



Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021

Titolo del progetto: Beam dynamics issues of a sustainable plasma-based accelerator for Free Electron Lasers

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:

FISICA DEGLI ACCELERATORI

Responsabile scientifico: L. Palumbo

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 6

Azienda: Elettra-Sincrotrone Trieste S.C.p.A, Trieste

Il Dipartimento è disponibile a cofinanziare per un importo pari a euro: 7000

Dipartimento finanziatore: DIPARTIMENTO DI SCIENZE DI BASE ED APPLICATE PER L'INGEGNERIA con delibera del 21/09/2021

Progetto di ricerca:

Il contesto: gli acceleratori al plasma come opzione verde per le infrastrutture di ricerca basate sugli acceleratori di particelle

A livello dell'UE è in corso uno sforzo per studiare la densità ottimale delle infrastrutture di ricerca in una moderna società ad alta tecnologia, cercando l'equilibrio tra esigenze educative, accesso alla tecnologia, capacità scientifiche e CO2 footprint. In quest'ambito, la tecnologia pionieristica dell'acceleratore compatto di EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications) consentirà la costruzione di una rete di strutture per un accesso più capillare alle infrastrutture di ricerca. Ciò ridurrà la necessità di viaggi ad alto impatto di CO2 per l'esecuzione di esperimenti in strutture distanti e potrà contribuire a un'Europa più innovativa e verde.

Inoltre, l'uso delle risorse naturali (terreno, acciaio, cemento, cavi, ...) per la costruzione dell'infrastruttura è fortemente ridotto grazie alle inferiori dimensioni richieste da questa nuova tecnologia.

Il progetto di dottorato cercherà di sviluppare un design complessivamente ottimizzato minimizzando il consumo di elettricità e il CO2 footprint. È ben noto che uno dei principali elementi di consumo di energia elettrica in una struttura di ricerca basata su acceleratori di particelle sono gli elettromagneti. L'impatto degli elettromagneti sul consumo energetico totale è leggermente inferiore al 30%.

Per l'alimentazione dei magneti, l'energia elettrica viene solitamente convertita da AC a DC o a corrente pulsata che genera perdite di calore per ogni fase di conversione. E' quindi richiesta una potenza elettrica superiore a quella necessaria ai magneti e un sistema di raffreddamento per la dispersione del calore per le bobine dei magneti ad alta densità di corrente. Pertanto, l'impatto sull'ambiente è rappresentato dalla richiesta di energia elettrica e dal calore da dissipare nell'aria o nell'acqua.

Il consumo di elettricità e il CO2 footprint di una struttura di ricerca basata su un acceleratore di particelle al plasma può essere ridotto mediante l'uso di innovativi magneti permanenti.

Eupraxia @ SPARC_LAB all'INFN: un FEL pilota basato sull'accelerazione al plasma

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) ha avviato la progettazione e la costruzione di un Laser a Elettroni Liberi (FEL) presso i Laboratori Nazionali di Frascati (INFN-LNF). Tale nuova struttura, denominata Eupraxia@Sparc_Lab, sarà una combinazione unica di un fascio di elettroni con energie dell'ordine del GeV ad alta luminosità generato in un linac RF in banda X all'avanguardia, un sistema laser di classe 0,5 PW e la prima sorgente di radiazione di quinta generazione prodotta da un acceleratore al plasma. Queste caratteristiche uniche porteranno a nuove promettenti sinergie tra la ricerca fondamentale orientata alla fisica e le applicazioni ad alto impatto sociale, in particolare nel dominio delle tecnologie abilitanti fondamentali (KETs) e della Smart Specialisation Strategy (S3).

Un tunnel lungo 55 m ospiterà un fotoiniettore RF in banda S da 150 MeV ad alta luminosità dotato di uno schema di compressore ibrido basato sia sul velocity bunching che sulla chicane magnetica. L'aumento di energia da 150 MeV a 0,5-1 GeV sarà fornito da una serie di cavità RF in banda X ad alto gradiente. All'uscita del linac sarà installata una sezione di accelerazione al plasma di 5 m.

Il modulo accelerante al plasma può essere pilotato in questo layout sia da un driver a fascio di elettroni (schema PWFA) che dal laser FLAME stesso (schema LWFA). Sarà inoltre possibile una configurazione a stadi di entrambi gli schemi PWFA (Particle WakeField Acceleration) e LWFA (Laser WakeField Acceleration) al fine di aumentare l'energia del fascio finale oltre i 5 GeV.

La sfida più ambiziosa è la progettazione e la costruzione di una sorgente FEL compatta a 3 nm di lunghezza d'onda per utenti e guidata da un modulo accelerante al plasma ad alto gradiente. Dovrà essere in grado di fornire fotoni stabili per consentire esperimenti come nelle strutture FEL convenzionali. Il componente più innovativo del progetto è il modulo di accelerazione al plasma, che consiste in un tubo capillare lungo 10 cm e diametro 0,5 mm in cui il plasma è prodotto da una scarica ad alta tensione in idrogeno. L'innovatività di Eupraxia@Sparc_Lab si basa sulla progettazione e sulla costruzione del primo linac RF in banda X da 1 GeV e sul funzionamento affidabile del sistema laser con potenza di 0,5 PW.

Compiti innovativi per lo studente: Simulazione di punti di lavoro e dimostrazione di principi sperimentali

La dinamica del fascio di elettroni in un tale progetto è un problema aperto, a causa della qualità del fascio necessaria all'iniezione nel plasma per essere ulteriormente accelerato garantendo le proprietà richieste per l'iniezione FEL. Il lavoro del dottorando partirà da simulazioni di dinamica 'start-to-end' mediante codici numerici (es. ASTRA o GPT) che hanno dimostrato di dare risultati in accordo con le misure di macchina.

Verrà esplorata una configurazione a treni d'impulso per il fascio di elettroni, costituita da un driver di poche centinaia di pC, seguiti da un witness di una decina di pC, con l'obiettivo di ottimizzare i parametri del witness e di impostare la distanza longitudinale tra i pacchetti al valore desiderato. Tale modalità operativa consente di pilotare uno stadio PWFA in cui il passaggio di un fascio ultrarelativistico di particelle cariche (il driver) attraverso un plasma genera una scia di densità di carica utile ad accelerare il fascio finale. Questa configurazione prevede anche la generazione di un treno di impulsi laser spaziali nel tempo che illuminano il fotocatodo.

Saranno dedicati studi computazionali per fornire all'ingresso nel plasma una separazione dei pacchetti corrispondente alla metà della lunghezza d'onda del plasma in funzione della sua densità. Ogni pacchetto del treno deve essere fortemente compresso fino a decine di fs (FWHM): la lunghezza del witness deve essere molto inferiore alla lunghezza d'onda del plasma per ridurre al minimo la crescita dello spread di energia. Tale compressione si basa su una chicane magnetica, come avviene nei FEL convenzionali (es. Fermi a Elettra-Sincrotrone Trieste).

Tra i vari studi necessari, sarà analizzata in dettaglio, mediante simulazioni, la possibilità di sostituire elettromagneti convenzionali con magneti permanenti di ultima generazione.

Ad esempio, in PWFA, il sistema di focalizzazione che inietta il treno di pacchetti nella cella al plasma molto probabilmente utilizzerà magneti permanenti così come lo stadio che raccoglie il fascio ad alta energia dopo l'accelerazione al plasma. Inoltre, una tripletta di magneti permanenti sarà utilizzata per dimostrare la possibilità di focalizzare in modo efficiente un fascio generato anche da una sorgente LWFA con un ampio spread di energia e un'elevata divergenza, e consentirà di eseguire l'allineamento della macchina basato sul fascio e di controllarne la dispersione.

Grazie all'ingegneria avanzata dei dispositivi a magneti permanenti, è possibile ottenere un gradiente di campo variabile per la focalizzazione dei magneti quadrupolari. Questa opzione non è mai stata considerata nel contesto dell'acceleratore PWFA.

Un secondo aspetto rilevante del progetto di ricerca è la necessità di effettuare prove sperimentali di principio per i principali risultati ottenuti dalle simulazioni della dinamica del fascio. In particolare, prevediamo uno sforzo nel ridimensionare i punti di lavoro Eupraxia@Sparc_Lab per adattarli all'iniettore Sparc da 100MeV per studiarne l'aspetto più innovativo. Ad esempio, possono essere studiati schemi per consentire la separazione dei driver e dei witness dopo l'accelerazione del plasma mediante magneti permanenti.

Ruolo del settore dell'hosting

In questo contesto l'esperienza di 6 mesi presso Elettra-Sincrotrone Trieste darà un forte impulso ai risultati della ricerca. In particolare, Elettra-Sincrotrone Trieste ospita l'unica struttura di utenza italiana basata su FEL (ovvero FERMI).

Il dottorando avrà la possibilità di entrare a far parte del gruppo di operazione presso il linac ad alta brillantezza FERMI che lavora ad un'energia (1.5GeV) prossima a quella del fascio che entra nel modulo plasma di Eupraxia@Sparc_Lab (1GeV).

FERMI utilizza lo stesso schema di compressione ad alta energia (ovvero la chicane magnetica) previsto per Eupraxia@Sparc_Lab. Pertanto, partecipando al funzionamento della macchina, lo studente avrà la possibilità di confrontarsi con le questioni pratiche da considerare quando si progetta una chicane per PWFA.

Ultimo, ma non meno importante, grazie al lavoro con gli utenti, FERMI ha raggiunto un'affidabilità e prestazioni impressionanti. Durante la sua permanenza, è molto importante che il giovane ricercatore comprenda le caratteristiche chiave che consentono di ottenere tali prestazioni dalla macchina, al fine di guidare la progettazione della dinamica del fascio.

Conclusione

La ricerca mira a proporre un layout per una struttura di ricerca compatta, economica, ecologica e basata su acceleratori al plasma che utilizzi, ove possibile, magneti permanenti. La ricerca includerà esperimenti proof-of-principle sui problemi più critici che possono essere testati presso il fotoiniettore RF ad alta luminosità di Sparc_Lab presso INFN-LNF (100MeV), e presso il FEL FERMI (1,5 GeV), struttura all'avanguardia in funzione presso Elettra-Sincrotrone Trieste S.C.p.A.

Titolo del progetto (inglese): Beam dynamics issues of a sustainable plasma-based accelerator for Free Electron Lasers

Progetto di ricerca (inglese):

The context: beam dynamics issues of a sustainable plasma-based accelerator for Free Electron Lasers

There is an on-going effort at the EU-level in investigating the optimal density of research infrastructures in a modern high-tech society, determining the optimal balance between educational needs, technology access, science capabilities and CO₂ footprint. In this context, the pioneering of the compact accelerator technology in EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications) will enable the construction of a distributed network of facilities that provide a more localised access to research infrastructures. This reduces the need for CO₂ intensive travel when performing experiments at distant facilities and contributes to a more innovative and greener Europe.

Moreover, the use of natural resources (ground, steel, concrete, cables, ...) for construction of the research infrastructure is strongly reduced by the much-reduced length and size of novel plasma accelerator technology.

The PhD project will look at developing an overall optimized technical concept with minimal electricity consumption and CO₂ footprint. It is well known that one of the main electrical power consumption items in particle accelerator-based research facility are electro-magnets. The impact of the magnet consumption on the total power consumption is slightly smaller than 30%.

For the magnets feeding, electrical power is usually converted from AC to DC or pulsed current generating heat loss for every conversion step. This means that a higher power than the one needed by the magnets is required and also a cooling system has to be installed for the heat loss. As a consequence, a water-cooling system is necessary to cool high current density magnets coils. Therefore, the impact on the environment is represented by the electrical power request and the heat to be dissipated in the air or in water.

The electricity consumption and CO₂ footprint of a research facility based on plasma particle accelerator can be minimized by the use of innovative permanent magnets.

Eupraxia @ SPARC_LAB at INFN: a pilot FEL based on plasma acceleration

The Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) has started the design and construction of a Free Electron Laser (FEL) at the Laboratori Nazionali di Frascati (INFN-LNF). Such new facility, named Eupraxia@Sparc_Lab, will be a unique combination of a high brightness GeV-range electron beam generated in a state-of-the-art X-band RF linac, a 0.5 PW-class laser system and the first 5th generation light source driven by a plasma accelerator. These unique features will lead to new promising synergies between fundamental physics-oriented research and high social impact applications, especially in the domain of sustainable Key Enabling Technologies and Smart Specialization Strategies.

A 55 m long tunnel will host a high brightness 150 MeV S-band RF photoinjector equipped with a hybrid compressor scheme based on both velocity bunching and magnetic chicane. The energy boost from 150 MeV to 0.5–1 GeV will be provided by chain of high gradient X-band RF cavities. At the linac exit a 5 m long plasma accelerator section will be installed,.

The plasma accelerator module can be driven in this layout either by an electron bunch driver (PWFA scheme) or by the FLAME laser itself (LWFA scheme). A staged configuration of both PWFA (Particle WakeField Acceleration) and LWFA (Laser WakeField Acceleration) schemes will be also possible in order to boost the final beam energy beyond 5 GeV.

The most ambitious challenge is the design and building of a compact FEL source, equipped with user beam line at 3 nm wavelength and driven by a high gradient plasma accelerator module as well as being able to provide stable photons to allow user experiments as in conventional FEL user facilities. The most innovative component of the project is the plasma accelerating module, which consists in a 10 cm long, 0.5 mm diameter capillary tube in which the

plasma is produced by a high voltage discharge in Hydrogen. The Eupraxia@Sparc_Lab effort relies on designing and building the first-ever 1 GeV X-band RF linac as well as the reliable operation of 0.5 PW range laser system.

Innovative tasks for the student: Simulation of working points and proof of principle experiments

The beam dynamics aspect of such a design is an open issue, because of the superior beam quality needed at the plasma cell entrance to be further accelerated keeping the beam properties mandatory for FEL injection. The work of the PhD candidate will start from extensive start-to-end simulations of the electron beam dynamics by means of numerical codes (e.g. ASTRA or GPT codes) proven to give results in agreement with machine measurements.

A train configuration for the electron beam, consisting of few hundreds of pC drivers followed by a tens of pC witness bunch, will be explored aiming to optimize the witness parameters and to set the longitudinal distance between the bunches at the desired value. Such operating mode enables the possibility to pilot a PWFA stage where the passage of an ultra-relativistic bunch of charged particles (the drivers) through a plasma drives a charge density wake useful to accelerate the trailing bunch.

The bunch train operation foresees the generation of two or more bunches within the same RF accelerating bucket through the generation of a train of time-spaced laser pulses that illuminates the photo-cathode. The witness arrives earlier than the drivers on a photo-cathode and then they are reversed in time at the end of the velocity bunching process, during which the longitudinal phase space is rotated.

Computational studies will be devoted to provide at the plasma entrance a bunch separation corresponding to half of the plasma wavelength depending on the plasma background density. Each bunch of the train must be heavily compressed down to tens of fs (FWHM): the witness bunch length must be much less than the plasma wavelength in order to minimize the energy spread growth. Such compression relies on a magnetic chicane, as done in conventional FELs (e.g. Fermi at Elettra-Sincrotrone Trieste).

Among the various needed studies, the possibility of substituting extensively conventional electro-magnets with state-of-the-art permanent magnets will be studied in details by means of beam dynamics simulations.

For instance, in PWFA the focusing system delivering the bunch train in the plasma cell will most probably use permanent magnets as well as the stage collecting the high energy beam after the high gradient plasma stage. Moreover, a triplet of permanent magnets has been used to efficiently focus a beam with large energy spread and high divergence that is generated by a LWFA source for a free electron laser demonstration and it has enabled to perform beam-based alignment and to control the dispersion of the beam.

By advanced engineering of permanent magnet devices, it is possible to achieve a varying field gradient in focusing quadrupole magnets. This option has never been considered in the context of PWFA accelerator.

A second relevant aspect of the research project is the need of proof of principle experiment for the main results obtained by the beam dynamics simulations. In particular, we envisage some effort in scaling Eupraxia@Sparc_Lab working points to adapt them to the 100MeV Sparc injector to investigate the most innovative aspect. For instance, schemes to allow the separation of drivers and witness after the plasma acceleration by means of permanent magnets may be investigated.

Role of the hosting industry

In this context the 6-month experience at Elettra-Sincrotrone Trieste will heavily boost the research results. In particular the Elettra-Sincrotrone Trieste is hosting the unique Italian FEL based user facility (namely FERMI).

The PhD candidate will have the possibility of joining the group operation at FERMI high brightness linac working at an energy (i.e. 1.5GeV) close to the energy of the beam entering in the plasma module of Eupraxia@Sparc_Lab (i.e. 1GeV).

FERMI uses the same high energy compression scheme (i.e. the magnetic chicane) foreseen for Eupraxia@Sparc_Lab. Therefore, by joining the machine operation, the student will see which are the practical issues to be considered when designing a chicane for PWFA.

Last but not least, because of the working with users, FERMI has achieved an impressive reliability and up-time performance. During his permanence there, it is very important that the young researcher understands the key features allowing such performances of the machine, in order to guide the beam dynamics design.

Conclusions

The research aims to propose a layout for compact, cost-effective, green, plasma-accelerator-based research facility using, wherever possible, permanent magnets. The research will include proof-of-principle experiments on the most critical issues that can be hosted at the 100MeV, high brightness RF photoinjector of Sparc_Lab at INFN-LNF as well as on the state-of-the-art 1.5 GeV FERMI Free Electron Laser operating at Elettra-Sincrotrone Trieste S.C.p.A.