

Overview of Laser/Beam Plasma Interaction and Inertial Confinement Fusion Research and Developments in Italy

Fabrizio Consoli¹ e Anna Giribono²

¹ ENEA, Dipartimento Nucleare, Centro Ricerche Frascati - Fabrizio.Consoli@enea.it

² INFN, Laboratori Nazionali di Frascati - Anna.Giribono@Inf.infn.it

Conferenza Italiana Plasmi (CIP); 3-6 Febbraio 2026, ENEA C.R. Frascati

Introduzione

- L'Italia vanta una lunga e prestigiosa tradizione di ricerca e sviluppo nel campo dell'interazione di laser e di fasci di particelle con plasmi e della fusione nucleare a confinamento inerziale, a partire dal secolo scorso e che abbraccia molte decadi.
- Nel nostro Paese sono state condotte pionieristiche ricerche teoriche e sperimentali in questo ampio settore, fornendo ai nostri gruppi di ricerca italiani le conoscenze e le competenze necessarie per costruire progressi e sviluppi significativi.
- Quest'area di ricerca comprende
 - interazione di laser e fasci di particelle con plasmi
 - fusione nucleare a confinamento inerziale
 - idrodinamica ed instabilità nei plasmi prodotti mediante laser
 - plasmi ad alta densità di energia
 - sorgenti di radiazione elettromagnetica e particellare basate su laser e su plasma
 - interazione di laser ultra-intensi con la materia
 - fisica dei campi intensi
- Le attività di ricerca correlate includono modellistica teorica e numerica, preparazione ed esecuzione di esperimenti e sviluppo di diagnostiche dedicate.
- In questa presentazione illustreremo le attività italiane attuali in questo settore, collegandole al contesto internazionale e alle prospettive di questo ambito.

Un po' di storia...

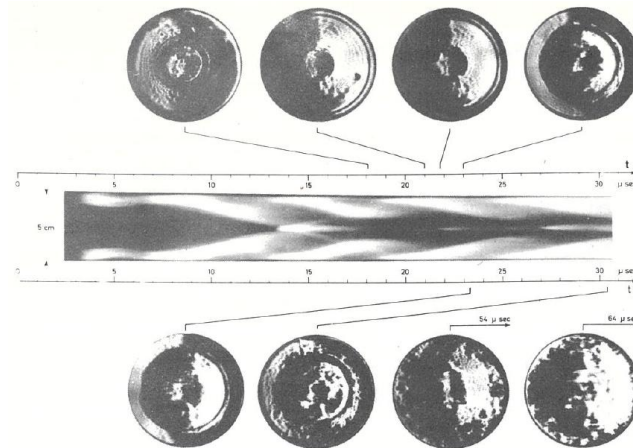
- Come noto, il **16 maggio 1960** Theodore H. Maiman mise in funzione il primo laser, presso i laboratori Hughes Research in California. Era un laser a stato solido a rubino, che produceva un raggio laser di colore rosso (lunghezza d'onda 694 nm).
- Pochi mesi dopo, nel 1961, quello che probabilmente è stato il primo sistema laser italiano fu approntato e messo in funzione presso il Laboratorio Gas Ionizzati del CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare, poi ENEA) dal gruppo di **Ascoli-Bartoli**, grazie all'aiuto di **Franco Rasetti** che portò con sé dagli USA un prototipo di barra di rubino sintetico.
- Con questa nuova sorgente il gruppo riuscì ad ottenere, proprio l'anno successivo (1962) le prime misure **Shadowgrafiche e Schlieren dei plasmi**, poi pubblicate nel 1963. Queste tecniche di diagnostica del plasma sono standard in tutti gli impianti laser del mondo, e non solo.

Development of Schlieren Technique in Plasma Diagnostic by using a Pulsed Ruby-Laser

U. Ascoli-Bartoli*, S. Martellucci and E. Mazzucato**

Laboratorio Gas Ionizzati - Frascati, Roma

Associazione EURATOM - CNEN

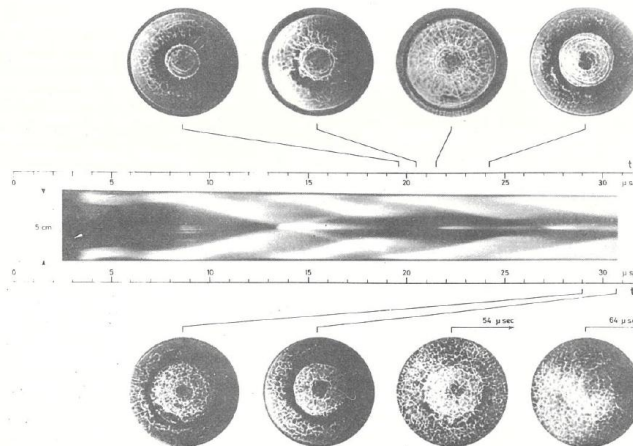


Experimental Detection of Plasma Turbulence by Shadowgraph Technique

U. Ascoli-Bartoli*, S. Martellucci and E. Mazzucato**

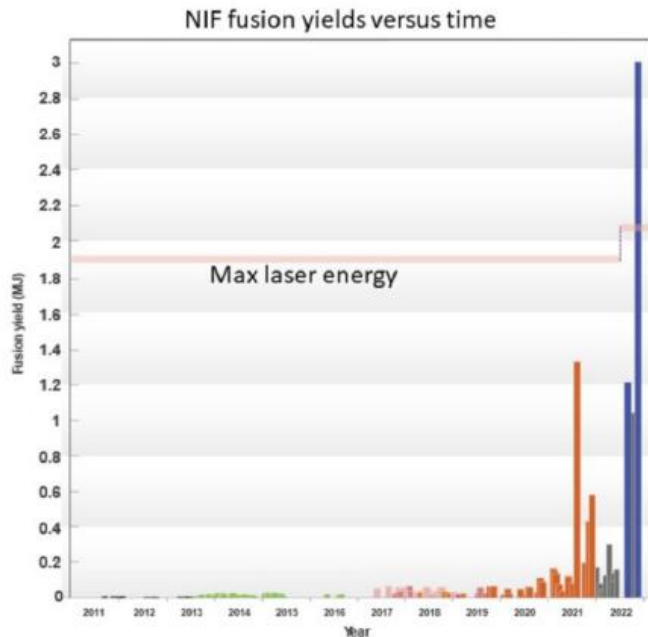
Laboratorio Gas Ionizzati - Frascati, Roma

Associazione EURATOM - CNEN



Fusione nucleare a confinamento inerziale

- Il 5 dicembre 2022 alla National Ignition Facility (NIF) dei Lawrence Livermore National Laboratories è stato ottenuto un risultato storico: per la prima volta si è ottenuta più energia da fusione, mediante approccio inerziale, di quella dei laser usati per generare l'esperimento
- Per la prima volta nella storia si è prodotta 3.15 MJ di energia da fusione con schema inerziale, a fronte dei 2.05 MJ di energia dei laser. Cioè si è prodotta $3.15 - 2.05 = 1.10$ MJ di energia in eccesso. Con un guadagno G pari a 1.53 (= 153%).
- Il risultato viene a seguito di progressi costanti durante gli anni, ed in particolare dopo i grossi risultati di agosto 2021, in cui si erano ottenuti già 1.35 MJ
- A questo fanno seguito una serie di risultati successivi
 - Luglio 2023 (3.9 MJ a fronte di 2.05 MJ laser $\rightarrow G = 1.90$)
 - Febbraio 2024 (5.2 MJ di energia a fronte di 2.2 MJ laser $\rightarrow G = 2.36$)
 - Aprile 2025 (8.6 MJ di energia a fronte di 2.08 MJ laser $\rightarrow G = 4.13$)



Fusione nucleare a confinamento inerziale

- Reattore? Non ancora, bisogna bilanciare l'energia dei laser
→ servono 2 ordini di grandezza di incremento
- Diverse vie di ricerca.
 - Approccio Diretto: Shock Ignition e Fast Ignition
 - Laser più efficienti
 - Capsule fatte meglio (foam,...)
- In Europa **HIPER+ group**
 - Necessità di un programma IFE coerente in Europa, con la missione di dimostrare l'ignizione per la fusione nucleare mediante laser e di sviluppare tecnologie per un futuro reattore a fusione per scopi energetici civili.
 - Programma associato al design e costruzione di una dedicata laser facility per attività di ricerca e sviluppo
 - Strutturato in diversi assi
 - **Asse A:** Fisica e Tecnologia per IFE
 - **Asse B:** Sviluppo di tecnologia laser per IFE, costruzione di sistemi laser IFE
 - **Asse C:** Scienza dei materiali e tecnologia del target e del reattore
 - **Asse D:** IFE community building, project management e sviluppo competenze

HIPER+ Group e iniziative europee

- **Dimitri Batani, Université de Bordeaux, Celia, France**
- **Arnaud Colaïtis, Université de Bordeaux, Celia, France**
- **Fabrizio Consoli, ENEA C.R. Frascati, Italy**
- **Colin Danson, AWE & Blackett laboratory, United Kingdom**
- **Leonida Gizzi, Istituto Nazionale di Ottica, CNR, Pisa, Italy**
- **Javier Honrubia, estiae, universidad politecnica de madrid, Spain**
- **Thomas Kuehl, gsi, Darmstadt, Germany**
- **Sébastien Le Pape, ecole poytechnique, LULI, Palaiseau, France**
- **Jean-Luc Miquel, Association Lasers and Plasmas & CEA/dam, France**
- **Manolo Perlado, instituto Fusión Nuclear “G. Velarde”, Madrid, Spain**
- **Robbie Scott, Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Harwell, UK**
- **Michael Tatarakis, Institute of Plasma Physics and Lasers, Hellenic Mediterranean University, Greece**
- **Vladimir Tikhonchuk, Université de Bordeaux, France & ELI-Beamlines, Czech Republic**
- **Luca Volpe, Estiae, Eniversidad politecnica de Madrid & Centro de Laseres Pulsados, Spain**

HIPER+ Group e iniziative europee

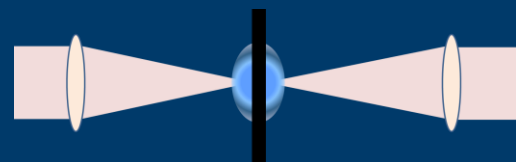
- **EUROfusion: Enabling Research project on IFE:** “Conceptual design for a European High Power Laser Fusion Research Facility (HiPER+RF)” (partecipanti italiani: ENEA-C.R. Frascati, INO-CNR, POLIMI, UniMB, INFN-LNS)
- **Laserlab Europe AISBL supporta 3 ICF-related groups:**
 - Expert group in IFE/ICF
 - Expert group in micro- nano-structured materials (Lead ENEA)
 - Expert group in laser-generated EMP (Lead ENEA)
- **COST Actions:**
 - CA21128 - PROton BORon Nuclear fusion: from energy production to medical applicatiOns (PROBONO)
 - HiPER+n (led by Cirrone), submitted in 2025
- **Nuovo progetto supportato da EURATOM: GO4FUSION**
 - accelerare lo sviluppo della fusione nucleare creando una nuova **Partnership Pubblico-Privata (PPP)** europea, una collaborazione co-programmata tra enti pubblici e privati. Finanziato dalla Commissione Europea attraverso Euratom Coordination and Support Action.

A livello italiano

- Coinvolgimento storico delle Istituzioni italiane (ENEA, CNR, Università di Roma La Sapienza, Università di Pisa, ...).
- Recente coinvolgimento anche di altre Istituzioni e recenti attività della società RSE, anche con un MoU con Blue Laser Fusion
- Collaborazione con i principali gruppi internazionali sull'IFE
 - In Europa
 - Negli USA (NIF, Omega)
 - In Asia: Giappone, Cina
- Finora nessun finanziamento diretto governativo alle attività IFE.
- Qualche finanziamento molto limitato
 - da parte di alcuni progetti PRIN (Progetti di Rilevante Interesse Nazionale)
 - Recente progetto INFN-FUSION
- Inclusione delle attività di inerziale all'interno del Piattaforma Nazionale per un nucleare sostenibile (PNNS)

ABC LASER

ENEA Centro Ricerche Frascati



- Più grande impianto laser italiano
- **Laser con la maggiore energia per impulso in Italia**
- Corredato da oltre 40 diagnostiche impiegate simultaneamente
- **Per studi sperimentali di Inerziale e di interazione laser-materia ad alta intensità**
- **Laser e Radiazione secondaria generata (particellare ed elettromagnetica, per applicazioni anche in contesti industriali (EUROfusion Technology Transfer,...) (Horizon Europe: ReMade,...))**

F. Consoli, M. Cipriani, M. Scisciò, M. Alonzo, F. Filippi, P.L. Andreoli, G. Cristofari, G. Di Giorgio, E. Di Ferdinando, V. Piergotti, B. Grau (Ph.D Tor Vergata), L. Manzoni (Ph.D Sapienza)

Active medium	Nd:phosphate glass
Fundamental wavelength	1054 nm
Number of beams	2 (counter-propagating)
Energy	100 J per beam
Pulse duration	2.5 - 7 ns
Beam diameter	75 mm
Focusing	f/1 and f/2.5 lenses
Minimum focal spot diameter	40 μm
Maximum Intensity	$2 \times 10^{15} \text{ W cm}^{-2}$
Polarization (laser output)	Linear
Polarization on target	Circular
Contrast	1×10^5
Beam integrator	Induced Space Incoherence



Two-beam neodymium-phosphate glass laser

--- Higher-harmonic operation ---

Frequency converter	2ω
Number of beams	- 2 at 527 nm or - 1 at 1054 nm + 1 at 527 nm
Wavelength	527 nm
Energy	- $2 \times 40 \text{ J}$ at 527 nm - 100 J at 1054 nm + 40 J at 527 nm or

Materiali micro-strutturati - foam

- **Materiali micro-strutturati (foam):** disposizione casuale di filamenti o membrane separati da ampi spazi vuoti.
- **Numerose applicazioni nell'Inerziale, ed estremamente strategici nel panorama mondiale**
 - **Migliore accoppiamento e maggiore uniformità del laser sul bersaglio**
 - **Impiego per generazione di radiazione gamma e particellare ad alta efficienza**
 - ...
- **Realizzate con metodi chimico-fisici e recentemente con stampa 3D avanzata**
- **In ABC: setup sperimentale costruito per la caratterizzazione laser-foam x inerziale → benchmark codici di calcolo, simulazioni su CRESCO6**
- **Collaborazioni molto estese**
 - GSI (O.Rosmej); Politecnico Milano; Politecnico Torino, NIF,...
 - Esperimento finanziato a NIF (PI F.Consoli, febbraio 2026)
 - Esperimento finanziato a LMJ (PI J. Cikhardt, 2027)
 - Coordinamento Expert Group Laserlab-Europe (M.Cipriani) con oltre 20 istituzioni straniere

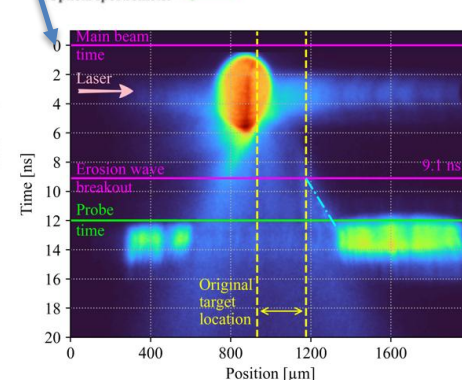
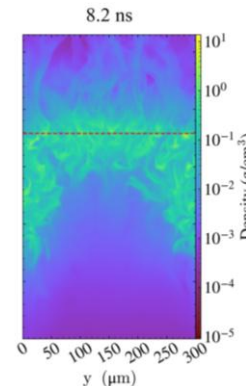
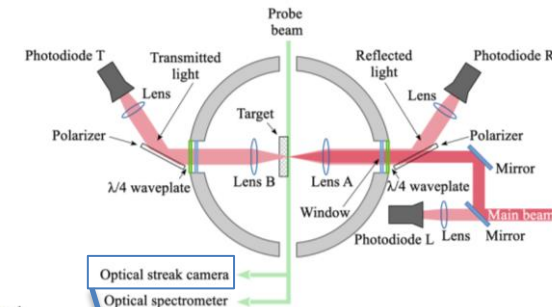
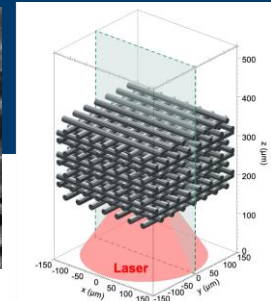
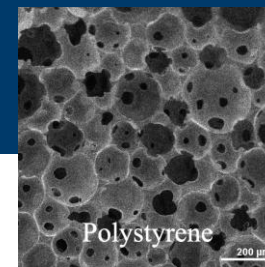
M. Cipriani, et al Matter Radiat. Extremes 11, 027401 (2026)

A. Maffini, et al, *Laser and Particle Beams* 2023, 1214430 (2023)

M. Cipriani, et al, *High Power Laser Science and Engineering* 9, e40 (2021).), **Editor's Pick**

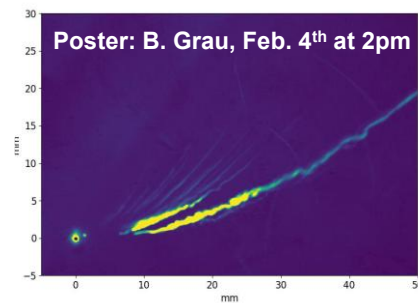
O.N. Rosmej, et al , *Plasma Phys. Control. Fusion* 62, 115024 (2020)

M. Cipriani, et al, *Physics of Plasmas* 25, 092704 (2018), **Editor's Pick**

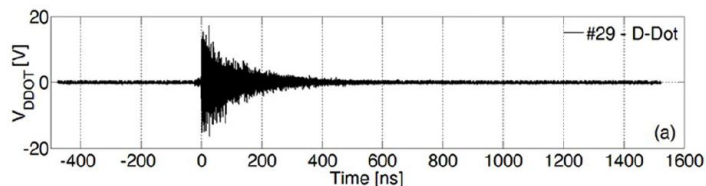
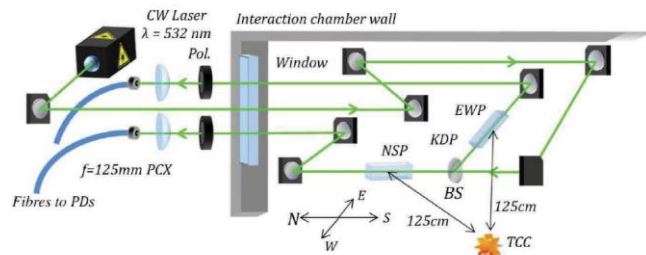


Laser-generated electromagnetic pulses (EMP)

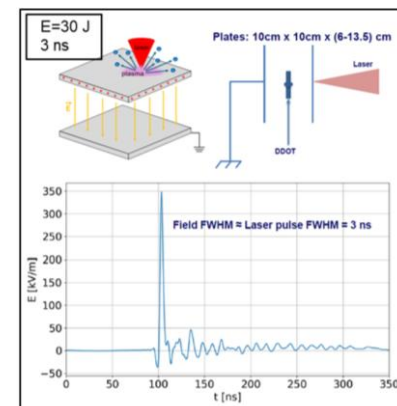
- Impulsi elettromagnetici transienti (EMP) ad alta intensità (MV/m) generati da interazione laser materia: da MHz a THz.
- **Problema tecnologico di primo interesse per Inerziale e per accelerazione laser-plasma**
- Ricerca su sorgenti, rivelazione (sonde conduttive, dielettriche e non convenzionali), mitigazione e sviluppo diagnostiche robuste al riguardo, impiego in contesti anche industriali (Brevetto ENEA e EUROfusion Technology Transfer)
- **In ABC: setup sperimentale costruito per la caratterizzazione ed impiego EMP per applicazioni multidisciplinari**
- Collaborazioni molto estese in ambito internazionale → Coordinamento Expert Group Laserlab-Europe (F. Consoli) con oltre 23 istituzioni straniere



Poster: L. Manzoni, Feb. 4th at 2pm



J. Cikhardt, et al, High Power Laser Science and Engineering, (2025), 13, e57
 P. Bradford, et al, High Power Laser Science and Engineering, (2024), 12, e98
 M. Scisciò et al, High Power Laser Science and Engineering 9, e64 (2021)
 F. Consoli et al., High Power Laser Science and Engin. 8, e22 (2020), **Best Paper of the 2020**
 F. Consoli et al, Phil. Trans. Royal Society A - 379: 20200022 (2020)
 F. Consoli, et al, Scientific Reports 9, 8551 (2019)
F. Consoli et al., ENEA Patent PCT/IB2020/057464, WO2021/024226



Tecniche diagnostiche e dispositivi

- **Rivelatori a tempo di volo basati su diamante per particelle generate dal laser**

M. Salvadori, et al., Scientific Reports 11, 3071 (2021)

M. Salvadori et al., High Power Laser Science and Engineering 10, e6 (2022)

- **Spettrometria Thomson per la rivelazione di ioni**

M. Scisciò et al., Journal of Instrumentation 17, C01055 (2022)

G. Di Giorgio et al., Journal of Instrumentation 15, C10013 (2020)

- **Diagnostiche a tempo di volo al diamante per ioni (coll. Tor Vergata)**

- **Sviluppo di uno spettrometro per elettroni generati da laser a bassa energia (fino a 10 keV)**

- **Spettrometri Thomson - ioni di bassa energia (da 10 keV) e ad alta sensibilità (single particle detection) e per identificazione particellare (coll. INFN-Fusion)**

G.A.P. Cirrone et al., Laser and Particle Beams 43, e4 (2025)

M. Salvadori et al., Laser and Particle Beams 2023, 7831712 (2023)

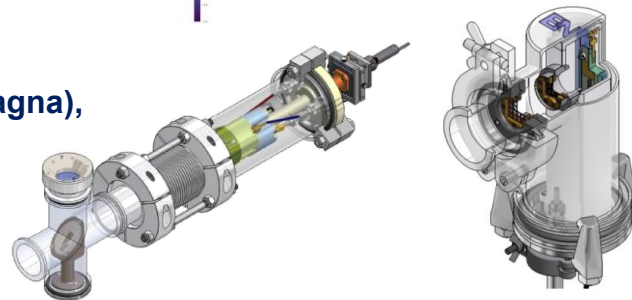
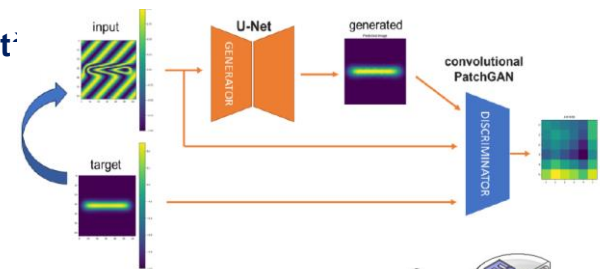
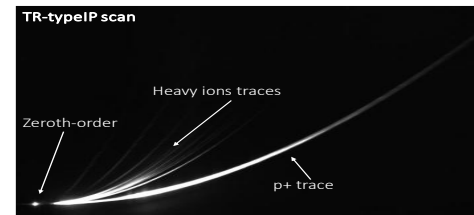
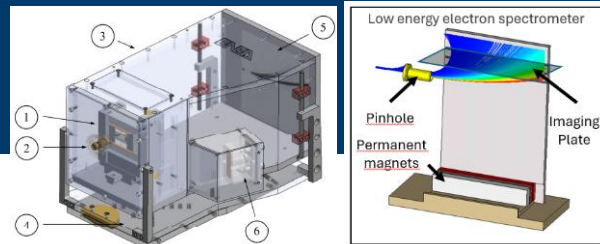
M. Scisciò et al., Laser and Particle Beams 2023, 3531875 (2023)

F. Consoli et al., Frontiers in Physics 8, 561492 (2020)

- **Interferometria/shadografia ad alto repetition rate**

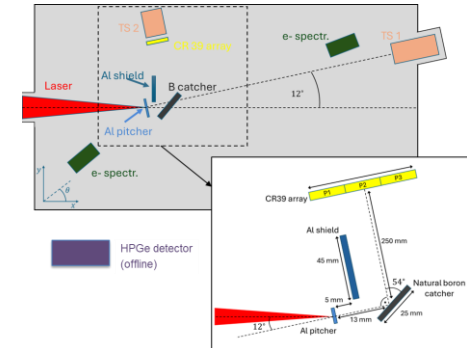
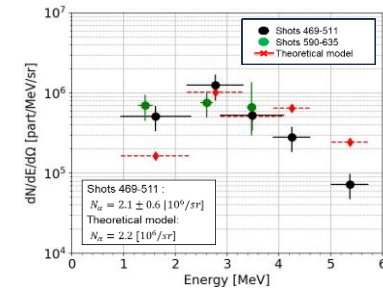
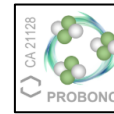
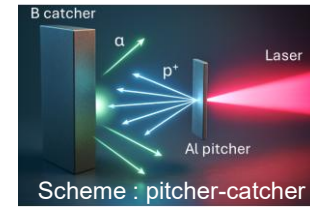
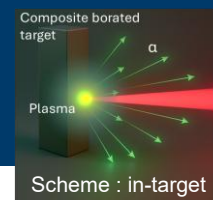
Filippi F., et al. Journal of Instrumentation 18.05 (2023): C05013

- **Test diagnostiche ed impiego in ABC (ENEA, Italia), Vega III (CLPU, Spagna), Asterix (PALS, Cechia), L3 (ELI Beamlines, Cechia), Vulcan PW (RAL, UK)**



Laser-driven low-rate nuclear reactions (DD, p- ^{11}B ,...)

- Laser per iniziare reazioni nucleare a basso rate (DD, p- ^{11}B , p+ ^6Li ,...) in plasmi, e in solidi, per
 - determinare sezioni d'urto a bassa energia (applicazioni astrofisica)
 - Impiego di sorgenti localizzate di particelle alpha e neutroni → interesse industriale
- Schemi sperimentali 'pitcher-catcher' ed 'in target'
- Laser-driven p- ^{11}B fusion at high-repetition rate at the VEGA III facility (CLPU) (2022 and 2023) **Poster: M. Scisciò, Feb. 4th at 2pm**
 - M. Scisciò et al., Matter and Radiation at Extremes 10, 037402 (2025)
 - M. Huault et al., Physics of Plasmas 32, 013102 (2025)
 - M.R.D. Rodrigues et al., Matter and Radiation at Extremes 9, 037903 (2024)
 - K. Batani et al., High Power Laser Science and Engineering 13, e11 (2025)
- Laser-driven p- ^{11}B fusion on kJ-class laser at the Asterix facility (PALS), within the INFN "FUSION" (2024)
 - A. Raso et al., Review of Scientific Instruments (2025)
 - G.A.P. Cirrone et al., Laser and particle Beams 43, e4 (2025)
- Ulteriori esperimenti svolti ad ELI-Beamlines (2024) ed al GSI (2025)
- Caratterizzazione degli ioni accelerati mediante TNSA, a vari angoli
 - Poster: M. Alonzo, Feb. 4th at 2pm**
- Diagnostiche per single particle identification **Invited Talk: F. Filippi, Feb. 5th at 3:40pm**

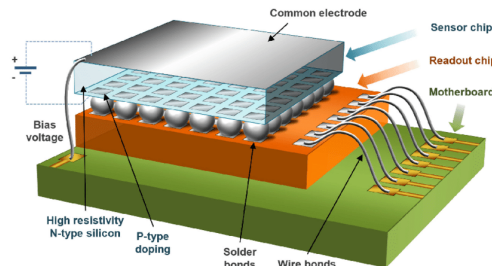


The QUAD Timepix3 detector for D-D neutron at ELI-Beamline - Lab NIXT ENEA-Frascati

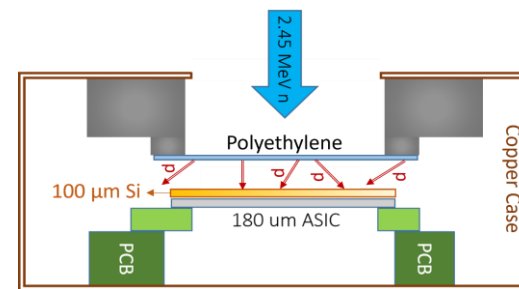
D. Pacella, F. Cordella,
G. Claps, V. De Leo

- 2D matrix 256x256 pixel, 55 micron each,
- active area 14mm x 14 mm, 100 micron Si thickness
- It enables the determination of the energy deposited in each pixel and the identification of the ionizing particle interacting with the detector through morphological analysis of the particle's track.
- The TPX3 detector can simultaneously acquire the released energy (ToT) and the particle's time of arrival (ToA).
- The active sensor of the TPX3 detector can be composed of different semiconductor materials (Si, Cd, te, diamond..)

Timepix3 Silicon detector

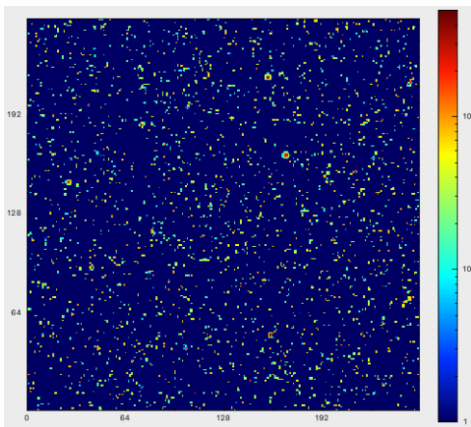


Setup @ ELI Beamlines

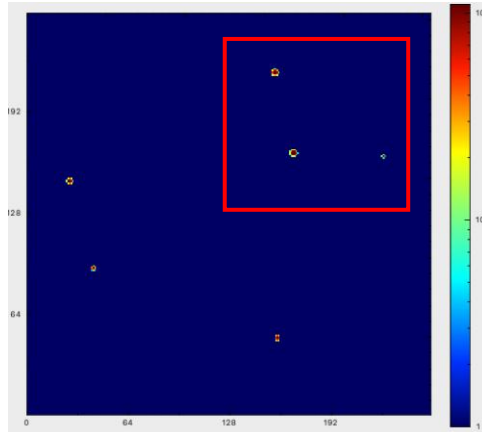


Calibration at Frascati FNG with Am-B neutron source (about 3 MeV neutrons)

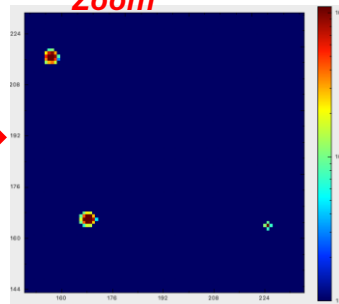
Before cut (gammas + neutrons)



After 3° cut (only neutrons)

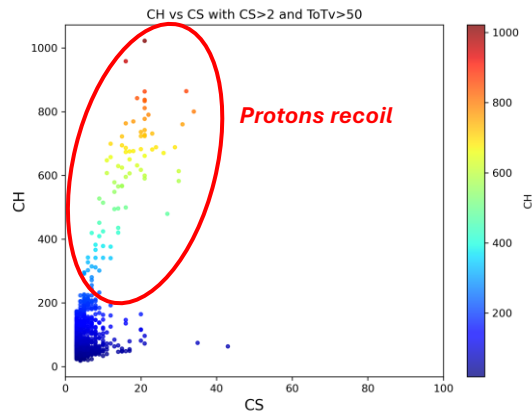


Zoom



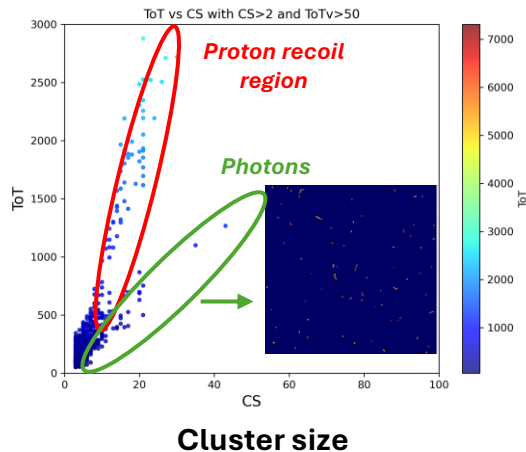
N° Clusters with $CS > 2$ & $ToT > 50$ & $CH^* > 200$ & $Rnd > 70$: 88

CH (Cluster Height) =
maximum ToT
value in a cluster



Cluster size = length of the trace

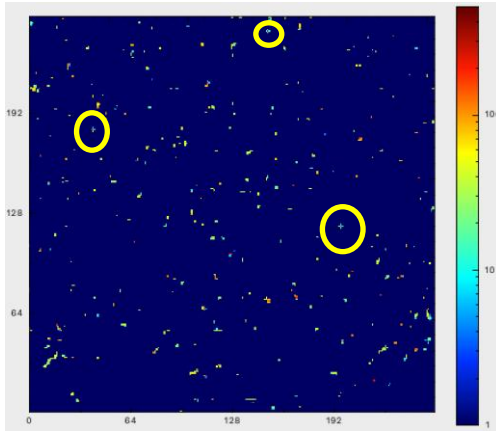
Total ToT
= total energy
released by
the trace



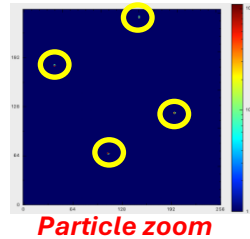
ELI deuterated target vs non deuterated target

D-D neutrons (2.5 MeV) are expected 80 ns delayed due to the time of flight

Before cut



After 3° cut

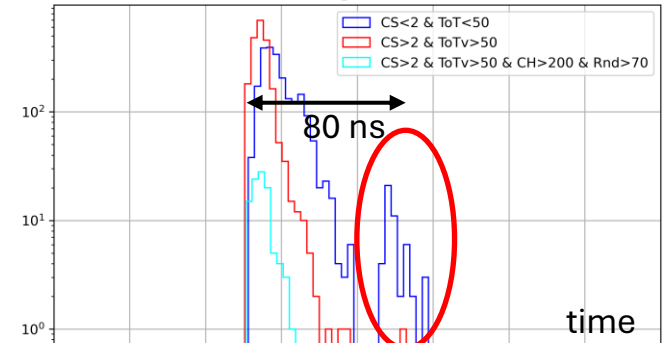


Particle zoom

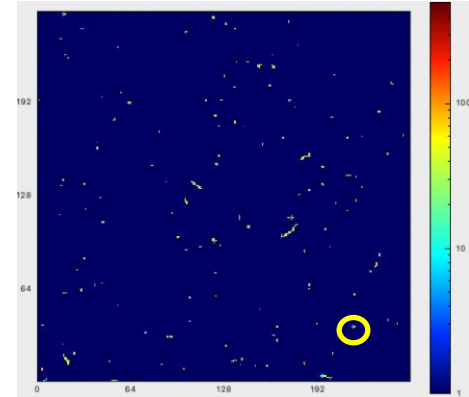
Deuterated

N° Clusters with CS>2 & ToT>50 & CH>200 & Rnd>70: 115

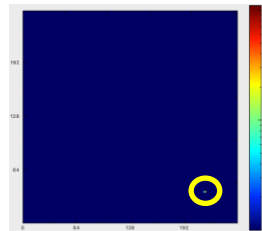
FToA Data taking 04-06-2024 Run 1



Before cut

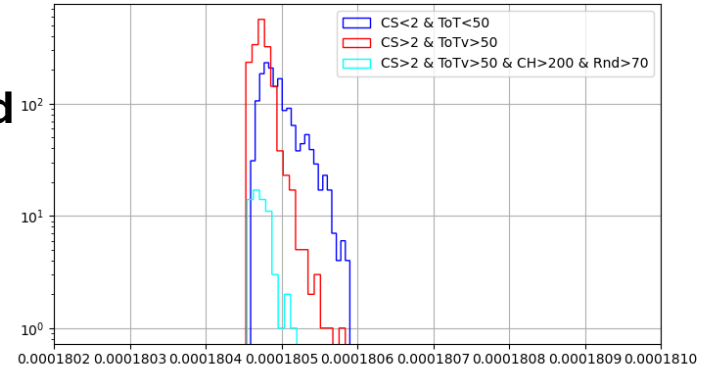


After 3° cut



Non- Deuterated

FToA Data taking 05-06-2024 Run 1



Intense Laser Irradiation Lab – Beamline a 100 Hz



THE Tuscany Health Ecosystem



I-PHOQS
INTEGRATED INFRASTRUCTURE INITIATIVE
IN PHOTONIC AND QUANTUM SCIENCES



Finanziato dall'Unione europea
NextGenerationEU

Ministero dell'Università e della Ricerca

Italiadomani
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

1. **Aggiornamento del sistema laser** esistente (220 TW) per una maggiore stabilità e controllo
2. **Nuovi sistemi laser** per un funzionamento ad alta frequenza di ripetizione (100 Hz – 1 J):
 - a. Compressore ad alta potenza media
 - b. Trasporto ad alta potenza media verso il bersaglio
 - c. Bersaglio ad alta frequenza di ripetizione
 - d. Raccolta dati ad alta frequenza di ripetizione
3. **Sviluppo di nuove infrastrutture**, compreso un bunker sotterraneo per l'accesso degli utenti alle linee di fascio

*Lavori di miglioramento finanziati ed in corso –
completamento previsto entro il 2026.*

PEOPLE

Leonida A. **GIZZI** (Head)

Fernando **BRANDI**

Gabriele **CRISTOFORETTI**

Federica **BAFFIGI**

Petra **KOESTER**

Luca **LABATE**

Lorenzo **FULGENTINI**

Gabriele **BANDINI**

Alessandro **FREGOSI**

Daniele **PALLA**

Simona **PICCININI**

Martina **SALVADORI**

Mohamed **EZZAT** (postdoctoral fellow)

Federico **AVELLA** (PhD, UniPi, I-PHOQS)

David **GREGOCKI** (PhD, UniPi, EuPRAXIA)

Caterina **MOZZO** (PhD, UniPi, RSE)

Simon **VLACHOS** (PhD, UniPi, I-PHOQS)

Shang **TAN** (PhD, Hunan University)

Paolo **TOMASSINI** (@ ELI-NP Coll.)

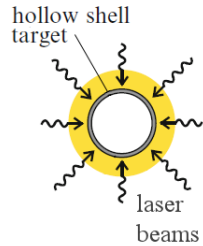
Giulia **DI SALVO** (AUKELOS)

Livia **FABIANO** (AUKELOS)

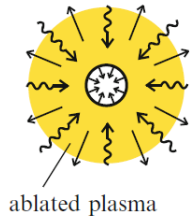
<https://www.pacri.eu/>

Interazione Laser-Plasma nella Fusione a Confinamento Inerziale

a irradiation

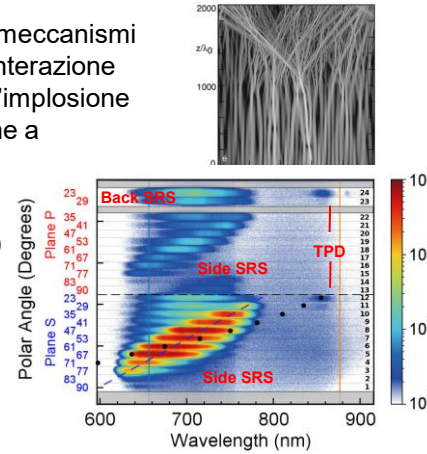


b implosion

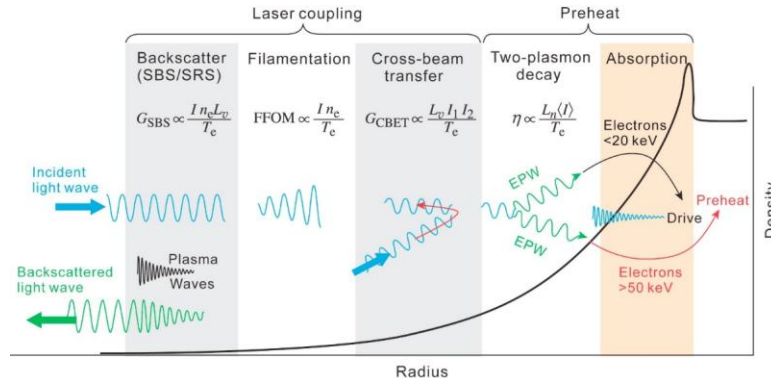


Sviluppo di diagnostiche e studio di meccanismi non collisionali di propagazione ed interazione di fasci laser in un plasma ai fini dell'implosione e ignizione del target DT nella fusione a confinamento inerziale (ICF):

- Stimulated Brillouin Scattering (SBS)
- Stimulated Raman Scattering (SRS)
- Two Plasmon Decay (TPD)
- Filamentazione / Self Focussing
- Generazione di elettroni veloci



Campagne sperimentali in medium/large international Facilities (PALS, ELI-BL, Gekko XII, Phelix, Omega, Vulcan, Laser MegaJoule, ecc.)



Training of PhD and young researchers

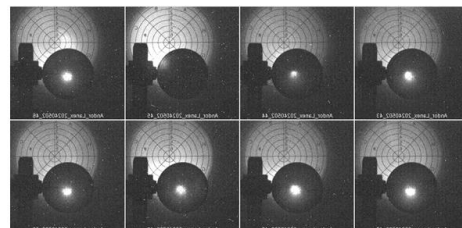
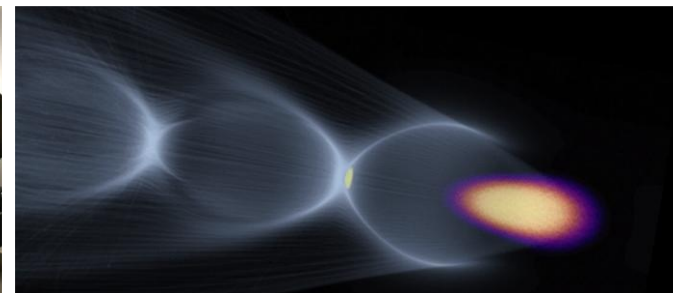
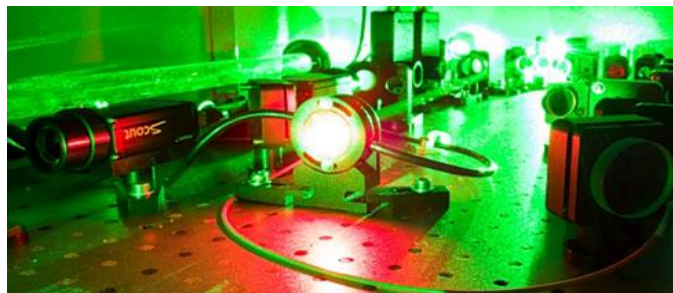


LaserFusion
education - training

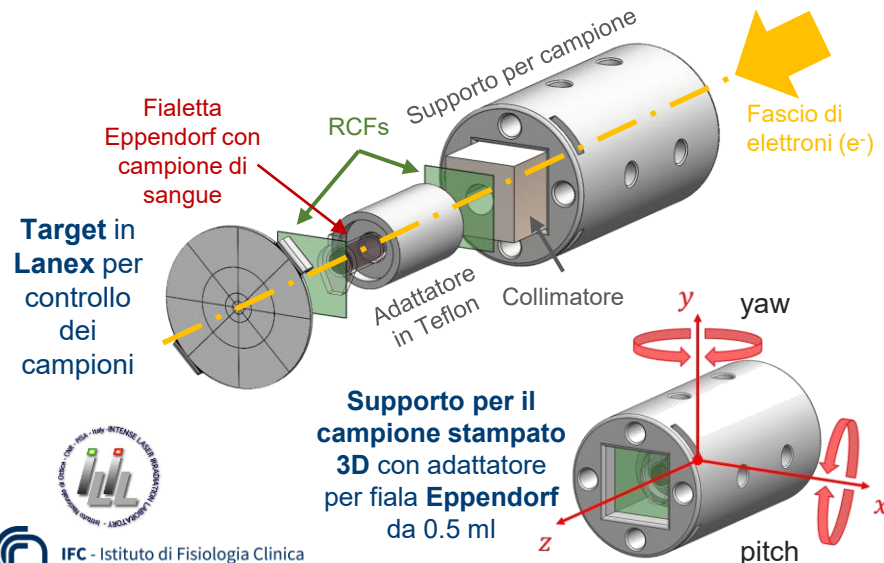
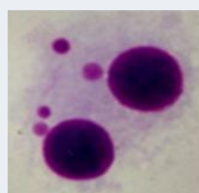
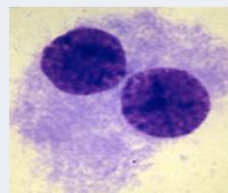
HiPER+
EUROPEAN LASER FUSION PROJECT

EUROfusion

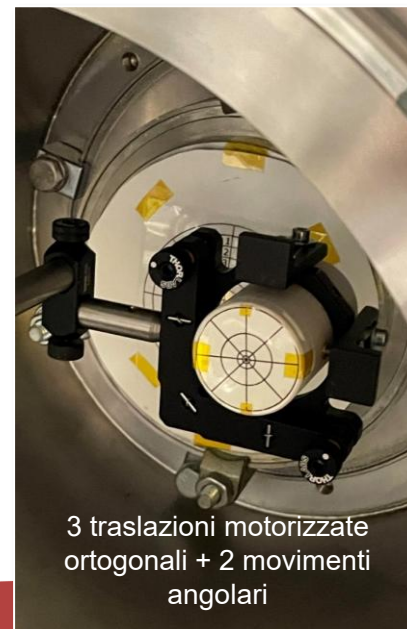
ILIL – Radiobiologia con Acceleratori Laser-plasma



Valutazione del danno radiobiologico con TEST DEL MICRONUCLEO

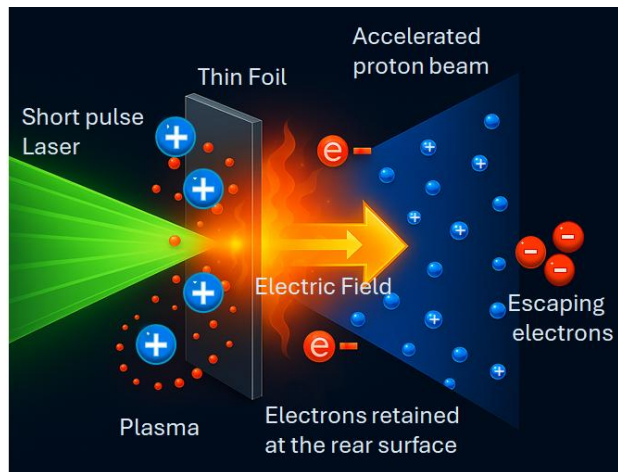


IFC - Istituto di Fisica Clinica
Consiglio Nazionale delle Ricerche



Accelerazione di Protoni tramite laser e alcune delle applicazioni

Target Normal Sheath Acceleration



Studio dell'interazione laser-plasma utilizzando laser duplicati in frequenza per irraggiare bersagli sottili e/o nanostrutturati

→ Effetti sull'emittanza degli e-
E. J. Hume et al. HPLSE 13:e14 (2025)

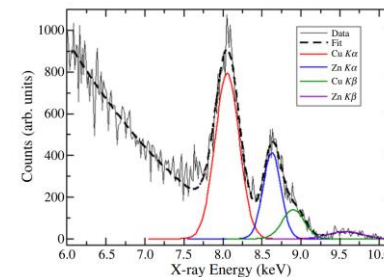
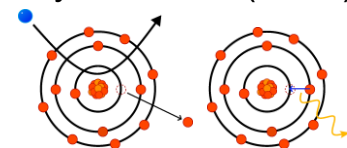
→ Effetti sull'accelerazione di protoni

G Cristoforetti et al. Plasma Phys. Control. Fusion 62 114001 (2020)

L.A. Gizzi Phys. Rev. Research 2, 033451 (2020)

Ion Beam Analysis: Particle Induced X-Ray Emission (PIXE)

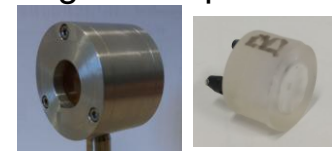
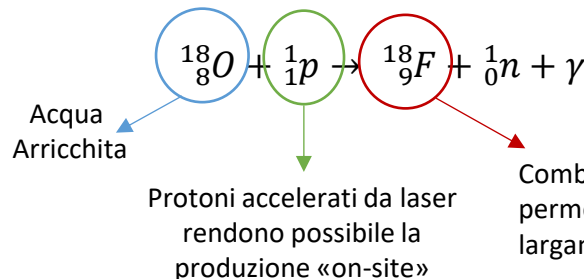
Fasci di particelle energetiche, in questo caso protoni, vengono usati per irradiare il campione da caratterizzare. Le particelle incidenti, interagendo con il materiale, generano lacune nei gusci interni, con successiva emissione di radiazione caratteristica durante la de-eccitazione



L'analisi della radiazione emessa permette di determinare la composizione chimica del materiale e le rispettive concentrazioni.

M. Salvadori et al. Phys. Rev. Applied 21, 064020 (2024)

Produzione di Radiofarmaci: Fluorodeossiglucosio per PET



Combinato con il 2-deossiglucosio permette di ottenere l'FDG, largamente utilizzato nella PET

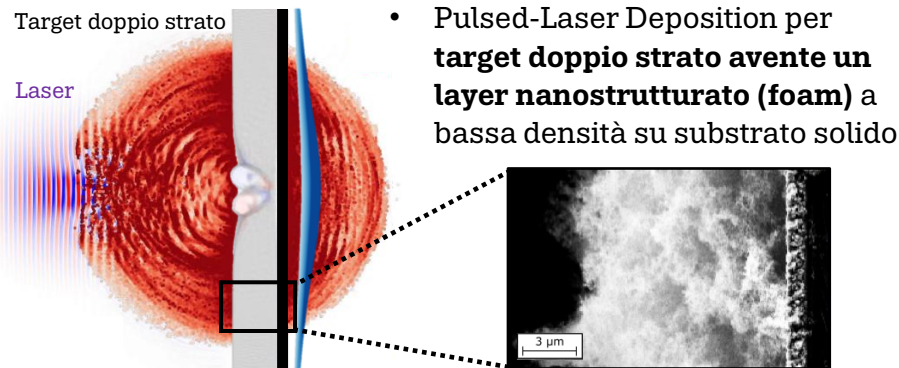
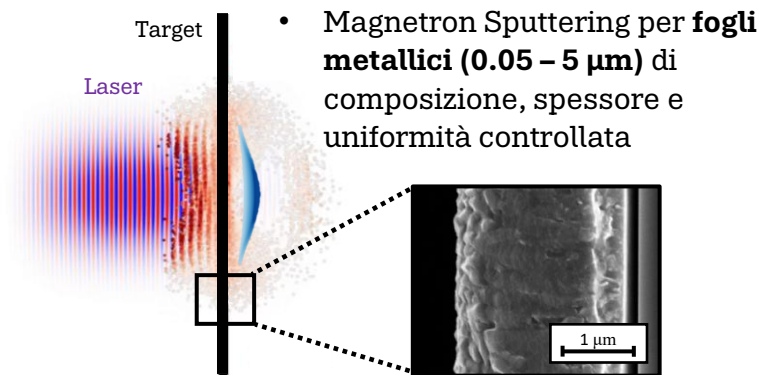
Attività sperimentali per studiare la generazione di radiazione da laser @ PoliMi



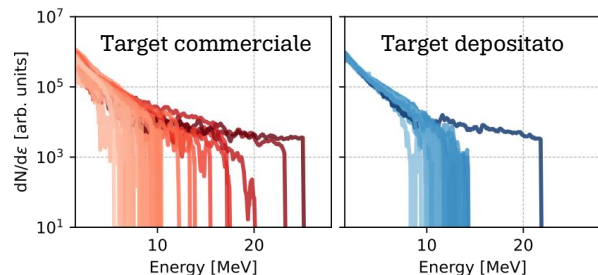
Produzione di target avanzati tramite tecniche Physical Vapour Deposition



Impiego in esperimenti di accelerazione di ioni e generazione di fotoni

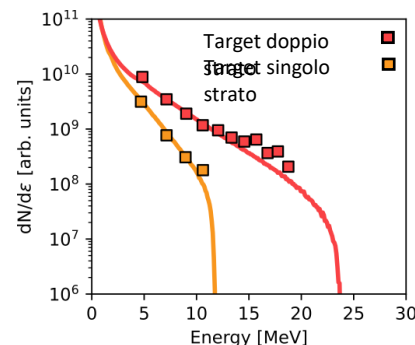


Maggior controllo su energia e numero di protoni



Maggior assorbimento del laser → Più protoni accelerati a energie più elevate

Collaborazioni con **eli** beamlines, **CLPU** CENTRO DE LASERES PULSADOS, **L4** e **ENEA**



Attività teoriche e computazionali per l'interazione laser-plasma @ PoliMi

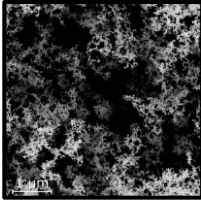


Codice sviluppato internamente per **studiare l'aggregazione di bersagli nanostrutturati**

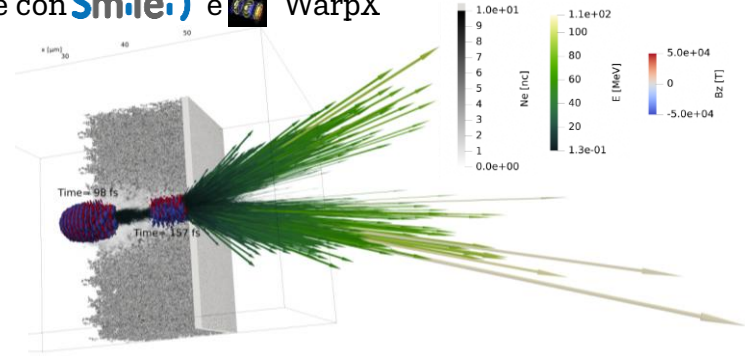
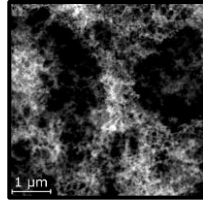


Input per **simulazioni Particle-In-Cell (PIC)** ad alta risoluzione svolte con **Smilei** e **WarpX**

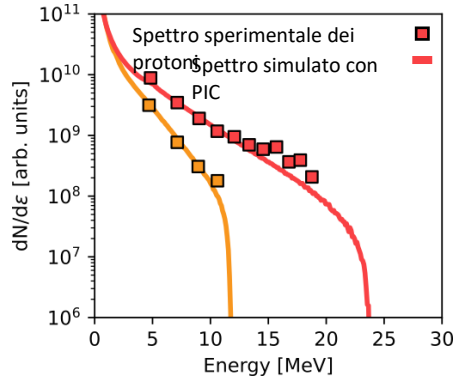
Foam simulata



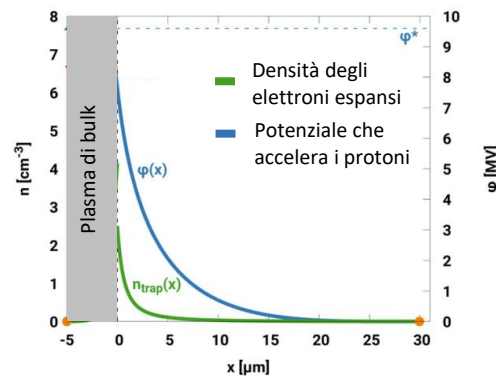
Foam reale



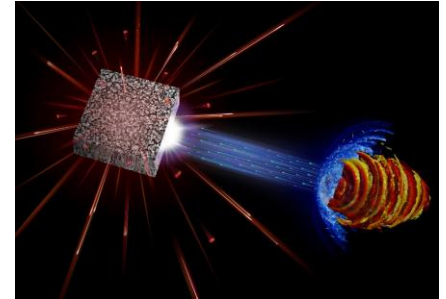
Design di esperimenti e interpretazione dei risultati



Supporto allo **sviluppo di modelli** teorici della



Studi di **fattibilità** delle **applicazioni** di sorgenti laser-plasma



A. Pazzaglia, et al., *Commun. Phys.*, 3.1 (2020):

A. Maffini, et al., *PPCF*, (2026), accepted.

I. Prencipe, et al., *NJP*, 23.9 (2021): 093015.

M. Galbiati, et al., *Sci. Rep.*, (2026), under review.

M. Galbiati, et al., *Front. Phys.*, 11 (2023): 1117543.

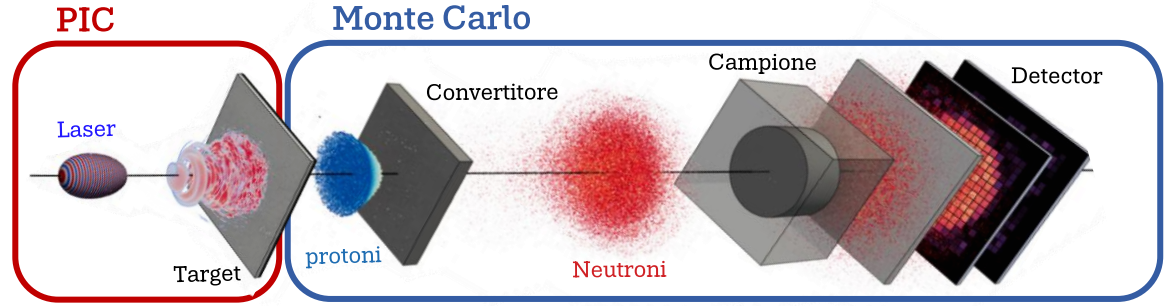
A. Formenti, et al., *PPCF*, 64.4 (2022): 044009.

<https://www.ensure.polimi.it/>

Studio delle applicazioni nella scienza dei materiali delle sorgenti da laser @ PoliMi

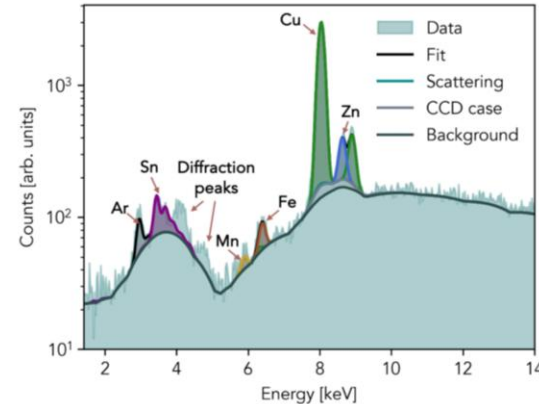
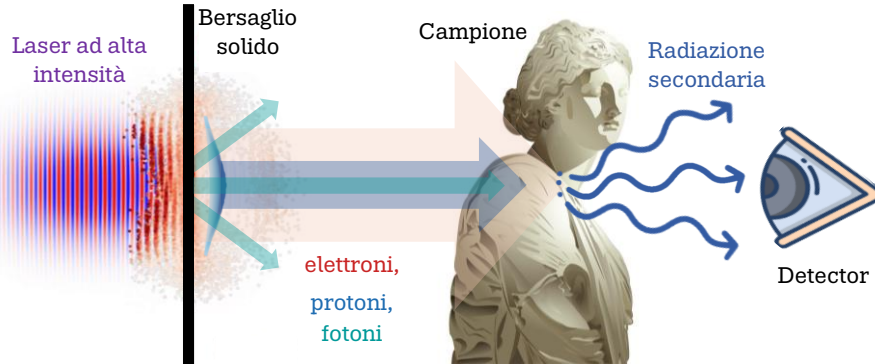


Accoppiamento tra **PIC** e **Monte Carlo** per studiare la **generazione di radiazione secondaria** (e.g. neutroni, gamma) e il suo **uso per tecniche di caratterizzazione** (e.g. imaging, analisi per attivazione)



Esperimenti di **irraggiamento di campioni** (e.g. **beni culturali**) con **protoni e fotoni da laser** per indurre emissione di raggi X caratteristici → caratterizzazione della composizione con tecniche di **Particle Induced X-Ray Emission (PIXE)** e **X-Ray Fluorescence (XRF) spectroscopy**

F. Mirani, Orale, Sessione della mattina 4 febbraio 2026, 2/2



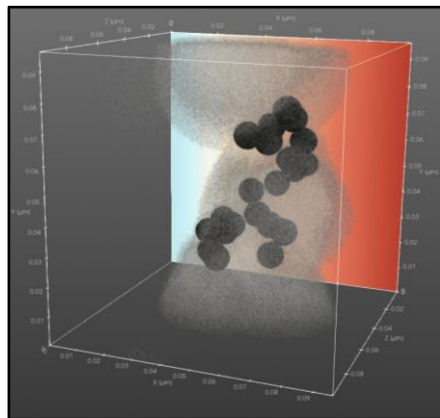
Collaborazioni con



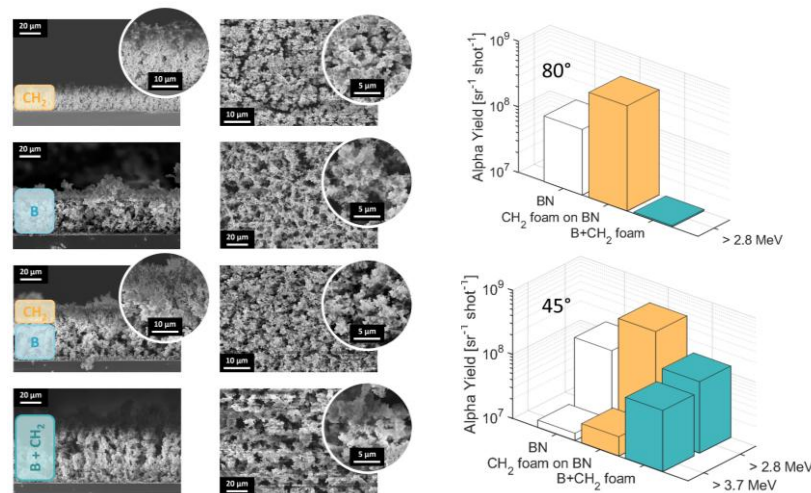
Studio di target nanostrutturati per fusione a confinamento inerziale e generazione di particelle α tramite reazioni fusione p-B @ PoliMi



- **Simulazioni** idrodinamiche ed **esperimenti** per studiare **l'assorbimento di impulsi laser al ns** in **foam** nanostrutturate $\rightarrow$ buone candidate come **ablatori** per direct drive ICF.
- Simulazioni PIC per investigare **l'omogenizzazione della nanostruttura** con ns-laser



- Deposizione di **foam arricchite di B e H** per indurre **reazioni $B^{11}(p,3\alpha)$** nel target. $\rightarrow$ Incremento nel numero di particelle α generate osservato sperimentalmente.



K. Ambrogioni, Sessione Poster 1 del 4 febbraio alle 14.00 (P. 5)

Collaborazioni con **ENEA** e **QUEEN'S UNIVERSITY BELFAST**

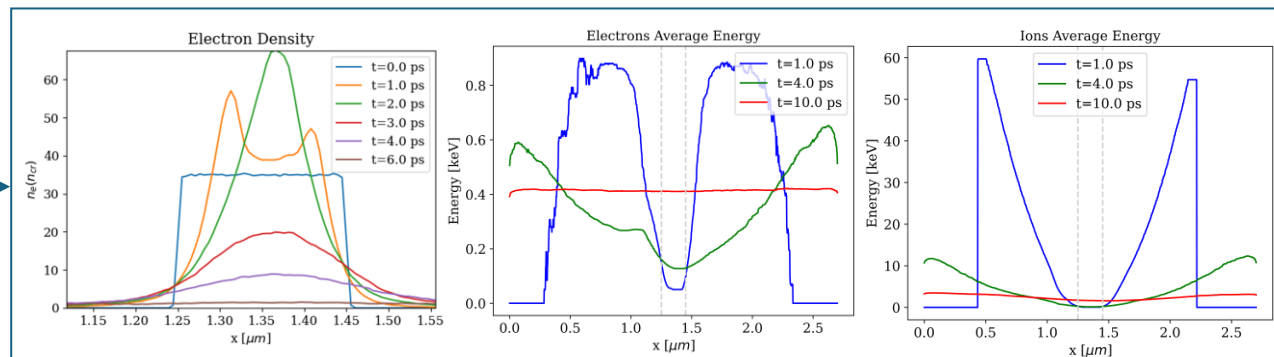
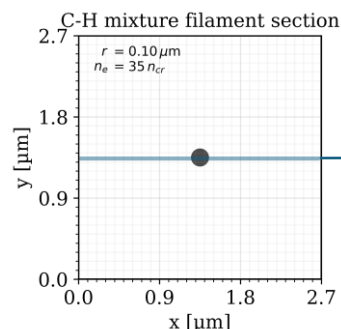
Interazione tra laser e materiali porosi (foam).

Analisi della microstruttura di un poro

R. Bonifetto, A. Froio,
R. Testoni, A. Zurzolo

Si è osservato sperimentalmente che **l'interazione tra laser e materiali porosi genera temperature ioniche molto alte** se comparate a materiali omogenei a parità di densità. [1]

Sono state condotte simulazioni cinetiche con il codice Particle in Cell SMILEI per capire come gli ioni vengono riscaldati e per comprendere quali sono i principali meccanismi di termalizzazione degli stessi.



Microstruttura di un poro utilizzata come configurazione iniziale nelle simulazioni (plastica TMPTA)

- Laser $\rightarrow I = 10^{14} \frac{W}{cm^2}$, $\lambda = 0.35 \mu m$
- Cilindro solido $d < \lambda$
- Condizioni al contorno periodiche in y

L'espansione del plasma è dovuta al contributo congiunto **dell'assorbimento risonante** e di quello **collisionale** nel caso di **polarizzazione nel piano di incidenza del laser**. L'ablazione è rilevante nei primi picosecondi.

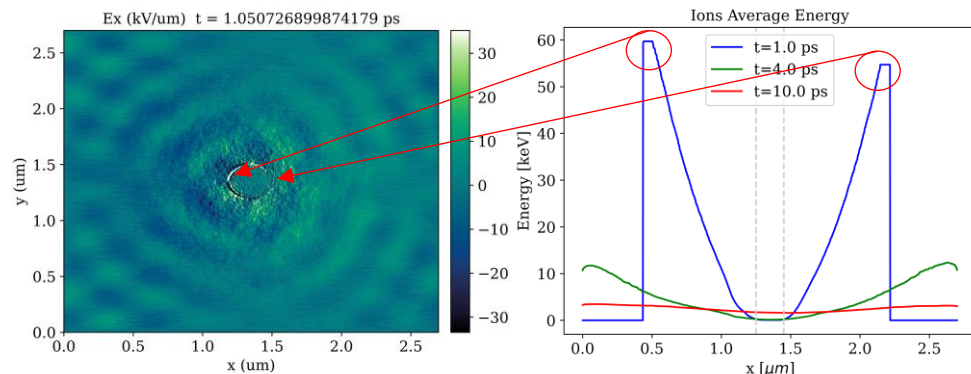
L'espansione è simmetrica e quasi neutra, sebbene **l'energia degli ioni sia molto più alta di quella degli elettroni**.

[1] Hudec, L. et al. (2025) "Investigation of ion temperature in low-density undercritical foams," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 67(2), p. 025022. Available at: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ada8db>.

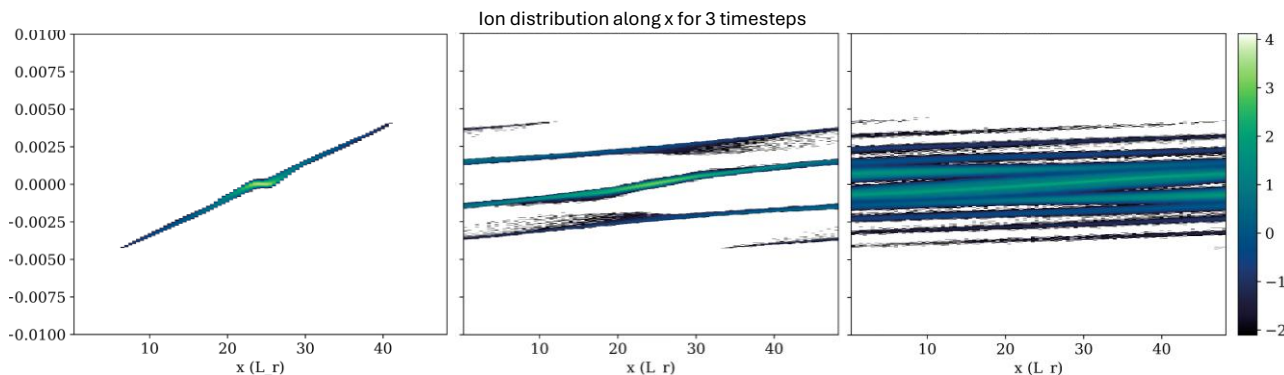
Interazione tra laser e materiali porosi (foam).

Analisi della microstruttura di un poro

R. Bonifetto, A. Froio,
R. Testoni, A. Zurzolo

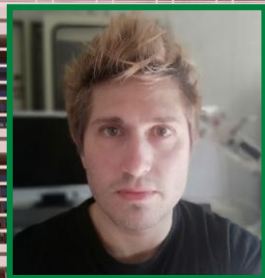


L'**accelerazione degli ioni** ad alte energie è dovuta al **campo elettrostatico** generato attorno al cilindro, che persiste finché gli elettroni riempiono il poro riequilibrando la carica.



Dalla distribuzione di velocità degli ioni stiamo ricavando un **modello teorico per determinare il tempo caratteristico di termalizzazione degli ioni** nel caso di interazioni tra laser e strutture porose

Professori



Claudio
Verona



Gianluca
Verona Rinati

PhD



Edoardo
Domenicone



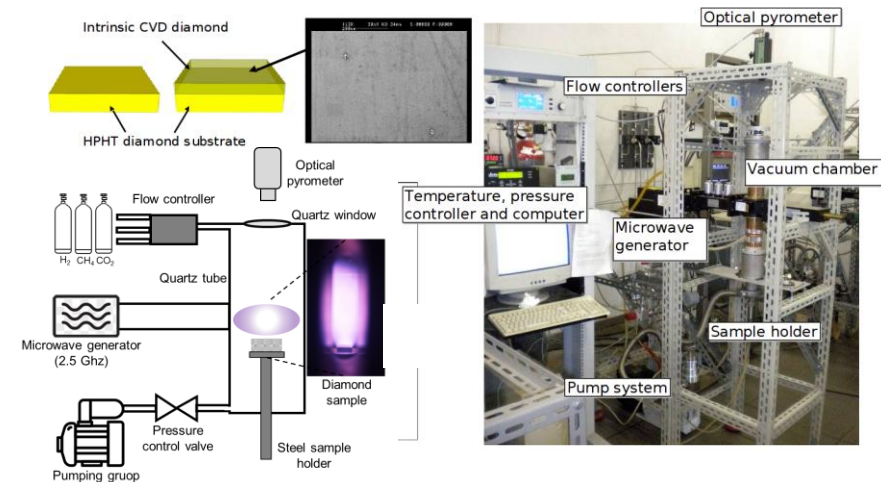
Benoist
Grau

Postdoc



Angelo Maria
Raso

Rivelatori di particelle al diamante

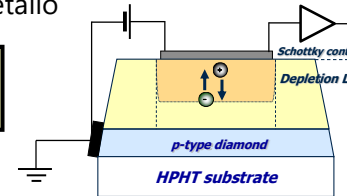


- Il film di diamante viene depositato mediante Chemical Vapour Deposition assistita da plasma a microonde (MW-CVD)
- Tre reattori MW-CVD (drogaggio, produzione, ricerca).
- Infrastrutture per la fabbricazione completa (end-to-end) di dispositivi in diamante.

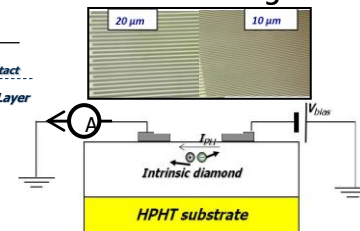
"Sandwich"
Metallo – Diamante - Metallo



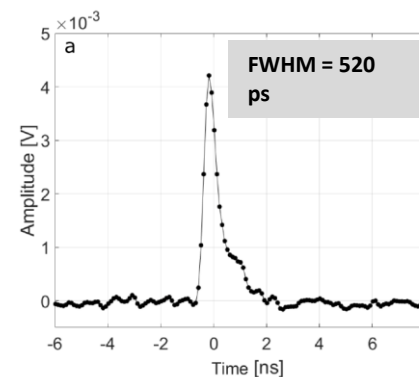
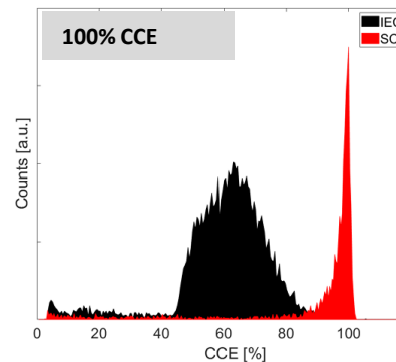
Diodo Shottky



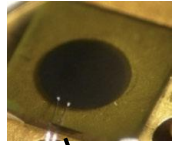
Contatti Interdigitati



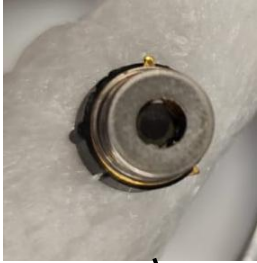
- Le diverse configurazioni degli elettrodi e il layout geometrico consentono di soddisfare un'ampia gamma di requisiti.
- Rivelatori molto veloci
- Alta resistenza alle radiazioni



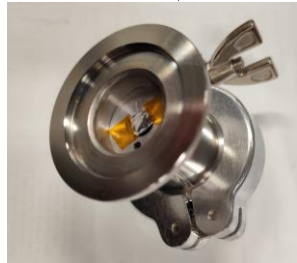
Rivelatori Time-of-Flight (TOF) e ricostruzione Spettro di particella



detector



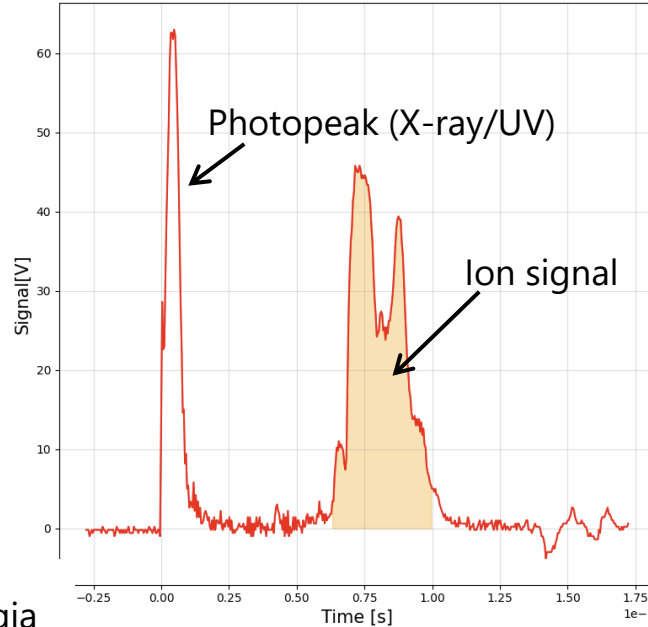
TO-39 holder



KF40 flangia
da vuoto per
ridurre
rumore EMP

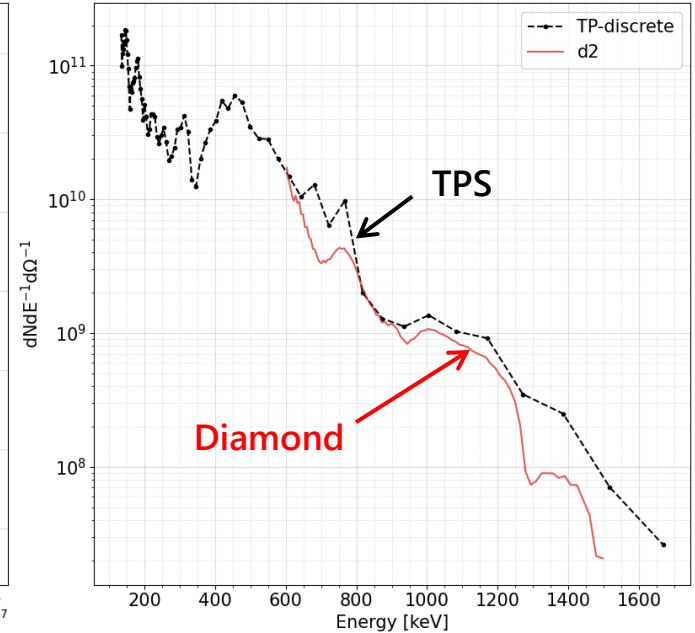
Segnale TOF

Signal from d2 - shot 60690



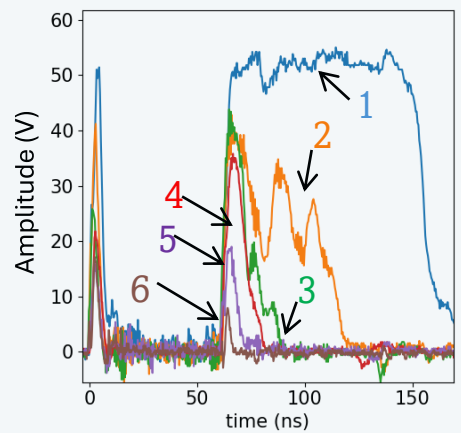
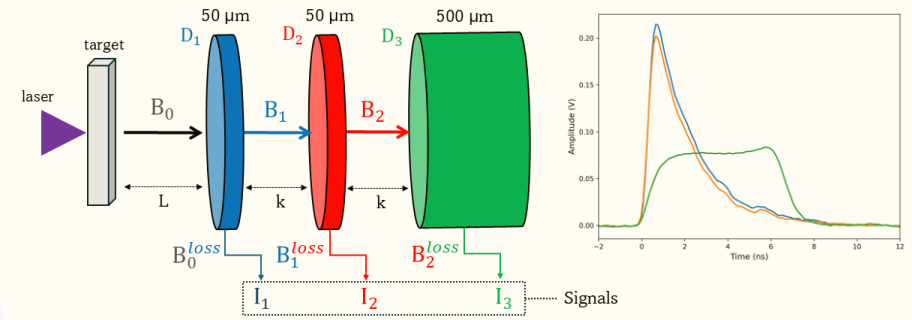
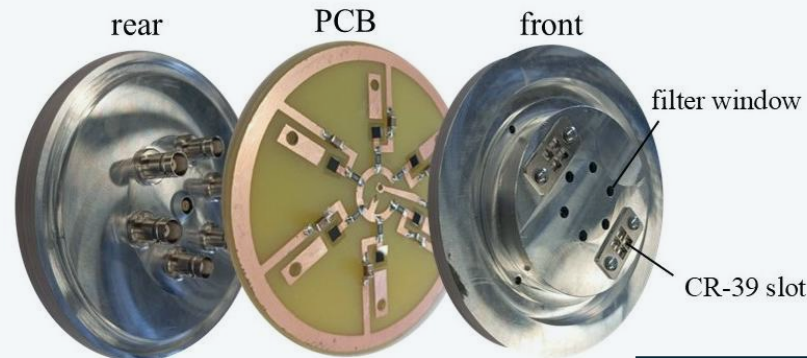
Spettro protonico

Proton spectrum - shot 60690

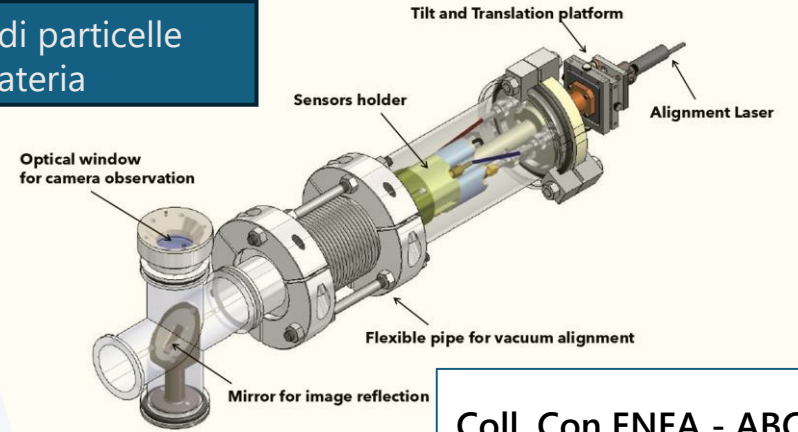
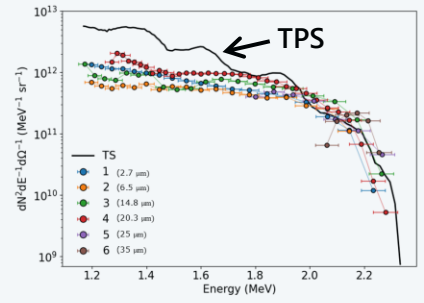


- Risultati confrontabili con lo spettrometro di massa a parabola di Thomson (TPS) posizionato opportunamente.

Prototipi di rivelatori TOF: Array e Stack di diamanti



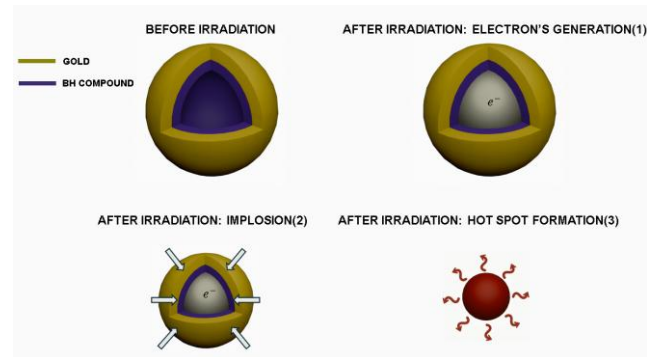
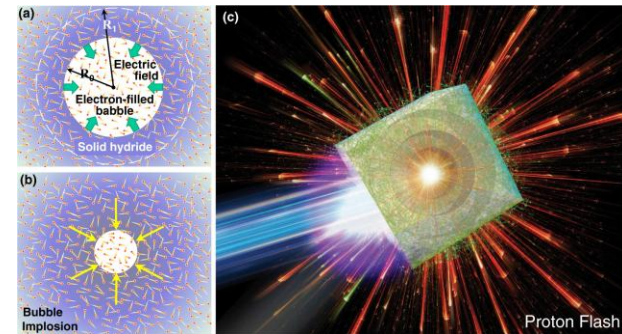
➤ Per la discriminazione di particelle in esperimenti laser-materia



Coll. Con ENEA - ABC

«Microbubble Implosion» per la fusione nucleare (1)

- La Microbubble Implosion (MBI - Implosione di Microbolle) è un concetto recente introdotto da Murakami [1,2,3]: possibilità di ottenere l'implosione di un bersaglio a cavità sferica grazie alla redistribuzione degli elettroni prodotti dopo che un laser ad intensità elevata (UHIL, $10^{18} - 10^{22} \text{ W/cm}^2$) abbia colpito il bersaglio.
- Lo sbilanciamento di carica indotto genera un campo di Coulomb che attrae gli ioni verso il centro del sistema. Il campo elettrico può essere fino a solo due ordini di grandezza inferiore al **limite di Schwinger** (10^{18} V/m , polarizzazione del vuoto). In tali condizioni, **la densità degli ioni può aumentare fino a 10^{34} m^{-3}** per decine di femtosecondi (la figura in alto a sinistra mostra uno schema concettuale del fenomeno).
- Se il bersaglio è costituito da gusci di Oro, Boro e Idrogeno (BH), può verificarsi la fusione protone-boro [3] con produzione di particelle alfa! (la figura in basso a sinistra mostra uno sketch dell'evoluzione temporale).
- Questa idea è sviluppata presso l'Università del Sannio, Benevento, Italia, dal gruppo di Ingegneria Elettrica (Davino, Loschiavo e Ciardiello) in collaborazione con il gruppo di M. Londesborough presso l'Accademia delle Scienze (CAS), Praga, Repubblica Ceca.



«Microbubble Implosion» per la fusione nucleare (2)

- **I principali vantaggi** di questa nuovo schema per la fusione nucleare inerziale sono:
 - Impulsi laser a bassa energia e durata di femtosecondi → **Sistemi laser compatti** → maggiori applicazioni
 - Il fenomeno è molto veloce (decine di femtosecondi) → **Perdite per Bremsstrahlung trascurabili**
 - Altissima densità alla “stagnazione” → **Sorgente di particelle alfa localizzata!**
- **Applicazioni:**
 - **La produzione di energia** per scopi commerciali è difficile ma possibile
 - Applicazioni industriali e **biomediche** possibili grazie alle ridotte dimensioni del sistema.
- **Referenze:**
 - [1]: M. Murakami et al, <https://doi.org/10.1063/1.5093043>
 - [2]: M.A.H. Zosa et al, <https://doi.org/10.1063/5.0068815>
 - [3]: Ciardiello et al, “Proton-Boron Fusion via Microbubble Implosion: A Preliminary Study”, Laser and Particle Beams, submitted.
- Per **informazioni**, contattare daniele.davino@unisannio.it (**Università del Sannio**)

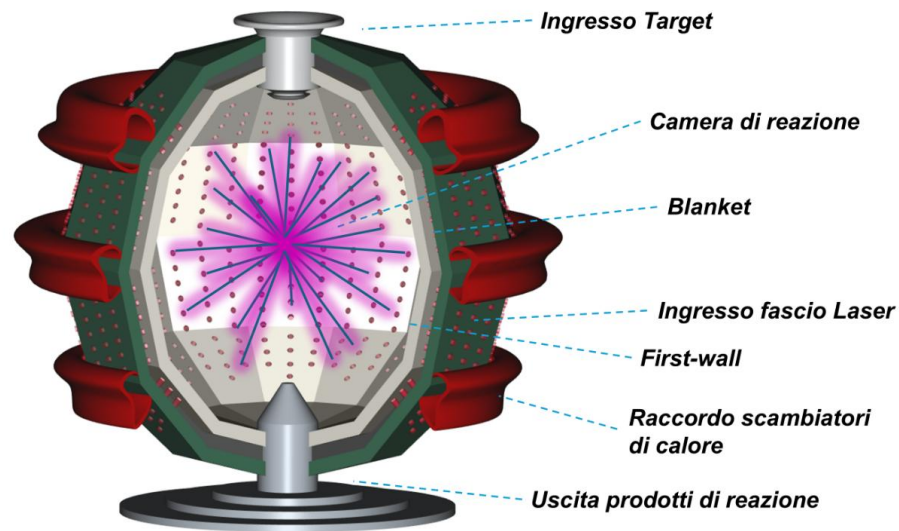


Design del reattore a fusione inerziale

Studio dell'architettura complessiva del sistema (camera di reazione, prima parete, blanket) per funzionamento ad alta ripetitività (1–10 Hz).

Utilizzo simulazioni integrate multi-fisiche con l'ausilio di tecniche e metodi Machine Learning per ottimizzare simulazioni e design. In particolare:

- **Definizione concettuale e ottimizzazione della geometria** della camera di reazione per reattori a fusione laser ad alta potenza
- **Analisi dei materiali e progettazione del blanket:** breeder (litio), moltiplicatori neutronici (piombo/berillio), materiali strutturali a bassa attivazione, garantire Tritium Breeding Ratio > 1 e autosufficienza del combustibile
- **Studio simulativo della longevità** dei componenti in presenza di elevati flussi neutronici (DPA e vita operativa)



IFER1 - Inertial confinement Fusion Energy Reactor 1



BLUE LASER FUSION, Inc.

Anno di fondazione: **2022**

Fondatore: **Shuji Nakamura**, Richard Ogawa

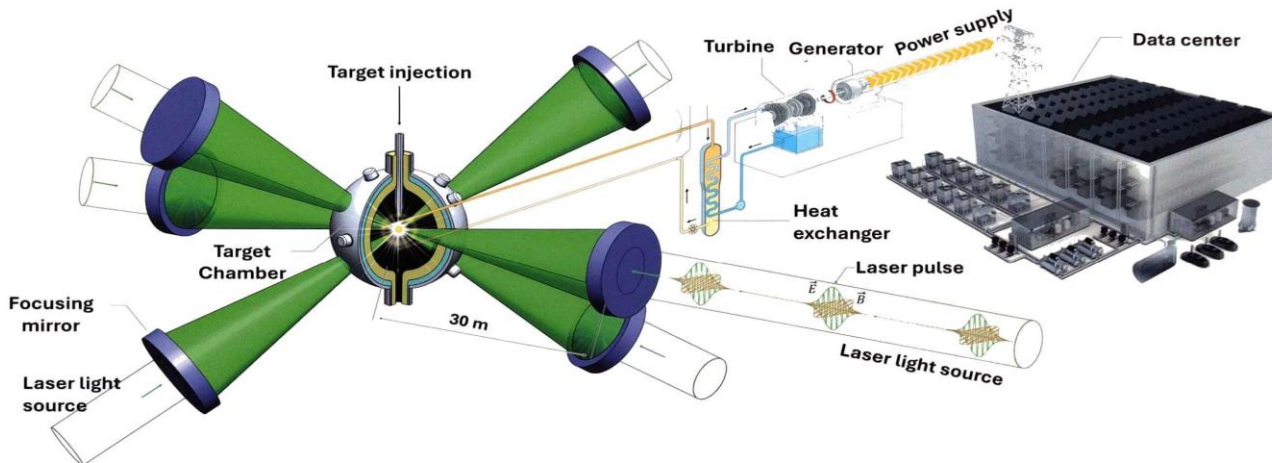
Sede: Goleta, California USA

4 Novembre 2024 RSE-BLF

Roma, Cotana-Nakamura

6 Novembre 2024 WFEG

Roma, Meeting inaugurale del
World Fusion Energy Group



I-LUCE current status

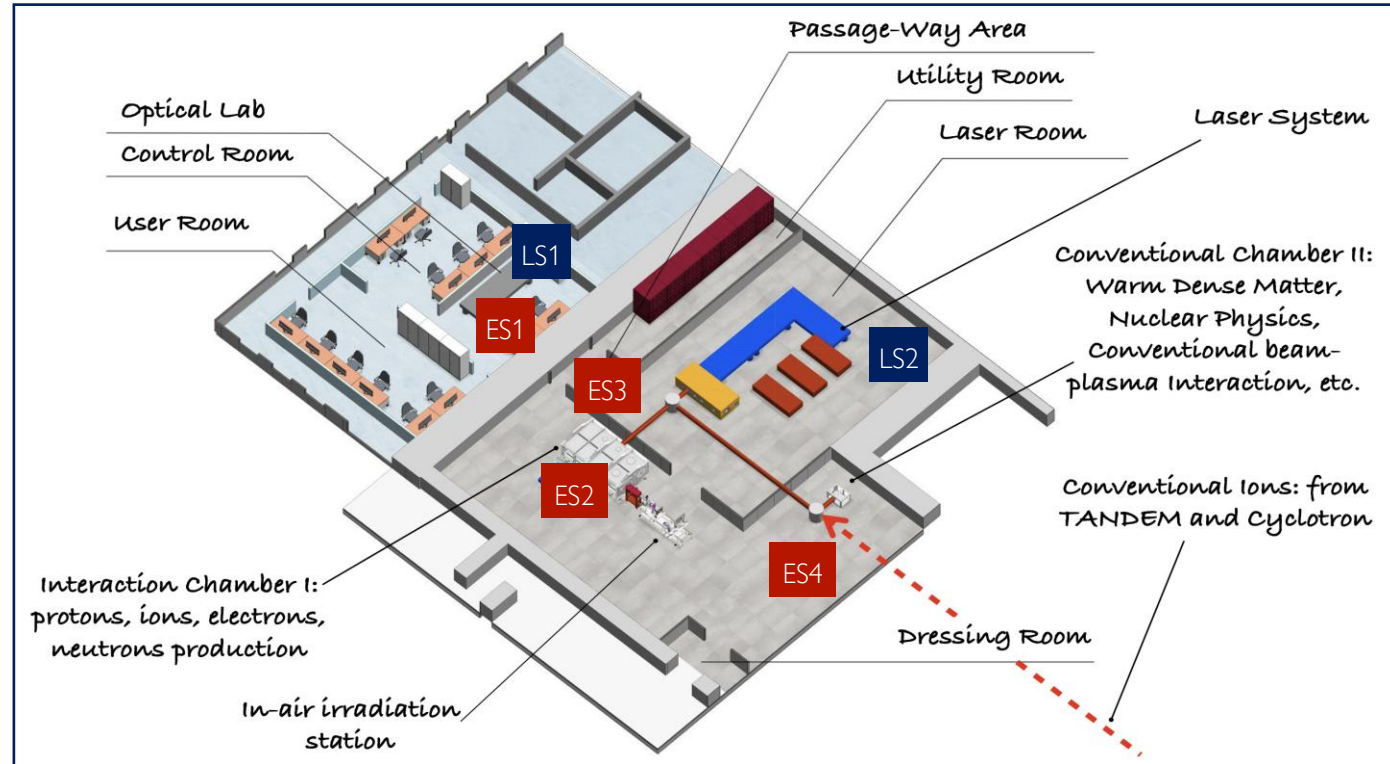
Two laser systems (L1 and L2),
four Experimental Stations (ES),
and three laser outputs

- **Coherent Astrella system (L1):**
9 mJ, 35 fs, 1 kHz
- **THALES Quark (L2)**
> 8 J, 23 fs, 2.5 – 10 Hz
> 11 J for a 500 TW upgrade

ES1 and ES2:
electron accelerations

ES3: ion acceleration

ES4: ion-plasma interaction;
nuclear physics studies,
neutron production



Progetto **FUSION**: studio della reazione $^{11}\text{B}(p, \alpha)2\alpha$ indotta da laser per applicazioni multidisciplinari

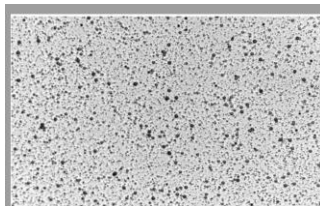
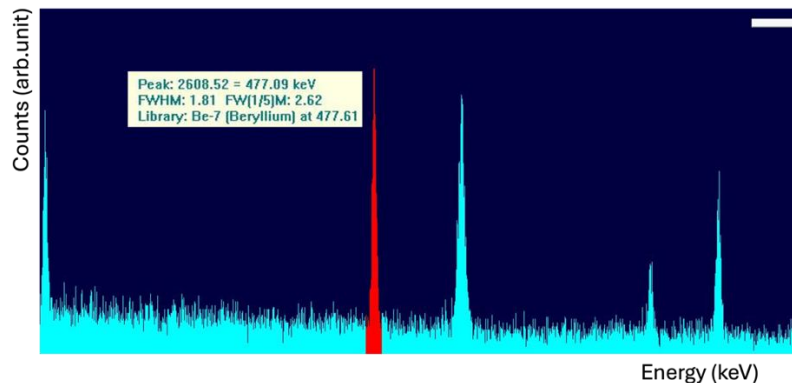
WP1: Studio di reazioni di fusion in plasma indotte da laser ad alta intensità

WP2: Analisi delle interazioni tra protoni/ioni e plasma (es. α Stopping Power in plasma)

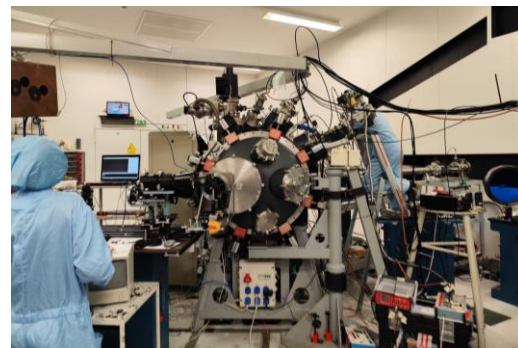
WP3: Sviluppo di target innovativi per aumentare il numero di interazione

WP4: Sviluppo e impiego di diagnostiche innovative per monitorare l'interazione laser materia e i prodotti di fusione

Due principali campagne sperimentali per investigare il pB11: nel 2024 e nel 2025 presso la struttura laser PALS (Praga)



PI: G.A.P. Cirrone, F. Consoli



Argomento: Studio preliminare dell'interazione ione-plasma
all'interno del toolkit Geant4 nell'ambito della reazione di fusione p-11B
nel plasma per applicazioni energetiche

Autore e coautori: A. Hassan^{*1,2,4}, D. Mascali¹, A. Pidotella¹, N.
Macaluso^{1,2}, A. Sciuto¹, L. Pandola¹, and G.A.P. Cirrone^{†1,2,3}

1. INFN-LNS, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy
2. Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana", Università degli Studi di Catania, Catania, Italy
3. Centro Siciliano di Fisica Nucleare e Struttura della Materia (CSFNSM), Catania, Italy
4. HB11 Energy Holdings Pty, Freshwater, Australia



Università
di Catania



HB11
ENERGY
LASER BORON FUSION



UNIVERSITY OF BERGEN

Nuclear isomers play an important role in nucleosynthesis chains. The thermalisation in stars can be studied by measuring their photoexcitation and decay rates

The naïve idea of the experiment may be:

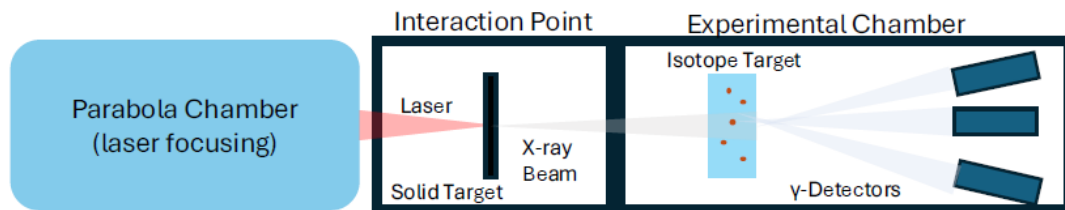
- ns lasers are directed toward a solid target composed of metallic element one wants to investigate, and/or its isomer (that can be produced in-plasma!)
- X-ray bath can excite/de-excite isomer levels
- nuclei undergo β^- decay and subsequent γ decays, having characteristic energies much larger than typical photon bath in the plasma
- comparison of measured photoexcitation and decay rates provides insight into isomer thermalisation as a function of plasma density n_e and temperature kT_e

Preliminary work is needed before such an approach could be used:

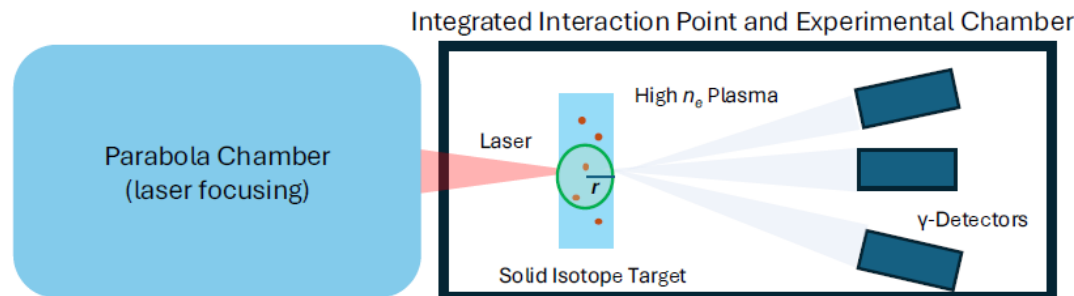
- Better knowledge of nuclear level scheme
- Accurate measurement of plasma parameters
- Scaling with laser pulse duration and intensity

Nuclear excitation in dense plasmas

Nuclear isomers play an important role in nucleosynthesis chains. The thermalisation in stars can be studied by measuring their photoexcitation and decay rates

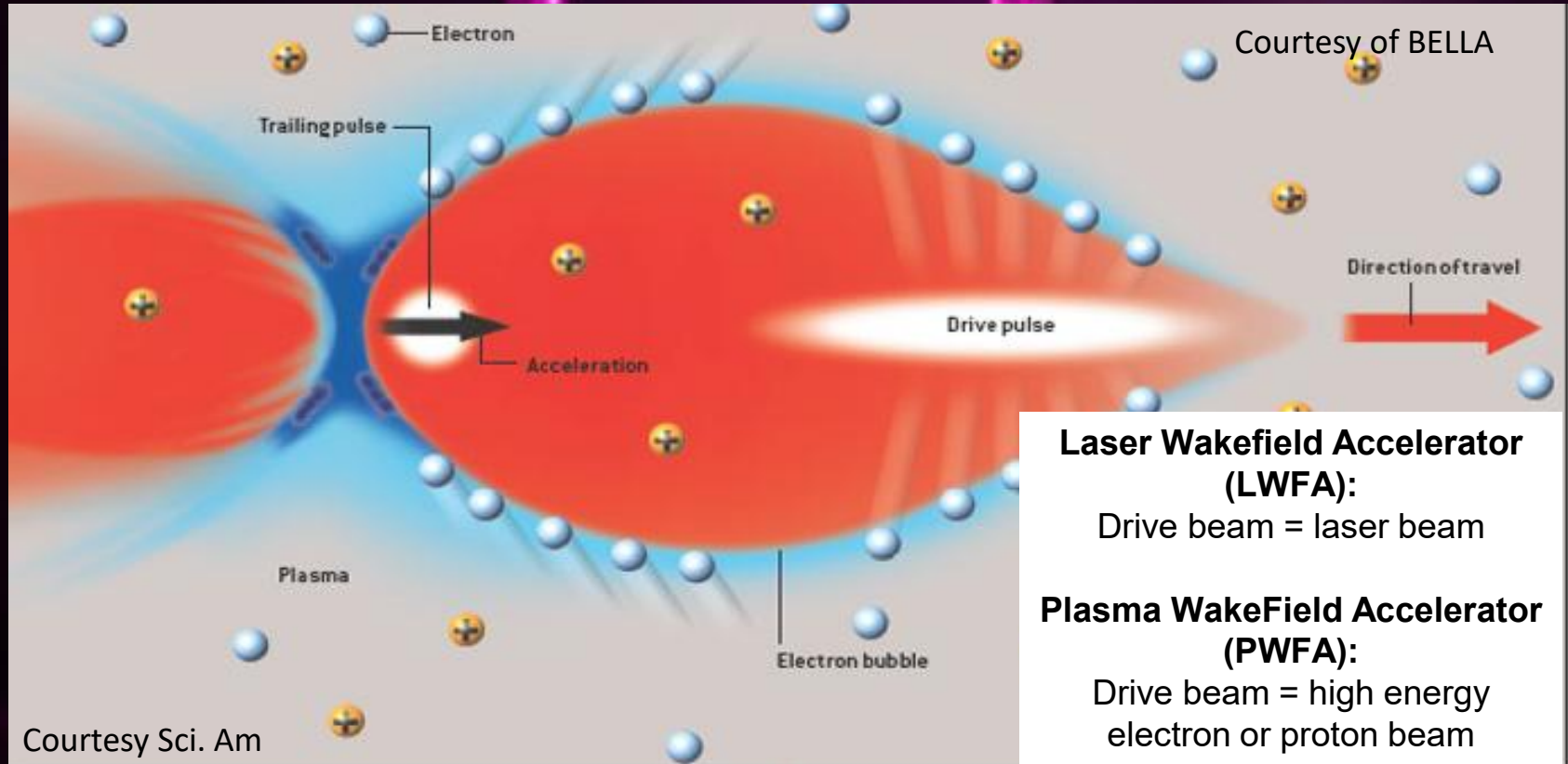


Rough schematic of photoexcitation studies using dense, laser-generated plasmas

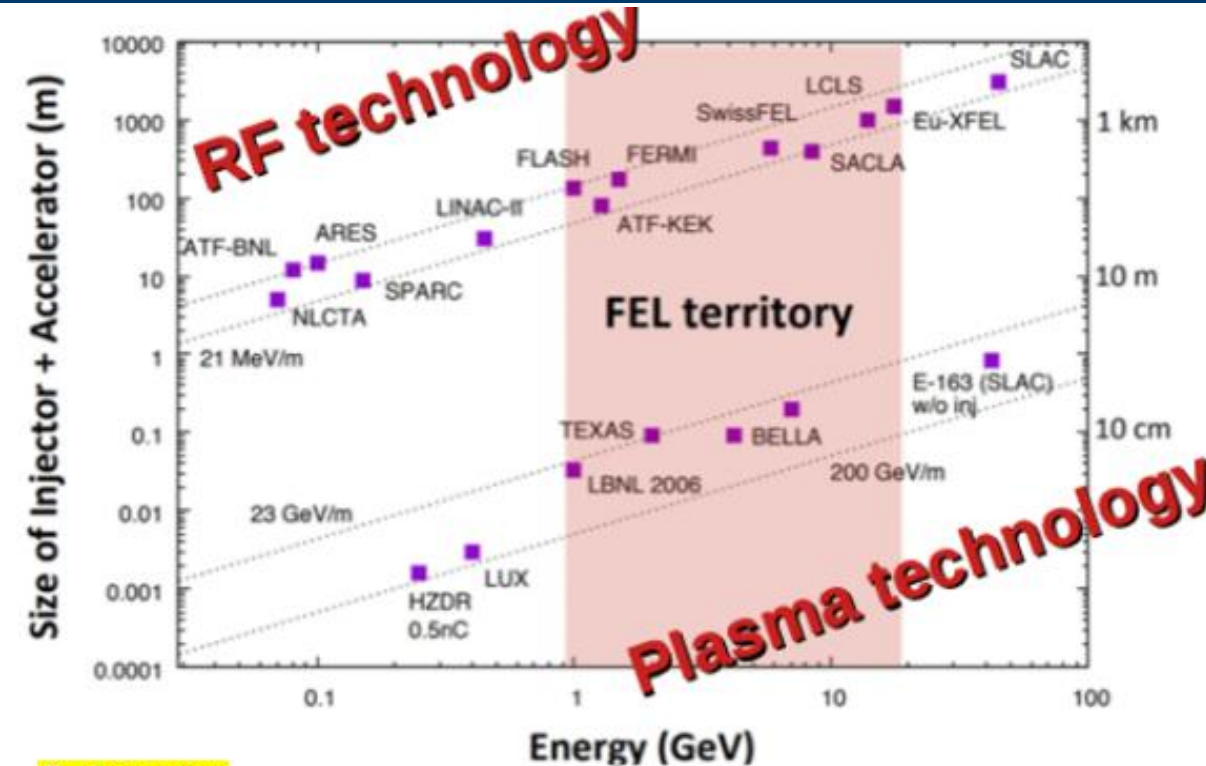


Rough schematic of nuclear decay studies using dense, laser-generated plasmas

Accelerazione al plasma



Il diagramma di Livingstone



R. Assmann

Risultati degli acceleratori al plasma

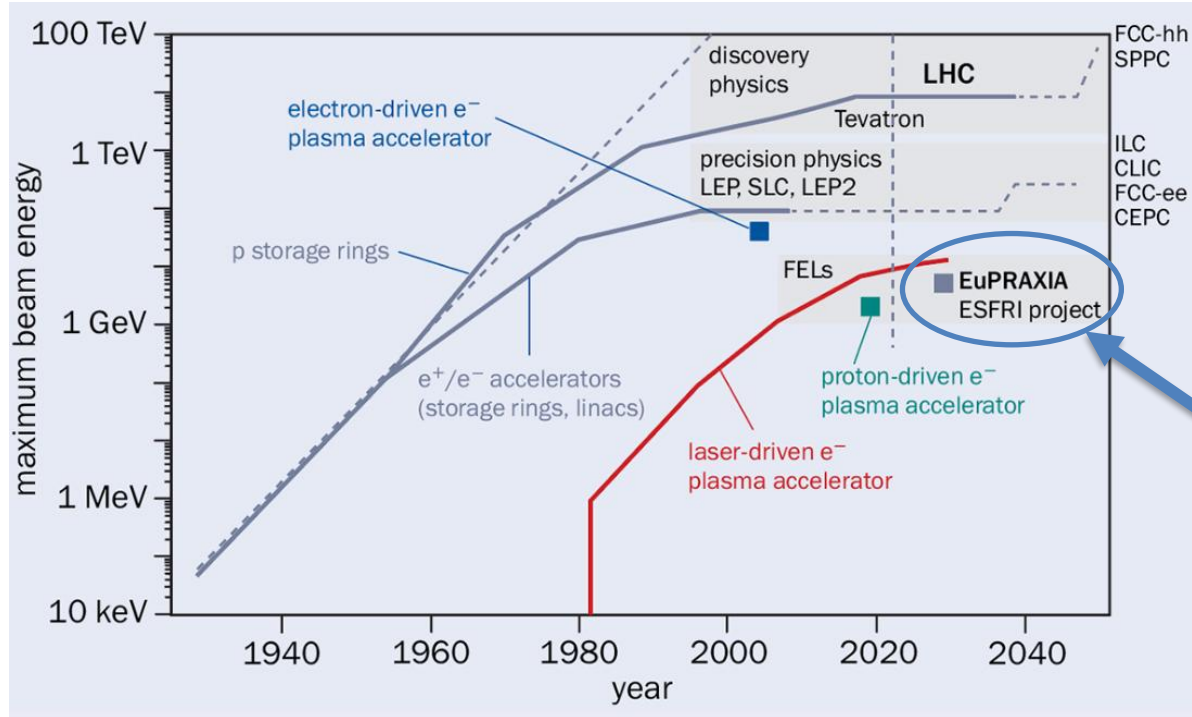
- Gradienti fino a 100 GV/m
- Accelerazione > 10 GeV di fasci di elettroni
- Accelerazione di fasci di alta qualità ed emissione di radiazione da un laser ad elettroni liberi (FEL)



Sfide attuali

- Aprire la strada ai collider di nuova generazione
- Sviluppo di infrastrutture orientate agli utenti

Accelerazione al plasma in Italia

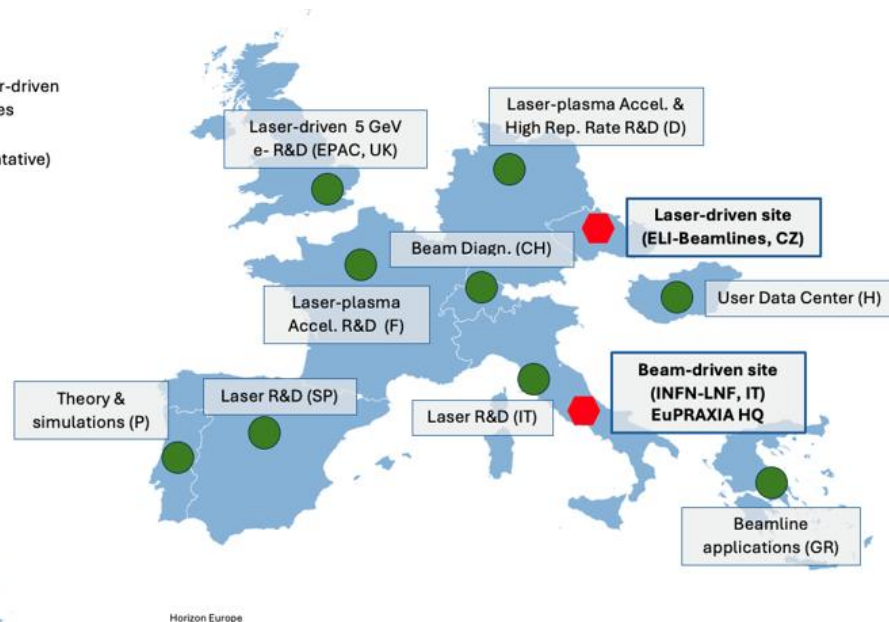
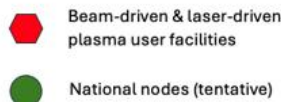


Evoluzione nel tempo dell'energia massima raggiungibile dal fascio.
Le bande grigie visualizzano le applicazioni degli acceleratori.

Oggi la comunità scientifica italiana partecipa al progetto europeo EuPRAXIA, volto a realizzare acceleratori al plasma compatti e affidabili per la ricerca scientifica e infrastrutture orientate agli utenti



- Il consorzio **EuPRAXIA** comprende: **54 istituti da 18 paesi più il CERN**, inserito nella Road Map di **ESFRI**
- Due infrastrutture di ricerca
 - **PWFA: EuPRAXIA@SPARC_LAB** (INFN-LNF Frascati, Italia)
 - **LWFA: ELI Beamlines** (Repubblica Ceca)
- **Numerosi nodi nazionali. In Italia CNR-INO**
- Progetti correlati:
 - **Preparatory Phase Consortium**
 - **Doctoral Network**
 - **Progetto EuAPS** – finanziato da Next Generation EU
 - **PACRI**





EuPRAXIA Advanced Photon Sources (EuAPS)

- Progetto PNRR
- Collaborazione tra INFN, CNR, University of Tor Vergata
- EuPRAXIA → **sorgente di radiazione di betatrone al plasma @SPARC_LAB**
 - Sviluppo di laser ad alta potenza (fino a 1 PW @ LNS) e alta frequenza di ripetizione (fino a 100 Hz @ CNR Pisa)
 - precursore di una futura infrastruttura per utenti

- 1) **Ultrarapido** – durata dei pacchetti laser di decine di fs, ideale per esperimenti time-resolved (XFEL: decine di fs, sincrotroni: decine–100 ps)
- 2) **Ampio spettro energetico** – fondamentale per la spettroscopia a raggi X
- 3) **Alta brillantezza** – sorgente piccola con alto flusso di fotoni per processi veloci
- 4) **Ampio mercato** – 50 sorgenti di luce sincrotrone nel mondo, 6 XFEL hard e 3 soft-ray (molti acceleratori operativi e altri in costruzione)

Electron beam Energy [MeV]	50-800
Plasma Density [cm^{-3}]	$10^{17} - 10^{19}$
Photon Critical Energy [keV]	1 - 10
Nuber of Photons/pulse	$10^6 - 10^9$

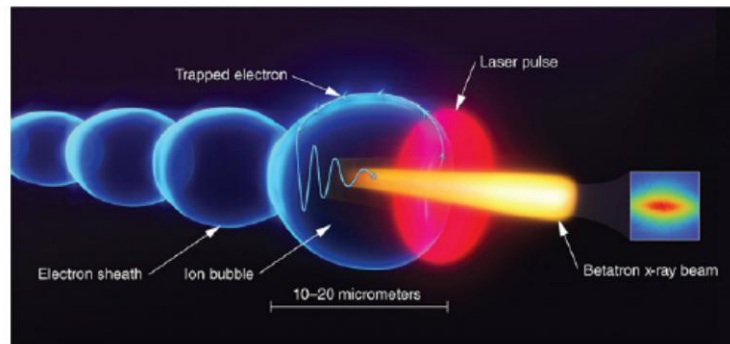


Figure 3: Principle of betatron X-ray emission from a LWFA. Electrons trapped at the back of the wakefield are subject to transverse and longitudinal electrical forces; subsequently they are accelerated and wiggled to produce broadband, synchrotron-like radiation in keV energy range [6].



Verso gli ondulatori al plasma compatti



- Investimento previsto: > 130 M€
- Acceleratore a plasma guidato da fascio (PWFA)
- FEL più compatto e più a sud d'Europa
- Acceleratore RF più compatto al mondo



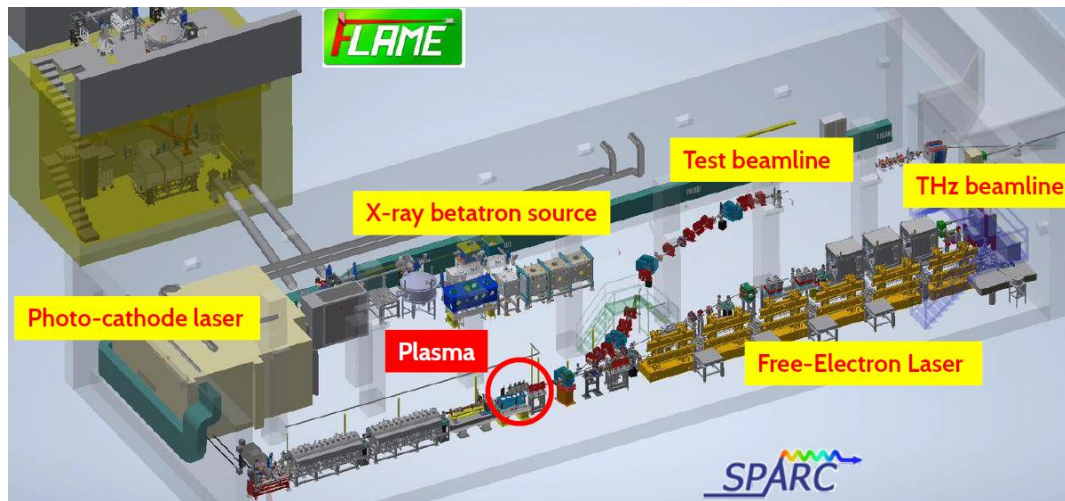
- **Technical Design Report** completato (in stampa)
- **Inizio lavori del cantiere:** settembre 2026

R&D attuale a SPARC_LAB

- **Prime validazioni sperimentali e numeriche dei concetti PWFA in Italia (@SPARC_LAB, INFN-LNF)**
- SPARC_LAB come struttura di riferimento per la ricerca su acceleratori al plasma in Italia
- **L'Italia come membro chiave nelle iniziative europee PWFA**

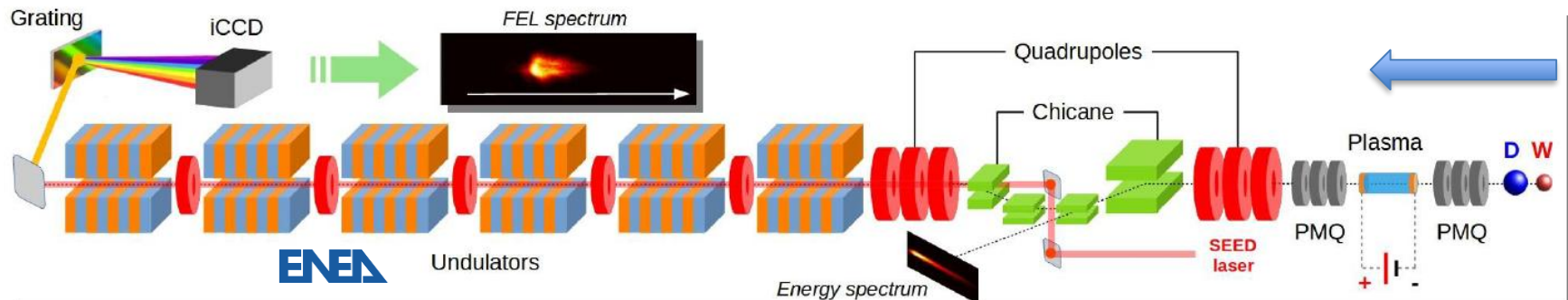
Transizione verso EuPRAXIA@SPARC_LAB

- SPARC_LAB, in quanto incubatore di tecnologie e conoscenze, contribuisce direttamente al design di EuPRAXIA@SPARC_LAB
- Passaggio dalla prova di principio ad acceleratori al plasma compatti e affidabili
- Collegamento tra R&D di laboratorio e infrastruttura europea orientata agli utenti

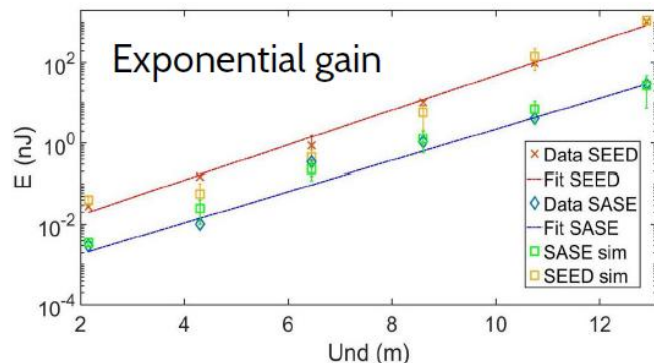


INFN-LNF

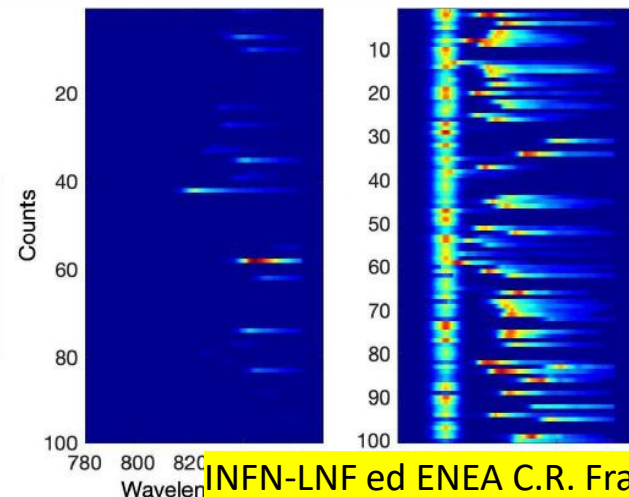
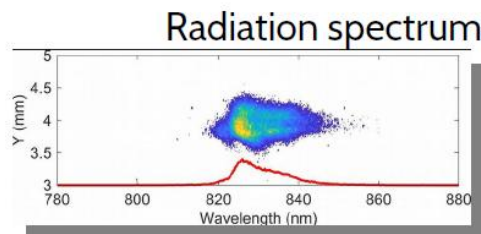
SPARC_LAB collaboration



Pompili, R., et al., Nature 605.7911 (2022): 659-662.



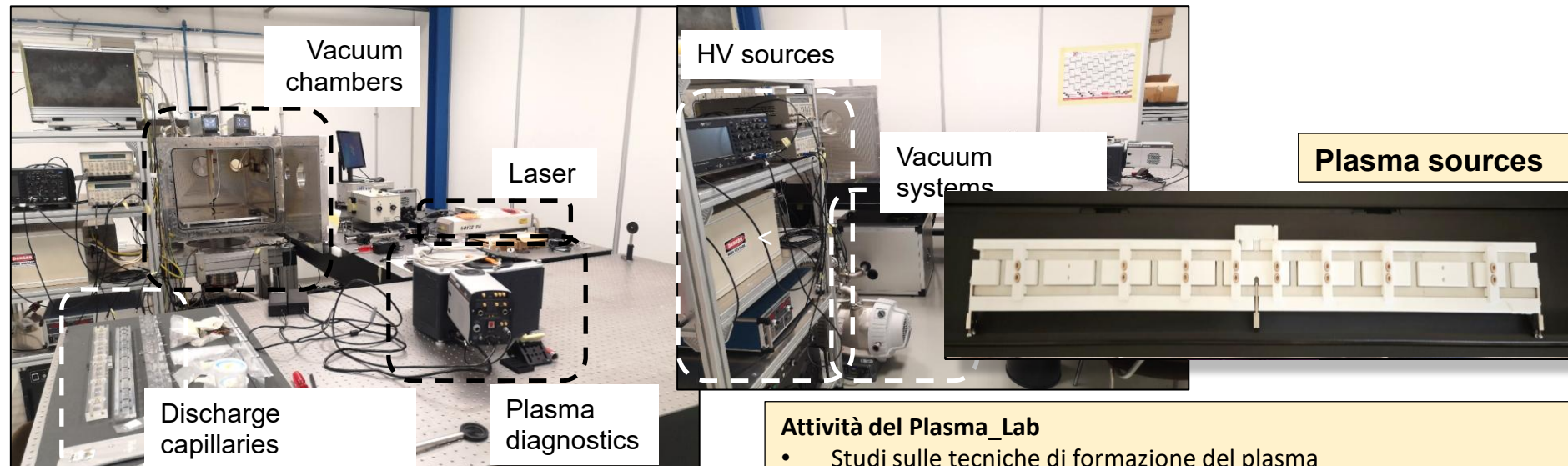
Galletti, M., et al. Physical review letters 129.23 (2022): 234801.
Galletti, M., et al., Nature Photonics 18.8 (2024): 780-791.



INFN-LNF ed ENEA C.R. Frascati
SPARC_LAB collaboration

Il **Plasma_Lab** è dedicato ad attività di ricerca e sviluppo tecnologico per la progettazione e la caratterizzazione di sorgenti di plasma necessarie alla realizzazione di moduli di acceleratore (in funzione dal 2018).

Plasma_Lab



Strumentazione:

- Camera per il test della formazione del plasma
- Sistema di pompaggio (pompe turbo e pompe primarie)
- Sorgenti ad alta tensione per la produzione di plasma (generatori HV e pulsatori)
- Sistemi laser
- Oscilloscopi
- Diagnostica del plasma
 - Telecamere CCD intensificate
 - Spettrometri

Attività del Plasma_Lab

- Studi sulle tecniche di formazione del plasma
 - basate su scariche ad alta tensione
 - basate su ionizzazione tramite impulsi laser
- Progettazione e caratterizzazione di sorgenti di plasma
 - Studio delle forme delle sorgenti per ottimizzare la formazione del plasma
 - Misure di densità del plasma
- Progetto EuPRAXIA
 - Progettazione di sorgenti lunghe (metodi ad alta tensione o laser)

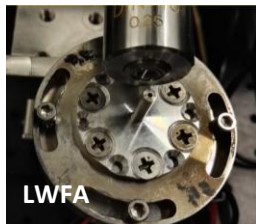
Main beamline in TET area

Gas-like target:

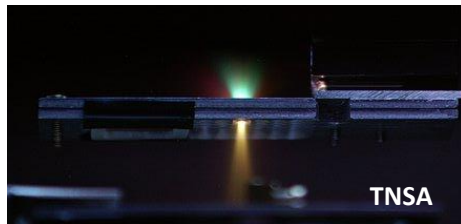
- Accelerazione di elettroni tramite Laser WakeField Acceleration (LWFA) in un bersaglio gassoso, con self-injection o ionization injection
- Produzione di radiazione secondaria, ad esempio radiazione betatrone --> **progetto EuAPS**

Solid-state like target:

- Generazione di fasci rapidi di elettroni e ioni leggeri tramite interazioni con bersagli solidi nel meccanismo Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)



LWFA



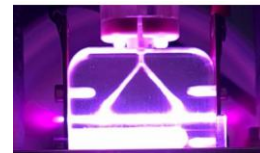
TNSA

Implementazione di tecniche diagnostiche single-shot

Auxiliary beamline in GEM area

Interazione laser-bersaglio con pacchetti a bassa intensità e bersagli diversi

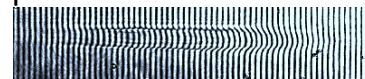
- Gas neutro per test di ionizzazione all'interno del capillare
- Plasma preformato per esperimenti di guida laser



Auxiliary beamline in TET area

Linea di ritardo per sincronizzare la beamline principale nelle esperienze pump-and-probe

- Diagnostica interferometrica per misurare la densità del plasma in LWFA

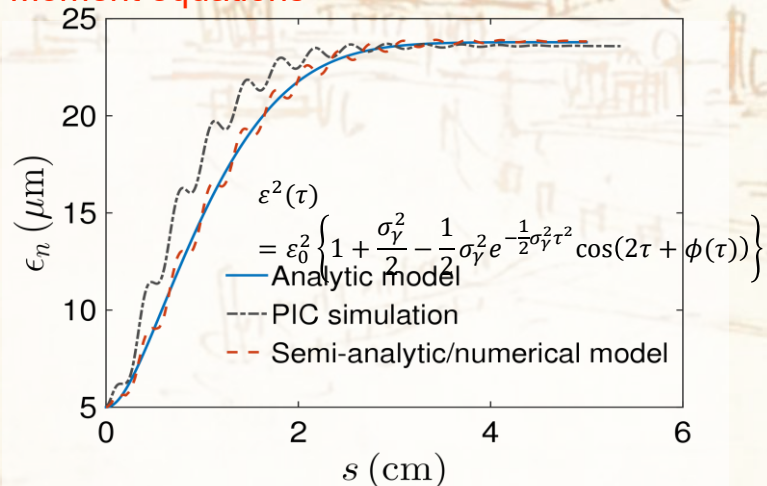


- Diagnostica elettronica negli esperimenti TNSA

Sviluppo di modelli e codici semplificati

- **Obiettivo:** sviluppare modelli semplificati e codici a esecuzione rapida per rappresentare dinamica dell'accelerazione al plasma, riducendo i costi computazionali.
- **Inclusione degli effetti termici** nella valutazione del processo di accelerazione e delle sue prestazioni.

Moment equations



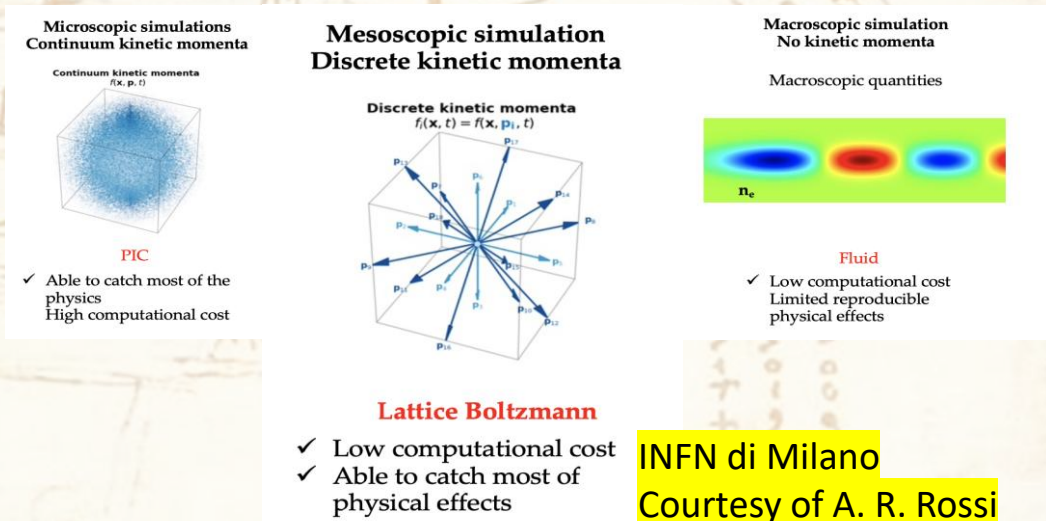
Sviluppo di modelli e codici Lattice Boltzmann

- **Obiettivo:** il metodo Lattice Boltzmann è un approccio mesoscopico, a metà tra il metodo macroscopico dei codici fluidi (che usano grandezze macroscopiche) e quello microscopico dei metodi Particle-in-Cell (PIC).
- **Proposta:** aggiornamento di un codice esistente per applicazioni di accelerazione al plasma..

PIC

Fluid with LB solver

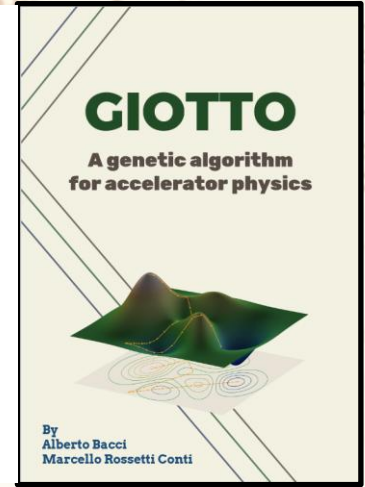
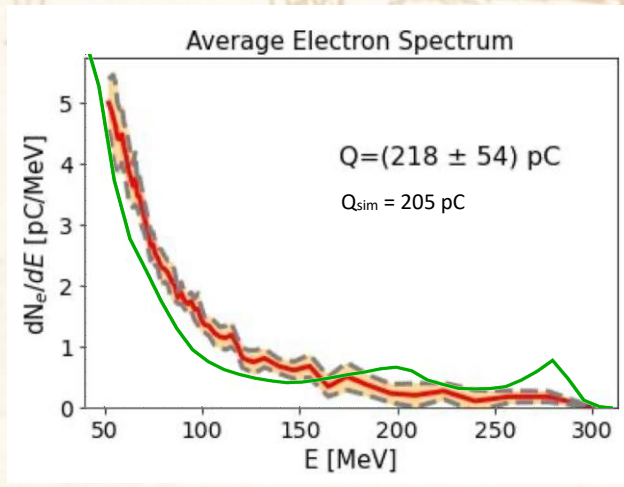
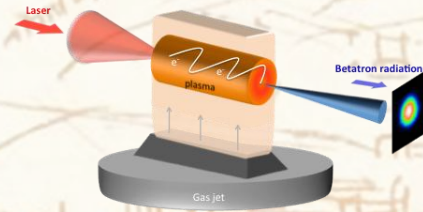
Fluid



Ottimizzazione dei punti di lavoro

Obiettivo: punti di lavoro tramite lo sviluppo di GIOTTO

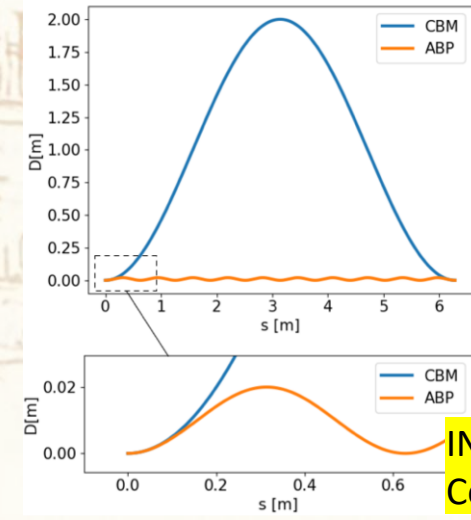
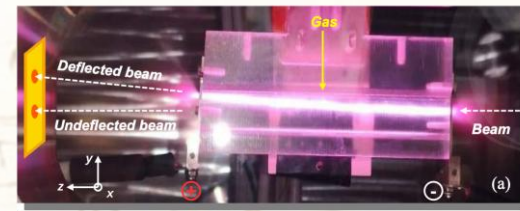
Experimental vs simulated electron spectrum for EuAPS



Plasma based devices

Obiettivo: caratterizzazione numerica e teorica

BD in an active plasma bending



$$R_{11} = \cos k_x s$$

$$R_{12} = \frac{1}{k_x} \sin k_x s$$

$$R_{16} = \frac{1}{\rho_0 k_x^2} (1 - \cos k_x s)$$

$$R_{21} = -k_x \sin k_x s$$

$$R_{22} = \cos k_x s$$

$$R_{26} = \frac{1}{\rho_0 k_x} \sin k_x s$$

$$R_{33} = \cos k_y s$$

$$R_{34} = \frac{1}{k_y} \sin k_y s$$

$$R_{43} = -k_y \sin k_y s$$

$$R_{44} = \cos k_y s$$

$$R_{55} = 1$$

$$R_{56} = s \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - \frac{\tilde{I}_0 r_c^2 \gamma}{I \rho_0^2} \right)$$

$$R_{66} = 1$$

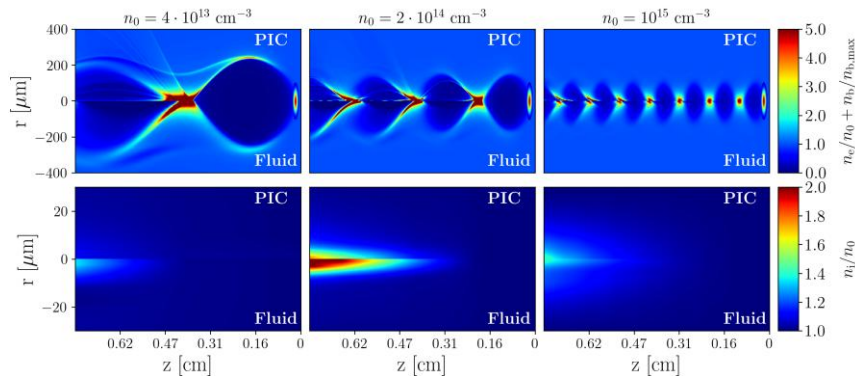
$$T_{511} = -s \frac{k_x^2}{4}$$

$$T_{522} = -\frac{s}{4}$$

$$T_{533} = -s \frac{k_y^2}{4}$$

Simulazioni di processi di accelerazione al plasma

Ion motion



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI

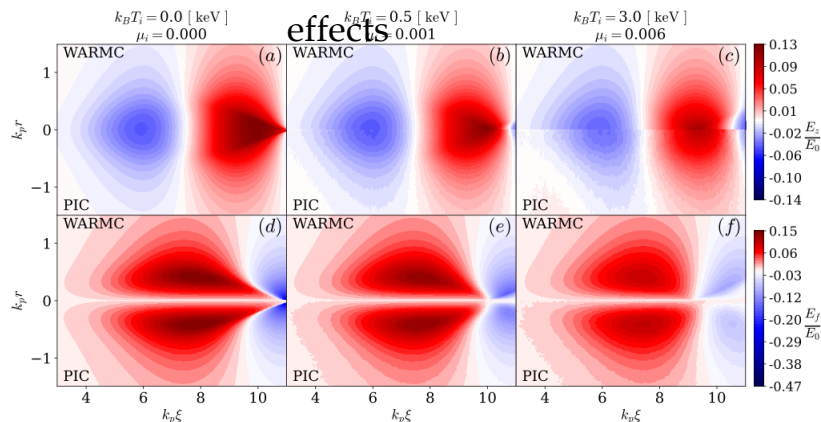
✓ È stato sviluppato un nuovo codice fluido, per simulazioni rapide e precise [1,2]

✓ Sono stati inclusi effetti non triviali come il movimento degli ioni e gli effetti termici [3]

✓ Sistemati confronti con lo stato dell'arte per le simulazioni (codici Particle- in-Cell)

✓ I risultati numerici forniscono un supporto complementare ai risultati sperimentali dei LNF [4]

Thermal effects



[1] Parise, G., et al., Physics of Plasmas, 29, 043903, (2022)

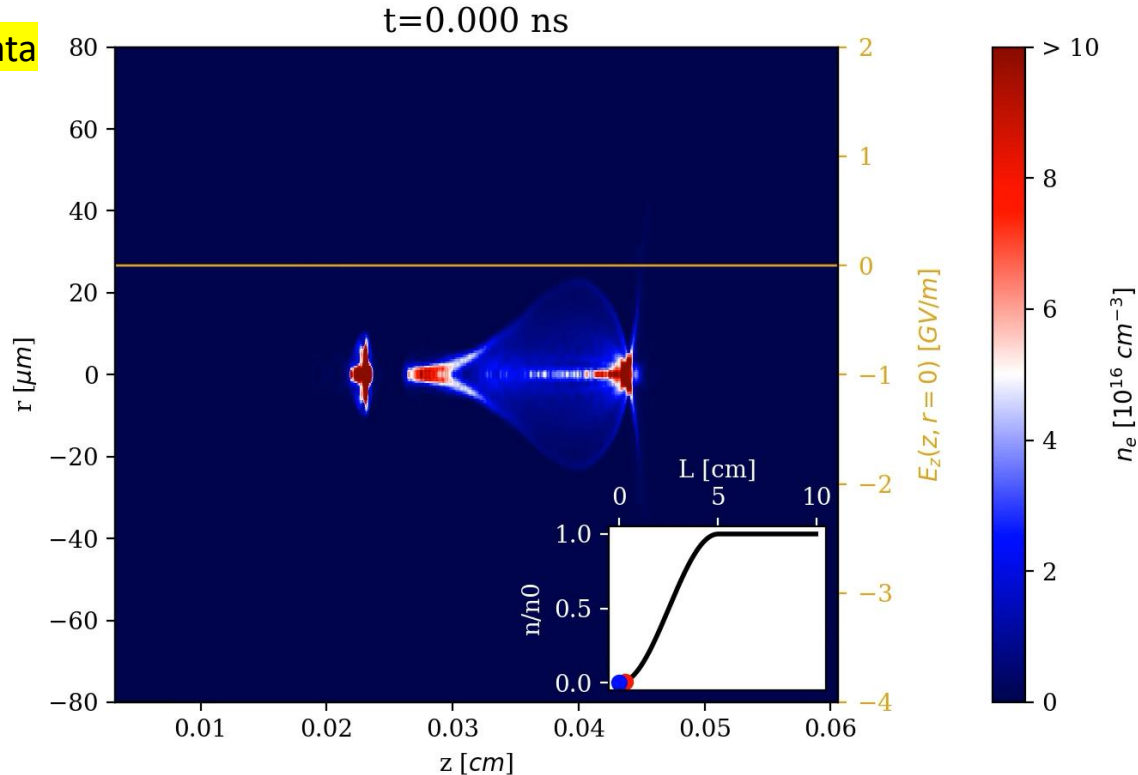
[2] Simeoni, D., et al., Physics of Plasmas, 31, 013904, (2023)

[3] Simeoni, D., et al., Physics of Plasmas, 31, 093103, (2024)

[4] Parise, G., et al, in preparation

Applicazione allo studio del punto di Lavoro di EuPRAXIA

Università di Tor Vergata
Courtesy of A. Cianchi



- ✓ Sono state condotte simulazioni Start-to-End del punto di lavoro di EuPRAXIA
- ✓ Simulazioni per il modulo a plasma confermano la validità dello studio sui valori di accelerazione e di qualità del fascio che verrà utilizzato per produrre luce nel FEL

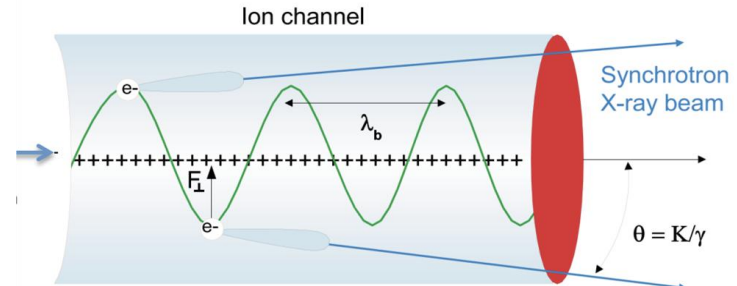
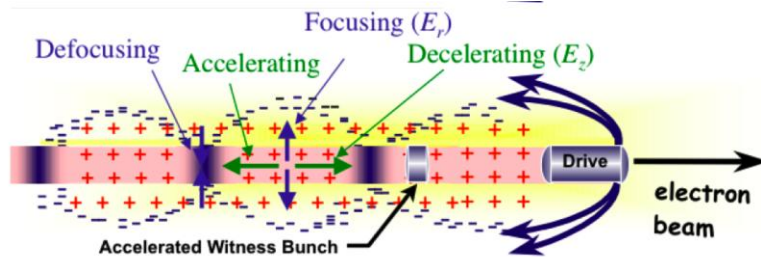
Attività di R&D sui concetti avanzati basati su plasma

Sapienza University of Rome - Dept. of Fundamental Physics and Applied Sciences

Enrica Chiadroni, Alessandro Curcio, Mauro Migliorati, Andrea Mostacci

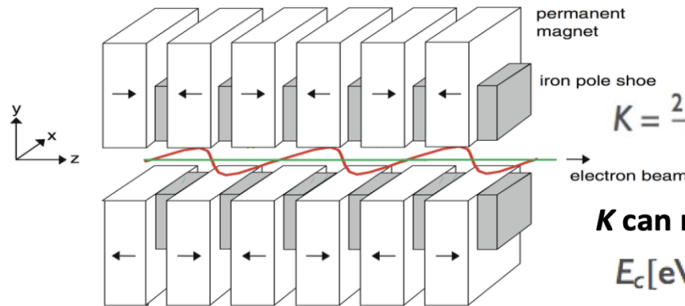
- Gli ondulatori convenzionali sono ancora troppo lunghi → non compatti e costosi
 - Si può sfruttare il moto di betatrone degli elettroni in un canale ionico per
 - Diagnosticare in modalità single shot e non-intercettante per il fascio accelerato (A. Curcio et al., PR AB 20, 012801 (2017))
 - Emulare un onduttore
 - Device più compatto
 - Il **moto di betatrone** consiste in oscillazioni **perpendicolari alla direzione di propagazione**
 - Rilevante solo in un **canale di focalizzazione uniforme**, come un **canale di plasma**
- **«PLASMA UNDULATOR»** → Esperimento finanziato da CSN5 of INFN (2024-2027) in collaborazione con INFN

Background teorico



Betatron oscillation $k_\beta = \sqrt{2\pi r_e n_0 / \gamma} = k_p / \sqrt{2}$

A. Rousse *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 135005 (2004).



$$K = \frac{2\pi\gamma x_0}{\lambda_\beta} \approx 1.33 \times 10^{-10} \gamma^{0.5} n_e^{0.5} [\text{cm}^{-3}] x_0 [\mu\text{m}]$$

Amplitude dependent

K can reach ~100 (Requires large offset, $k_p x_0 \sim 1$)

$$E_c [\text{eV}] = 5 \times 10^{-21} \gamma^2 n_e [\text{cm}^{-3}] x_0 [\mu\text{m}]$$

Photon energy up to

Can reach up to 100 MeV with dense plasma.

Plasma wigglers can give magnet field equivalent $B_u > 100$ T with sub-cm wavelength

Courtesy of J. Rosenzweig

S. Kiselev *et al.*, PRL **93**, 135004 (2004)

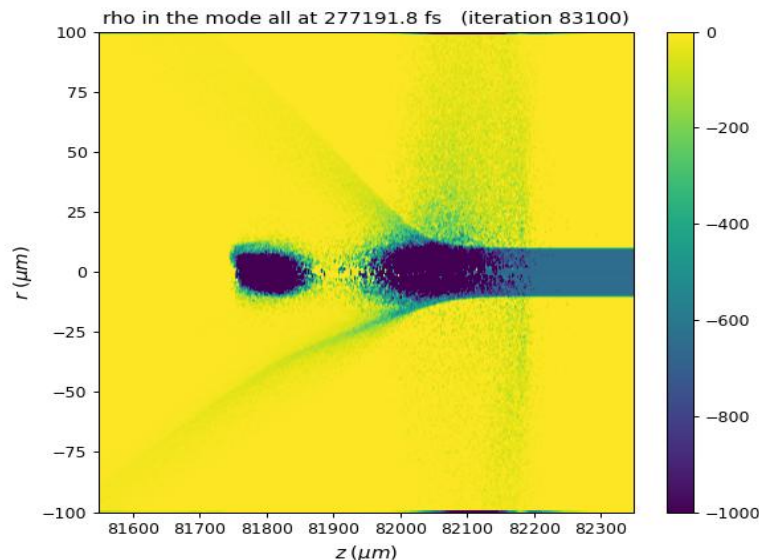
Università La Sapienza
courtesy of E. chiadroni

Formazione della colonna ionica

- Creazione di plasma neutro tramite ionizzazione laser
- Espulsione degli elettroni del plasma tramite fascio di elettroni detto 'driver'
 - **Gli elettroni del plasma vengono espulsi verso l'esterno del plasma**
 - Forze di richiamo fuori dalla colonna trascurabile
 - Accelerazione trascurabile nella colonna
 - Forza di richiamo nella colonna lineare nella colonna

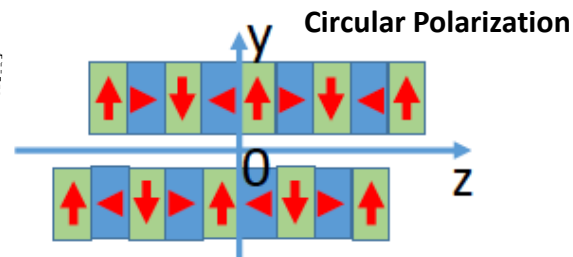
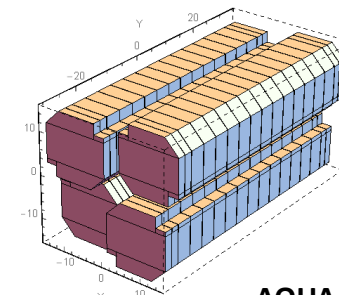
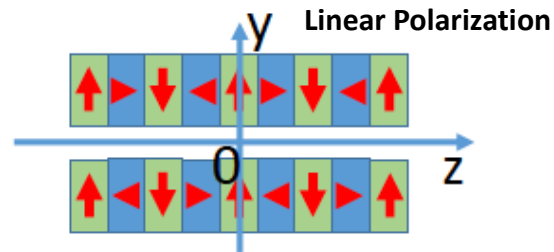
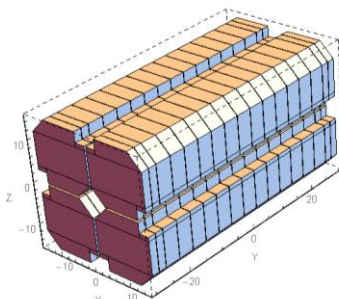
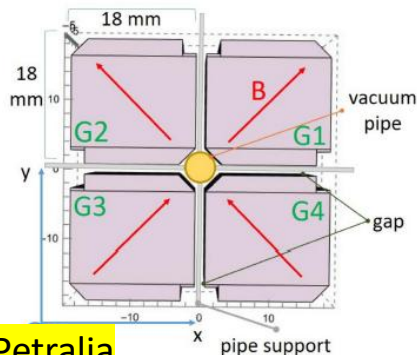
Comb-like, driver and witness, **beam**:

500 pC + 50 pC, 3 cm acceleration + 10 cm plasma undulator, $n_0 \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



Courtesy of A.R. Rossi

ENEA – C.R. Frascati - APPLE-X undulator modeling



AQUA baseline radiator: 10 APPLE-X modules

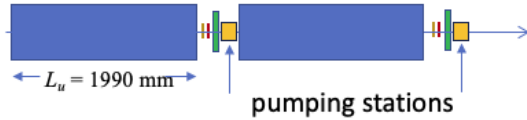
A. Petralia et al., FEL2022 WEP38 Proceedings

Interplay among aperture, magnetic strength, wavelength tunability and inner diameter constrained by wakefield effects on FEL performance

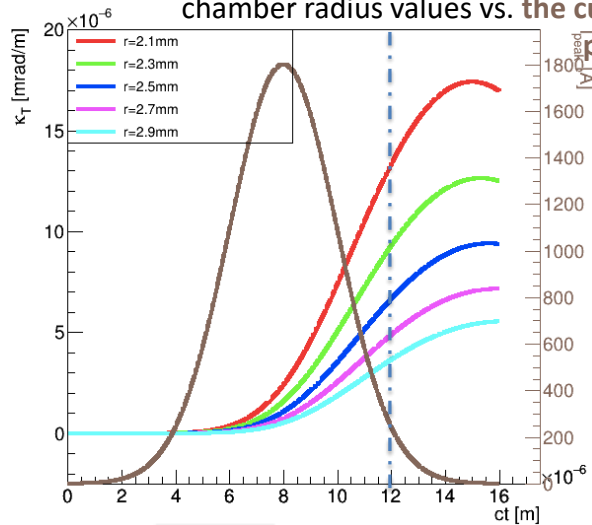
Courtesy of A. Petralia
– ENEA Frascati

Pipe ext. diam. (mm)	5.6
Pipe inner diam. d (mm)	5.0
Wedge cut (mm)	2.8
ϕ aperture (mm)	6.0
B max (T) (in LP)	0.935
$K_{\max}$ (in LP)	1.572
$K_{\max}$ (in CP)	1.111
max λ_0 (nm) (@ 1 GeV)	5.25

ENEA – C.R. Frascati - Resistive wall wakefields along the undulator line



Kick angle/path length for different chamber radius values vs. **the current profile**



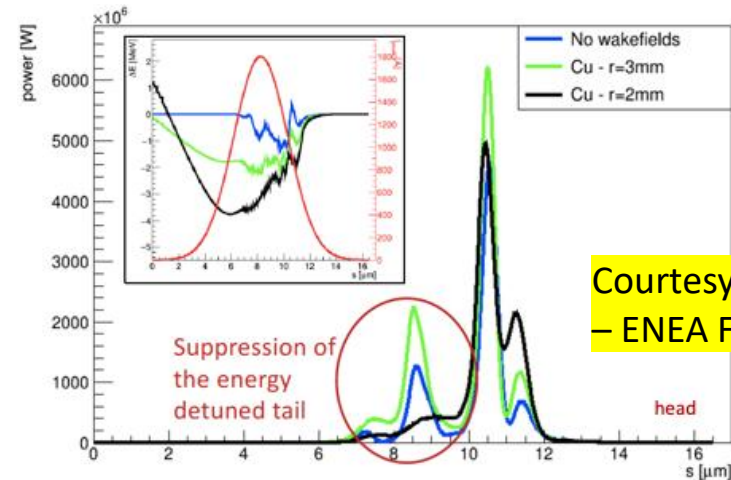
$$\varepsilon_{eff} \approx \varepsilon \sqrt{1 + \frac{\tilde{\beta}}{\varepsilon} \langle \theta^2 \rangle}, \quad \sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \approx L_{AQUA} \ell_{off} \sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}$$

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon \sim 0.5\%$$

The **longitudinal** wakefield generates an energy loss and an energy spread increase **independent of the beam orbit**, the **transverse** wakefield generates an emittance growth that **depends on the trajectory**



Shorter chamber radius $\rightarrow$ higher longitudinal wakefield at undulator exit: wakefield energy loss adds up to the FEL interaction loss $\rightarrow$ net peak power is marginally affected



Courtesy of F. Nguyen
– ENEA Frascati

Conclusioni

- La comunità scientifica italiana ha un ruolo di riconosciuto primo piano nel campo dell'interazione di laser e di fasci di particelle con plasmi, di acceleratori al plasma e della fusione nucleare a confinamento inerziale, in ambito teorico, sperimentale e di sviluppo diagnostiche ed impianti
- Il grande patrimonio di conoscenze e competenze dei gruppi italiani in questo settore consente al nostro Paese
 - di avere ruoli di primo piano nelle sfide scientifiche e tecnologiche ad esso associate
 - di collaborare con i maggiori gruppi internazionali nell'ambito di progetti ed iniziative di grande importanza internazionale, come HIPER+ in ambito di Inerziale ed EuPRAXIA in quello degli acceleratori al plasma.
- La partecipazione a tali attività consente
 - di rafforzare la comunità europea ed extraeuropea di ricerca su tali ambiti
 - sostenere lo sviluppo ed il mantenimento di infrastrutture italiane ad esse dedicate
 - affrontare le sfide future con esperienza e professionalità spesso uniche nel panorama internazionale
- EUPRAXIA è un esempio di base comune formalizzata che consente il coordinamento italiano ed internazionale nel campo degli acceleratori al plasma → la comunità scientifica italiana ha la forte necessità di avere lo stesso in ambito di Inerziale: assenza di programmi o progetti nazionali su Inerziale e di start up italiane nel panorama mondiale
 - Enti di ricerca nazionali e ricercatori italiani all'estero hanno dato e danno contributi di primissimo rilievo alla ricerca mondiale sull'Inerziale → Roadmap europea HIPER+ con significativa partecipazione e leadership italiana; leadership e partecipazione ad esperimenti su NIF ed altri impianti di rilievo
 - A valle delle raccomandazioni della PNNS sarà necessario un piano nazionale di R&S sulla fusione, in cui il coinvolgimento dell'industria in una coalizione di attori nazionali è indispensabile

Acknowledgements

- This work has been carried out within the framework of the **EUROfusion Consortium**, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Program (Grant Agreement No. 101052200—EUROfusion). Views and opinions expressed are, however, those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.
- This work has been carried out within the framework of the **COST Action** No. CA21128-PROBONO “PROton BORon Nuclear Fusion: From Energy Production to Medical Applications,” supported by COST (European Cooperation in Science and Technology, www.cost.eu).
- Un sentito ringraziamento all'intera comunità operativa su tematiche di accelerazione al plasma e al progetto **IFAST** (Innovation Fostering in Accelerator Science and Technology - Horizon 2020) per il supporto alle attività **EuRONNAC** → **EAAC** → **EuPRAXIA**, che hanno favorito il consolidamento della comunità europea di ricerca sugli acceleratori al plasma.

