scattering Gamma-ray source*, **PHYS. REV. ACCEL. BEAMS** **22, 093501 (2019)**.

[3] Cf. *Contributions aux exercices de prospective nationale 2020-2030* : **a.** H. Monard, projet **ACCS** ; **b.** K. Dupraz, projet **SOBA** ; **c.** A. Martens projet **GammaFactory** ; **d.** K. Cassou projet **PALSAS** ; **e.** Projet **STINGRAY** (appel d'offre DARPA aux USA, projet accepté en phase de négociation budgétaire) ; **f.** **ELI-XS@ BEAMLINES-Tchéquie** Projet d'installation de deux lignes de lumières en Tchéquie à partir de matériel originellement prévu pour ELI-NP-Roumanie.

- [4] H. Carstens et al., *Megawatt-scale average-power ultrashort pulses in an enhancement cavity*, **Opt. Lett.** **39**, 2595 (2014).
- [5] P. Favier, *Etude et conception d'une cavité Fabry-Perot de haute finesse pour la source compacte de rayons X ThomX*, **Thèse Université Paris-sud**, nov. 2017.
- [6] L. Amoudry, *Modal instabilities suppression in high average power and high finesse Fabry-Perot Cavity*, **to appear in Appl. Opt**
- [7] 39. P. Favier et al., Optimization of a Fabry-Perot cavity operated in burst mode for Compton scattering experiments, **PHYS. REV. ACCEL. BEAMS** **21** (2018)121601
- [8] X. Chen et al., Observation of three-mode parametric instability, *Phys. Rev.* **A91**, 033832 (2015)