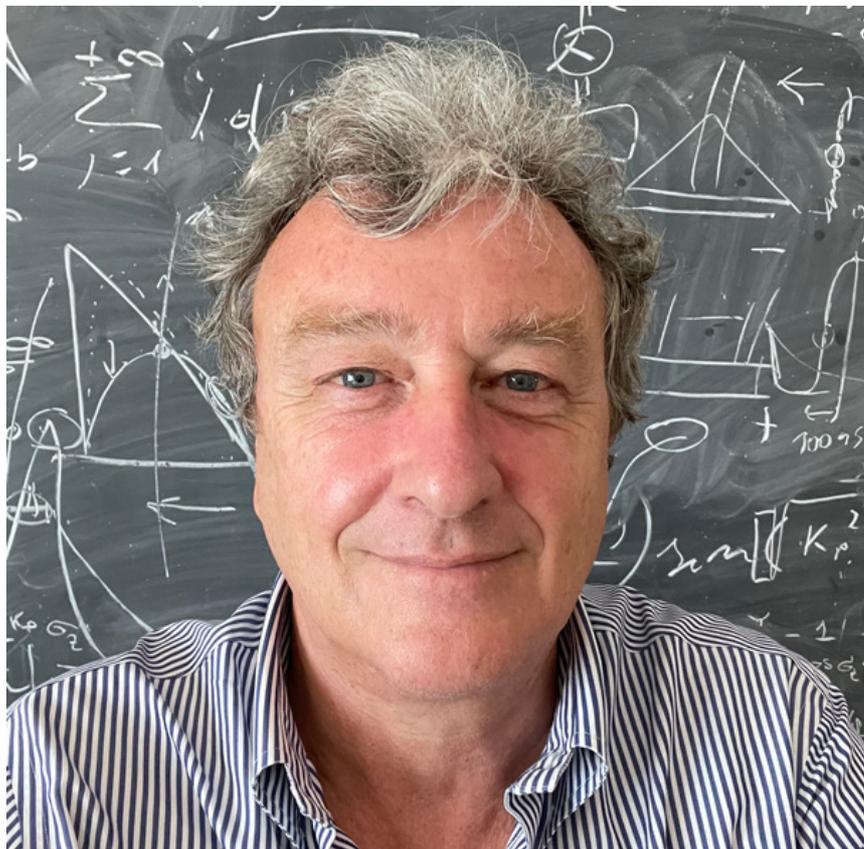


# Interviste Newsletter

## IL FUTURO DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE PASSA ANCHE DAL PLASMA



Tra i temi affrontati nel corso dell'annuale conferenza internazionale sugli acceleratori di particelle (IPAC'23), svoltasi nel mese di maggio al Lido di Venezia, anche le ricerche sugli acceleratori al plasma: non solo per il ruolo centrale svolto dall'Italia, ma anche per i nuovi e promettenti scenari che l'avvento di questa tecnologia sembra prefigurare, caratterizzati dalle opportunità derivanti da una maggiore facilità di accesso alle macchine acceleratrici e da un sempre più diffuso utilizzo di questi strumenti in ambiti disciplinari diversi. La possibilità di realizzare una nuova generazione di sorgenti di luce e acceleratori compatti, e più economici, in grado di soddisfare sia le esigenze della fisica delle alte energie, sia quelle del

mondo della ricerca applicata o dei settori produttivi, costituisce infatti la ragione del forte interesse nei confronti dei progetti che a livello internazionale si stanno concentrando sulla progettazione e sullo sviluppo della tecnica di accelerazione delle particelle per mezzo del plasma e delle sue applicazioni. Iniziative come EuPraxia, non a caso tra i protagonisti dell'agenda di IPAC'23. Inserito già nel 2021 nella Roadmap di ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructure), che individua le infrastrutture di ricerca di interesse strategico per l'Europa, Eupraxia, che riunisce oltre 40 istituti di ricerca appartenenti a 10 Paesi europei, vede un fondamentale contributo dell'INFN, impegnato in veste di capofila e selezionato per ospitare, presso i Laboratori Nazionali di Frascati, una dei due centri dedicati ad attività multidisciplinari previsti dal progetto. Un impegno, quello dell'Italia e dell'INFN, nei confronti della ricerca per lo sviluppo delle tecniche di accelerazione al plasma, confermato e rilanciato anche con EuAPS (EuPRAXIA Advanced Photon Sources), progetto di interesse nazionale a guida INFN finanziato nell'ambito del PNRR, che si propone come strumento per l'attuazione e il conseguimento degli obiettivi di EuPRAXIA. Responsabile di EuAPS e di SPARC\_LAB, facility di ricerca dei Laboratori Nazionali di Frascati che fungerà da sede per le attività del progetto, è Massimo Ferrario, ricercatore dei Laboratori Nazionali di Frascati.

**Durante l'ultima conferenza IPAC molto spazio è stato dedicato al campo dell'accelerazione al plasma. Su quali principi e fenomeni fisici si basa questa tecnica di accelerazione delle particelle? Che cosa la differenzia dai sistemi oggi in uso e quali sono i settori disciplinari coinvolti nel suo sviluppo?**

L'idea di utilizzare un'onda di plasma per accelerare particelle cariche è ben nota, e risale al 1979. Il principio su cui si basa è relativamente semplice: un plasma nel suo complesso è elettricamente neutro, contenendo quantità uguali di elettroni di carica negativa e di ioni di carica positiva. Tuttavia, un impulso iniettato dall'esterno nel plasma, quale un fascio laser intenso o un fascio di particelle, può creare una perturbazione nel plasma. In sostanza, il fascio spinge gli elettroni più leggeri lontano dagli ioni positivi più pesanti, che a loro volta, rimanendo quasi fermi, formano una sorta "bolla" con un eccesso di carica positiva, all'interno della quale è presente un campo elettrico estremamente intenso. Questa perturbazione si propaga lungo il plasma come un'onda sull'acqua a una velocità prossima a quella della luce, e può accelerare le particelle cariche che ne vengono influenzate. Le dimensioni della bolla accelerante sono molto piccole, alcune decine di micron, rendendo molto difficile iniettare un fascio di elettroni da accelerare all'interno di essa, ma gli elevati campi acceleranti prodotti rendono la tecnica molto conveniente, in termini sia di compattezza dell'acceleratore, sia di riduzione dei costi. Direi che questa è la caratteristica principale che differenzia l'accelerazione al plasma dagli acceleratori convenzionali che, utilizzando onde elettromagnetiche propaganti in strutture metalliche, possono oggi produrre campi acceleranti ragguardevoli, ma inferiori a quelli ottenibili in un plasma.

Ancora molto può essere fatto per migliorare le prestazioni degli acceleratori al plasma, in particolare in termini di stabilità e qualità del fascio accelerato, e a questo fine un vasto sforzo interdisciplinare è in corso a livello mondiale. Sono coinvolti esperti di fisica del plasma, fisica dei laser e naturalmente fisica degli acceleratori, generando un circolo virtuoso di fertilizzazione tra diversi settori disciplinari che trovo molto stimolante. Ricordiamo per esempio che senza l'invenzione del sistema di generazione di impulsi laser corti ad alta potenza non sarebbe stato possibile eccitare le onde di plasma in modo efficace. L'importanza di questa invenzione, non solo per l'accelerazione al plasma, è stata riconosciuta nel 2018 con l'assegnazione del premio Nobel per la fisica ai suoi inventori, Gérard Mourou e Donna. Strickland.

Oggi gli esperti delle differenti discipline coinvolte nello sviluppo degli acceleratori al plasma hanno rafforzato un linguaggio comune che agevola una visione d'insieme nell'affrontare i problemi e che sta dando i risultati ben visibili anche nelle grandi conferenze generali come IPAC.

**Quale tipo di vantaggi potrebbe garantire l'utilizzo di futuri acceleratori al plasma e quali potrebbero essere le loro applicazioni?**

L'accelerazione di fasci di elettroni mediante i plasmi è ormai un risultato consolidato. Fasci fino a 10 GeV sono infatti già stati prodotti con successo in moduli al plasma di 10 cm di lunghezza, confermando la promessa principale di questa nuova tecnologia, ovvero la riduzione degli spazi necessari e dei costi di realizzazione e operazione. Anche la qualità dei fasci accelerati sta migliorando rapidamente tanto da rendere gli acceleratori al plasma per elettroni una opzione possibile entro i prossimi cinque anni per le sorgenti di luce di sincrotrone coerente, quali sono i laser a elettroni liberi (FEL). Si aprirà così un nuovo panorama per gli utenti FEL, che avranno maggior accesso alle sorgenti di radiazione realizzabili anche in spazi ridotti, come quelli disponibili nelle Università o negli ospedali e in qualche caso anche nelle industrie.

Per la fisica delle alte energie è ancora prematuro, a mio avviso, prevedere una applicazione ai collisori lineari a breve termine. Il problema principale riguarda lo sviluppo dell'accelerazione di positroni, che non ha ancora raggiunto i risultati ottenuti con gli elettroni. Il problema è in parte motivato da alcune difficoltà intrinseche negli schemi di accelerazione di positroni che non sono ancora state risolte in modo soddisfacente, e in parte anche dalla minore attenzione posta fino ad oggi a questa tecnologia per mancanza di programmi di ricerca dedicati. Credo che comunque l'entrata in funzione dei primi acceleratori al plasma per elettroni sia un passo necessario anche per lo sviluppo dei collisori.

**Il progetto EuPRAXIA, dedicato a promuovere lo sviluppo degli acceleratori al plasma a livello europeo, vede l'INFN impegnato con un ruolo di primo piano. Come si articola il progetto e in quale modo l'INFN vi sta contribuendo e vi contribuirà?**

Il progetto EuPRAXIA è un sogno che sta per diventare realtà. Nel 2014, i ricercatori europei concordarono sulla necessità di un impegno combinato e coordinato nella ricerca e nello sviluppo per realizzare una struttura di accelerazione al plasma che fungesse da dimostratore. Il progetto doveva puntare alla produzione di fasci di elettroni di alta qualità, con energia fino a 5 GeV, ottenendo una significativa riduzione delle dimensioni e possibili risparmi di costi rispetto agli acceleratori a radio frequenza (RF). Questo progetto fu chiamato European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications (EuPRAXIA), e, come si evince dal nome, si rivolgeva soprattutto alle applicazioni e gli utenti. All'epoca si decise che il fine dell'iniziativa dovesse essere quella di fornire impulsi di raggi X, fotoni, elettroni e positroni a utenti provenienti da diverse discipline. Il progetto EuPRAXIA è iniziato nel 2015 con uno studio preliminare, finanziato nell'ambito del programma Horizon 2020 dell'Unione Europea (UE), che ha portato alla fine del 2019 alla pubblicazione del primo "Conceptual Design Report" (CDR), coordinato da Ralph Assmann (DESY), di una struttura di accelerazione al plasma. Il piano di implementazione di EuPRAXIA prevede un'infrastruttura di ricerca distribuita con due siti principali, dove verranno costruite le "user facilities", e diversi centri di eccellenza in Europa che contribuiranno alla ricerca e alla costruzione dei due siti principali.

Un risultato molto importante per l'intera collaborazione, che oggi include 51 istituti provenienti da 15 paesi, è stato conseguito nel 2021 quando EuPRAXIA è stata inclusa nella roadmap del Forum Strategico per le Infrastrutture di Ricerca Europee (ESFRI), che identifica le strutture di ricerca di importanza pan-europea che corrispondono alle esigenze a lungo termine della comunità europea. L'Italia, rappresentata dall'INFN, è stata scelta come paese guida. Il ruolo dell'INFN sarà quindi molto importante, sia in quanto ente che ospita il quartier generale dell'intera collaborazione europea, sia perché realizzerà ai Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'INFN una delle due "user facilities" previste. EuPRAXIA@SPARC\_LAB, nome dell'infrastruttura che verrà realizzata ai LNF, sarà un acceleratore al plasma in grado di pilotare un FEL con emissione di radiazione coerente a 3-4 nm, ideale ad esempio per applicazioni di carattere biofisico.

Il "Technical Design Report" di EuPRAXIA@SPARC\_LAB sarà pubblicato entro la fine del 2025. Nel frattempo, stiamo concludendo le richieste di autorizzazioni per la realizzazione del nuovo edificio, di cui prevediamo di completare la costruzione entro il 2027. L'installazione e l'operatività della macchina inizieranno non appena la struttura sarà pronta ad accoglierla e verranno avviate entro il 2028. Se non ci saranno ritardi imprevisti, prevediamo di avere i primi utenti pilota nel 2029. Per la realizzazione di questa infrastruttura il Ministero dell'Università e della Ricerca italiano (MUR) ha stanziato un finanziamento di 108 milioni di euro.

**Il nostro paese ha riconosciuto il valore strategico degli acceleratori al plasma anche attraverso il finanziamento su fondi PNRR del progetto a guida INFN EuAPS. Quali sono i suoi obiettivi e come si inseriscono nel più ampio contesto di EuPRAXIA?**

In effetti il risultato conseguito nel processo di selezione dei progetti di infrastrutture di ricerca da finanziare attraverso il PNRR ci ha fatto molto piacere. Il nostro progetto, denominato “EuPRAXIA Advanced Photon Sources” (EuAPS), guidato dall'INFN in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e l'Università di Roma Tor Vergata, ha ricevuto un ulteriore sostegno finanziario di 22,3 milioni di euro dal piano PNRR, e affronterà alcuni aspetti cruciali per la realizzazione di EuPRAXIA. EuAPS prevede infatti la costruzione ai LNF di una sorgente di raggi X incoerenti emessi dagli elettroni accelerati nel plasma, nota come “radiazione di betatrone”, di energia tra 1 e 10 KeV, e in parallelo vedrà lo sviluppo di laser ad alta potenza presso i Laboratori Nazionali del Sud e di laser ad alta frequenza di ripetizione presso il CNR di Pisa, necessari per la realizzazione di EuPRAXIA. EuAPS sarà di fatto il primo mattone del programma EuPRAXIA, da realizzarsi entro i 36 mesi previsti dal bando PNRR, che per noi scadranno alla fine del 2025. Una corsa contro il tempo molto impegnativa, ma che ci sentiamo in grado di affrontare anche grazie al grande sforzo messo in campo dall'INFN per sostenere tutti i progetti PNRR approvati che coinvolgono le strutture dell'Istituto.

**SPARC\_LAB, infrastruttura dei LNF, è un laboratorio di riferimento a livello internazionale per le ricerche condotte nel campo dell'accelerazione al plasma. Quali sono i risultati fino a oggi ottenuti dal laboratorio e su quali attività si concentrerà nei prossimi anni?**

SPARC\_LAB si è imposto nello scenario internazionale di ricerca di accelerazione al plasma grazie ai risultati di altissimo livello generati dall'impegno di un gruppo di giovani e brillanti ricercatori e dal crescente coinvolgimento della Divisione Acceleratori di Frascati con i suoi Servizi Tecnici di grande esperienza.

Senza dubbio il risultato più importante ottenuto recentemente a SPARC\_LAB è stata la prima dimostrazione sperimentale della emissione di radiazione FEL a 800 nm da un fascio di elettroni accelerato da un plasma. Questo risultato è stato pubblicato su Nature nel 2022 (ndr, Pompili et al., Nature, 605, 659-662 (2022)) essendo stato riconosciuto come un passo avanti fondamentale verso la realizzazione di sorgenti di radiazione compatte, quale sarà EuPRAXIA. A questo risultato si è arrivati grazie all'esperienza maturata fin dalle origini di SPARC\_LAB, intorno al 2002, come test facility per il progetto FEL SPARX, ma soprattutto grazie alla recente formazione di un gruppo di esperti in grado di progettare l'esperimento sia nei suoi aspetti di modellizzazione teorica e di simulazione numerica, sia nella realizzazione del modulo accelerante stesso, prodotto nel laboratorio PLASMA\_LAB dei LNF. Numerosi problemi sono stati affrontati e superati per arrivare al risultato finale, come quelli legati alla progettazione della camera dove avviene l'interazione tra fascio e plasma e al relativo sistema di pompaggio per evitare la diffusione del gas nell'acceleratore.

In attesa della realizzazione di EuPRAXIA, SPARC\_LAB sarà ancora per qualche anno la test facility dedicata alla messa a punto delle componenti critiche di EuPRAXIA. Uno degli aspetti cruciali ancora da perfezionare sarà la stabilizzazione in energia dei fasci accelerati, che richiederà la messa appunto di un sistema di sincronizzazione tra l'onda di plasma e il fascio accelerato. Certamente una sfida per l'elettronica del sistema, ma necessaria per il conseguimento del risultato finale. In parallelo nel laboratorio PLASMA\_LAB,

opportunamente attrezzato per lo sviluppo dei moduli al plasma e della loro caratterizzazione prima dell'installazione sull'acceleratore, verranno sviluppati i moduli lunghi 40 cm come previsto dal progetto EuPRAXIA.

**Oltre ai Laboratori Nazionali di Frascati, quali sono gli altri gruppi INFN impegnati nel lavoro di ricerca e sviluppo legato agli acceleratori di particelle, e con quale ruolo?**

La collaborazione EuPRAXIA si estende naturalmente anche ad altri gruppi INFN oltre a quello dei LNF. In particolare, il gruppo di Milano ha dato e continuerà a dare un apporto fondamentale nello sviluppo di codici di simulazione numerica dell'interazione tra fascio e plasma e della fisica del FEL, indispensabile in fase sia di progettazione, sia di interpretazione dei dati sperimentali. Recentemente i Laboratori Nazionali del Sud si sono aggiunti attraverso il programma EuAPS e contribuiranno allo sviluppo dei laser di potenza per EuPRAXIA. Altrettanto importante è la collaborazione con le Università dell'area romana, in particolare il programma di dottorato in Fisica degli Acceleratori della Sapienza Università di Roma è una via di reclutamento di giovani brillanti interessati al progetto EuPRAXIA, così come l'Università di Roma Tor Vergata e l'Università di Milano contribuiscono attivamente da tempo alle attività di ricerca legate a EuPRAXIA. Una lunga e proficua collaborazione con l'ENEA di Frascati e il CNR di Pisa ci ha permesso di acquisire esperienza anche in settori di ricerca in cui l'INFN non era ancora preparato, quali lo sviluppo di ondulatori per il FEL e i laser di potenza.

**L'alto valore tecnologico rendono EuPRAXIA e EuAPS progetti con un forte legame con le industrie. In quale modo oggi le aziende contribuiscono alle attività INFN nel campo dell'accelerazione al plasma? In quali settori operano e quali benefici può trarre il mondo industriale da questa sinergia?**

Il progetto EuPRAXIA ha un forte legame con l'industria. Nello specifico, l'industria specializzata nella produzione di laser ad alta potenza si è rivelata un importante partner per la finalizzazione del progetto ed è attualmente co-sviluppatrice dei sistemi laser ad alta ripetizione previsti sia per EuAPS, sia per EuPRAXIA. La scelta di utilizzare strutture acceleranti in banda X per la parte di accelerazione convenzionale di EuPRAXIA@SPARC\_LAB sta trainando anche l'industria nello sviluppo di opportune sorgenti di microonde ad alta efficienza e alta ripetizione necessarie per alimentare le strutture acceleranti in banda X. Le strutture acceleranti stesse saranno prodotte da ditte specializzate italiane.

È nostra speranza che la spinta innovativa che il progetto EuPRAXIA porterà avanti potrà avere importanti ricadute anche sull'industria, riuscendo, per esempio, ad aprire un nuovo mercato legato ai moduli acceleranti al plasma che stiamo progettando al PLASMA\_LAB. Inoltre, quando EuPRAXIA entrerà in funzione, l'industria stessa potrà trarre beneficio dalle nuove sorgenti di radiazione X disponibili presso i LNF ed eventualmente utilizzarle per applicazioni di loro interesse quali ad esempio test di irraggiamento di materiali.