

# Collaborazione ENEA-INFN

## Attività su Laser a Elettroni Liberi (FEL) e Ondulatori

Alberto Petralia

*ENEA, Dipartimento Nucleare (NUC)*

*a nome della collaborazione ENEA-INFN sui FEL*



*ENEA-INFN: collaborazioni in essere e sviluppi futuri, 5 Novembre 2024, ENEA Frascati*

# Argomenti e temi della collaborazione

## 1. SPARC FEL:

- Esperimenti di generazione radiazione FEL da fascio accelerato a plasma
- Operazione linea ondulatori ENEA presso laboratorio SPARC\_LAB dell'INFN LNF



## 2. SABINA - sorgente THz FEL:

- Modello preliminare onduttore (poi realizzato da KYMA s.p.a.)
- Analisi delle misure magnetiche
- Misure stress meccanico



## 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB - X-Ray plasma accelerator based FEL:

- Modello e progettazione dell'onduttore per la linea AQUA
- Studio degli effetti di wakefield nella guida dell'onduttore
- Trasporto del fascio di elettroni nell'onduttore
- Studio delle tolleranze dei parametri per l'operazione del FEL
- Redazione capitolo «Undulators» per il TDR

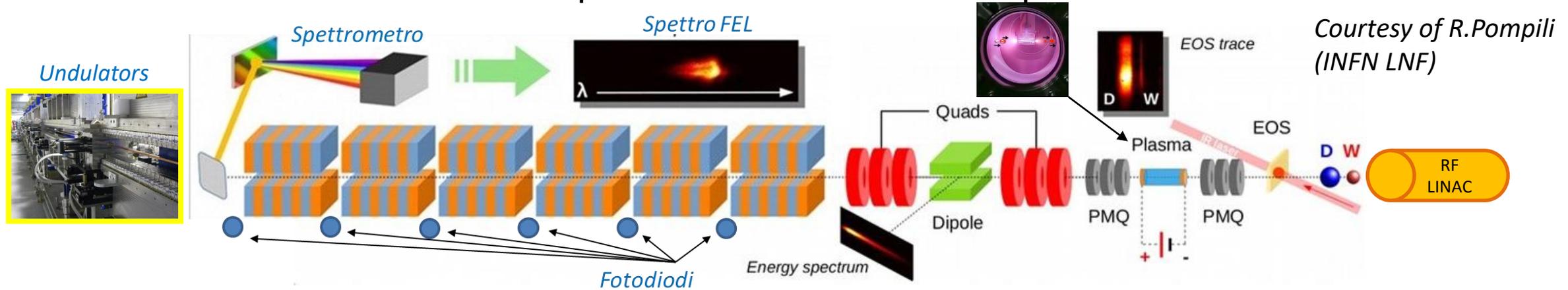
Accordo di collaborazione  
ENEA-INFN luglio 2021 / luglio 2024

Nuovo accordo in via di definizione  
per la prosecuzione delle attività e  
progettazione della macchina  
EuPRAXIA@SPARC\_LAB

## 4. EuPRAXIA Preparatory Phase (PP)

- INFN coordinatore del progetto
- ENEA coordinatore del WP9 - RF, Magnets & Beamline Components (F.Nguyen)

# 1. SPARC FEL: 2020-2022 FEL pilotato da acceleratore a plasma



- Dimostrazione (prima volta al mondo) di amplificazione FEL con fascio di elettroni accelerati a plasma (beam-driven)
- Esperimento realizzato in due configurazioni FEL (SASE e Seeded)

Article

Nature | Vol 605 | 26 May 2022 | 659

## Free-electron lasing with compact beam-driven plasma wakefield accelerator

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04589-1>

Received: 11 June 2021

Accepted: 25 February 2022

Published online: 25 May 2022

R. Pompili<sup>1</sup>, D. Alesini<sup>1</sup>, M. P. Anania<sup>1</sup>, S. Arjmand<sup>1</sup>, M. Behtouei<sup>1</sup>, M. Bellaveglia<sup>1</sup>, A. Biagioni<sup>1</sup>, B. Buonomo<sup>1</sup>, F. Cardelli<sup>1</sup>, M. Carpanese<sup>2</sup>, E. Chiadroni<sup>1</sup>, A. Cianchi<sup>3,4,5</sup>, G. Costa<sup>1</sup>, A. Del Dotto<sup>1</sup>, M. Del Giorno<sup>1</sup>, F. Dipace<sup>1</sup>, A. Doria<sup>2</sup>, F. Filippi<sup>2</sup>, M. Galletti<sup>3,4,5</sup>, L. Giannessi<sup>1</sup>, A. Giribono<sup>1</sup>, P. Iovine<sup>6</sup>, V. Lollo<sup>1</sup>, A. Mostacci<sup>7</sup>, F. Nguyen<sup>2</sup>, M. Opromolla<sup>8</sup>, E. Di Palma<sup>2</sup>, L. Pellegrino<sup>1</sup>, A. Petralia<sup>2</sup>, V. Petrillo<sup>8</sup>, L. Piersanti<sup>1</sup>, G. Di Pirro<sup>1</sup>, S. Romeo<sup>1</sup>, A. R. Rossi<sup>9</sup>, J. Scifo<sup>1</sup>, A. Selce<sup>2</sup>, V. Shpakov<sup>1</sup>, A. Stella<sup>1</sup>, C. Vaccarezza<sup>1</sup>, F. Villa<sup>1</sup>, A. Zigler<sup>10</sup> & M. Ferrario<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italy. <sup>2</sup>ENEA Fusion and Technology for Nuclear Safety and Security Department (FSN), C.R. Frascati, Frascati, Italy. <sup>3</sup>University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy. <sup>4</sup>INFN Tor Vergata, Rome, Italy. <sup>5</sup>NAST Center, Rome, Italy. <sup>6</sup>INFN Napoli, Naples, Italy. <sup>7</sup>Sapienza University, Rome, Italy. <sup>8</sup>INFN Milano, Milan, Italy. <sup>9</sup>Racah Institute of Physics, Hebrew University, Jerusalem, Israel. <sup>10</sup>E-mail: riccardo.pompili@lnf.infn.it

PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 234801 (2022)

### Stable Operation of a Free-Electron Laser Driven by a Plasma Accelerator

M. Galletti<sup>1,2,3,\*</sup>, D. Alesini<sup>4</sup>, M. P. Anania<sup>4</sup>, S. Arjmand<sup>4</sup>, M. Behtouei<sup>4</sup>, M. Bellaveglia<sup>4</sup>, A. Biagioni<sup>4</sup>, B. Buonomo<sup>4</sup>, F. Cardelli<sup>4</sup>, M. Carpanese<sup>5</sup>, E. Chiadroni<sup>4,6</sup>, A. Cianchi<sup>1,2,3</sup>, G. Costa<sup>4</sup>, A. Del Dotto<sup>7</sup>, M. Del Giorno<sup>4</sup>, F. Dipace<sup>4</sup>, A. Doria<sup>5</sup>, F. Filippi<sup>5</sup>, G. Franzini<sup>4</sup>, L. Giannessi<sup>4</sup>, A. Giribono<sup>4</sup>, P. Iovine<sup>8</sup>, V. Lollo<sup>4</sup>, A. Mostacci<sup>6</sup>, F. Nguyen<sup>5</sup>, M. Opromolla<sup>9,10</sup>, L. Pellegrino<sup>4</sup>, A. Petralia<sup>5</sup>, V. Petrillo<sup>9,10</sup>, L. Piersanti<sup>4</sup>, G. Di Pirro<sup>4</sup>, R. Pompili<sup>4</sup>, S. Romeo<sup>4</sup>, A. R. Rossi<sup>10</sup>, A. Selce<sup>5,11</sup>, V. Shpakov<sup>4</sup>, A. Stella<sup>4</sup>, C. Vaccarezza<sup>4</sup>, F. Villa<sup>4</sup>, A. Zigler<sup>4,12</sup> and M. Ferrario<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Università di Roma Tor Vergata, Via Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy

<sup>2</sup>INFN-Tor Vergata, Via Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy

<sup>3</sup>NAST Center, Via Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy

<sup>4</sup>Laboratori Nazionali di Frascati, Via Enrico Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

<sup>5</sup>ENEA Fusion and Technology for Nuclear Safety and Security Department (FSN), C.R. Frascati, via Enrico Fermi 45, 00044 Frascati, Italy

<sup>6</sup>Sapienza University, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Rome, Italy

<sup>7</sup>ENEA, C.R. Brasimone, 40032, Camugnano, Bologna, Italy

<sup>8</sup>INFN-Napoli, Via Cintia, 80126 Naples, Italy

<sup>9</sup>Università degli Studi di Milano, Via Celoria 16 20133 Milano Italy

<sup>10</sup>INFN-Milano, Via Celoria 16, 20133 Milan, Italy

<sup>11</sup>INFN-Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, 00146 Roma RM, Italy

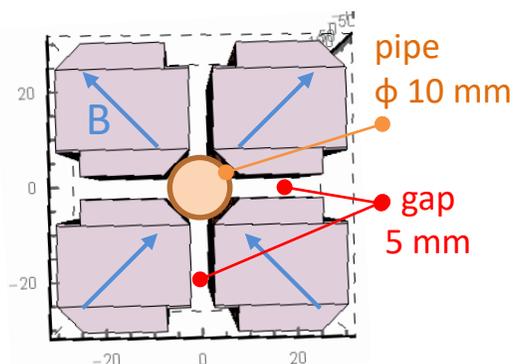
<sup>12</sup>Racah Institute of Physics, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel

## 2. SABINA: ondulatore APPLE X

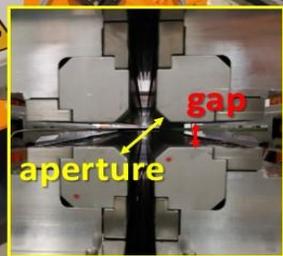
- 2020 Modello magnetico preliminare
- 2021-2023 Aggiudicazione, realizzazione e misure magnetiche, KYMA s.p.a.
- 2023-2024 Analisi misure magnetiche e misure di stress meccanico
- 2024-2025 Prevista installazione e inizio operazione

### Parametri ondulatore

Parameter	Value
Material	NdFeB
Remanent field $B_r$	1.28-1.31
Period $\lambda_u$	55 mm
Blocks per period	4
Block magnet x,y,z size	28 mm x 28 mm x 13.65 mm
Aperture diameter $\phi$	14.84 mm
Minimum gap	5 mm
$B_{max}$ (in LP)	0.97 T
$K_{max}$ (in LP)	4.9
$K_{rms}$ max	3.5
Tuning range @ 30 MeV	20 - 100 $\mu\text{m}$
Tuning range @ 100 MeV	2 - 10 $\mu\text{m}$
$N$ periods	22 (23.5)
Module length	1.35 m

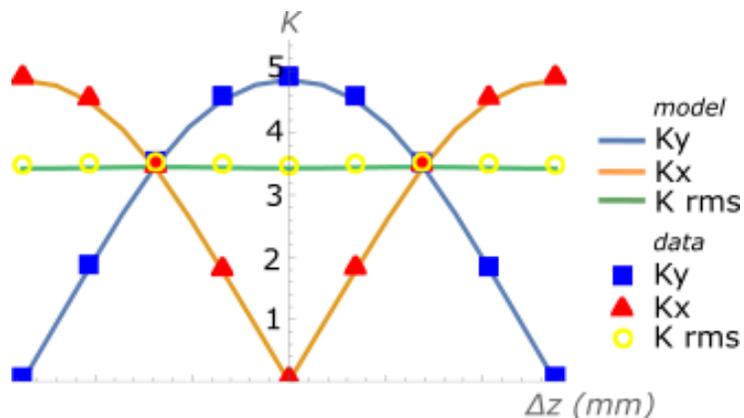
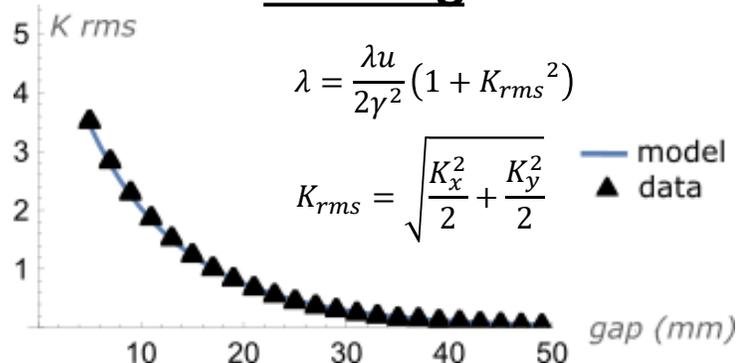


- ❖ Alto campo
- ❖ Schema compatto
- ❖ Polarizzazione variabile
- ❖ Sorgente FEL THz @  $\lambda \sim 10\text{-}100 \mu\text{m}$
- ❖ Operazione a energia 30-100 MeV
- ❖ Tre moduli per l'intera linea
- ❖ Simulazioni con codice RADIA



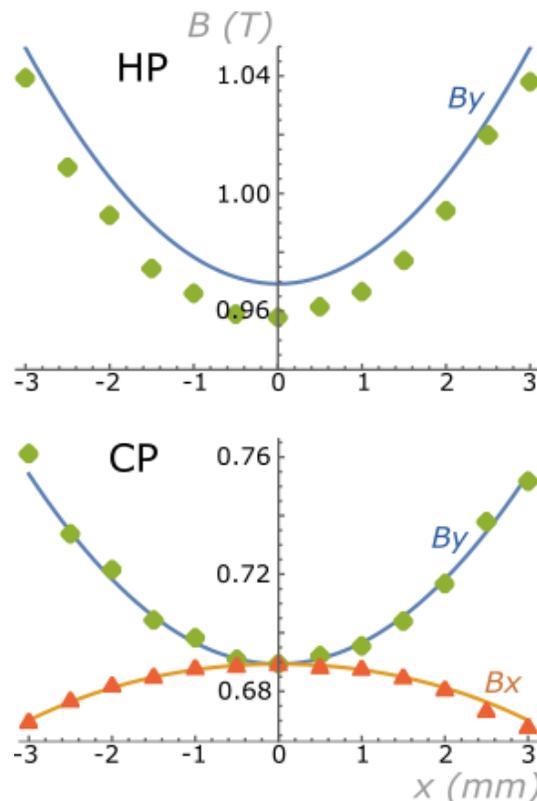
# 2. SABINA APPLE X: Caratteristiche Magnetiche

## K tuning



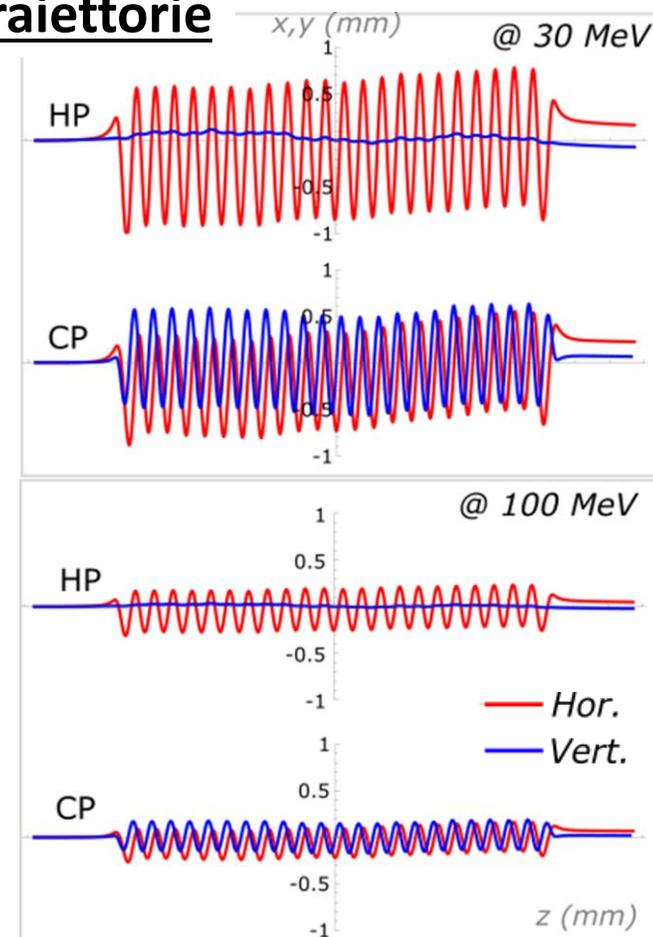
- $K = 1 @ gap \approx 18 mm$
- $\Delta z$  determina la polarizzazione
- $K_x$  e  $K_y$  stessa variazione con la fase
- Stesso  $K_{rms}$  per tutte le configurazioni di polarizzazione

## Profili di campo trasverso



- Buon accordo con il modello ideale
- Profilo parabolico per  $x, y < 2 mm$
- Zona di omogeneità del campo ( $\Delta B \eta / \Delta \eta < 0.1\%$ ) per  $\eta (=x, y) < 300 \mu m$  dall'asse

## Traiettorie

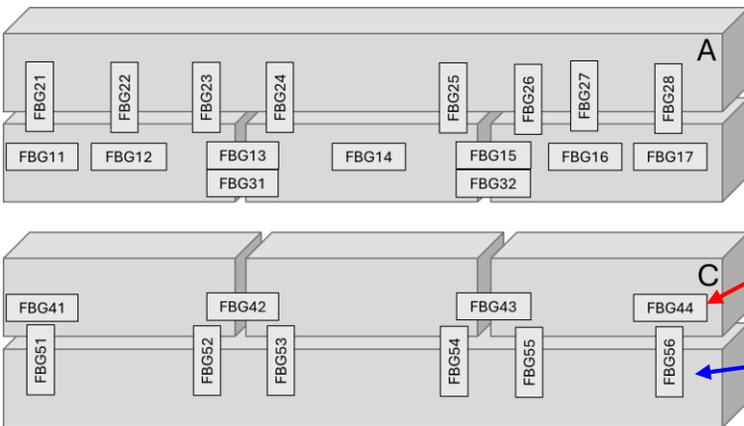
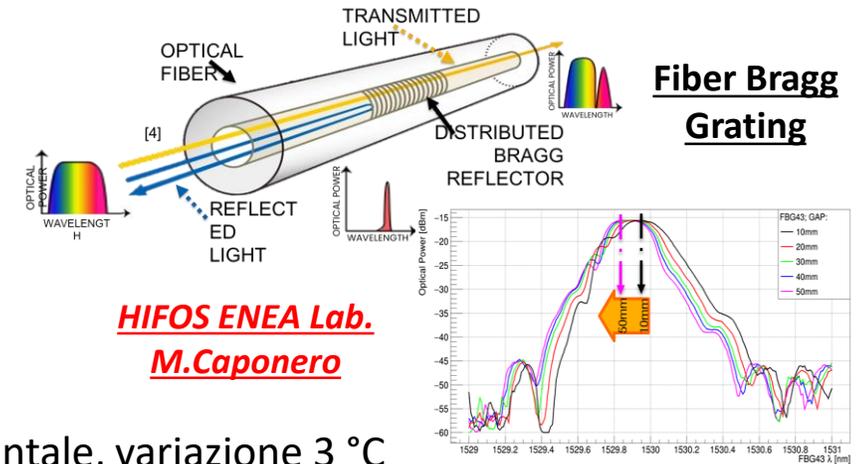


- $e^-$  ingresso in asse e con angolo nullo
- angolo di uscita trascurabile
- offset in uscita  $< 200 \mu m$

# 2. SABINA APPLE X: misure di deformazione con Fiber Bragg Grating

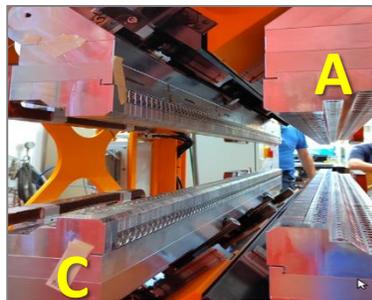
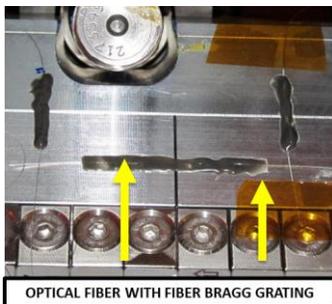
Grazie al contributo del **Laboratorio di Interferometria Olografica e Sensori in Fibra Ottica (HIFOS)** dell'**ENEA** è stata misurata la deformazione della struttura meccanica dell'APPLE-X. La deformazione della fibra produce una variazione dell'indice di rifrazione del nucleo della fibra (Sensore FBG) → ogni movimento produce una variazione nello spettro della luce misurata

$$1 \mu\text{strain} \left( = 1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right) \Leftrightarrow \Delta\lambda = 1.2 \text{ pm}$$



## Test effettuati sull'APPLE-X

- Dipendenza dalla temperatura ambientale, variazione 3 °C
- Forze magnetiche con la variazione della gap e della fase di operazione.
- I sensori sono usati in due modi:
  1. **Misura della tensione (strain measurement)**, incollando la fibra totalmente aderente alla piastra di supporto dei magneti;
  2. **Misura di allargamento delle giunzioni (gap sensors)**, sensori sulla giunzione delle piastre adiacenti.



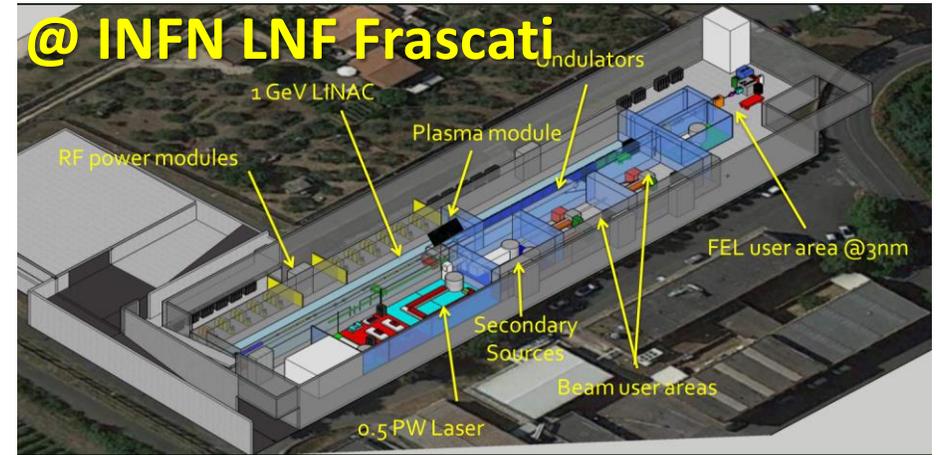
- ❖ Massima deformazione 180 nm su gap sensor
- ❖ Massima deformazione 100 nm sui 2.7°C in 15 ore
- ❖ Diagnostica estremamente sensibile
- ❖ Struttura meccanica rigida, deformazione trascurabile per le prestazioni del FEL

*Courtesy of  
F.Nguyen (ENEA NUC)  
and I.Balossino (INFN LNF)*

### 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB

FEL user facility @  $\lambda \sim 3\text{-}5\text{ nm}$  (water window)  
Operazione a energia 1 GeV del fascio di elettroni accelerati  
tramite RF linac + stadio di accelerazione a Plasma

Di prossima realizzazione ai laboratori NFN di Frascati  
Technical Design Report in sviluppo, da ultimare entro il 2025



#### 1) AQUA: Soft-X ray SASE FEL – Water window optimized for 4 nm (baseline)

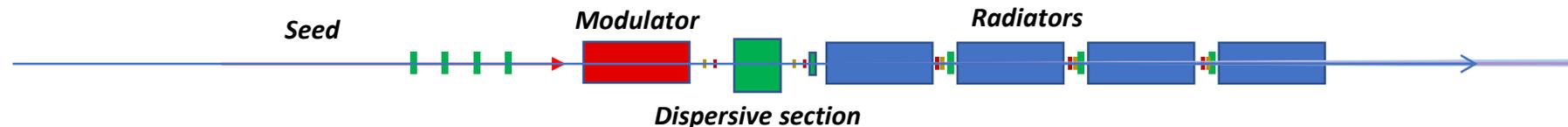
SASE FEL: 10 UM Modules, 2 m each – Two technologies under study: Apple-X PMU and planar SCU



2 FEL  
lines

#### 2) ARIA: VUV Seeded HGHG FEL beamline – Wavelength range 290 – 430 nm

SEEDED FEL: Modulator 3 m + 4 Radiators APPLE II – variable pol. 2.2 m each, based on FERMI FEL-1



# 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB: onduttore APPLE X per la linea FEL AQUA

## Perché un APPLE X?

I requisiti sulla radiazione e i vincoli sui parametri del fascio determinano:

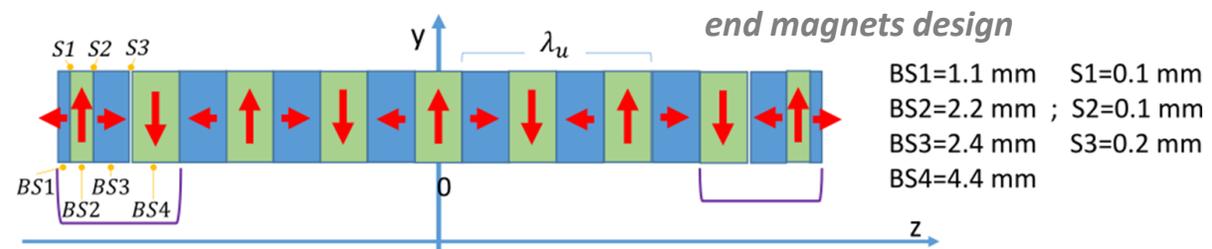
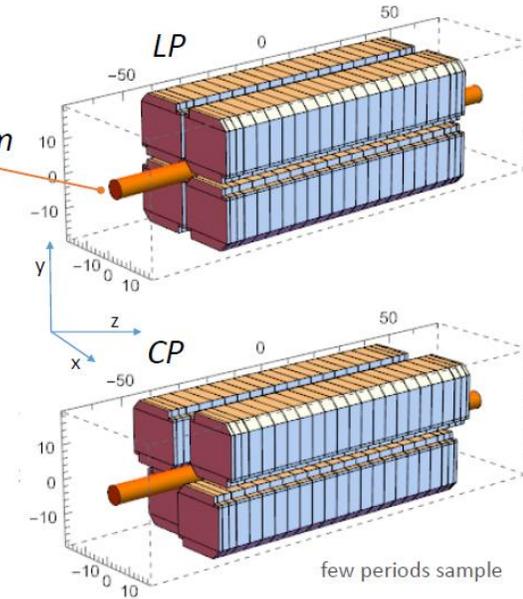
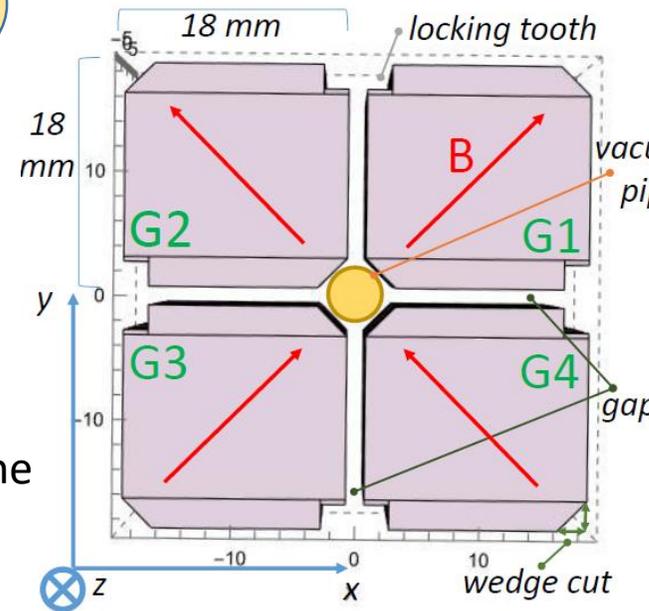
$$E_{\max} = 1 \text{ GeV}$$

$$\lambda_{\text{res}} = 4 \text{ nm} \rightarrow \lambda_{\text{res}} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K_{\text{rms}}^2) \rightarrow \begin{matrix} K_{\text{rms}} \approx 1 \\ \lambda_u = 18 \text{ mm} \end{matrix}$$

- Tipo APPLE: Polarizzazione variabile, Lineare/Circolare
- L' APPLE X permette un campo più alto a parità di apertura per una guida circolare con diametro di **5.5 mm**
- Totale simmetria tra le coordinate trasverse x e y
- $\lambda_u = 18 \text{ mm}$  consente più ampio manico di tuning
- Gap piccola a  $\lambda_u = 18 \text{ mm}$ , per avere  $K > 1$
- Gap minima gap 1.5 mm, non meno per questioni meccaniche

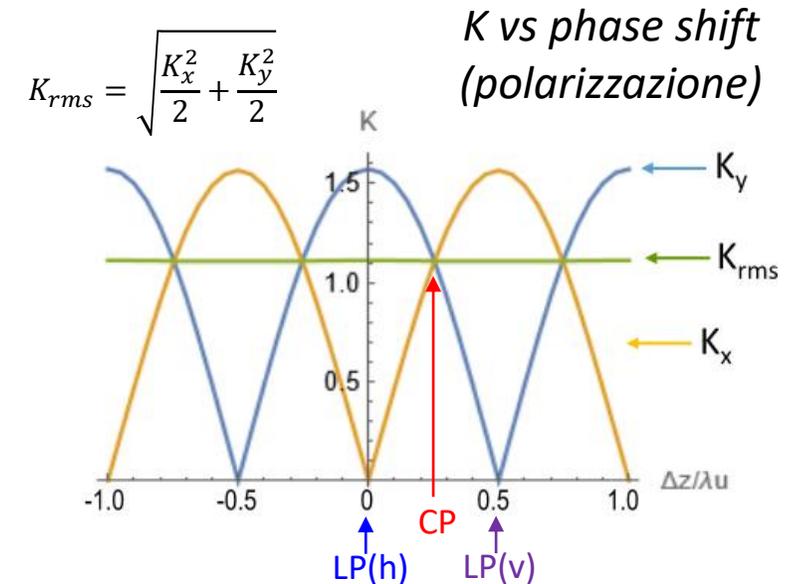
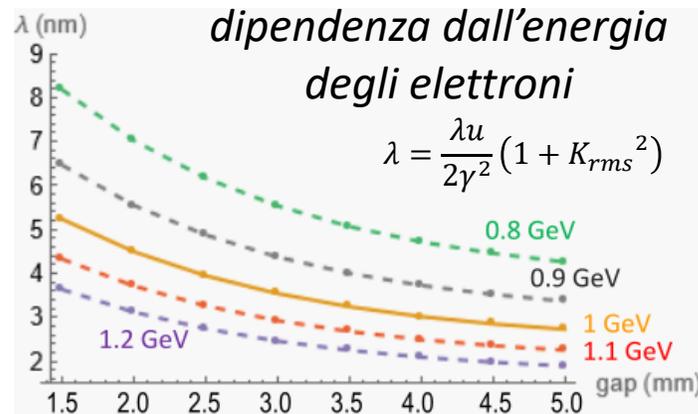
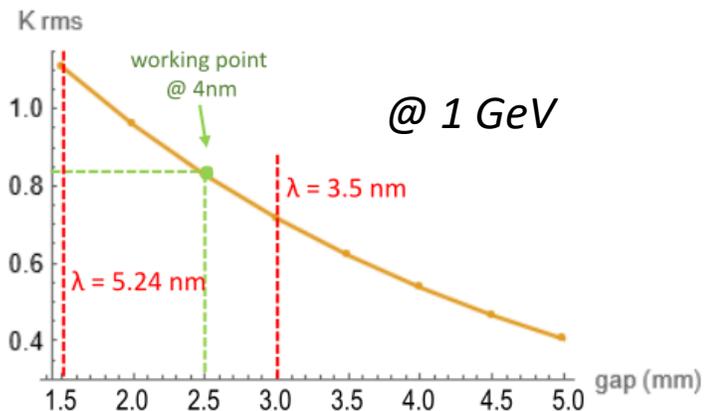
### Parametri di base dell'Onduttore

Material	NdFeB	Min. gap	1.5 mm
Remanent field	1.35 T	Aperture	6 mm
Block / period	4	B max (K max) in LP	0.93 T (K = 1.57)
Block x,y,z size	18x18x4.4 mm	K rms range	1.11 – 0.6
Und. Period	18 mm	Tuning range	3.5 – 5.24 nm
N periods	110	Module length	2 m



# 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB: onduttore APPLE X per la linea FEL AQUA

## Tuning range



## Altre caratteristiche (dalle simulazioni, codice RADIA)

- Campo trasverso: profilo parabolico per  $\eta (=x,y) < 1.5 \text{ mm}$
- Zona di omogeneità del campo ( $\Delta B_\eta/\Delta \eta < 0.1\%$ )  $< 150 \mu\text{m}$
- Traiettoria: angolo massimo in uscita (da integrale 1°)  $< 1 \mu\text{rad}$
- Traiettoria: massimo offset in uscita (da integrale 2°)  $< 1 \mu\text{m}$

## Prossimi passi:

- Studio proprietà di foccheggiamento
- Progettazione Phase Shifters
- Definizione struttura meccanica (rescaling dell'onduttore di SABINA)

### 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB: Canale da vuoto e Wakefields

Quale diametro *d* scegliere per il canale da vuoto?



- Guida circolare con spessore delle pareti < 300  $\mu\text{m}$ ;
- Il diametro esterno determina la dimensione del foro centrale dell'ondulatore (apertura) e il valore massimo del campo magnetico
- Vengono generati effetti di Wakefields che possono influenzare sia il trasporto del fascio (WK trasversi) che la potenza FEL generata (WF longitudinali) dipendentemente dalla dimensione del canale

Pipe diameter (ext)	5 mm	5.5 mm	6 mm
$\phi$ aperture (mm)	5.515	6.081	6.505
B max (T) (in LP)	1	0.94	0.87
K rms	1.2	1.11	1.04
max wl (nm)	5.79	5.25	4.9

**Resistive wall (RW) Wakefields:** per un tubo a simmetria cilindrica

- Il WF **longitudinale** (monopolo) genera un degrado dell'energia del fascio e un aumento dell'energy spread
- Il WF **trasverso** (dipolo) produce un aumento dell'emittanza e dipende dalla traiettoria degli elettroni

**La minimizzazione dei Wakefield** richiede:

- una superficie liscia e regolare,
- Evitare il più possibile discontinuità nel canale (es. nelle transizioni nelle zone di pompaggio del vuoto)
- Evitare coating che aumentano gli effetti di WF

**Gli effetti dati dai Wakefield** sulle prestazioni del FEL sono stati:

- Calcolati in funzione del raggio della guida (long. WF - formule da M. Migliorati, F.Bosco *et al.*, trasv. WF – formule da K. Bane & G. Stupakov)
- Considerati nelle simulazioni eseguite con il codice di simulazione FEL **3D Genesis1.3** per i fasci di elettroni di AQUA nelle varie configurazioni di lavoro

**I risultati ottenuti dimostrano che per un canale da vuoto con un diametro interno  $d = 5$  mm (ext 5.5 mm) gli effetti di wakefield sia longitudinale che trasverso sono trascurabili**



# 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB: studio delle Tolleranze e prestazioni FEL

- Considerando:**
- la variazione dell'emittanza e dell'energy spread,
  - le traiettorie dovute a: angolo e offset in ingresso, disallineamento nel canale di trasporto magnetico (quadrupoli) e agli errori magnetici degli ondulatori

## Modello Semi-Analitico e sim. 3D per calcolare le prestazioni FEL in polarizzazione lineare/circolare

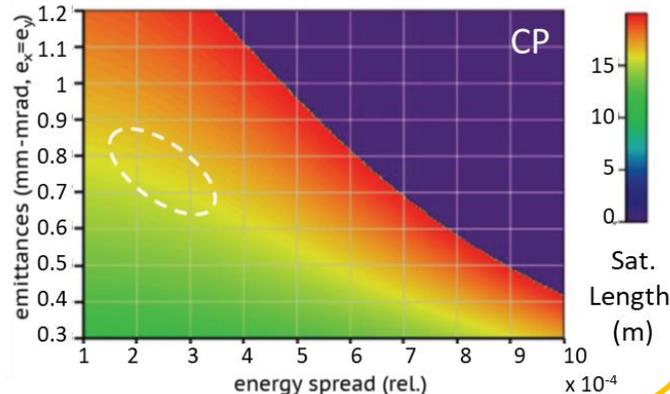
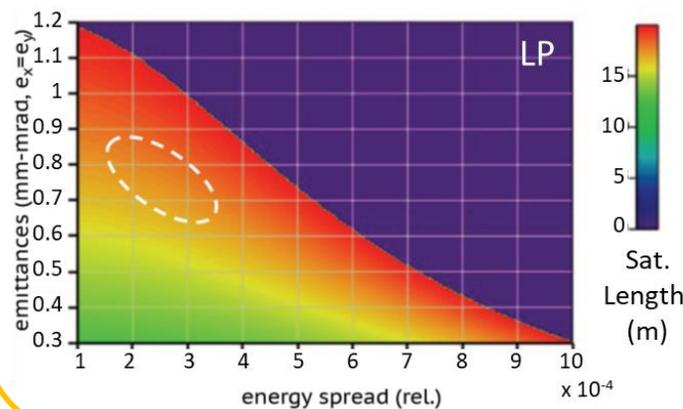
- Working point: photon energy 4 nm = 310 eV a 1 GeV,
- Corrente di picco 1.5 kA, lunghezza bunch FWHM 5 fs,  $\beta_x = \beta_y = 10$  m, e emittanza  $\epsilon_x = \epsilon_y$
- Distribuzione gaussiana dei vari parametri del fascio
- Massima lunghezza di saturazione accettabile  $L_{sat} < 20$  m



Per avere > 60% della  
potenza nominale del FEL  
 $N_y / \text{pulse} \approx 10^{11}$

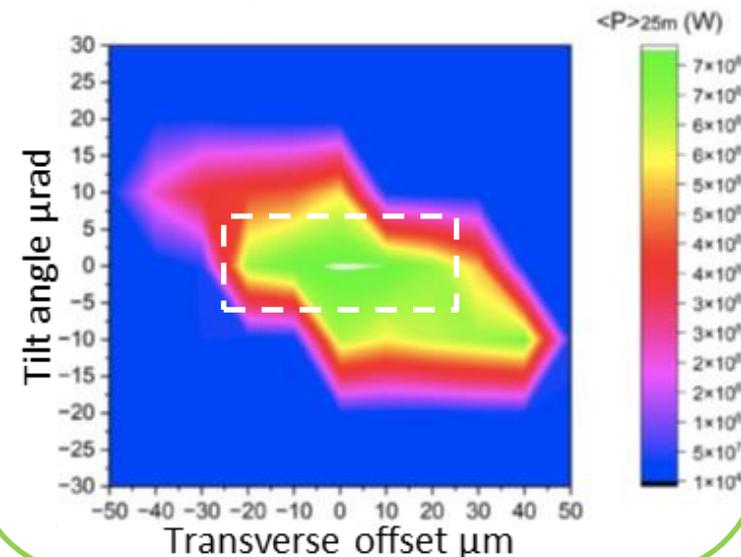
### Sat. Length vs emittance and energy spread

Courtesy of L.Giannessi (INFN LNF)



### Power loss vs trajectory

Courtesy of M.Opromolla (INFN LNF)



## 4. EuPRAXIA PP - WP9: cosa bolle in pentola?

**Principale Obiettivo:** orientare il progresso tecnico nello sviluppo e nella progettazione dei componenti della macchina FEL

- specificare in dettaglio i Centri di Eccellenza
- R&D su potenziali prototipi dei vari componenti
- coordinare le richieste di finanziamenti
- definizione dei concetti e dei parametri verso il TDR

*Courtesy of  
F.Nguyen (ENEA NUC)*

Alta qualità, alta stabilità dei fasci di elettroni  
e impulsi di luce in machine compatte

- Magneti compatti (elettromagnetici o permanenti) per il trasporto del fascio
- Sorgenti a radiofrequenza di alta potenza per acceleratori convenzionali
- Sviluppo di ondulatori magnetici compatti per generazione di radiazion FEL

### Undulators

- ENEA (Italy)
- ALBA (Spain)
- ELI (Czech Republic)
- INFN (Italy)
- UKRI Great Britain)

### Beamline magnets

- ALBA (Spain)
- CERN (Switzerland)
- ELI (Czech Republic)
- IASA (Greece)
- INFN (Italy)
- UKRI Great Britain)

### RF components

- CERN (Switzerland)
- CLPU (Spain)
- DESY (Germany)
- IASA (Greece)
- INFN (Italy)
- Sapienza Un. (Italy)

### WP8 - Theory & Simulation

J. Viera, IST  
H. Vincenti, CEA

### WP9 - RF, Magnets & Beamline Components

S. Antipov, DESY  
F. Nguyen, ENEA

### WP10 - Plasma Components & Systems

K. Cassou, CNRS  
J. Osterhoff, DESY

# Lavori in corso e Sviluppi futuri

## 1. SPARC FEL:

- Esperimenti di generazione radiazione FEL da fascio accelerato a plasma
- Nuove configurazioni della sorgente di plasma per aumento del gradiente accelerante
- Radiazione FEL con fasci a più grande energia da fasci accelerati a plasma

## 2. SABINA - THz FEL source:

- ❖ Completamento installazione ondulatori
- ❖ Operazione della linea ondulatori e test su fascio
- ❖ Sviluppo apparati per misure magnetiche su ondulatori a piccola apertura

## 3. EuPRAXIA@SPARC\_LAB (ondulatore AQUA):

- Completamento studio tolleranze e simulazioni start to end
- Progetto phase shifters
- Studio proprietà di foccheggiamento
- Definizione della struttura meccanica dell'ondulatore
- Progettazione componenti linea ondulatori, trasporto del fascio e diagnostiche
- Completamento redazione del TDR (ENEA, WP 18 Undulators)
- Sviluppo tecniche e strumentazione per misure magnetiche su ondulatori Apple X con piccola apertura
- Possibile attività congiunta sullo sviluppo della seconda linea FEL ARIA

## 4. EuPRAXIA Preparatory Phase (PP)

- Verso la realizzazione dell'infrastruttura EuPRAXIA
- Possibile attività sulla sviluppo di ondulatori compatti

# Conclusioni

- ❖ ENEA e INFN hanno una collaborazione pluridecennale sulle attività riguardanti i Laser a Elettroni Liberi (FEL)
- ❖ Importanti risultati scientifici ottenuti nel campo dei FEL e più recentemente sui FEL pilotati da acceleratore a plasma
- ❖ ENEA collabora con INFN ai lavori per la realizzazione e prossimo esercizio della linea THz SABINA presso INFN LNF
- ❖ INFN è impegnato nella progettazione della macchina EuPRAXIA@SPARC\_LAB presso INFN LNF e ENEA è coinvolto per la progettazione della linea ondulatori e stesura del TDR della macchina (entro il 2025)
- ❖ In via di firma il nuovo accordo di collaborazione per attività su EuPRAXIA@SPARC\_LAB, SABINA e SPARC
- ❖ Prosegue il lavoro verso la realizzazione dell'infrastruttura europea EuPRAXIA, INFN è capofila e ENEA è partner