
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

SOURCE D'IONS ACCELERES BASEE SUR L'INTERACTION LASER PLASMA

Auteur principal :

Nom : F Hannachi

Affiliation : CENBG

Email et coordonnées :hannachi@cenbg.in2p3.fr

Co-auteurs :

J Domange IR CENBG

L Lancia CR LULI

J R Marquès CR LULI

J J Santos MCF CELIA-Univ Bx

M Tarisien MCF CENBG-Univ.Bx

V. Tikhonchuk Pr CELIA-Univ Bx

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 : Développement d'une source d'ions accélérés basée sur l'interaction laser plasma

Acronyme : *(optionnel)*

Résumé *(max. 600 caractères espaces compris)*

Les champs électriques plasma atteignent des centaines de GV/m, réduisant la longueur d'accélération des particules à quelques dizaines de microns. Les systèmes lasers téra-pétawatts de haute cadence capables de générer de tels champs sont aujourd'hui assez compacts et relativement peu coûteux. Un même dispositif d'accélération laser-plasma peut permettre de produire des sources de photons, de neutrons, d'ions de différentes espèces, dans des gammes d'énergie variées. Nous proposons de renforcer les programmes en cours à l'IN2P3 et à L'INP afin de construire en France un prototype d'accélérateur d'ions plasma.

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

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées*
- *Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- *Accélérateurs pour la physique nucléaire*

- Accélérateurs pour les sources de neutrons
- Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

(2 pages max incl. figures)

Décrire les objectifs scientifiques et/ou techniques de la contribution proposée en précisant les motivations.

Préciser comment ces objectifs se situent par rapport à l'état de l'art et au contexte international (ex : est-ce une contribution visant un développement théorique ou expérimental ? Est-elle dans la continuité de concepts ou technologies actuelles, ou bien est-ce une nouvelle approche conceptuelle ?)

Préciser les liens éventuels avec d'autres projets nationaux ou internationaux existants ou envisagés.

L'interaction d'un laser de très haute intensité avec une cible gazeuse ou solide produit des faisceaux énergétiques d'ions et d'électrons et permet d'obtenir des sources secondaires compactes de rayons X et de neutrons. Suivant l'application désirée, les caractéristiques des faisceaux d'ions accélérés par laser (énergie maximale, dispersion en énergie, divergence et intensité du faisceau) doivent pouvoir être contrôlées. Ces caractéristiques sont directement déterminées par les mécanismes à l'origine de l'accélération des ions lors de l'interaction du laser avec la cible.

Mécanismes de l'accélération d'ions par laser

L'accélération des ions par laser est communément réalisée par l'irradiation d'une cible mince avec un laser ultra-court, fortement focalisé, à des intensités dépassant 10^{19} W/cm². Le principal mécanisme d'accélération d'ions connu est le Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) dans lequel les ions présents à la surface de cibles solides sont mis en mouvement par les champs électriques (TV/m) induits par les déplacements dans et hors de la cible des électrons accélérés dans le plasma. L'intensité de ces champs décroît au fur et à mesure de l'accélération des protons (ions) hors de la cible ce qui donne à ces derniers une distribution en énergie continue (exponentielle décroissante) jusqu'à une énergie maximale. Les protons (ions) sont émis dans des cônes de 30 à 45 degrés d'ouverture angulaire, leur énergie maximale ne dépasse pas la centaine de MeV avec des lasers de classe pétawatt et le nombre total de protons accélérés sur toute la gamme en énergie du spectre est au maximum de l'ordre de 10^{12-13} par tir. L'énergie maximale des protons accélérés par TNSA dépend non seulement de l'énergie contenue dans le pulse laser mais aussi de la durée de celui-ci et de l'épaisseur des cibles utilisées (de quelques nm à quelques dizaines de μ m). Elle atteint presque la centaine de MeV pour les protons et quelques dizaines de MeV pour les ions légers. D'autres mécanismes d'accélération par pression de radiation (Radiation Pressure Acceleration, RPA), par choc électrostatique (Collisionless Shock Acceleration, CSA) sont prédits. Tous ces mécanismes peuvent être couplés au cours d'une même interaction.

Parmi les résultats les plus récents, on peut citer :

- Des énergies de deutérons proches de 100 MeV par nucléon ont été obtenues sur l'installation laser TRIDENT du Los Alamos National Laboratory en utilisant la combinaison de deux schémas d'accélération dans une cible solide, puis dans un plasma peu dense. Ce laser a une énergie de 120 J délivrée pendant 500 fs, soit une puissance de 250 TW et une intensité sur cible de l'ordre de 10^{20} W/cm². Le contraste en intensité du laser est de 10^{-10} [M. Roth et al. Phys. Rev. Lett. 110, 044802, 2013].
- Des énergies de protons maximales proches de 85 MeV ont été obtenues au GSI, à Darmstadt sur le laser PHELIX (10^{20} W/cm², 500 fs) avec des cibles de quelques microns d'épaisseurs en régime TNSA. 10^9 ions par MeV ont été mesurés à ces énergies [F. Wagner et al. Phys. Rev. Lett. 116 205002 (2016)].
- Des faisceaux de protons avec une énergie maximale autour de 93 MeV ont été observées sur le laser 2 PW du GIST en Corée du Sud en irradiant un laser 800-nm 30-fs en polarisation circulaire avec une intensité de 6.1×10^{20} W/cm² sur des cibles de plastique de 15 nm d'épaisseur en régime RPA [Kim et al. Physics of Plasmas **23**, 070701 (2016)].
- Des expériences très récentes réalisées sur le laser VULCAN au Royaume-Uni ont démontré l'obtention d'une énergie des protons maximale proche de 100 MeV avec des cibles ultra-fines. Les paramètres du laser étaient 2.6×10^{20} W/cm², 500 fs [A. Higginson et al. Nat. Com. 9 724 (2018)].

Feuille de route

Le principal mécanisme d'accélération d'ions connu à partir de cibles solides (CH, Al ... de quelques μm) est le TNSA mais il existe d'autres processus d'accélération d'ions avec des cibles de faibles dimensions plus complexes à mettre en oeuvre et à renouveler à chaque tir laser. Le protocole requis, s'il est couramment réalisé sur les lasers monocoups (cadence < 1 tir/ 30 min), n'est pas adapté aux tirs lasers à haute cadence. C'est ainsi que la mise sur le marché de lasers à haut taux de répétition a entraîné les premières recherches sur l'accélération d'ions à partir de jets de gaz denses ou de cibles liquides. Plusieurs modes d'accélération volumiques dans des cibles de jets de gaz de très haute pression sont prédits. Dans ces modes le laser peut pénétrer profondément dans le volume cible et induire des déplacements d'électrons. Ces derniers sont capables d'accélérer de grandes quantités d'ions à des vitesses plus élevées que celles observées dans le TNSA (par les processus de « hole boring » ou d'accélération par choc). Des études théoriques pionnières sont menées notamment par les théoriciens du CELIA pour définir les paramètres de l'interaction qui permettent d'optimiser l'énergie et le nombre d'ions accélérés.

Les données expérimentales sont encore rares, les premiers résultats publiés ont été obtenus aux USA en 2011 avec un laser CO2 et rapportent des spectres de protons avec une énergie moyenne de plusieurs MeV et une dispersion de ~5 %. Chen et al ont rapporté en 2017 des énergies de protons de quelques centaines de keV dans des tirs réalisés sur le laser TITAN au LLNL. Nous avons réalisé 3 expériences au LULI (Ecole Polytechnique) et au CLPU (Univ. Salamanque, Espagne) en 2018. Elles ont permis d'une part de valider nos systèmes de jets de gaz basés sur deux compresseurs de 400 et 1000 bars et de tester différents types de buses, certaines conçues et simulées dans nos laboratoires puis micro-usinées par des entreprises extérieures, d'autres développées et vendues par la société SourceLab. Les résultats obtenus au LULI ont démontré pour la première fois avec un laser infrarouge, l'accélération de protons à des énergies de 5 MeV et d'Helium à des énergies de 10 MeV. Ces expériences nous ont aussi

permis d'affiner la feuille de route pour améliorer les jets de gaz créés afin d'atteindre les conditions requises pour observer des spectres quasi monoénergétiques d'ions attendus lors d'une accélération par le processus CSA. Une grande difficulté de ce programme réside dans la diversité des installations lasers existantes et dans leurs modes d'accès qui ne permettent pas de garantir les conditions d'études paramétriques quantitatives dans des laps de temps raisonnables. Le TNSA a été étudié par plusieurs équipes dans le monde depuis bientôt 20 ans, les données accumulées et les calculs ont permis une bonne maîtrise du phénomène. Les données concernant les autres mécanismes plus complexes sont beaucoup moins nombreuses car ils requièrent notamment des cibles difficiles à produire aujourd'hui encore.

Néanmoins, on assiste à une compétition internationale aigüe autour de l'accélérateur d'ions laser plasma car ses applications « atteignables dans le moyen terme » sont prometteuses tant pour la production d'isotopes et la radiobiologie que pour la production de sources de neutrons.

Dans le futur, les études autour de l'accélération laser plasma auront lieu auprès du laser APOLLON en région parisienne et auprès des lasers européens ELI et CLPU. Même si des avancées majeures sont attendues concernant la démonstration de nouveaux mécanismes d'accélération, du fait des caractéristiques uniques en intensités de ces lasers, l'accélérateur laser plasma comme machine délivrant des faisceaux de particules utilisables pour des applications ne peut pas être développé auprès de lasers, qui n'offrent pas de ligne de laser dédiée et du temps laser garanti sur une durée raisonnable pour un programme de recherche.

Les perspectives de l'IN2P3 sont l'occasion de préciser la stratégie du CNRS, IN2P3 et INP pour les 10 années à venir, de préciser notre ambition sur le sujet (recherche sur l'interaction laser plasma ou accélérateur laser plasma) et de discuter des moyens nécessaires à sa réalisation. Plusieurs propositions sont étudiées actuellement.

Projets européens: tous ont comme ambition de démontrer l'accélération de protons jusqu'à plusieurs centaines de MeV pour les applications médicales et en radiobiologie notamment.

ELIMED à Prague [ELIMED à Prague https://web.infn.it/ELIMED/index.php/en/](https://web.infn.it/ELIMED/index.php/en/)

ATHENA (Helmholtz Allemagne) [ATHENA \(Helmholtz Allemagne\) https://www.helmholtz-ard.de/e26746/](https://www.helmholtz-ard.de/e26746/)

A-SAIL en UK : collaboration entre plusieurs universités et laboratoires pour des études des mécanismes de l'interaction laser plasma d'ions en vue d'un accélérateur pour les applications <http://www.qub.ac.uk/research-centres/A-SAILProject/>

programme en Espagne <https://i3m-detectors.com/research/laser-ion-acceleration-and-applications-liaa/>

En France, une ligne de protons pour la radiobiologie a été expérimentée jusqu'à l'an dernier dans le cadre du projet SAPHIR au LOA qui a obtenu des résultats prometteurs sur les effets des dépôts de dose importants réalisés sur des courtes durées par rapport au durées conventionnelles.